

第8回量子ソフトウェア社会人講座:  
最先端を切りひらく量子センシングと量子時計～基礎から応用技術まで～  
第一部

## 量子センシング技術の背景・基礎と、最新の開発動向

2025年9月8日  
日本電気株式会社  
セキュアシステムプラットフォーム研究所  
桐原 明宏

## 自己紹介

# 桐原 明宏 (きりはら あきひろ)



### 所属／役職：

日本電気株式会社(NEC) セキュアシステムプラットフォーム研究所 ディレクター  
兼 産業技術総合研究所 NEC-産総研量子活用テクノロジー連携研究ラボ 副ラボ長  
(ほか、JSTさきがけ「物質と情報の量子協奏」「量子物質」の領域アドバイザーも担当)

### 経歴：

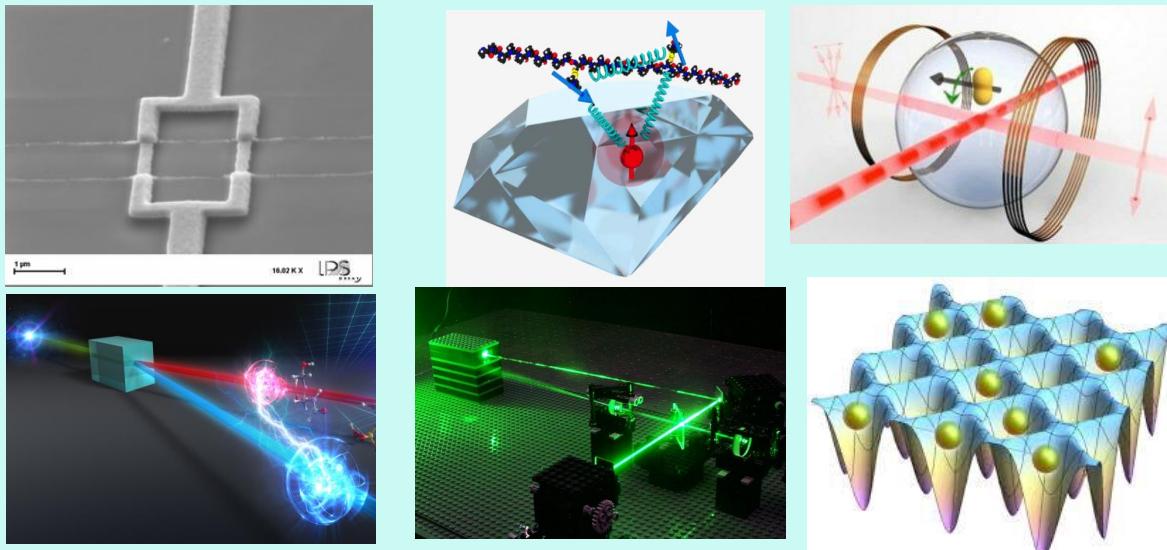
2002年:東京大学物理工学科 卒業  
2004年:東京大学大学院新領域創成科学研究科 修了  
2004年-:NEC基礎・環境研究所 入社  
2009年-:NECスマートエネルギー研究所 主任  
2013-2014年:カイザースラウテルン工科大学 客員研究員  
2020年-:NECシステムプラットフォーム研究所 研究部長  
2021年-:現役職

### 研究歴：

- ・量子(スクイーズド)光源を用いた光干渉計測 **光**  
(大学時代)
- ・量子光源のための半導体量子ドットの研究 **ナノ固体**
- ・スピントロニクス／磁性体材料の研究 **スピン/磁性**  
(スピinzゼーベック効果に基づく熱電変換デバイス)
- ・中性原子に基づく小型原子時計 **中性原子ガス**
- ・中性原子に基づく量子センシング

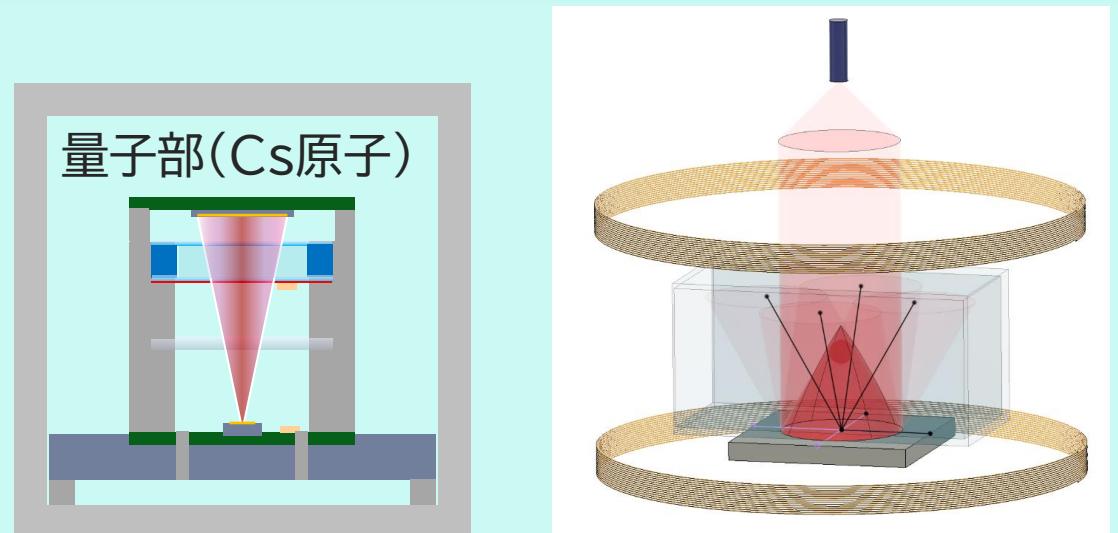
## ①量子センシングの全般解説と、②小型量子時計やNECでの取組み等をご紹介

### 第一部： 量子センシング技術の背景・基礎と、最新の開発動向



- 量子センシングの基本原理から説明
- 量子センサとして用いられる様々な物理系を紹介
- 多様な物理量を計測するセンサを広く解説

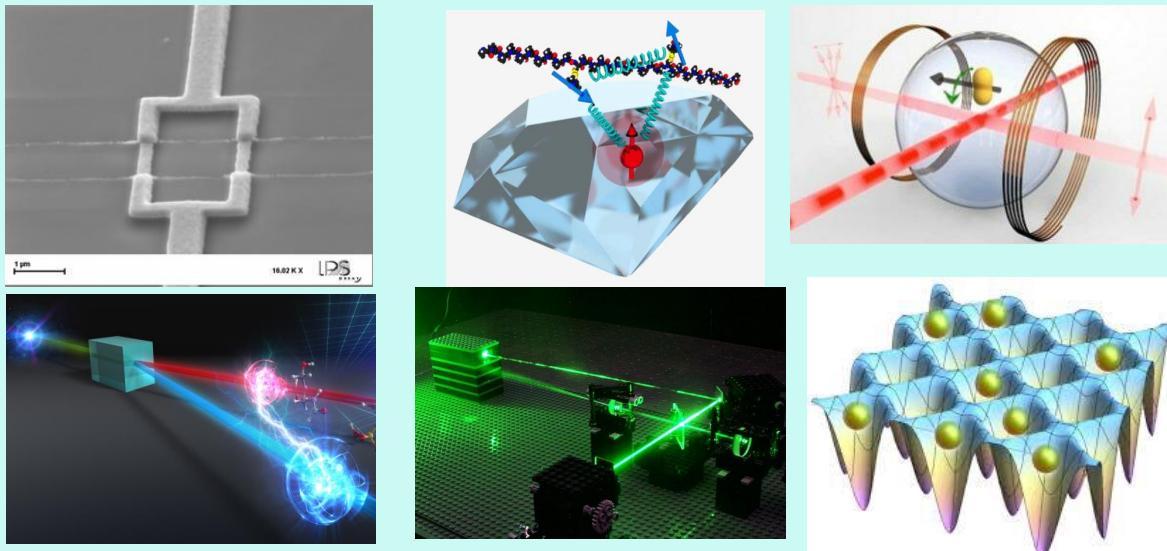
### 第二部： 中性原子を用いた小型量子時計技術の研究開発



- 経済安全保障ニーズが高まる量子PNTを説明
- 中性原子系を用いた小型原子時計技術を解説
- NECにおける最新の研究開発についてご紹介

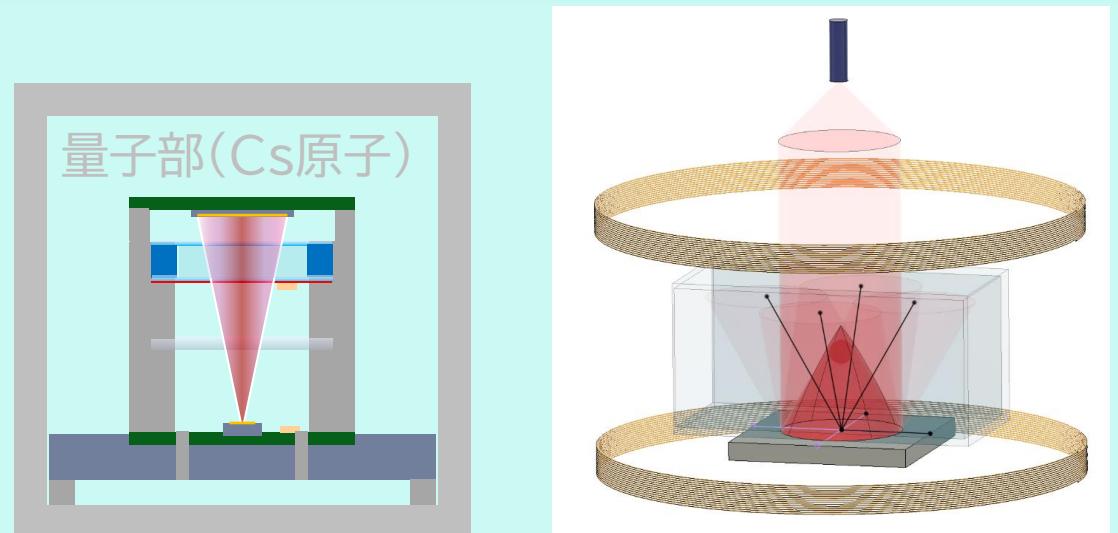
## ①量子センシングの全般解説と、②小型量子時計やNECでの取組み等をご紹介

### 第一部： 量子センシング技術の背景・基礎と、最新の開発動向



- 量子センシングの基本原理から説明
- 量子センサとして用いられる様々な物理系を紹介
- 多様な物理量を計測するセンサを概説

### 第二部： 中性原子を用いた小型量子時計技術の研究開発



- 経済安全保障ニーズが高まる量子PNTを説明
- 中性原子系を用いた小型原子時計技術を解説
- NECにおける最新の研究開発についてご紹介

量子技術とは

原子・電子・光子等が示す独特的な物理法則を、計算・通信・計測に応用  
各領域で劇的／質的变化をもたらすゲームチェンジャーに

### 量子コンピューティング

計算の単位「量子ビット」が0でもあり1でもある  
「重ね合わせ」という状態を活用し、**超高速・超並列処理**を実現



### 量子暗号・通信

読み取ると状態が変わる量子の性質を利用し、**情報の盗み見を察知**しながらの秘匿通信を実現



### 量子センシング

量子状態が環境変化に影響されやすい事を逆手にとり、**時間や物理量(磁気・温度等)の微小変化の計測**を実現



### 量子インターネット

量子状態のまま情報を交換・保存し、  
高速かつ安全な情報処理基盤を実現



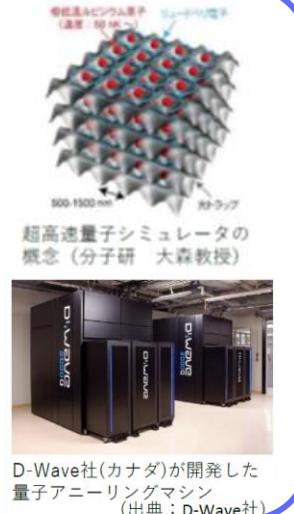
将来的に統合

量子センシングとは

量子技術(コンピューティング、通信・暗号、センシング)は  
情報通信・製造・金融・運輸・製薬・化学・医療等、幅広い産業で期待

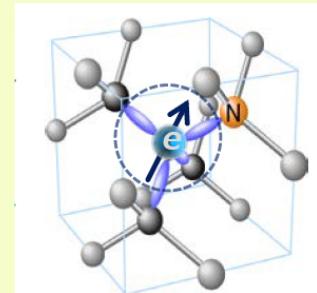
### 量子コンピューティング

- 新素材開発/創薬の効率化
- 交通渋滞の解消
- 工場生産プロセスの最適化
- 高信頼金融リスク分析
- システム品質・セキュア向上



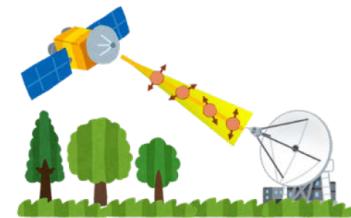
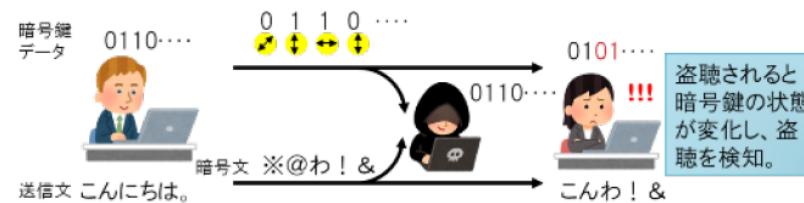
### 量子センシング

- 高精度な時計の実現に基づく次世代通信・測位応用
- GPSが使えない状況下での完全自動運転車、自立型無人潜水機
- 脳磁、神経磁場の計測によるヘルスケア、安全走行、脳疾患の予防・治療
- 微弱な重力変化の計測による地震・火山に関する防災



### 量子通信・量子暗号

- 量子暗号による絶対に破られない暗号サービス



出典:内閣府 量子技術イノベーション戦略(最終報告)

参考:量子センシング装置としての市場規模

## 多様な用途に適用可能な量子センシング技術の社会実装期待

日本経済新聞 2025年8月19日朝刊

調査会社グローバルインフォメーションが公開しているリポートによると、量子センサーの市場規模は30年ごろには約10億～20億ドル（約1500億～3000億円）に達する。

内閣府が23年にまとめた量子未来産業創出戦略では、30年に国内で1000万人が量子技術を使えるようになることなどを目標にしている。



量子センサHWをコアとして実現可能となる  
通信や医療などシステムとしての市場規模や  
波及効果を含めると、インパクトはさらに大きい

量子技術を使ったセンサー開発の経緯と見通し	
1990年ごろ	量子センサーに応用できる物理現象が観測される
2015年ごろから	米国企業などで量子技術研究への投資が進む
19年	QSTが5ナノのダイヤモンド量子センサーの作製に成功
20年	政府が量子技術イノベーション戦略を策定。量子計測・センシングの領域で研究開発プロジェクト開始
30年ごろ	検診などの血液検査でも量子センサーを活用へ
40年ごろ	がんなどで新しい診断法や治療法の開発へ

## 量子センシングとは

### I. 量子センシングの分類⇒3つの軸で整理

- 量子センシングの原理 (How): ~どのように計る／測るか~
- 量子センサを実現する物理系 (with What): ~何を用いて計る／測るか~
- 量子センサの種類・用途 (for What): ~何(どの物理量)を計る／測るか~

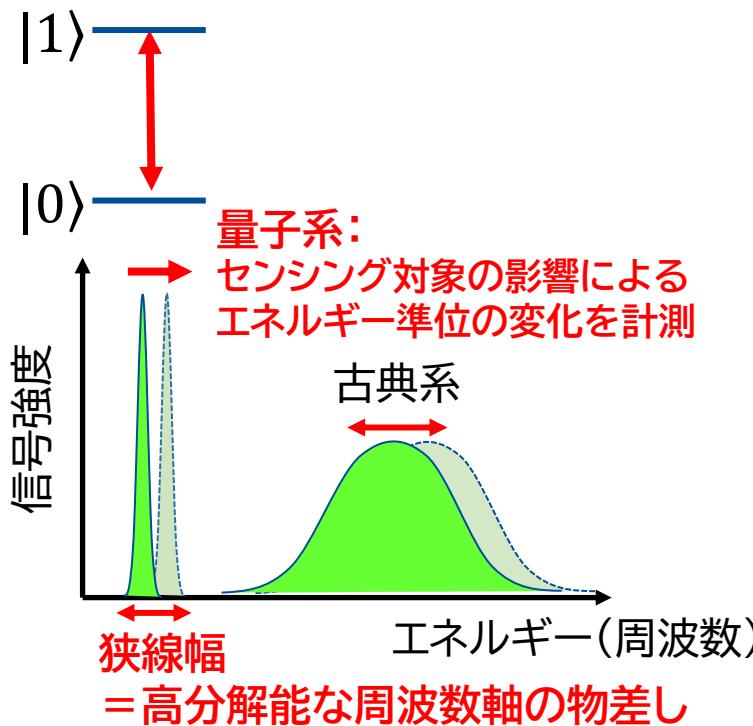
## 量子センシングとは

### I. 量子センシングの分類⇒3つの軸で整理

- 量子センシングの原理 (How): ~どのように計る／測るか~
- 量子センサを実現する物理系 (with What): ~何を用いて計る／測るか~
- 量子センサの種類・用途 (for What): ~何(どの物理量)を計る／測るか~

# 量子センシングの原理 (How): どのように計る／測るか

## ①離散的な量子準位を利用



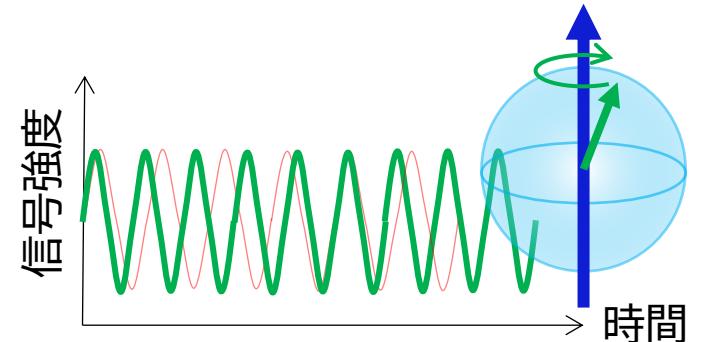
## ②量子コヒーレンスを利用

重ね合わせ状態を準備  $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$



時間発展

位相差から外場を計測  $|\psi(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{-i\phi}|1\rangle)$



## ③量子エンタングルメントを利用

2量子ビットの  
エンタングル状態

$$\frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

N量子ビットの  
エンタングル状態  
(GHZ状態)

$$\frac{|00\dots 0\rangle + |11\dots 1\rangle}{\sqrt{2}}$$

N00N状態

$$\frac{|N0\rangle + |0N\rangle}{\sqrt{2}}$$

量子もつれを利用して  
位相測定の精度の限界  
(標準量子限界  $\propto 1/\sqrt{n}$ ) を突破

$$SN \propto \frac{1}{\sqrt{T_2}} \frac{1}{\sqrt{n}}$$

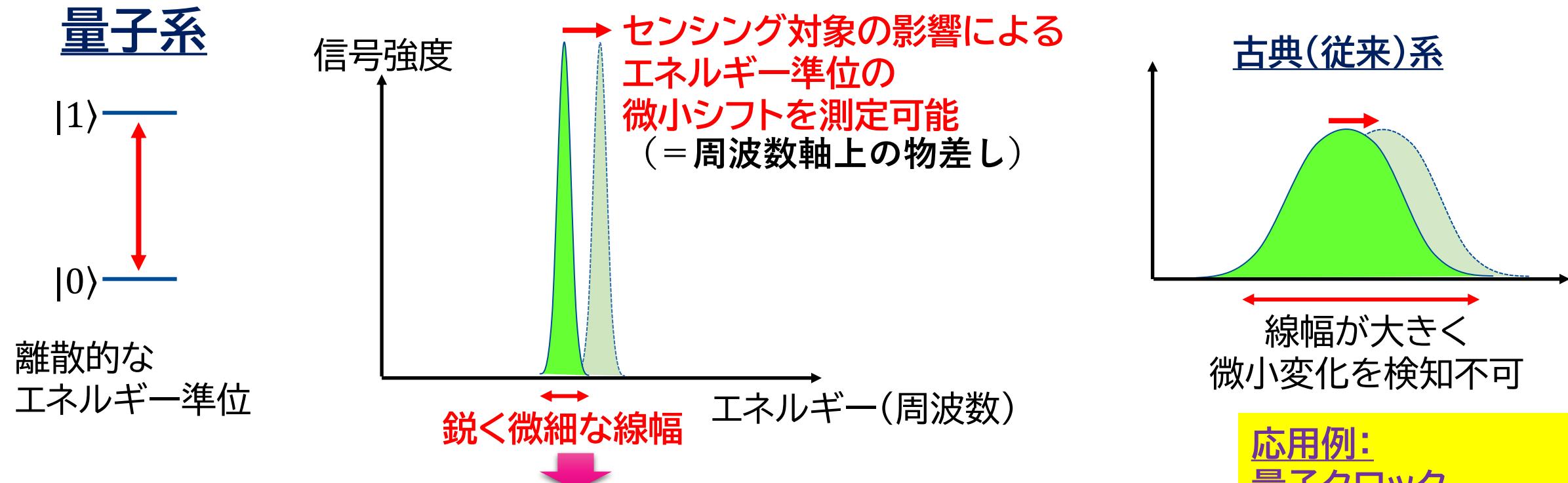
$n$ : 原子数密度  
 $T_2$ : 位相緩和時間

$\Leftrightarrow$  現状は  $n$  個のもつれ状態よりも  
 $n^2$  個の量子系を準備する方が容易

量子センシングとは:量子センシングの原理 (How)

## ①離散的な量子準位(エネルギー／周波数が一定な状態)を利用

量子システム:離散的な固有状態を有し外部環境変化に敏感⇒高精度/高感度な周波数基準やセンサに



微細(周波数が一定)な量子準位を周波数標準として利用 ⇒ 超高精度な時計  
加速度や磁場等に起因する準位の微小シフトを、光で評価 ⇒ 超高感度なセンサ

**応用例:**  
**量子クロック**  
**量子磁気センサ**  
**(Mz方式)**  
**量子電磁波センサ**

量子センシングとは:量子センシングの原理 (How)

## ②量子コヒーレンス(量子状態の波としての性質)を利用

量子システム:「粒子」としての性質とともに、「波」としての性質も保有

⇒光／電磁波よりも波長の短い「量子の波」(物質波など)の特徴により、高感度なセンシングを実現

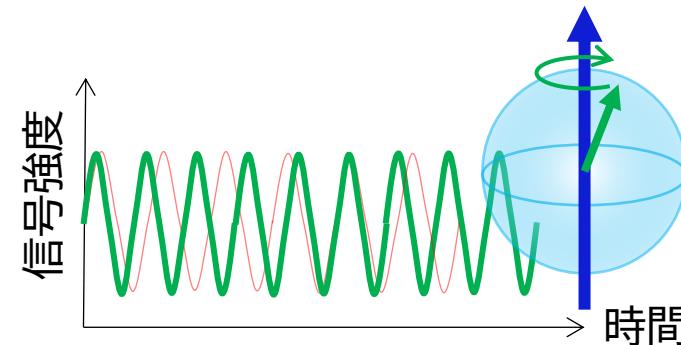
### 外場や加速度の影響による 量子の波の位相変化

$$\text{重ね合わせ状態を準備 } |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

↓ 時間発展

$$|\psi(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{-i\phi}|1\rangle)$$

量子干渉計などで、光干渉に基づく  
従来技術(光ジャイロなど)を凌駕する  
計測システムを実現

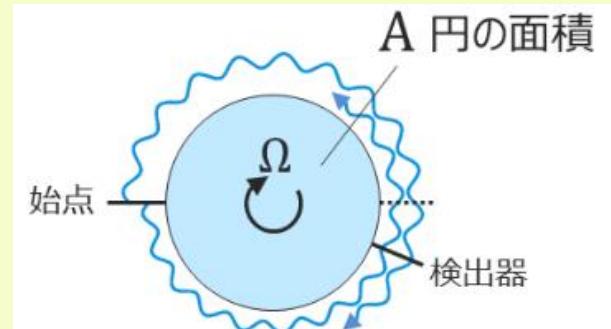


外場(磁場、重力、加速度)による位相変化を読み出す

応用例:  
量子磁気センサ  
(Mx方式, SERF方式)  
量子重力計  
量子ジャイロ

### 量子ジャイロスコープ

波長が光よりはるかに短い**量子の波**(ドブロイ波)の干渉効果により、  
超高精度な角速度計測が可能に

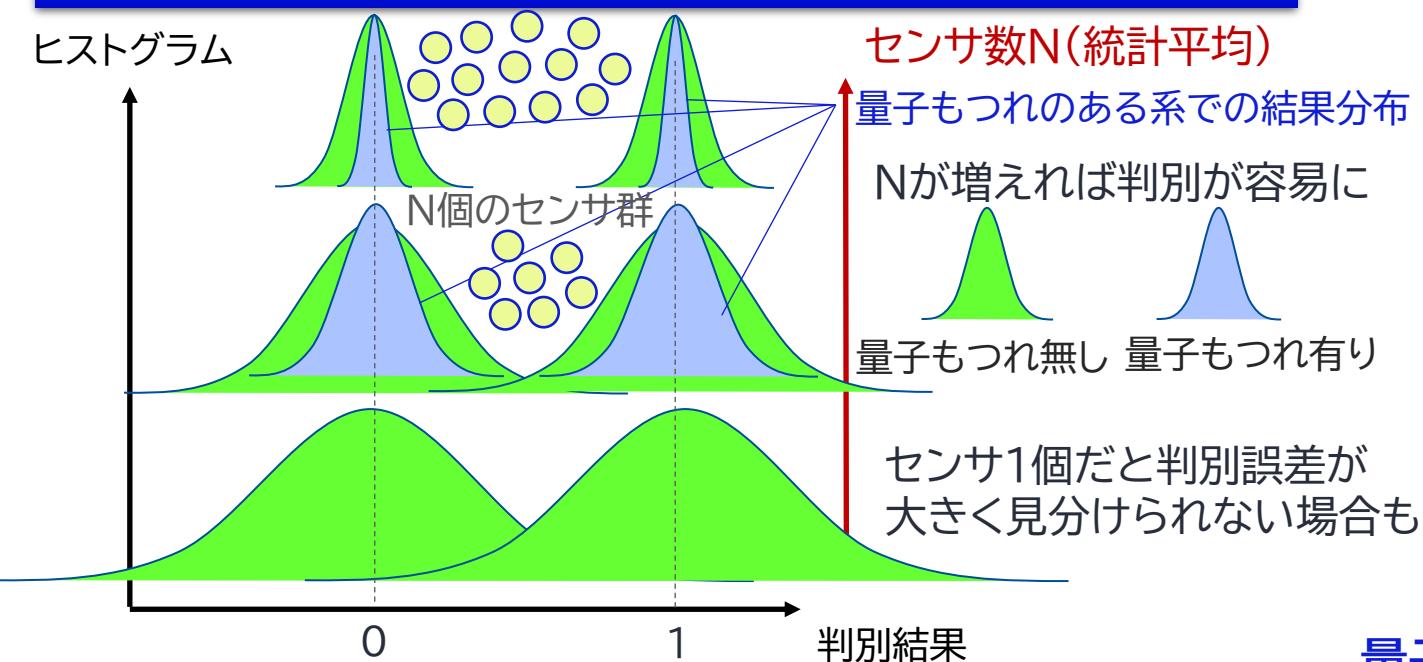


## 量子センシングとは:量子センシングの原理 (How)

### ③量子エンタングルメント(量子相関)を利用

量子システム:複数の量子(光子など)が空間的にどれほど離れても、物理量(偏光など)の相関を保持  
⇒従来の統計原理(大数の法則など)を超えた、多数の量子による高感度な計測を可能に

例:N個のセンサ／プローブで「0」が「1」かを判別する計測



センサの数Nが大きくなると、 $\sqrt{N}$ 倍識別精度が良くなる  
古典:N=10で3倍、N=100で10倍(大数の法則から)

量子:N=10で最大10倍、N=100で最大100倍制度が良くなる

**NEC** \Orchestrating a brighter world

量子もつれ状態を用いてなぜ判別が良くなるのか？

## 2量子ビットの エンタングル状態

## N量子ビットの エンタングル状態 (GHZ状態)

$$\frac{|\mathbf{00}\rangle + |\mathbf{11}\rangle}{\sqrt{2}} \rightarrow \frac{|0\rangle_a|0\rangle_b|0\rangle_c \cdots |0\rangle_N + |1\rangle_a|1\rangle_b|1\rangle_c \cdots |1\rangle_N}{\sqrt{2}}$$

⇒aの測定値が「0」なら、b,c,⋯,Nも「0」  
aの測定値が「1」なら、b,c,⋯,Nも「1」

→量子相関を使うと、判別バラつきがより抑制されやすい

量子もつれを利用することで  
・位相測定の精度の量子限界  
(標準量子限界 $\propto 1/\sqrt{n}$ )を突破

※現状は $n$ 個のもつれ状態よりも  
 $n^2$ 個の量子系を準備する方が容易

## 応用例:

### 量子イメージング テラヘルツ検出等

## 量子センシングとは

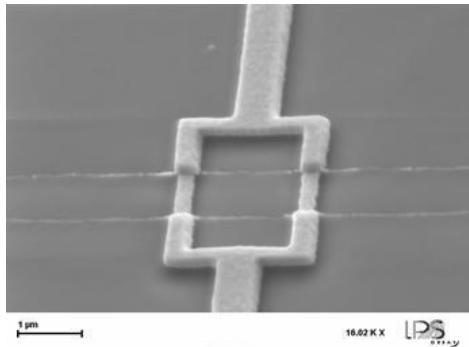
### I. 量子センシングの分類⇒3つの軸で整理

- 量子センシングの原理 (How): ~どのように計る／測るか~
- 量子センサを実現する物理系 (with What): ~何を用いて計る／測るか~
- 量子センサの種類・用途 (for What): ~何(どの物理量)を計る／測るか~

量子センシングとは

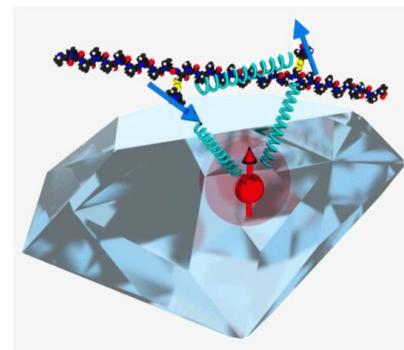
## 量子センサを実現する物理系 (with What): ~何を用いて計る／測るか~

多くの量子系が考案されており、それぞれ多様な物理量計測に応用



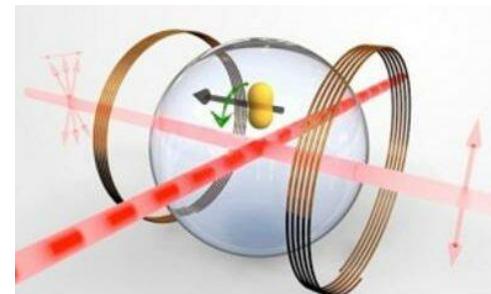
超電導デバイス

<http://www.supraconductivite.fr/en/index.php?p=applications-squid>



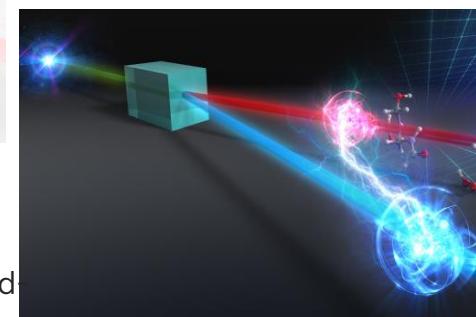
ダイヤモンド  
の格子欠陥

[https://www.fkf.mpg.de/6561822/04\\_Quantum\\_Sensing](https://www.fkf.mpg.de/6561822/04_Quantum_Sensing)



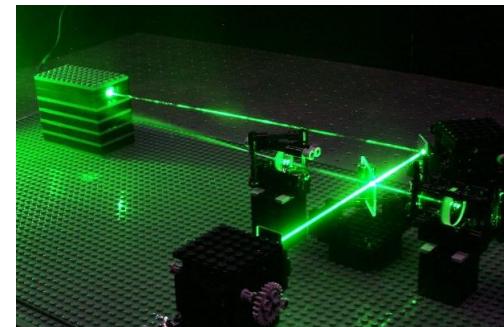
中性原子ガス

<http://famo.fizyka.umk.pl/wl-famo-uj/research-uj/zero-and-ultra-low-field-magnetic-resonance/>



もつれ光子対

<https://photonsensing.org/irgas/organization.html>

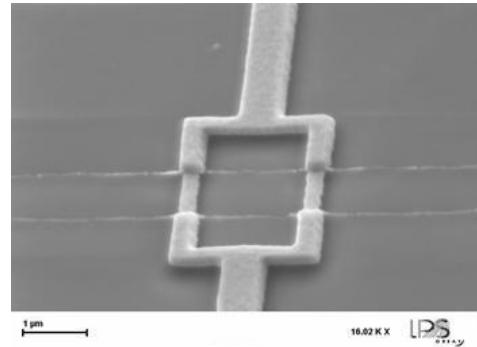


多光子干渉計  
(スクイーズド光利用等)

<https://www.instructables.com/Michaelson-Interferometer-build-from-LEGOBricks/>

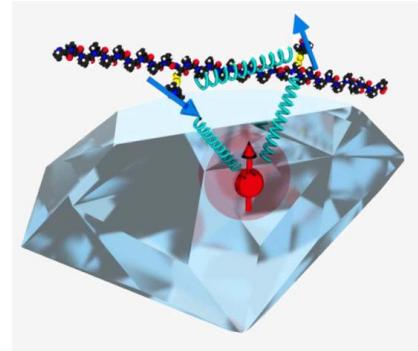
## 量子センシングとは

### 量子センサを実現する物理系 (with What): ~何を用いて計る／測るか~



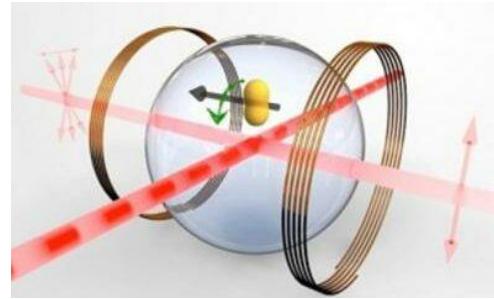
#### 超電導デバイス

- 超高感度
- △低温冷却が必要



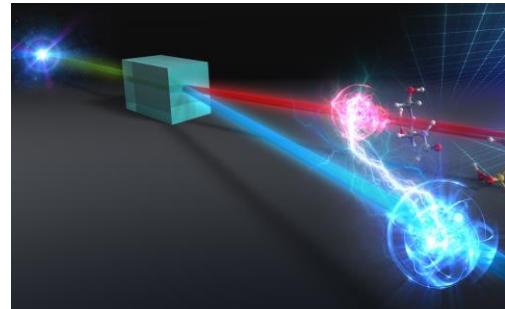
#### ダイヤモンドの格子欠陥

- 高い空間分解能



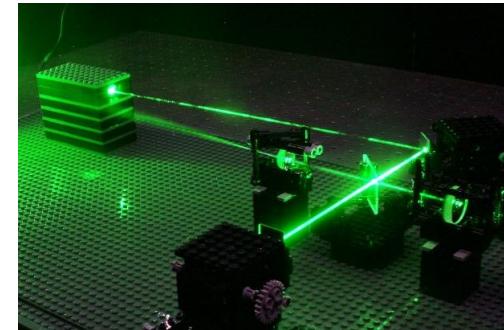
#### 中性原子ガス

- 室温下(冷媒不要)で高い感度
- △原子ガスの閉じ込めが必要



#### もつれ光子対

- 高感度かつ高い空間分解能
- △大規模なもつれ状態の生成は困難



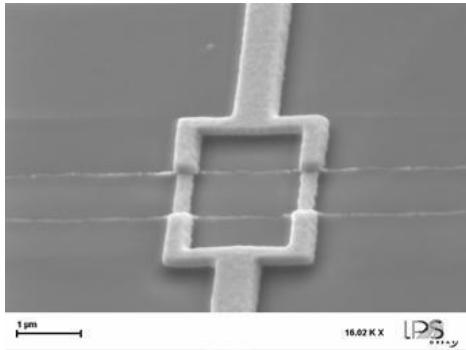
#### 多光子干渉計 (スクイーズド光利用等)

- 高精度な変位等の計測
- △精緻な制御を要する

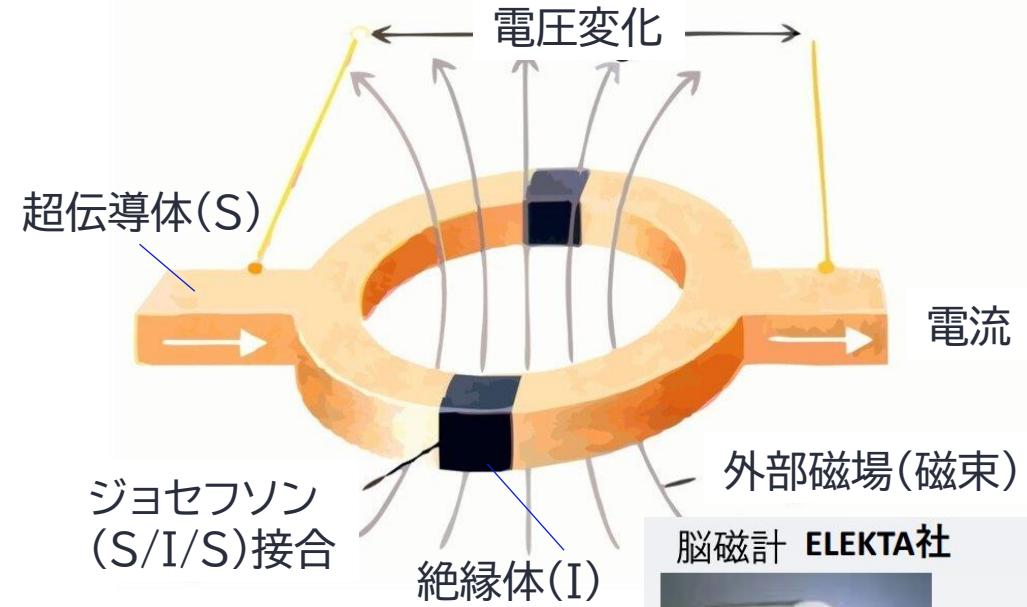
量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 超電導デバイス(ジョセフソン接合など)

### MRIなどの医療用途で活躍するSQUID磁力計



超電導デバイス



脳磁計 ELEKTA社



#### ①原理

ノイズが小さく応答の大きな超電導からなる量子回路/ジョセフソン電流からなる信号を検知することで、微小な磁場を検出可能

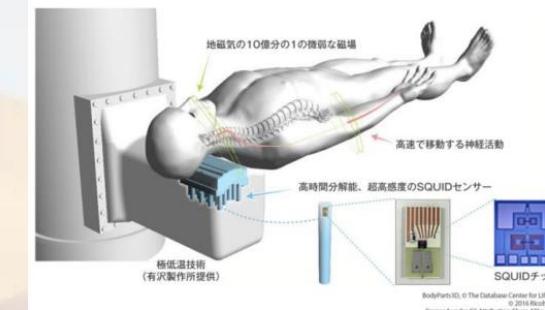
#### ②応用

脳や心臓など、生体からの微小磁場を検出する等の医療(非破壊な生体断面撮像)応用。ダイナミックレンジが狭く、磁気遮蔽環境で利用

心磁計 日立



脊磁計 リコー



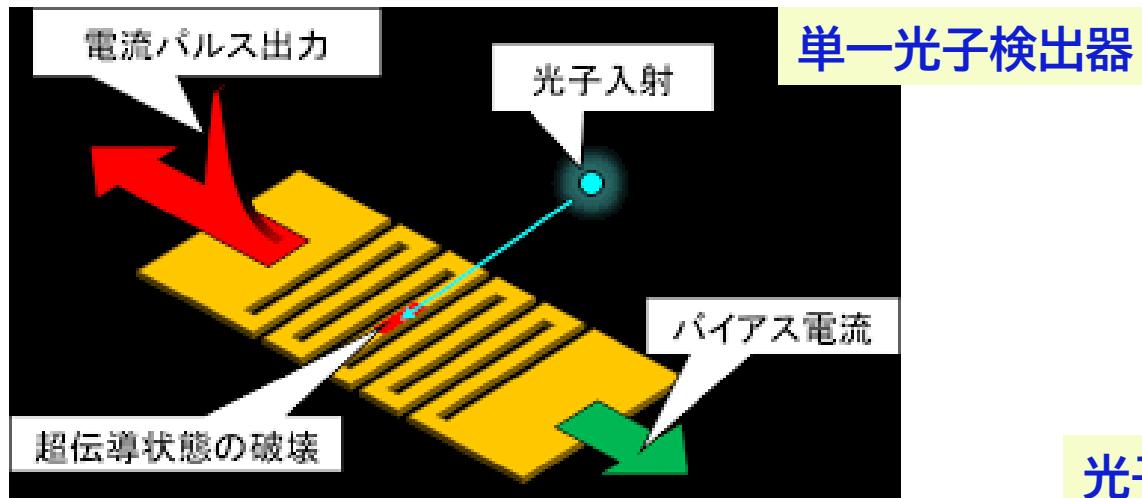
#### 特徴:

- 超高感度な計測が可能
- △ダイナミックレンジが狭い⇒背景信号で飽和しがち
- △冷凍機での低温冷却が必要

量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 超電導デバイス

量子暗号システム／光量子コンピュータ等で必要となる单一光子検出器、光子数識別器



## 超電導デバイス

### 特徴:

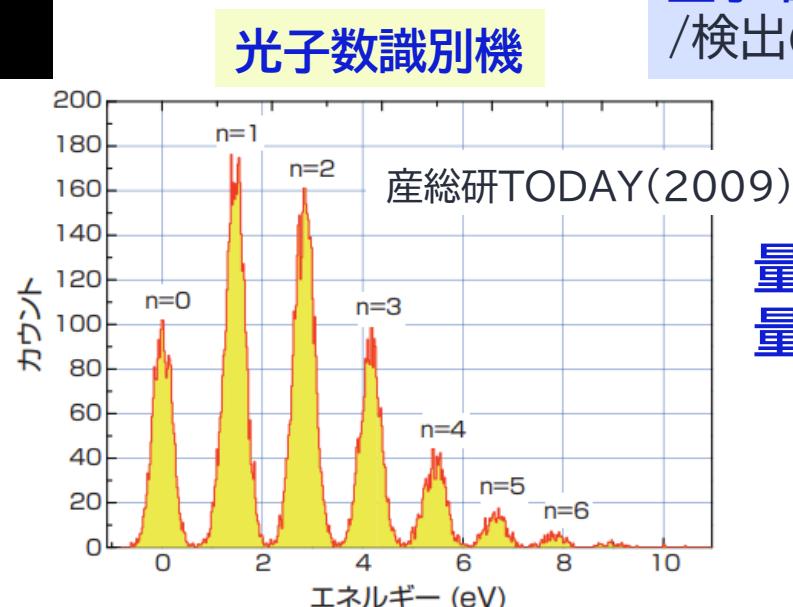
- 超高感度な計測が可能
- △ ダイナミックレンジが狭い
- △ 冷凍機での低温冷却が必要

### ①原理

超伝導体からなるナノワイヤで外部から来る光子が吸収されると、超伝導状態が一部壊れ、大きな電気信号変化が観測される。

### ②応用

单一光子を用いることで盗聴の検出が可能な量子暗号システムや、光量子コンピュータの制御/検出のための光子数識別機などに利用される



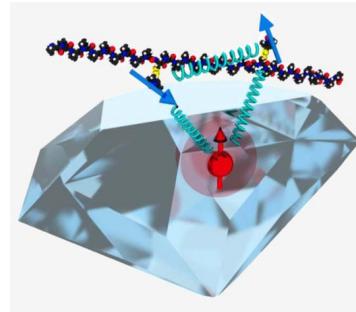
量子センシングのみならず、量子通信や  
量子計算のためのキーデバイスに

量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 固体結晶中の格子欠陥(ダイヤモンドNVセンター等)

### ①作り方:

CVD(気相成長)でダイヤモンド膜を形成。その後粒子線で格子欠陥を生成

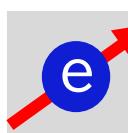
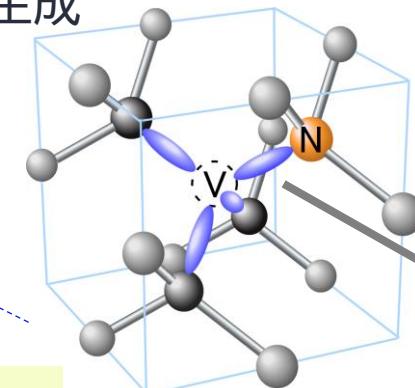


ダイヤモンドの格子欠陥

### ②物理系の仕組み

京都大学水落研究室HPより

ダイヤモンド結晶中の欠陥  
(不純物窒素Nと空孔V)が  
単一スピン量子状態を担持

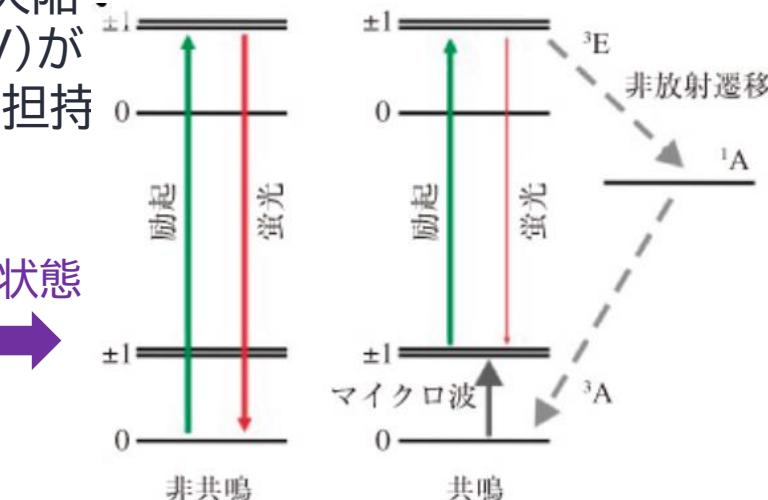


### 特徴:

- 高い空間分解能⇒小さなものを見れる
- 比較的広いダイナミックレンジ  
→背景信号で飽和しにくい
- 室温～高温で動作可能
- 様々な物理量を測れる(マルチモーダル)  
△感度／最小検出能はさほど高くない

### ③動作原理:

光検出磁気共鳴(ODCR)



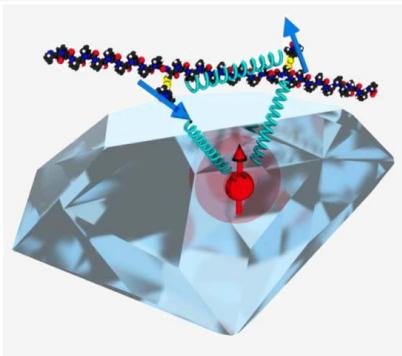
光とマイクロ波をパルス照射し、その後の発光(蛍光)の強度から電子スピンの共鳴状態を検出。  
⇒この共鳴状態はNVセンター周辺の磁場、温度、電場に強く依存することから、様々な量子センサに適用可能

ダイヤモンド以外に、Si, SiC中の欠陥  
なども近年注目され、開発が進んでいる

量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 固体結晶中の格子欠陥(ダイヤモンドNVセンター等)

### 高精度磁場/温度/PHセンサ

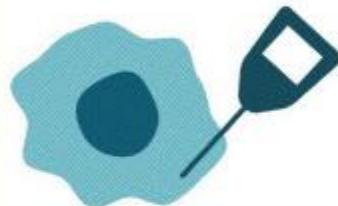


ダイヤモンドの格子欠陥

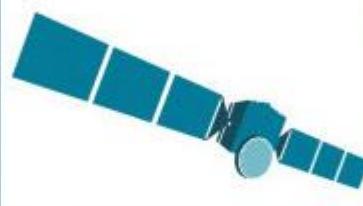
ダイヤモンド量子センサーは幅広い応用が期待されている

#### 想定される用途

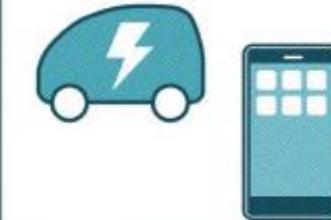
細胞の温度やpHを測ることで、病気のメカニズムなどを細胞レベルで詳細に研究



ダイヤモンドの結晶を使うことで宇宙などの過酷な環境でのセンシングに利用



多数の電気センサーが必要な製品でセンサーの数を減らせる



#### ダイヤモンド量子センサーの仕組み

窒素を含む  
特殊な構造



周囲の温度変化など  
によって蛍光強度が  
変化し、温度などを  
計算により求める

日本経済新聞 2025年8月19日朝刊

ダイヤモンド量子センサー  
のメリット

感度が高い

生物への  
毒性が低い

強度が高い

#### 特徴:

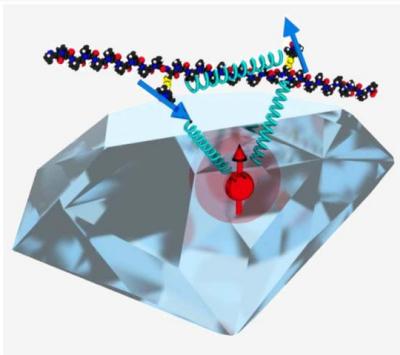
- 高い空間分解能⇒小さなものを見れる
- 比較的広いダイナミックレンジ⇒飽和しにくい
- 室温～高温で動作可能
- 様々な物理量を測れる(マルチモーダル)  
△感度／最小検出能はさほど高くない

Si, SiCなども近年注目され、開発が進んでいる

量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 固体結晶中の格子欠陥(ダイヤモンドNVセンター等)

### 高精度・高DR電流センサ



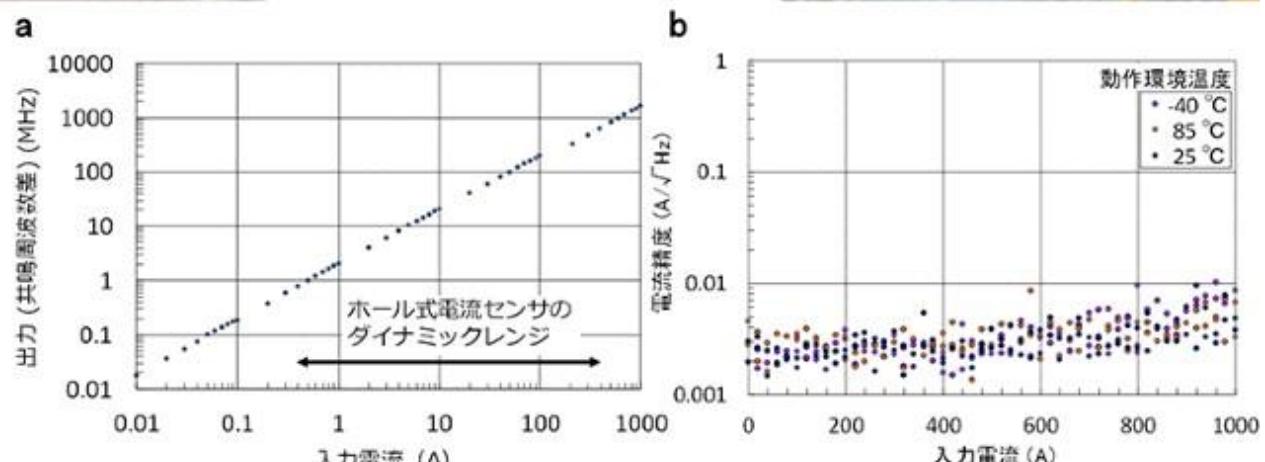
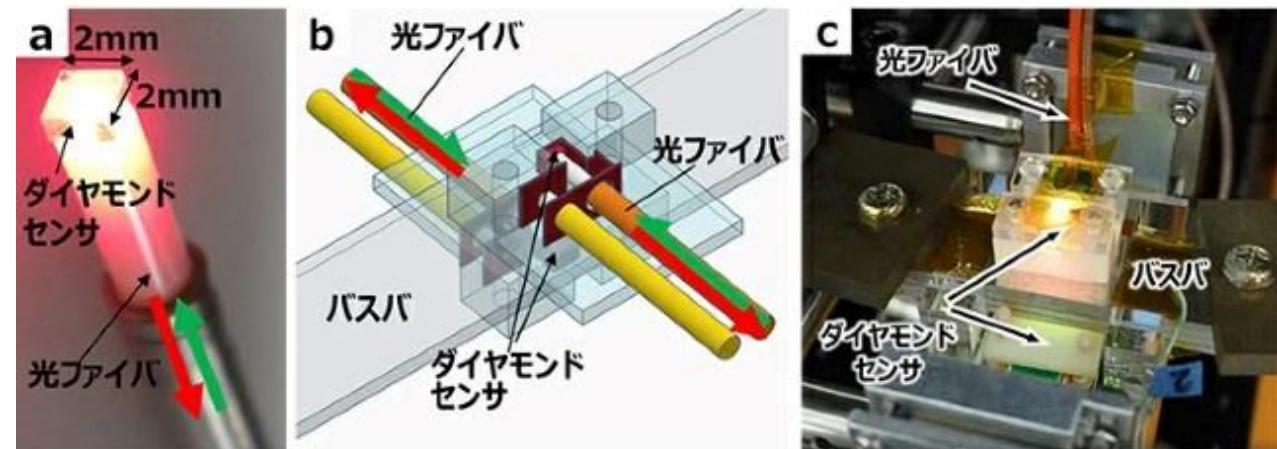
ダイヤモンドの格子欠陥

#### 特徴:

- 高い空間分解能⇒小さなものを見れる
- 比較的広いダイナミックレンジ⇒飽和しにくい
- 室温～高温で動作可能
- 様々な物理量を測れる(マルチモーダル)  
△感度／最小検出能はさほど高くない

Si, SiCなども近年注目され、開発が進んでいる

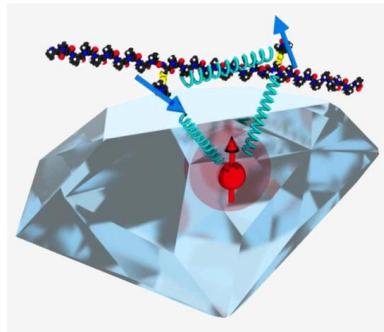
### 広いダイナミックレンジを活かした電気自動車等での充放電電流の高精度測定システム(矢崎総業、東工大など)



量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 固体結晶中の格子欠陥(ダイヤモンドNVセンター等)

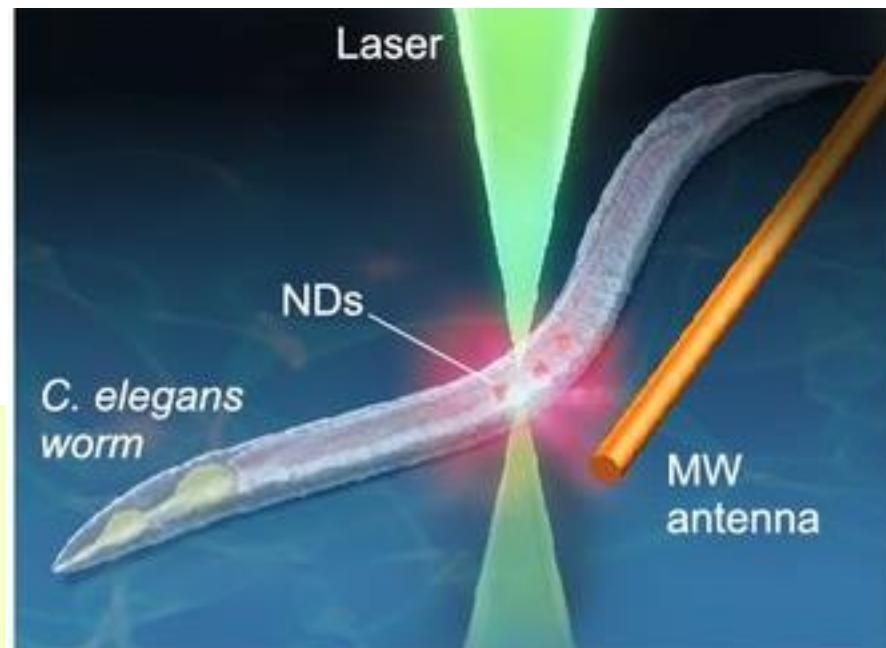
### 超小型生体向け温度センサ



ダイヤモンド格子欠陥

特徴:

- 高い空間分解能  
⇒小さな物を見れる
- 広いダイナミックレンジ
- 室温～高温で動作可能
- 様々な物理量を測れる  
△感度はさほど高くない



線虫内部の温度計測

Sci Adv. 2020 Sep; 6(37): eaba9636

数十ナノメートルの量子センサー 数ナノメートルの量子センサー

細胞小器官(ミトコンドリア等)や分子集団の計測に適している

小さいタンパク質やDNAなどの分子の計測に適している

分子標識

分子

分子の位置  
がわかる

一般的な蛍光プローブ  
(GFP等)

分子標識

分子

分子の位置  
がわかる

温度、電場など  
も計測できる

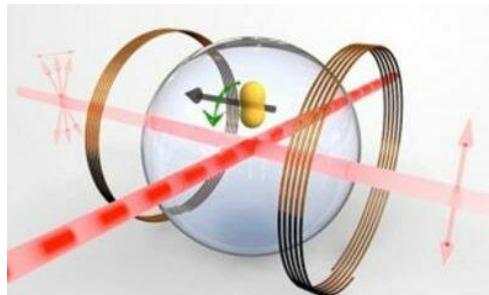
量子センサー

<https://www.qst.go.jp/site/press/26372.html>  
© NEC Corporation 2025 22

量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 中性原子ガス(セシウム、ルビジウム、ストロンチウム)

多くの量子系が考案されており、それぞれ多様な物理量計測に応用



中性原子ガス

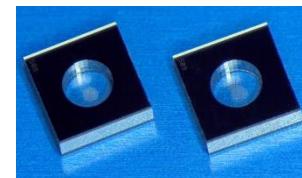
### 特徴:

- 室温下(冷媒不要)で高い感度  
(センサ数Nを稼ぎやすい)
- △原子ガスの閉じ込めが必要

### ■ 原子ガスセル(ガラスの中に原子(金属)を封入し加熱)



封じ切りガラスセル  
外寸6 mm~数cm



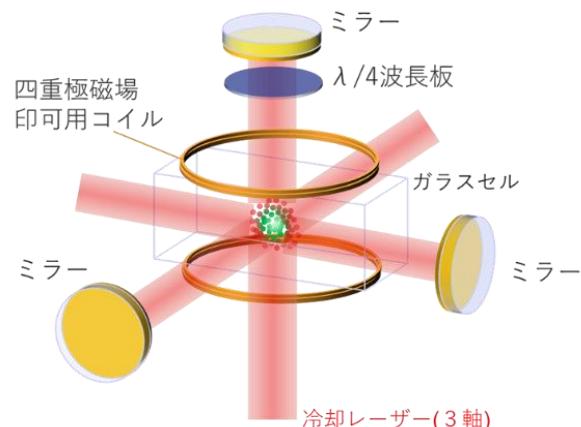
MEMSセル  
4 mm角~

### ■ 小型原子冷却装置の開発も進む

Cold Quanta(米)



### ■ 冷却原子(磁気光学トラップ…冷媒は不要)



量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

中性原子ガス(セシウム、ルビジウム、ストロンチウム)

光ポンピング磁力計:原子ガスセルによる高感度計測

微弱磁場センシング:コンパス(方位磁針)、MRI、資源探査など磁気計測は有用な技術。

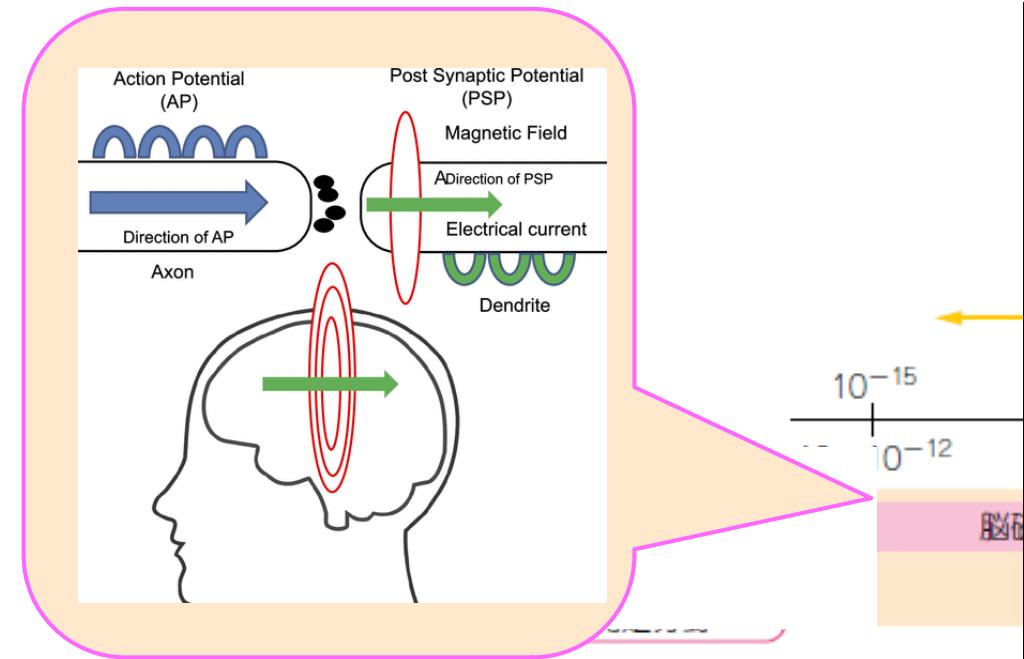
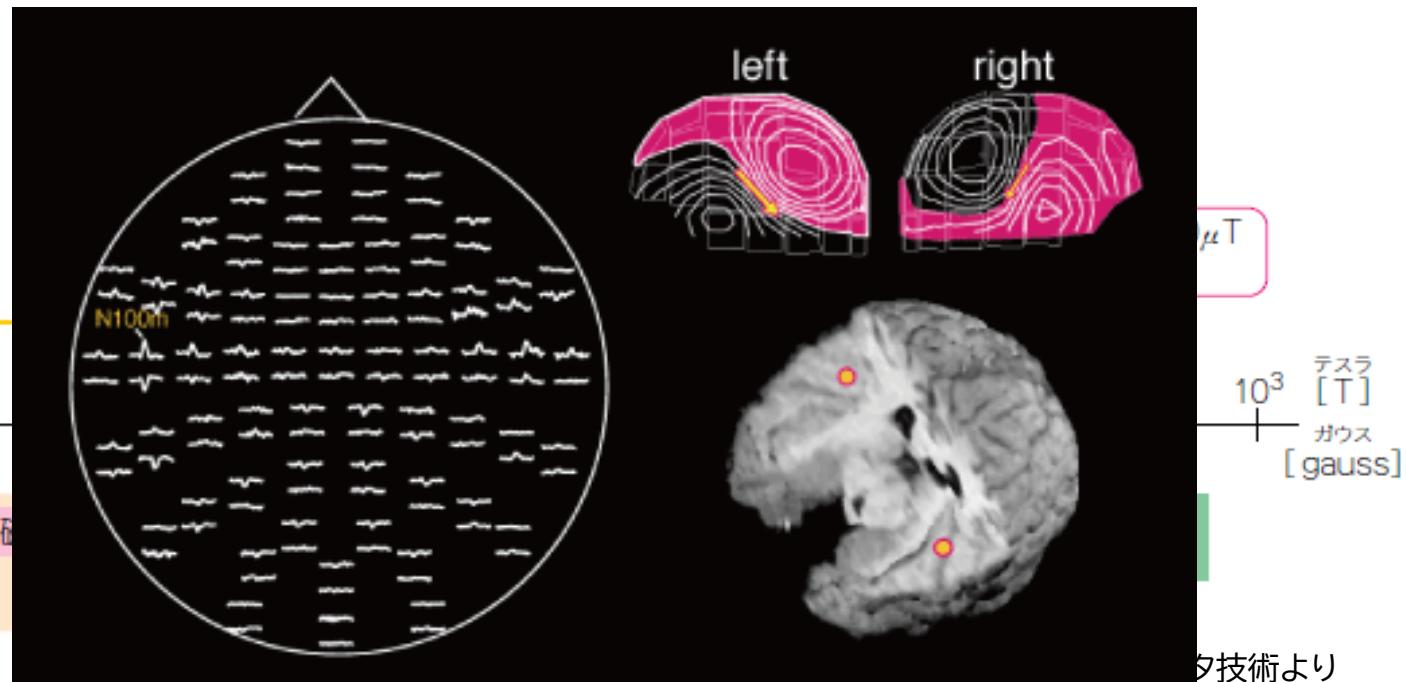


図1 磁気センサの種類と感度

脳磁:人間の脳からである、地磁気の  
1億分の1ほどの微弱な磁場



脳磁の測定により

- 医療:てんかんの診断、脳腫瘍の位置の特定が可能
- 脳神経科学:聴覚や言語処理などの認知処理の解明

量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

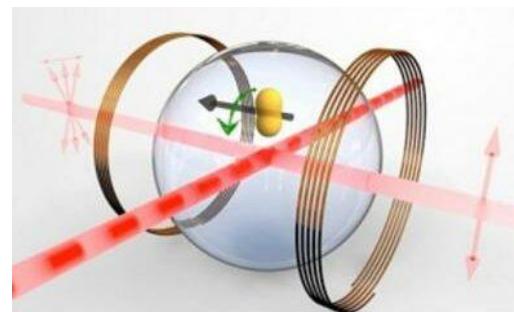
## 中性原子ガス(セシウム、ルビジウム、ストロンチウム)

### 光ポンピング磁力計:原子ガスセルによる脳磁計測など:

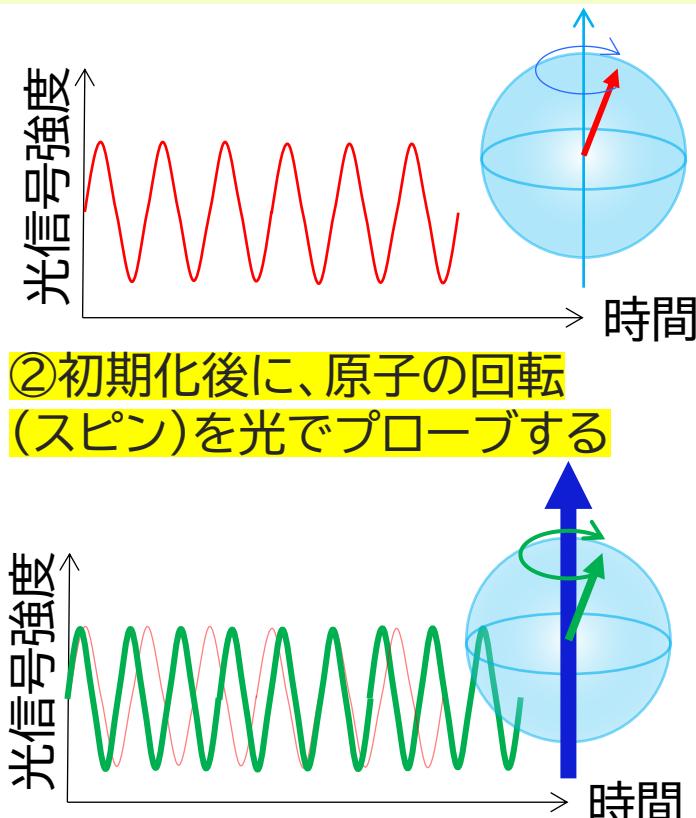
⇒原子ガスの回転の向きの変化を光で読み出すことで、磁場を高感度に計測

#### 中性原子ガス

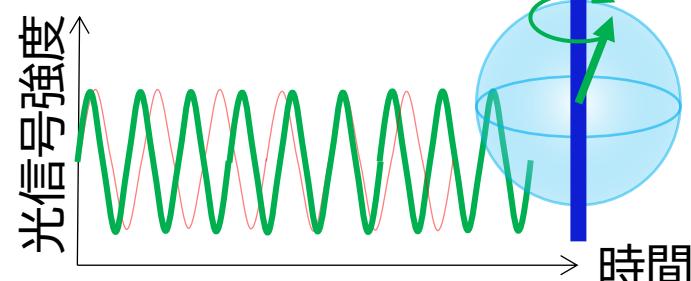
- 室温下(冷媒不要)で高い感度
- △原子ガスの閉じ込めが必要



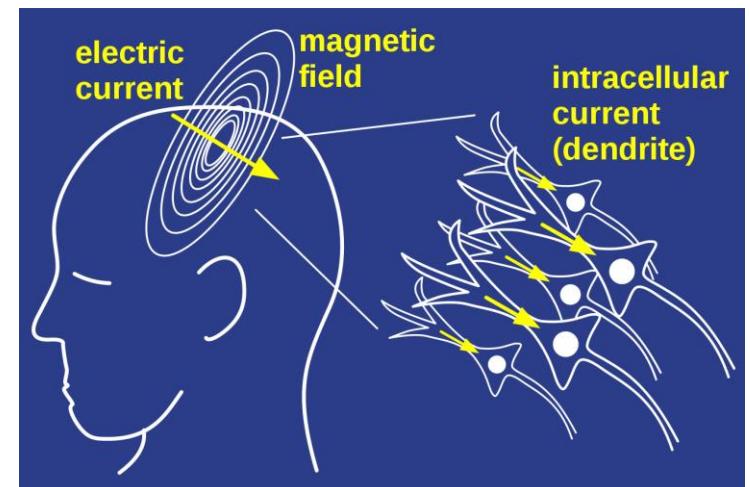
- ①ガラスの中に中性原子ガスを封入



- ②初期化後に、原子の回転  
(スピinn)を光でプローブする



- ③ 原子の回転変化を様子から  
外部の磁場状態を読み出す



- ④原子ガスを頭皮に近づけ脳磁を計測

量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

中性原子ガス(セシウム、ルビジウム、ストロンチウム)

## 光ポンピング磁力計による高感度脳磁センシング:

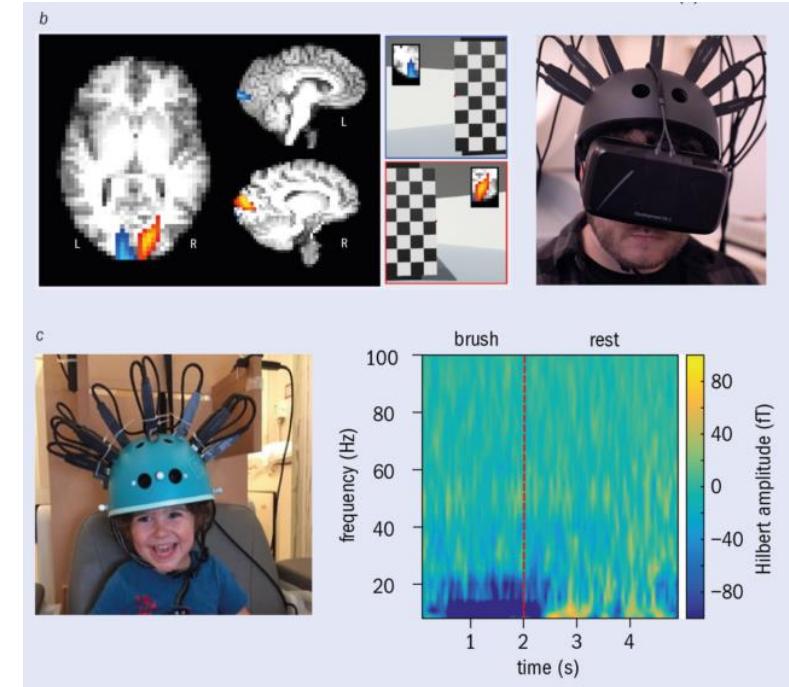
医療、ヘルスケア、ブレインマシンインターフェースなどへの応用の期待が高まる



NIST発ベンチャー  
QuSPINのセンサ

ウェアラブルデバイスで実現可能に

課題:複数の動作方式が存在。感度の高い動作方式ほど  
ダイナミックレンジが狭く、磁気シールド環境が必要に



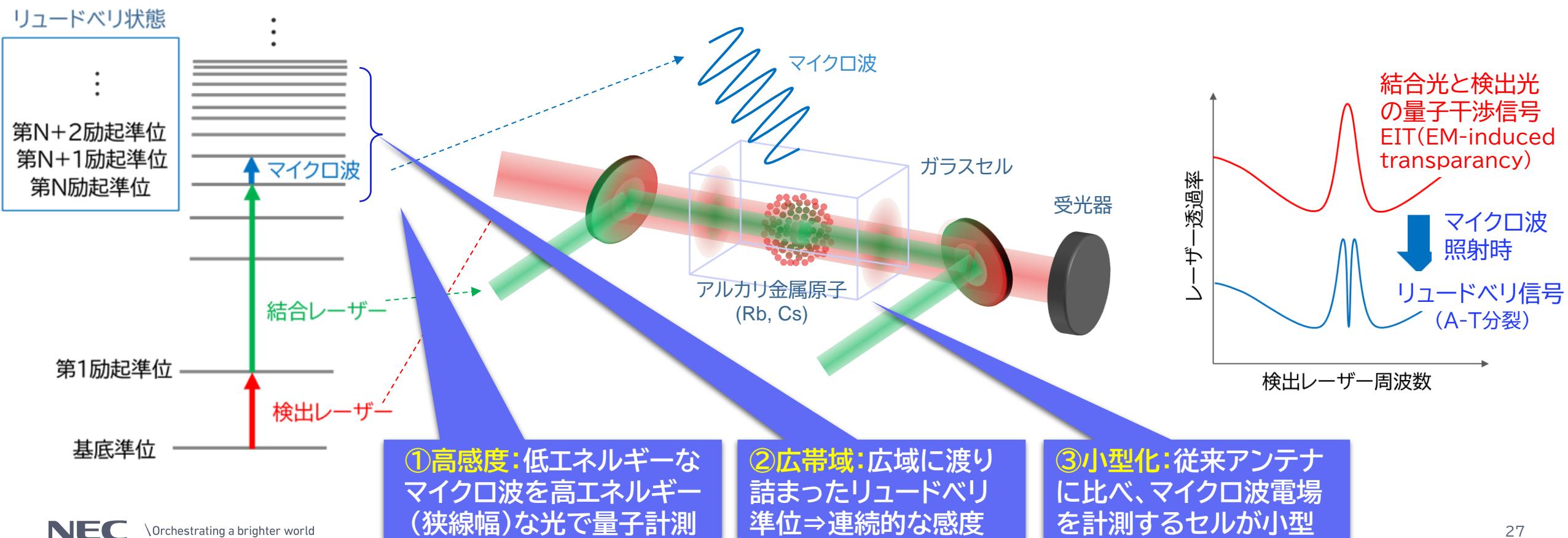
ゲーム中の脳活動計測や  
子供への装着例

量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

中性原子ガス(セシウム、ルビジウム、ストロンチウム)

## 量子アンテナ(量子電磁波センサ)

高励起の原子状態(リュードベリ原子)を用いた**超高感度・広帯域(MHz-THz)**電磁波計測

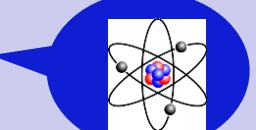


量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか～  
中性原子ガス(セシウム、ルビジウム、ストロンチウム)

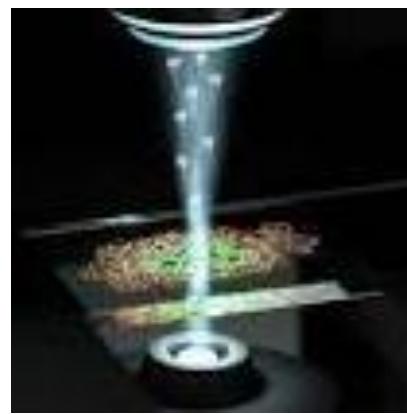
## 量子アンテナ(量子電磁波センサ)

従来型アンテナと比較して、量子アンテナは**約3000倍**の感度を小型構造で実現可能

- ◆ 従来型アンテナ：波長相当サイズの受信部で電気的に検出
- ◆ 量子アンテナ：原子の高励起準位における電磁場の吸収をレーザーの透過率変化として測定

	従来型アンテナ	量子アンテナ
システム	ダイポールアンテナ	リュードベリ原子 (ガラスセルに封入)  
システムサイズ	$\lambda/2$	外寸6 mm～数cm
感度	$\sim 1 \text{ mV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	(論文報告) $0.3 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$
帯域	高周波数領域では実現困難	(論文報告;高感度) 0-20 GHz
安定性	経年劣化あり	経年劣化小(原子は安定)
将来性	高度に成熟した技術	新しい未開拓の技術
アンテナ機能	送受信ともに可能	受信のみ可能
周辺系への影響	金属のため周辺電磁界へ影響大	非金属で周辺電磁界へ影響小

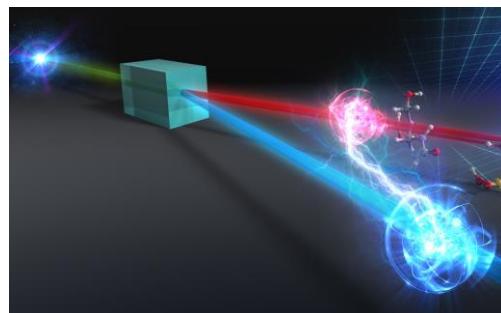
量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~



## 量子もつれ光子対

### 量子もつれ光子顕微鏡

量子もつれ状態にある光子対をプローブとして使用し、従来の顕微鏡では難しかった生物の微細構造を傷つけず観察したり、標準量子限界(光子の信号とノイズが等しくなる物理限界)を超える高感度での観察を可能にする技術

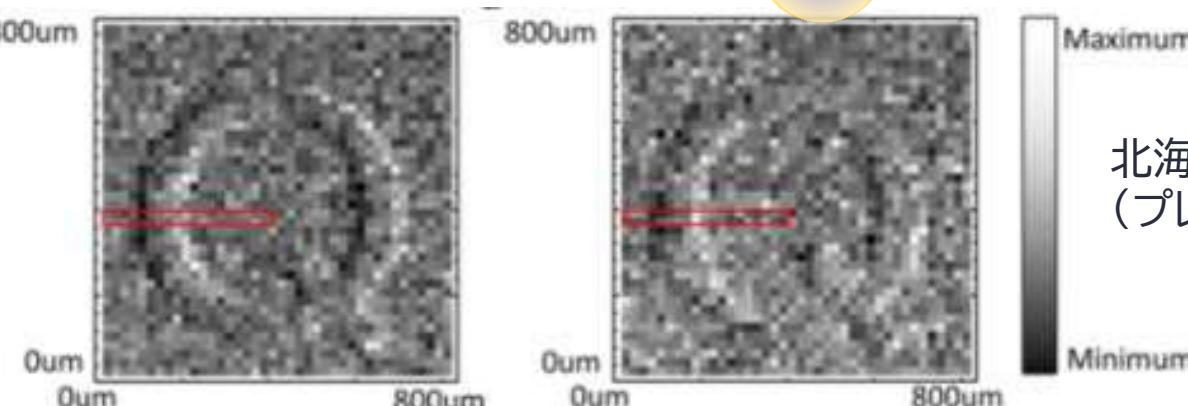


#### もつれ光子対を用いた 光子対顕微鏡技術の実証

T. Ono, R. Okamoto, S. Takeuchi,  
Nat. Commun. 4:2426 (2013).

#### もつれ光子対

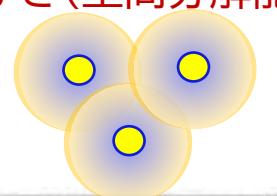
- 高感度かつ高い空間分解能
- △大規模なもつれ状態の生成は困難



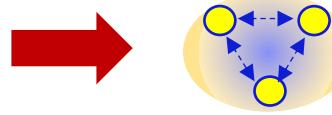
量子もつれ光子対を  
用いた場合の画像

量子もつれ光子対を  
用いない場合の画像  
(同じ光強度で比較)

光の空間分解能:波長程度  
の不確かさ(空間分解能)



量子もつれが回折限界を  
超えるイメージングを可能に



↑ 空間分解能  
(集光スポット)

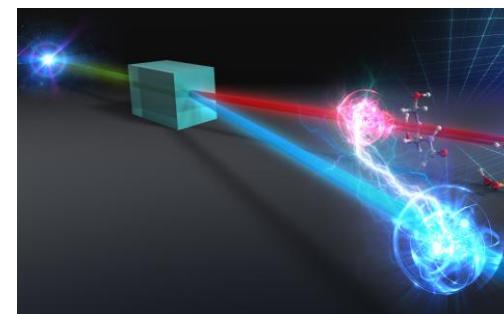
北海道大学HP  
(プレスリリース)より

量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 量子もつれ光子対

### 量子もつれ光子対を用いた赤外線／テラヘルツ検出

もつれ光子対発生機構を利用し、安価な光源/検出器が得にくい赤外線やテラヘルツ領域での計測を実現



#### 特長:

- ・赤外、電波(テラヘルツ)領域は分子や原子特有の吸収があり、各種検査に有用
- ・検出器や光源が高価/大型になることが課題
- ・量子技術を用いて、赤外やテラヘルツ帯域の光を可視帯域に変換
- ・可視帯域の検出器や光源は安価/小型

#### もつれ光子対

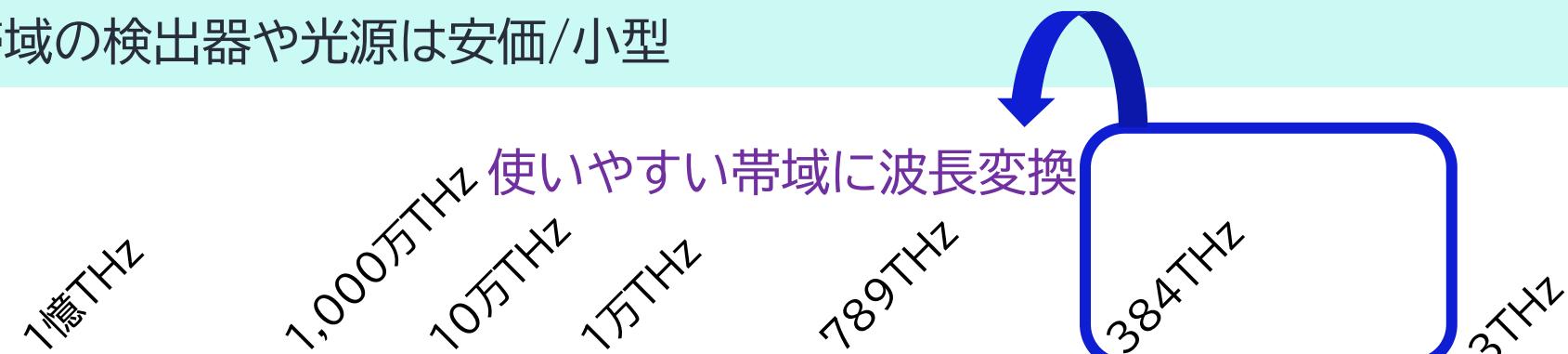
○高感度かつ高い空間分解能

△大規模なもつれ状態の生成は困難

周波数  
高い

ガンマ線	X線	紫外線	可視光線	赤外線	電波
------	----	-----	------	-----	----

低い

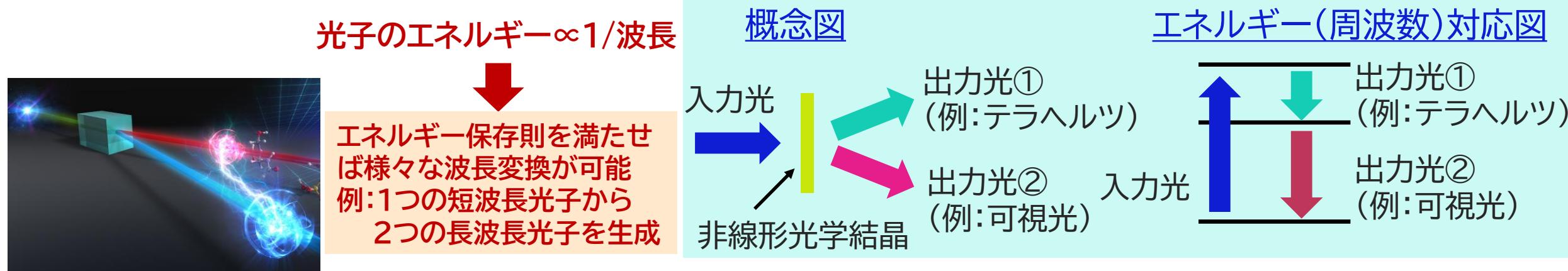


量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 量子もつれ光子対

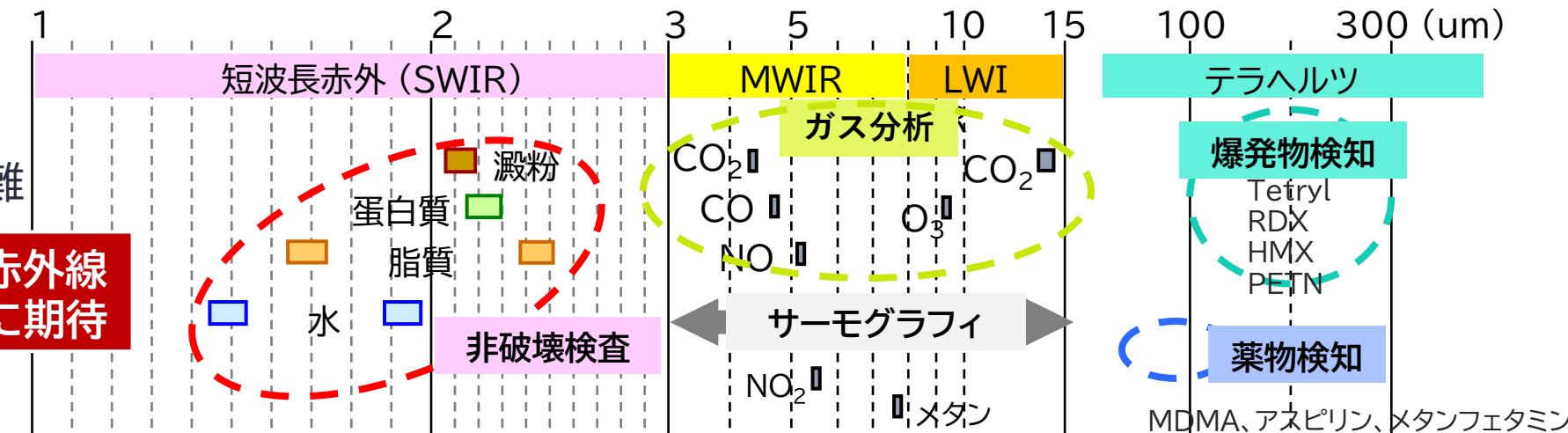
### 量子もつれ光子対を用いた赤外線／テラヘルツ検出

非線形光学結晶や量子特有の離散的な準位を用いた周波数変換により様々な波長領域での計測を実現



## もつれ光子対

- 高感度かつ高い空間分解能
- △大規模なもつれ状態の生成は困難
- 従来検出手段が高価／難しかった赤外線  
～テラヘルツ領域での検査用途等に期待

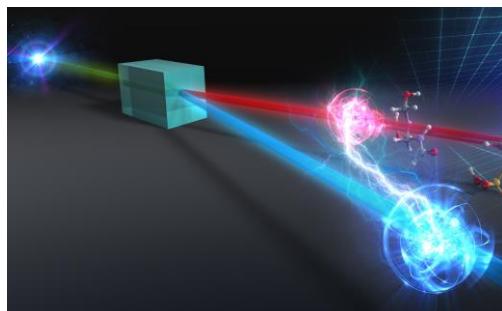


量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## もつれ光子対

### もつれ光子対を用いた”量子レーダー”

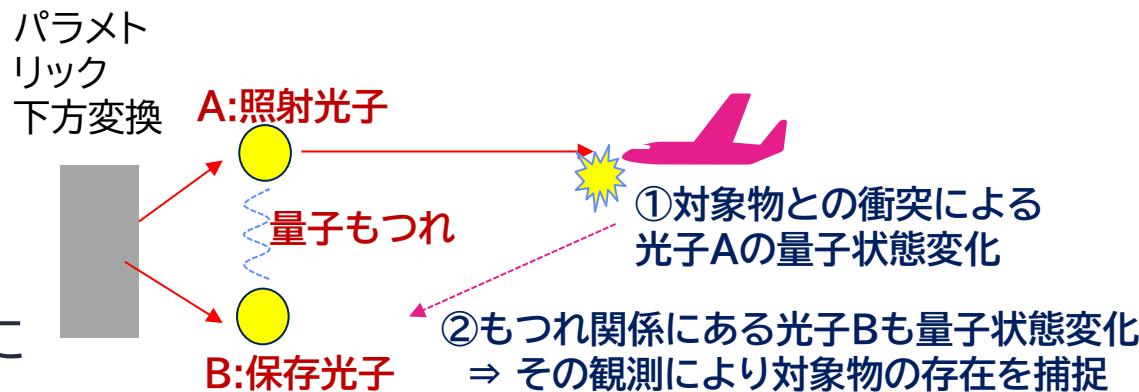
高感度かつ耐環境雑音性、ステルス性の高い検出手段に



もつれ光子対

○高感度かつ高い空間分解能

△大規模なもつれ状態の生成は困難



#### 原理:

- ①パラメトリック下方変換で量子もつれ 光子対を生成し、その片割れを対象物に照射。
- ②照射した光子Aが対象物と衝突すると、その量子状態変化により、もう片方の光子Bも量子状態変化 ⇒ これらの適切な観測により、対象物の存在を捕捉

#### 利点:

量子相関を用いるため感度が高く且つバックグラウンドノイズに信号が埋もれない  
光強度の弱い単一光子を用いるため、相手に気づかれにくい(ステルス性が高い)

#### 参考資料:

- "Microwave quantum illumination using a digital receiver." Science Advances
- "Entanglement-enhanced sensing in a lossy and noisy environment." Phys. Rev. Lett. 114, 110506 "The short, strange life of quantum radar" Science Vol. 369, pp. 1556 <https://science.sciencemag.org/content/369/6511/1556>

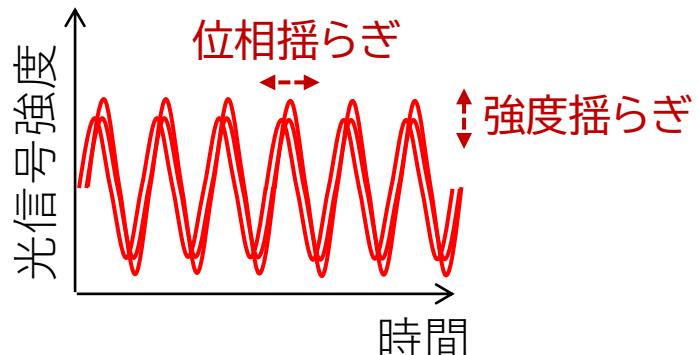
量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

## 多光子干渉計(スクイーズド光など)

コヒーレント光の直交位相成分表示

光=目に見える電磁波

量子理論(不確定性原理)から  
必ず揺らぎ(ノイズ)を有する



位相 $\pi$ の  
電場成分

強度揺らぎ  
(ショットノイズ)

光の位相

光の強度

量子理論／不確定性原理の要請  
強度揺らぎ×位相揺らぎ>定数

位相揺らぎ

高精度光学計測における量子限界

位相0の電場成分

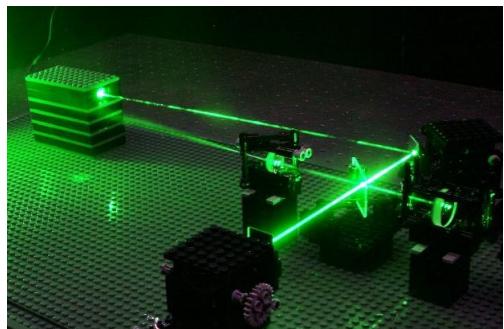
強度スクイーズド状態

⇒ショットノイズ低減

量子限界  
の打破

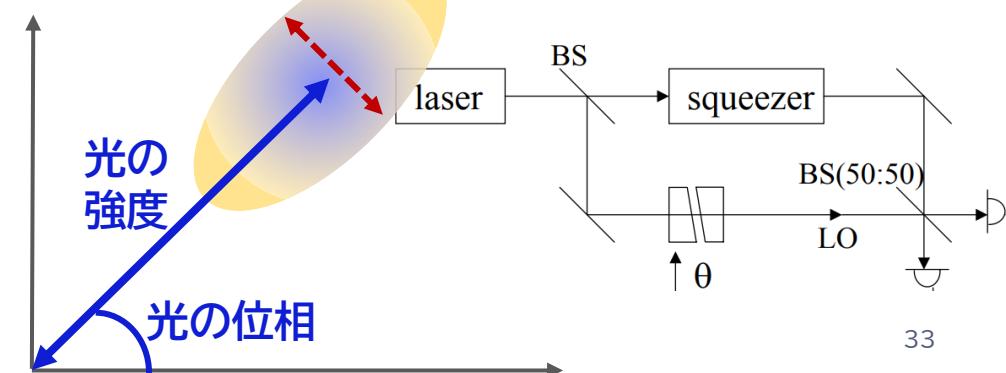
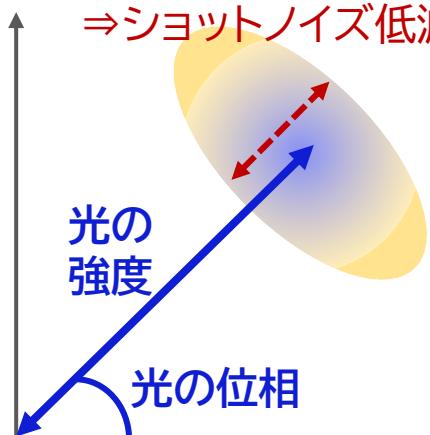
位相スクイーズド状態

⇒位相干渉計のノイズを低減



多光子干渉計  
(スクイーズド光利用など)

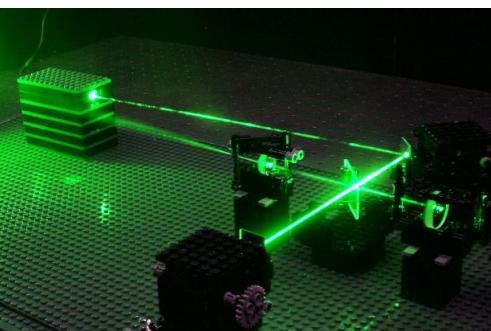
- 高精度な変位等の計測
- △精緻な制御を要する



量子センシングとは:量子センサを実現する物理系 (with What):~何を用いて計る／測るか~

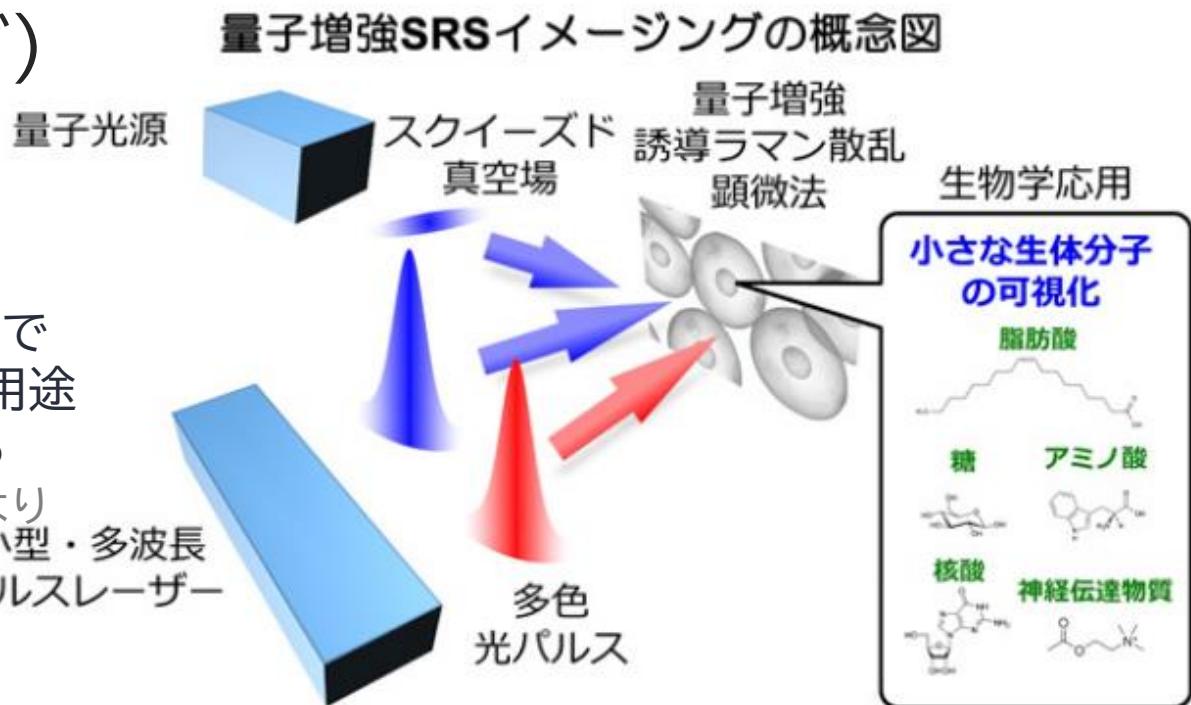
## 多光子干渉計(スクイーズド光など)

### スクイーズド光を用いた 生体分子の可視化などの取り組み



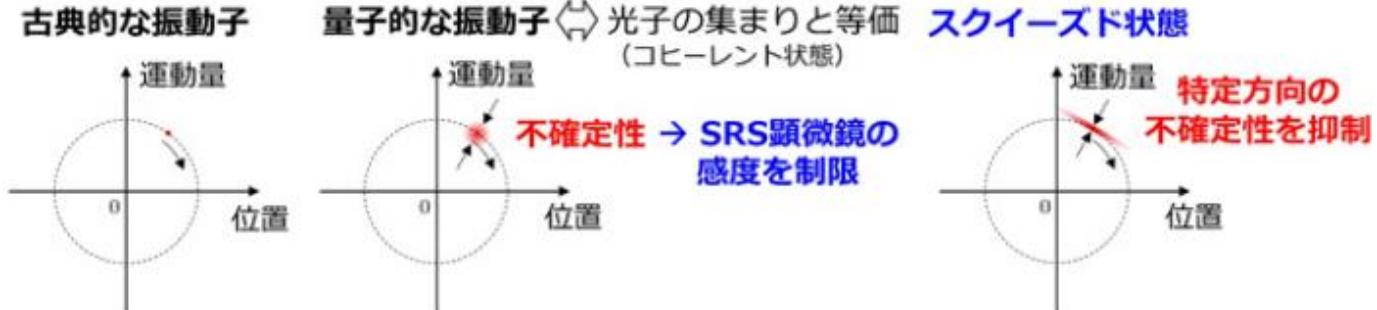
生体を壊さないよう微弱な光で  
分子/細胞などを可視化する用途  
に量子光源活用が期待される

右図:東京大学小関研究室HPより



### 多光子干渉計 (スクイーズド光利用など)

- 高精度な変位等の計測
- △精緻な制御を要する



[1] Y. Ozeki *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **37**, 3288 (2020). [2] Y. Sano and Y. Ozeki, J. Opt. Soc. Am. B **39**, 207 (2022). [3] Y. Taguchi *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **37**, 1535 (2020). [4] Z. Xu *et al.*, Opt. Express **30**, 18598 (2022). [5] Z. Xu *et al.*, Opt. Lett. **47**, 5829 (2022).

## 量子センシングとは

### I. 量子センシングの分類⇒3つの軸で整理

- 量子センシングの原理 (How): ~どのように計る／測るか~
- 量子センサを実現する物理系 (with What): ~何を用いて計る／測るか~
- **量子センサの種類・用途 (for What):** ~何(どの物理量)を計る／測るか~

## 量子センシングとは

量子センサの種類・用途 (for What): ~何(どの物理量)を計る／測るか~

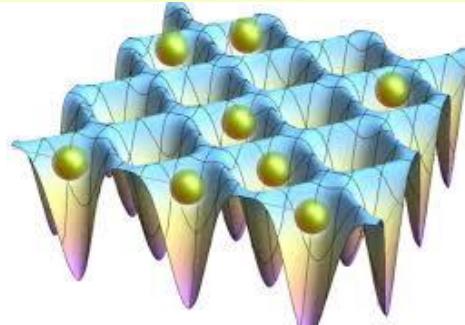
物理系 センシング対象	超電導	ダイヤモンド NVセンター	中性原子	もつれ光子対	多光子干渉計
磁場	○	○	○		
電場、電磁波	○	○	○		○
温度、pH		○			
高分解画像		○		○	
位置、変位				○	○
重力加速度、角速度		○	○		
時間			○		

## 光格子時計とは

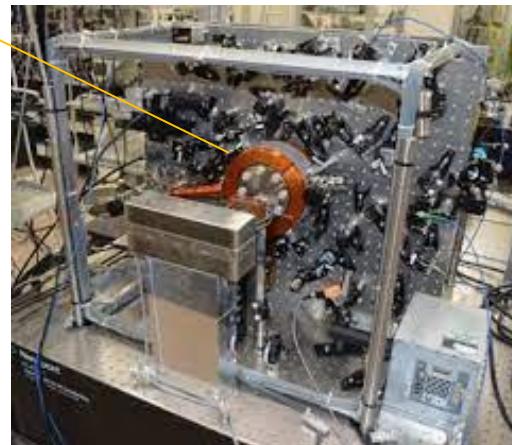
光格子に原子を捕獲し、究極の安定度を持つ周波数基準(クロック)として利用

### 原理:

複数本のレーザー光の空間的な干渉縞(光格子)の中に 冷却した原子を浮揚した状態で閉じ込め、それが吸収する光のスペクトルを超安定な周波数基準として用いる時計



光格子に捕獲された原子



究極精度:300億年で1秒の誤差  
(セシウム原子時計の1000倍)

### 主な研究機関:

- ・ 東京大(香取教授)
- ・ NTT
- ・ 島津製作所
- ・ NICT
- ・ 産総研

### 究極の計時精度により期待される応用例:

- **国際標準時:**現在のセシウム原子時計に替わる秒の再定義
- **水準測量／地殻監視:**わずかな標高差や重力の違いを計測
- **次世代通信インフラ:**高精度な周波数情報を基地局等に配信

光格子時計とは

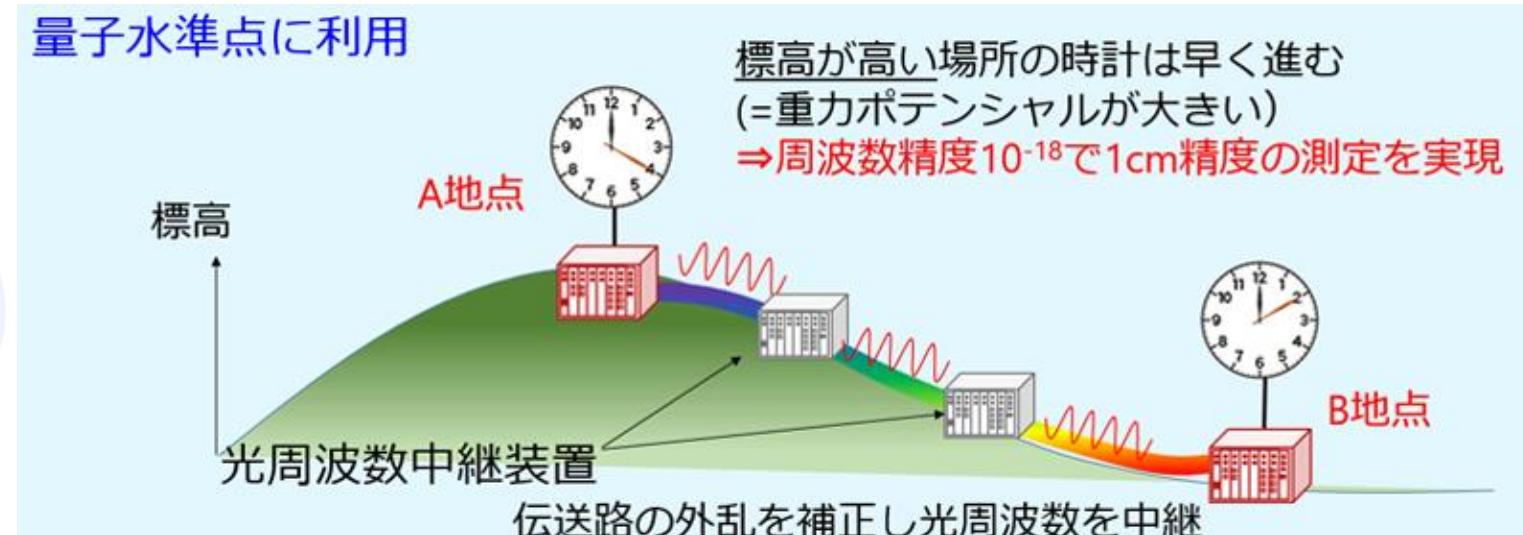
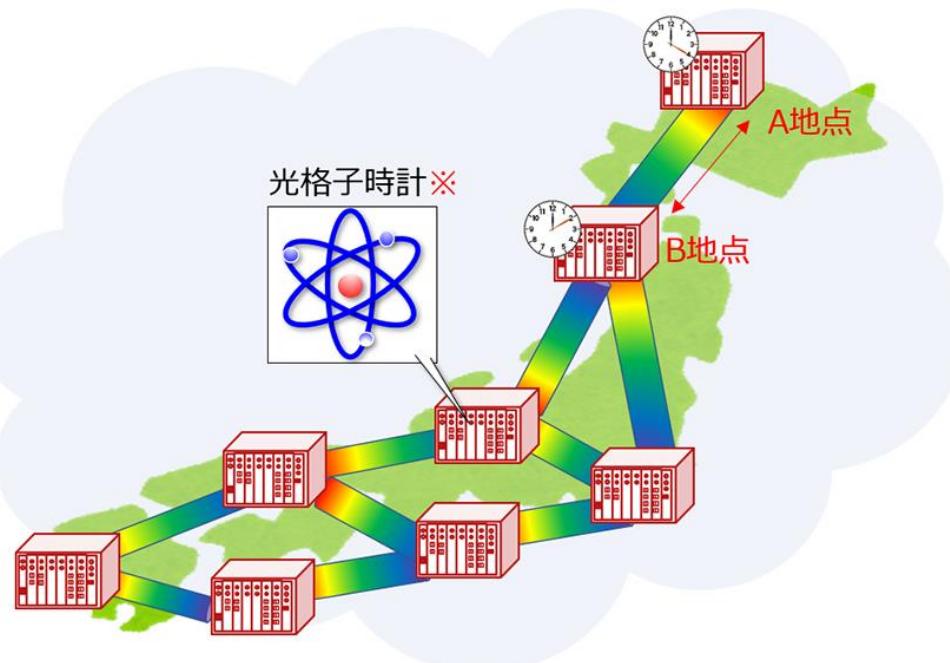
東京大学香取教授が提案・実証した究極の安定度を有する時計。

NTTは光格子時計等の量子技術を次世代通信「IOWN」の第4の柱に※

※日本経済新聞 2025年4月25日

光格子時計ネットワーク構想：300億年に1秒しかずれない光格子時計を全国に配備

相対性理論に起因する、重力に伴う時間の進む速さの差まで計測可能

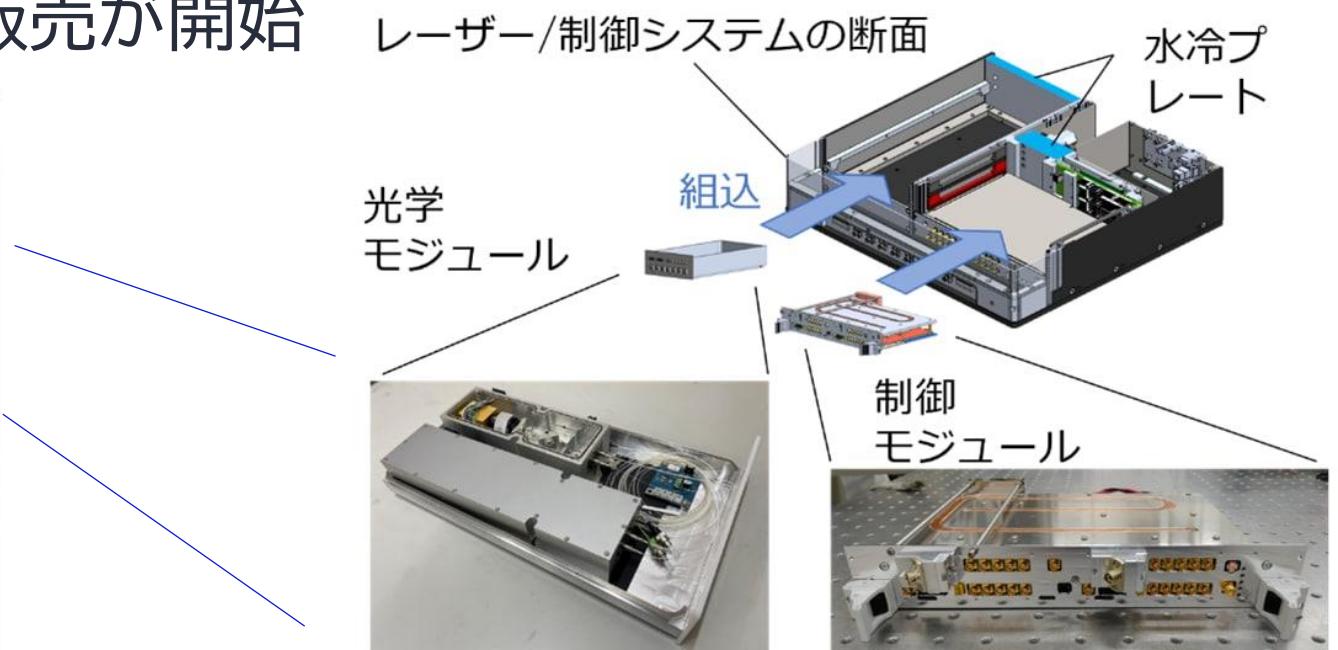


地殻変動検知／地震予知などへの応用に期待

## 光格子時計とは

島津製作所HPより:<https://www.shimadzu.co.jp/news/2025/-oqneexd8997ms8u.html>

## 島津製作所より光格子時計の商用販売が開始



製品名	ストロンチウム光格子時計 「Aether clock OC 020」
希望販売価格	5億円(税込) (システム構成により価格は変動します)
販売目標	国内外で3年間で10台

**NEC**

\Orchestrating a brighter world