

将来の素粒子実験のための 先端技術

高エネルギー物理学研究者会議 2021-2023年期 将来計画委員会

担当：飯山悠太郎、石川明正、居波賢二、岩崎昌子、坂上和之、
坂下健、澤田龍、末原大幹、田島治、中浜優、南條創、
身内賢太郎、三部勉、寄田浩平

2023年12月

はじめに

今期将来計画委員会のタスク：

1. 日本の次期基幹実験の議論
2. 量子技術、AIなどを踏まえた**検出器技術の先端化**の議論

- 今の先端技術によって、10年後にどんな実験が可能になるか？
- 素粒子実験は先端技術の恩恵を享受できているか？

先端技術の応用 → **高度な実験展開** + 技術開発

若手・新規参入者にとっても魅力

→ 分野の活性化

→ **先端技術の調査をし、報告書（本資料）として公開**

結論：

- これまでと質的に異なる技術による新たな可能性が広がっている
- 素粒子実験分野でも各種技術の応用が進んでいる

調査内容

現在の先端技術（の種・芽） → p5-30

- 委員会の議論で挙げられた技術トピックについて独自に調査
- 専門家を招いて勉強会
- 資料調査

多くはKEK測定器開発センター（ITDC）などで検討・開発が進行

→ 今期将来計画委員会では主に

他分野・インダストリーで発展している技術や新興技術を扱った

実験からのニーズ → p4

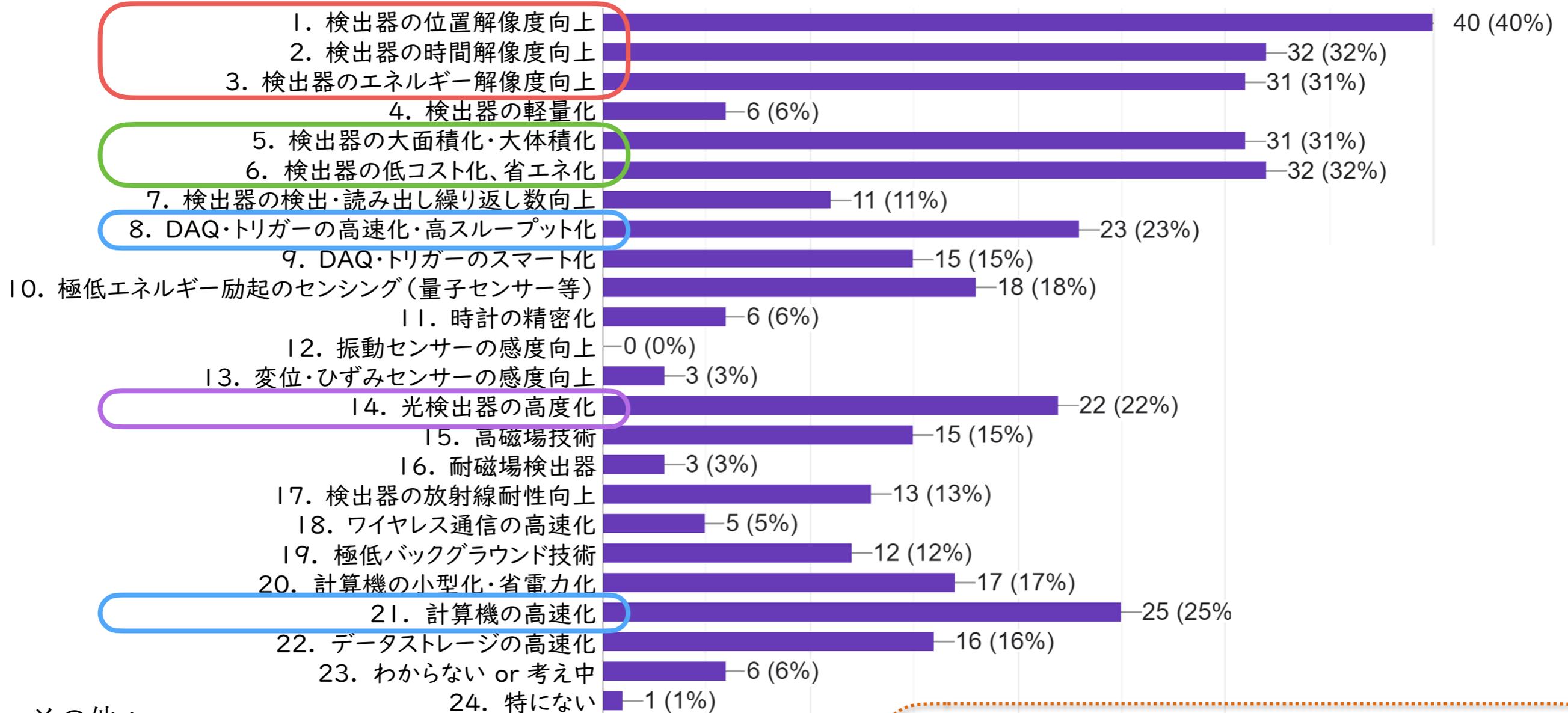
- コミュニティへのアンケート
- 資料調査

海外・国内の動向 → p31

- 資料調査

JAHEPコミュニティのニーズ

コミュニティアンケート：必要な技術ブレークスルーは？



その他：

- ・ 加速器機器の省電力化、大型パルス電磁石の高速化や安定化につながる磁石、電源、電力技術の向上
- ・ 検出器・ソフトウェアを含めた粒子識別効率の向上
- ・ 検出器製作の高品質化
- ・ 大面積をカバーできる位置分解能が1cm程度の、安い検出器
- ・ 高感度磁力計

既存検出器の先端化が主に求められている
→ 各所で研究・開発されている



ニーズに直接マッチしないが、委員会では
新興技術のサーベイ・紹介にフォーカス

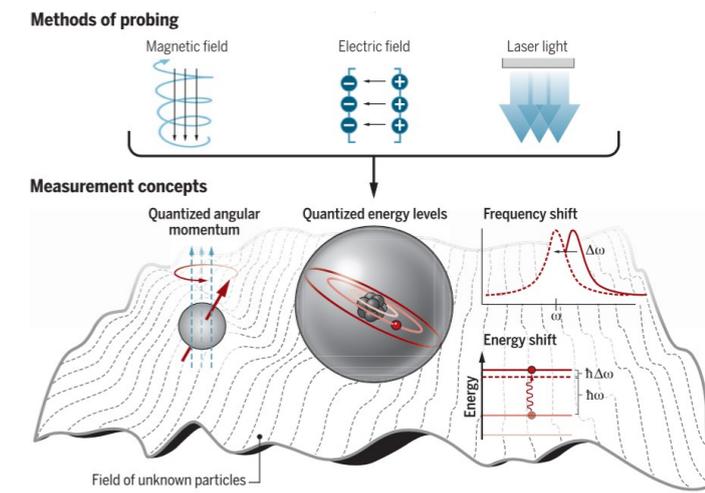
調べた技術について

他分野・インダストリーで発展している技術 ← 大きく4つのトレンド

- 量子センサー・量子デバイス ... p6
- 新奇素材 ... p7
- 機械学習 ... p8
- 計算・通信 ... p9
- ❖ 調査をした技術もこれらのトレンドと関連するものが多い
- ❖ ただし、網羅的な調査は不可能 → 委員の判断で選定

技術トレンド：量子センサー／デバイス

- 物質の量子状態の変化を検知する装置
 - 超／常伝導遷移、原子の励起、共鳴振動の変化など
- 過去数年で急速に実用化・商用化が進行
- 分野横断・融合 + 公的戦略的大型投資 → 速い発展



D. DeMille, J. M. Doyle, A. O. Sushkov, Science 357, 990 (2017)

青字：調査したトピック

キーワード

- 超／常伝導遷移ボロメータ (TES、ナノワイヤなど)
- スピン検知・操作 (ダイヤモンドNVセンター)
- 原子時計
- イオン・原子・分子干渉計
- オプトメカニクス
- 非破壊測定 (量子ビット) → 量子コンピューティング
- 低次元マテリアル (量子ドット、グラフェンなど)

技術トレンド：新奇素材

- 大きなドライバー：環境問題
 - 再生可能エネルギー → ソーラーセル、触媒、積層造形
 - 電気自動車、電化（交通、工業、家庭） → 電池、パワー半導体
 - 高効率・省エネルギー化 → 軽量化合物、機能性素材
- ナノテクノロジーで特殊素材の可能性が広がる
 - シート、ファイバー、ドットなどを混ぜて物性を操作

キーワード

- 非シリコン半導体（GaN、ペロブスカイトなど）
- ナノテクノロジー（グラフェン、ナノファイバー、量子ドットなど）
- 機能性素材（4Dプリンティング、自己修復、圧電効果など）
- 表面・薄膜（光触媒など）

技術トレンド：機械学習

- 人工知能（AI）の一つのアプローチ。データから確率分布を推定
- 近年の発展はほぼ全て**深層学習**=多層ニューラルネットワーク
 - 大きなモデルを多くの入力で訓練することで性能向上

関連トピック

識別モデル ↔ 生成モデル

- これまでHEPでは主に識別
- 生成モデルの発展が目覚ましい
→ HEP用途は？

説明可能AI（XAI）・透明性

→ 科学応用に重要

大規模学習

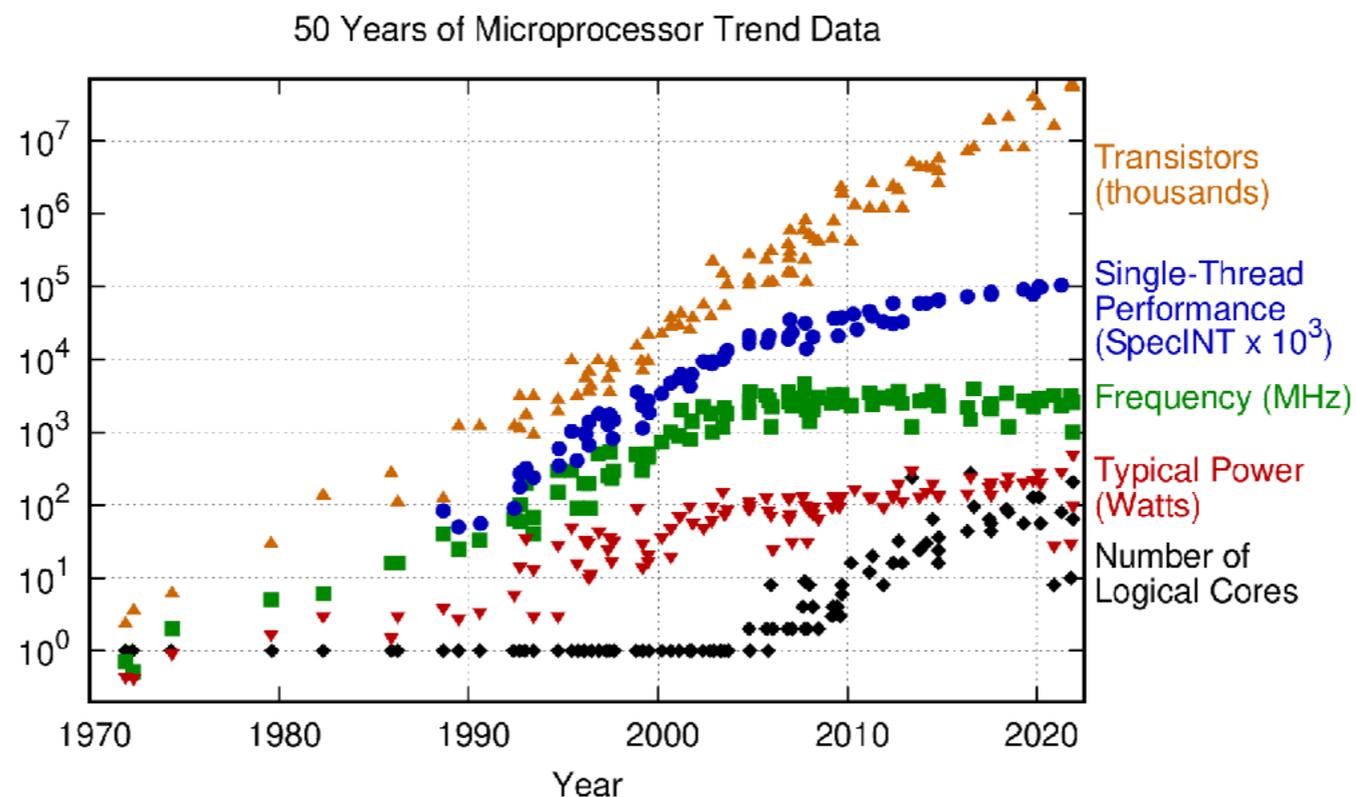
- Foundation models
=汎用化可能な巨大モデル
- Transformers
→ テキスト・画像ベース。科学応用は？

エッジML

- 低レイテンシ・省電力推定
- デバイス上オンライン学習

技術トレンド：計算・通信

- 回路の集積化は進むが、個々の演算コアの速度は向上せず
→ メニーコア（並列）化、ヘテロ化
- 計算リソースのコモディティ化
 - （マルチ）クラウド＋仮想化
- 通信速度は有線も無線も向上を続けている



Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2021 by K. Rupp

技術トピック調査のサマリー

- 次ページ以降：各トピックについて報告
- ページ中随所に参考文献リンク

原子系量子センサー ... p11-16

量子ドット ... p17-18

超伝導量子ビット ... p19-21

ペロブスカイト半導体 ... p22

ピコ秒タイミング測定 ... p23-24

量子計算 ... p25-26

機械学習 ... p27

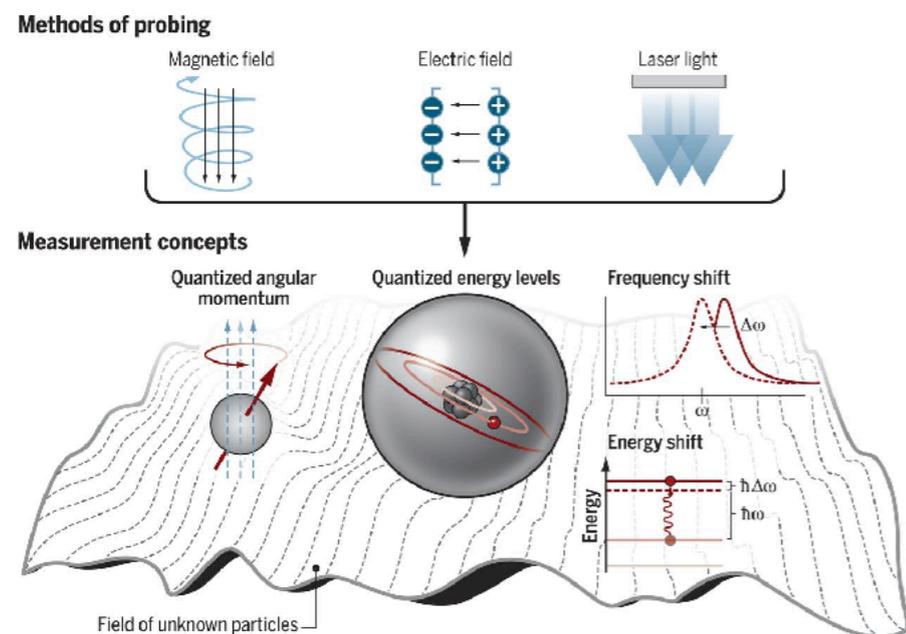
計算機 ... p28-29

集積回路... p30-31

..... 強い関連性

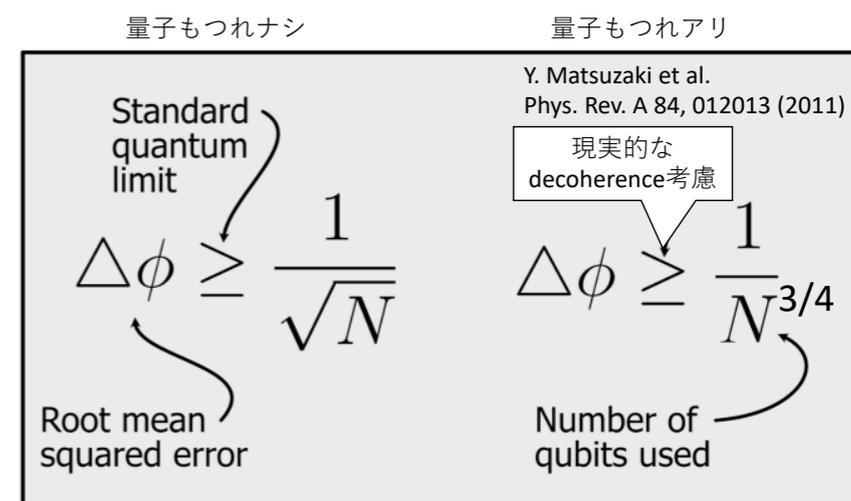
※トピックの順番に大きな意味はない

トピック1: 原子系量子センサー



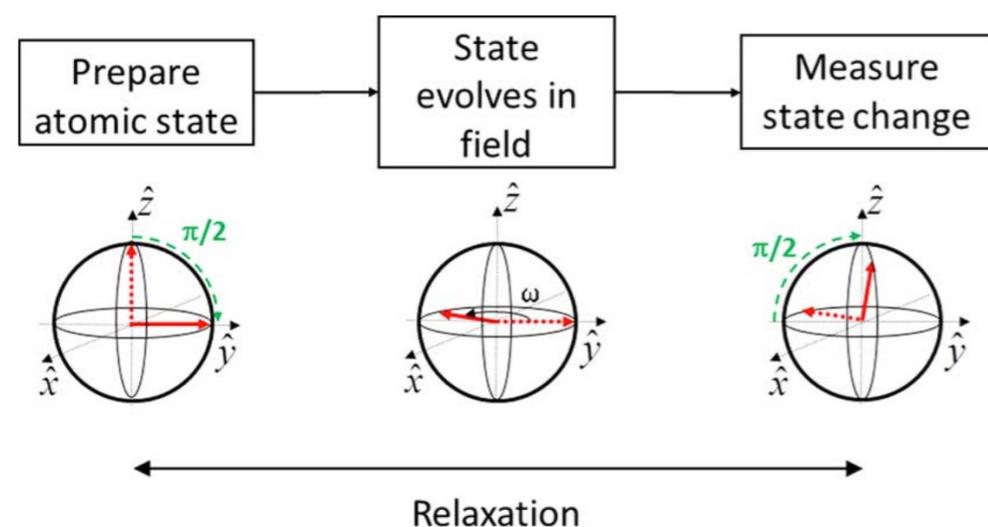
D. DeMille et al. Science 357, 990 (2017)

- コントロール可能な量子系で電場、磁場、重力場/加速度、温度、圧力などをプローブ
- 定常（エネルギー固有）状態の重ね合わせやエンタングルメントを利用



典型的な動作原理

定常状態の重ね合わせ → 摂動下で時間発展
 → 位相のずれを測定 (Ramsey interferometry)



トピック1: 原子系量子センサー

レビューした技術

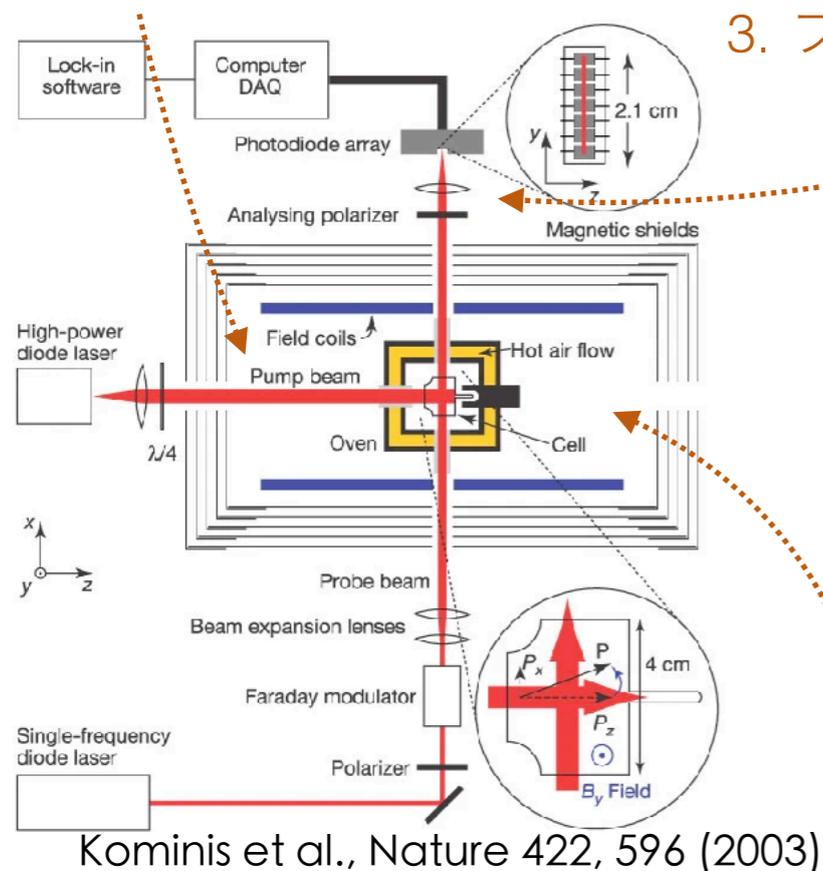
量子系	物質・自由度	測定対象	有感周波数
Atomic vapors	<ul style="list-style-type: none"> 室温～高温の中性原子気体 原子スピンの偏極を光学的に操作し、歳差運動などを利用 	磁場、回転、時間・周波数	dc - GHz
Cold atomic clouds	<ul style="list-style-type: none"> 低温の中性原子気体 スピン偏極の他、ドブロイ波干渉なども観測可能 	磁場、加速度、時間・周波数	dc - GHz
Trapped ions	<ul style="list-style-type: none"> 電場・磁場で捕捉したイオン 内的な励起と、集団的な振動モードを利用可能 	時間・周波数、回転、電場、磁場、力	THz / MHz
Rydberg atoms	<ul style="list-style-type: none"> 高い励起状態にある原子 (n~100) 軌道が大きく、核の束縛が弱い → 高い電場感度、大きい双極子能率 	電場	dc - GHz
Atomic clocks	<ul style="list-style-type: none"> 環境への感度の低い遷移を利用した時計 直接センサーにはならないが、時間のレファレンスとなる 	時間・周波数	
Diamond NV center	<ul style="list-style-type: none"> ダイヤモンド中の窒素による格子欠陥 → スピン系 常温で長くコヒーレンスを保つ レーザーとマイクロ波で操作 	磁場、電場、温度、圧力、回転	dc - GHz

トピック1: 原子系量子センサー

Atomic vapors (磁場)

原理

1. 中性原子気体をポンプレーザーで
スピン偏極させる



Kominis et al., Nature 422, 596 (2003)

2. 磁場によってスピンの歳差運動する

3. プロブレーザーのファラデー効果
(偏光面の回転) を観測する

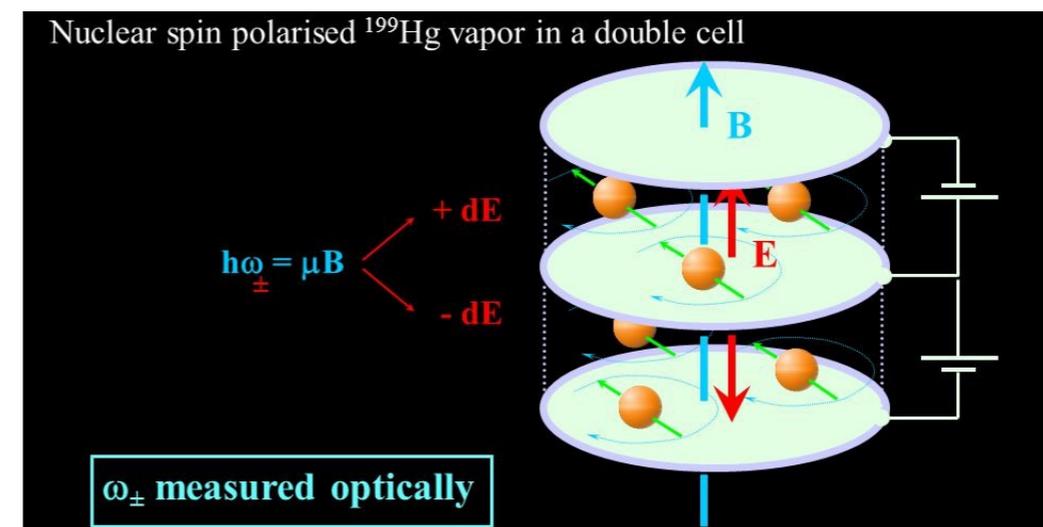
感度 100 aT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 40 Hz

理論的には <10 aT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ とも

Dang et al., Appl. Phys. Lett. 97, 151110 (2010)

amplitude spectral density

「偏極 → 歳差運動 → ファラデー効果」の原理を使って、原子気体そのものを調べることも可能
Hg EDM experiment: 2つの原子気体セルに共通の定磁場 + 反対方向の電場をかけ、歳差周波数の差を測定

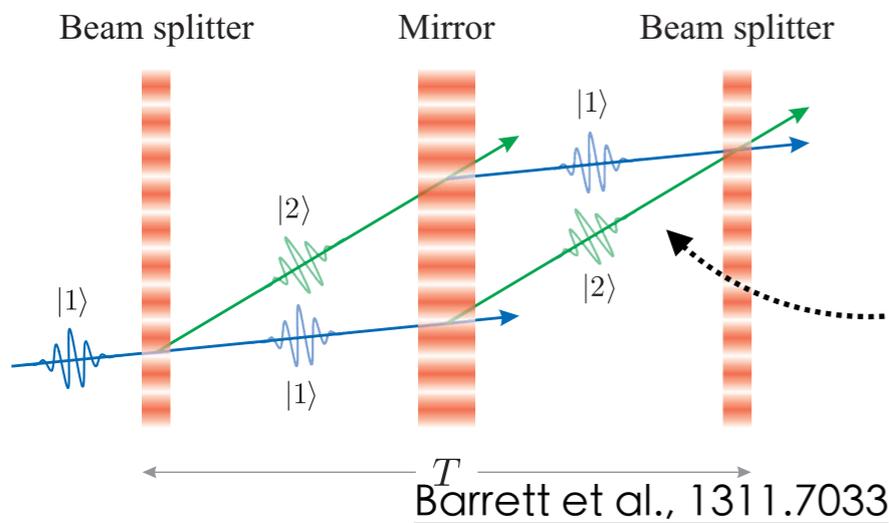


Graner et al., Phys. Rev. Lett. 116, 161601 (2016)

トピック1: 原子系量子センサー

Cold atomic clouds - atom interferometers (重力/加速度)

原理



重力ポテンシャルの違いによって経路のハミルトニアンが異なる

1. “ $\pi/2$ pulse”で2つの運動量固有状態の重ね合わせを作る
 2. “ π pulse”で運動量固有状態を入れ替える
 3. 二度目の“ $\pi/2$ pulse”で干渉
- 2つの経路で獲得する位相差によって|1>に戻らない

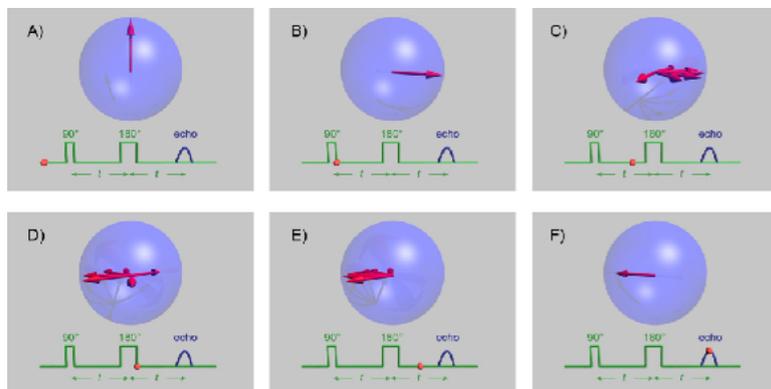
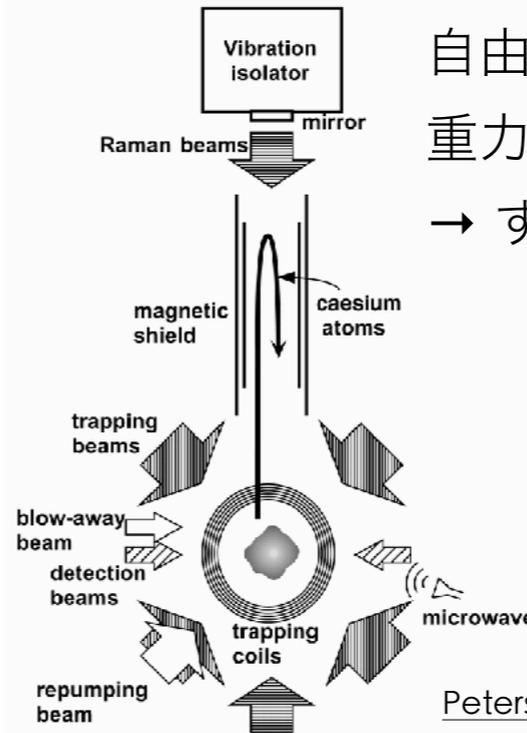


Image: Gavin W Morley

$\pi/2$ 、 π などの用語の由来はスピン1/2系 (qubit) の操作 (|1>|2>↔北極/南極)



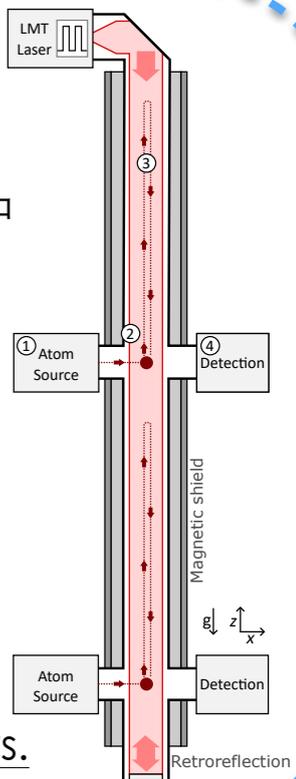
自由落下するCs原子による重力加速度測定
→ すでに感度 $\Delta g/g = 3 \times 10^{-9}$

大型原子干渉計システムによる暗黒物質探索・重力波探知:

- AION (UK), MAGIS (US): 鉛直真空容器中 2箇所に原子干渉計 (基線長10m 1km)
→ 位相差の差が基線長、空間のひずみ、遷移周波数の変化に依存
- MIGA/ELGAR (FR, EUR)
- ZAIGA (CN)

低い周波数領域に感度

Badurina et al., J. Cosm. Astro. Phys. 2020, 011 (2020)

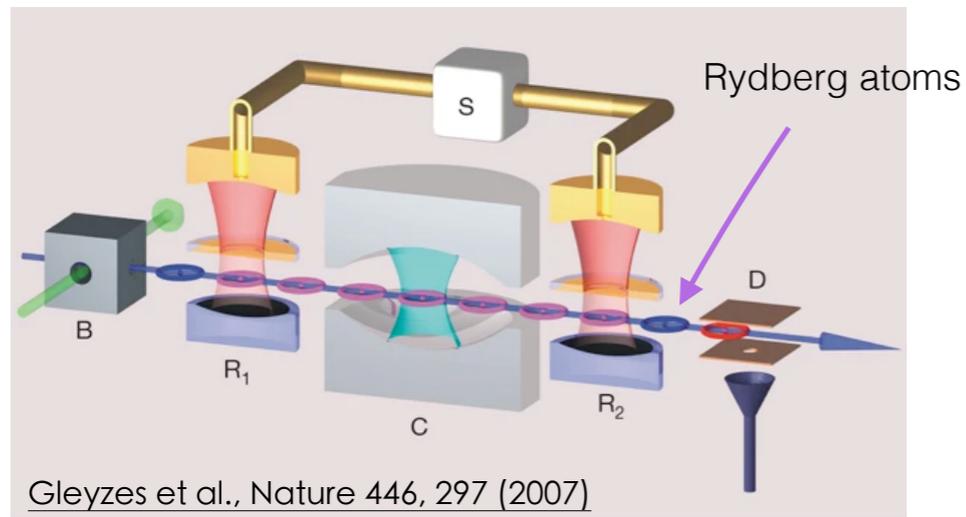


トピック1: 原子系量子センサー

Rydberg atoms (電場)

原理

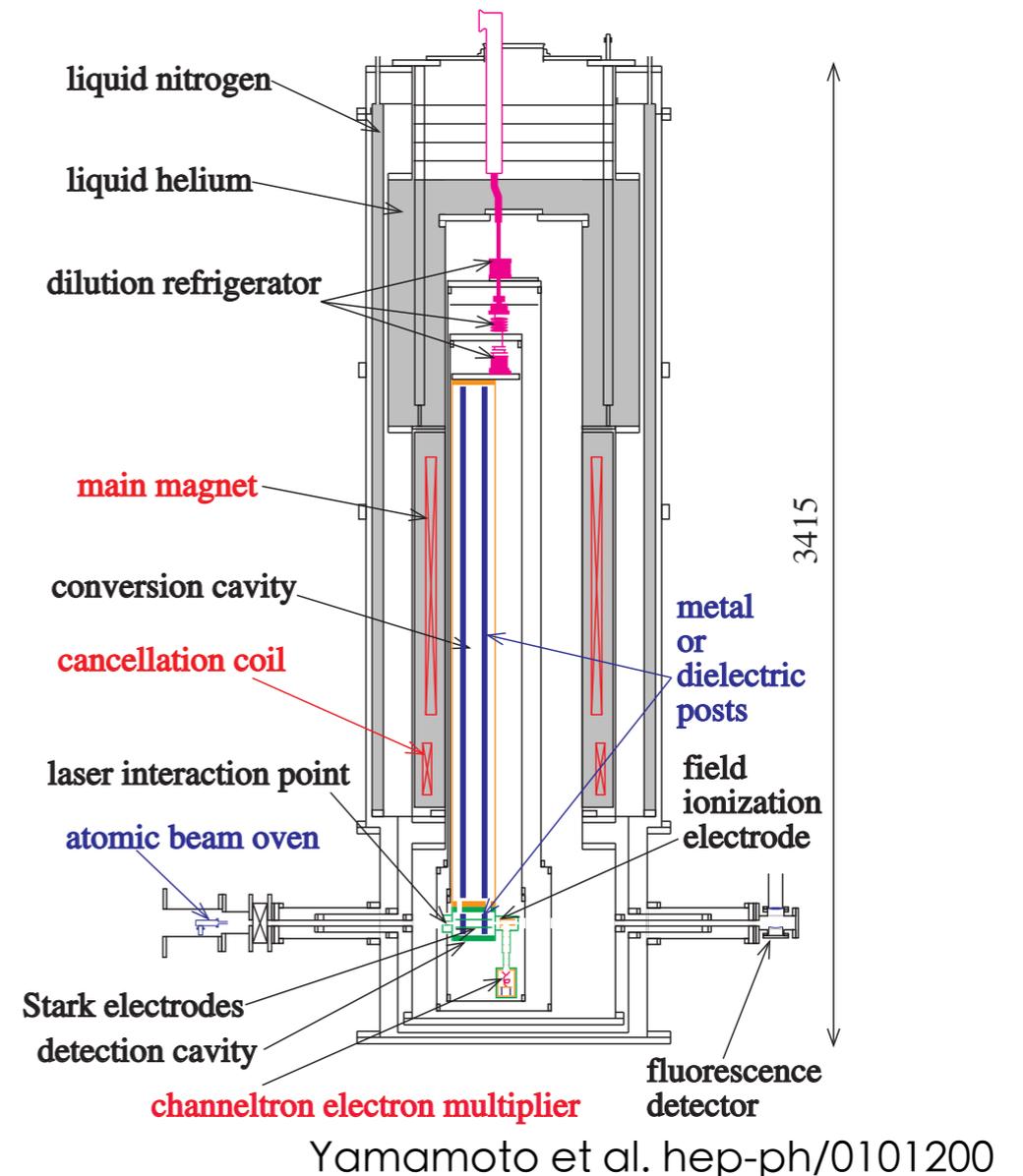
1. Rydberg atom = 高準位 ($n \sim 100$) に励起された原子
2. 軌道が大きい ($O(100)\text{nm} \sim \mu\text{m}$)
 - 核の束縛が弱い \rightarrow 高い電場感度
 - 電気双極子能率が大きい



単一マイクロ波光子検出

感度 $300 \text{ (nV/m)}/\sqrt{\text{Hz}}$

Facon et al., Nature 535, 262 (2016)



暗黒物質アクシオン探索 (CARRACK II)

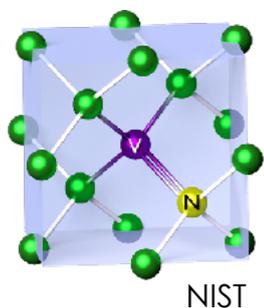
\rightarrow 磁場でアクシオンを光子に変換、Rydberg atomで光子を検出

USでも同様の計画: RAY collaboration

トピック1: 原子系量子センサー

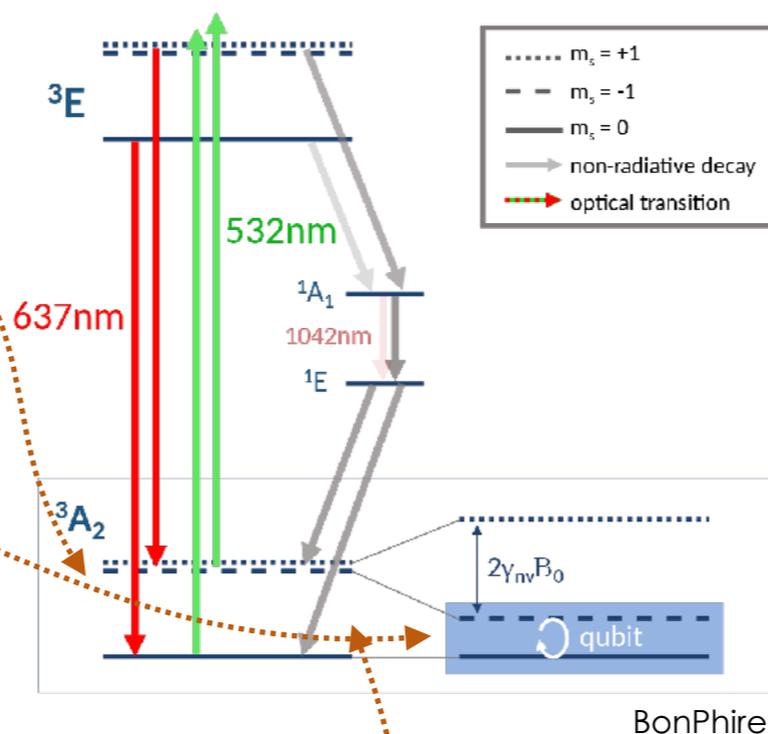
Diamond NV center (磁場、電場、加速度、etc.)

原理



ダイヤモンド中の窒素原子 (N) と隣接格子欠損 (V) に生じる電子対 (スピン1) 系

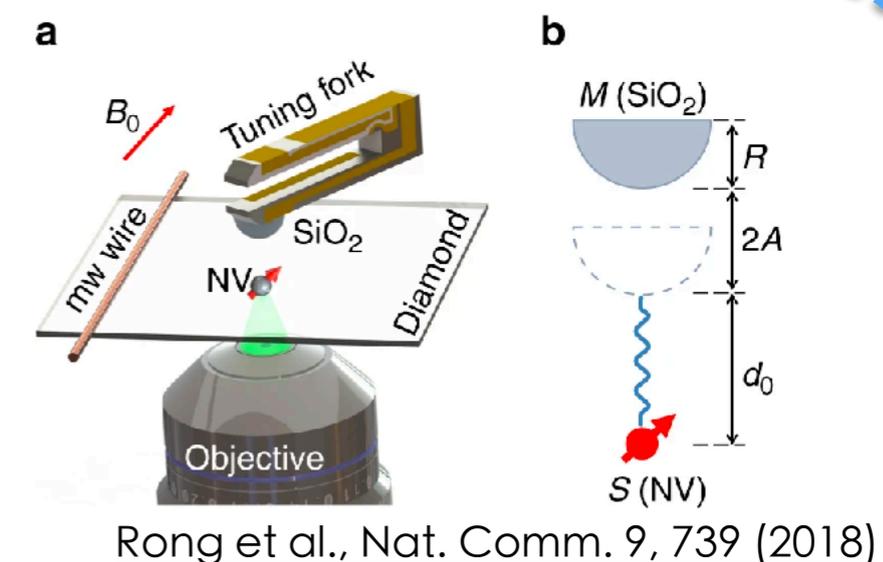
- 自己相互作用で基底状態tripletは $m_s=0$ と $m_s=\pm 1$ に分離
- さらに $m_s=\pm 1$ 間ギャップは磁場、電場、スピンスピン相互作用などに感度を持つ
- A-E (基底-励起) ギャップは温度や圧力に感度
- 可視光レーザーで基底tripletを励起tripletに遷移
 - $m_s=0$ は即座に637nm蛍光を放って脱励起
 - $m_s=\pm 1$ はnon-radiative decayも
 - 蛍光の強度でスピン状態を測定可能
 - 励起・脱励起を繰り返すと基底 $m_s=0$ に初期化可能



感度

磁場 250 aT/ $\sqrt{\text{Hz}}$

加速度 10 ($\mu\text{rad/s}$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$



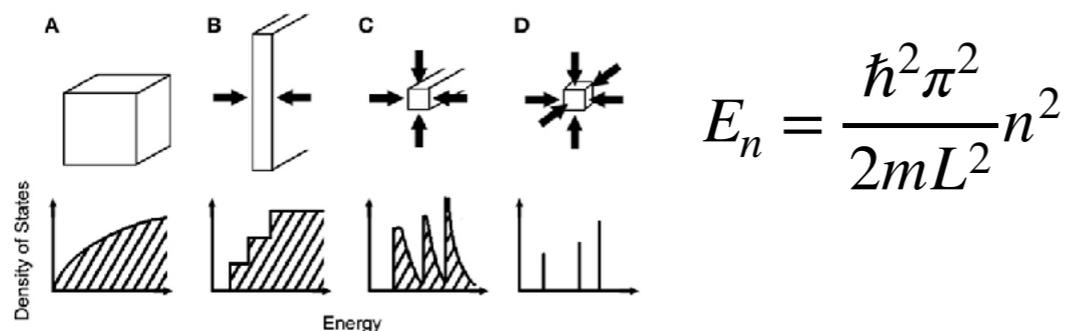
Axion-like particleを介したmonopole-dipole相互作用は電子に実効的に磁場として作用
 → Solid-stateセンサーとしての局所性 + 原子系センサーとしての磁場感度を利用して検出

トピック2: 量子ドット



Chemistry 2023

"for the discovery and synthesis of quantum dots"

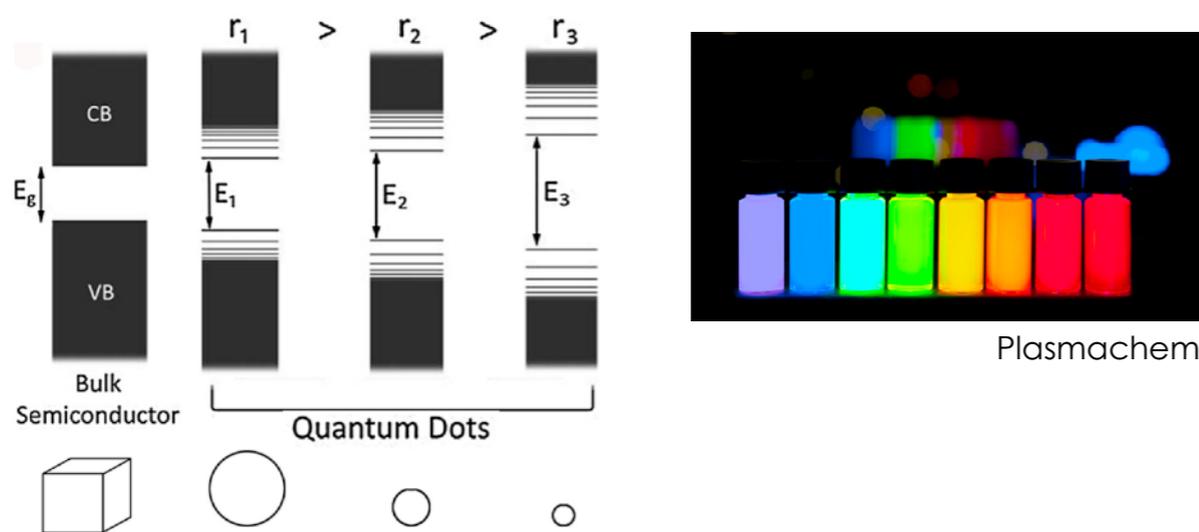


Particles-in-a-box: 準位の離散化



半導体ナノ結晶

→ バンドギャップがドットの大きさに依存



Dong et al., Front. Mat., 2, 13 (2015)

主に光学的・電子的な性質にアドバンテージ

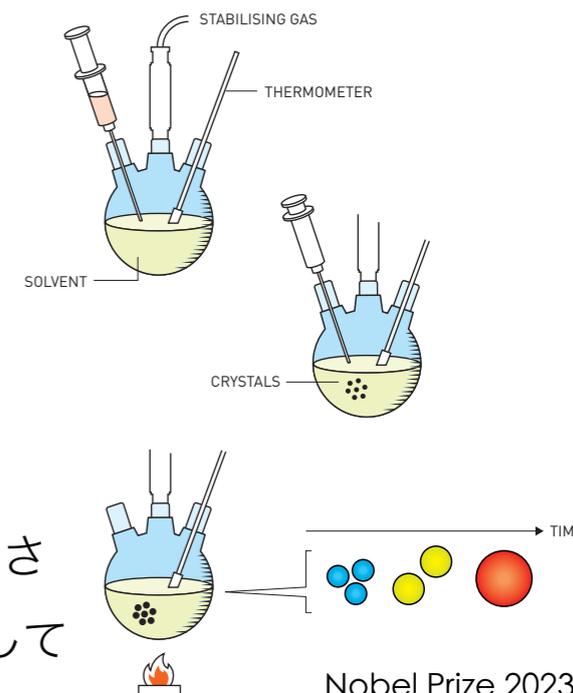
- バンドギャップ (放射光色) の選択性
- 高い紫外吸収特性 + 量子効率 → 明るい蛍光

主な種類

- Si
- PbSe, PbS
- CdSe, CdS
- InP, InAs
- HgTe
- CsPbX₃ (Perovskite)

合成法

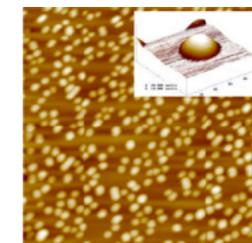
- コロイド (標準的) : 高温の有機溶媒中に常温の QD 物質を注入。均一な大きさの結晶核が生成され、再加熱によって QD 粒子が生じる。温度と時間によって QD の大きさをコントロールできる。粉として得られる。



- Self-assembly :

半導体基板の上に格子定数が大きく異なる物質を堆積させる (GaAs 上に InAs など) と、自己組織化が起こる。

- プラズマ、生化学的、etc.



Northwestern University

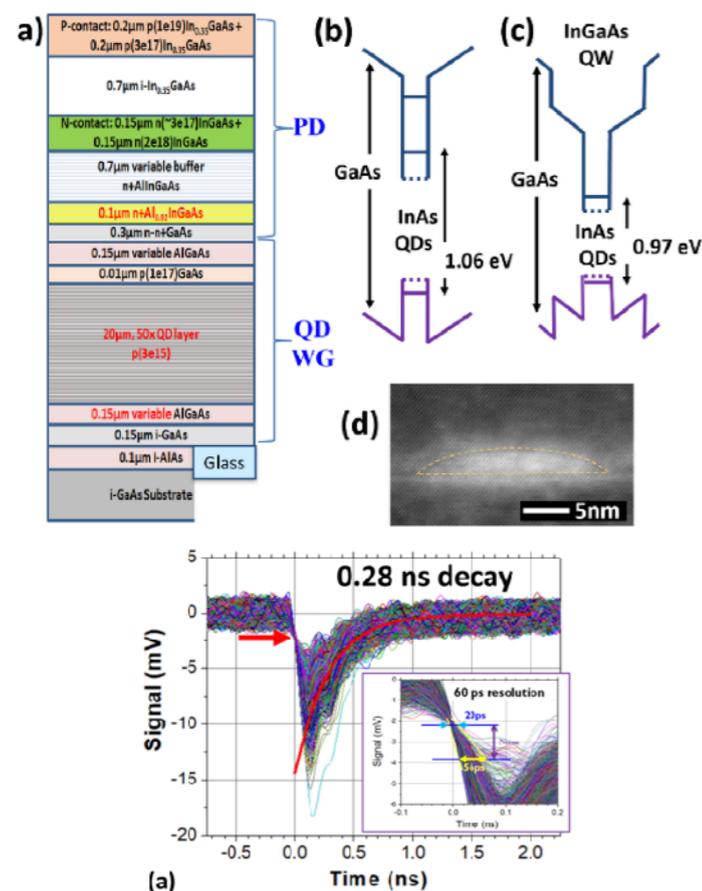
トピック2: 量子ドット

シンチレーター応用3例

共通項：高い蛍光効率

InAs QD in GaAs matrix

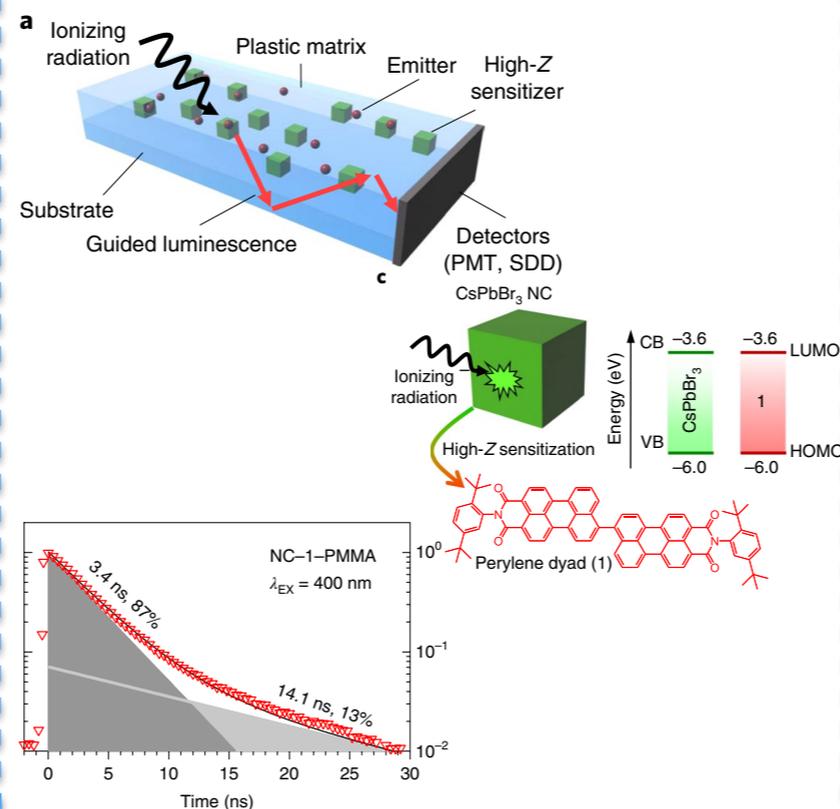
- GaAsをシンチレータに利用
→ 赤外で発光するが、遅い
- InAs QDの導入で電子捕捉が早くなり、光量が増える
- 時間分解能60ps



Dropiewski et al., Phys. Res. A
954, 161472 (2020)

Perovskite QD in plastic

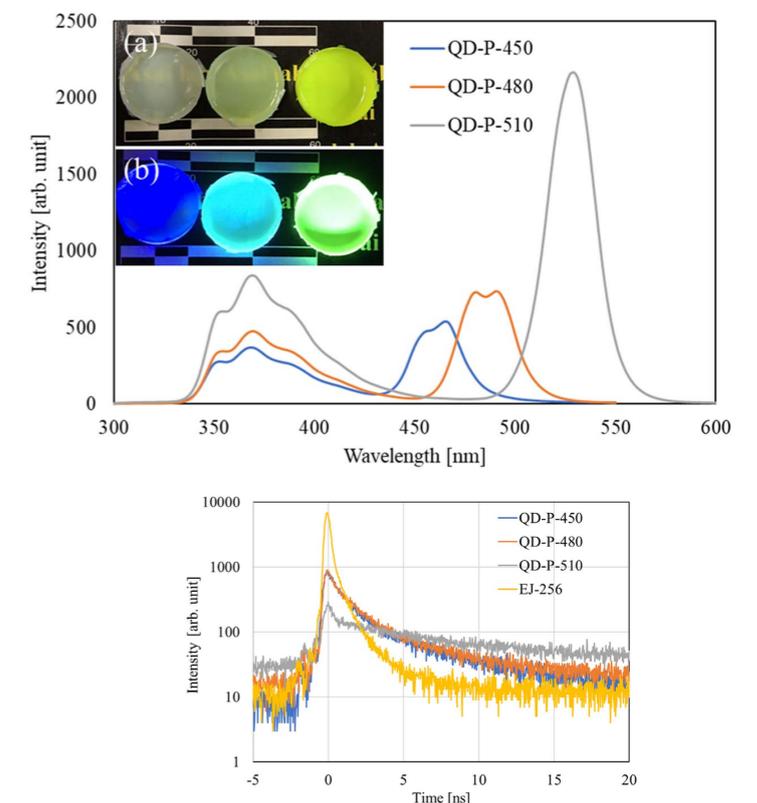
- プラスチックシンチレータにペロブスカイトQDを導入
→ Zが大きいので感度が上がる
- QDの蛍光（緑）を有機分子が吸収し、再放出（赤）
→ Reabsorption free



Gandini et al., Nat. Nanotechnol.
15, 462 (2020)

Perovskite QD in plastic

- 市販の有機シンチレータとQDを混ぜる
- 蛍光・吸収スペクトルが重ならないので、自己吸収が起こる
→ シンチレーション光の decay が長くなってしまった

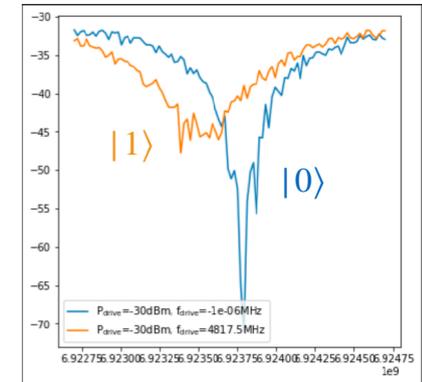


Magi et al., Jpn. J. Appl. Phys.
61, SB1036 (2022)

トピック3: 超伝導量子ビット

原理・ポイント

- 超伝導LC共振器のLがジョセフソン結合=非線形インダクタンス
 - 非調和振動子。量子化 ⇒ エネルギー準位が等間隔でない
 - $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle, |1\rangle \leftrightarrow |2\rangle, \dots$ 遷移を選択的に引き起こせる
 - **量子状態を操作しやすい**
- カップルしたもう一つの共振器（線形）を介した「分散読み出し」（共鳴周波数が量子ビットのエネルギー状態に依存）
 - **非破壊読み出し**

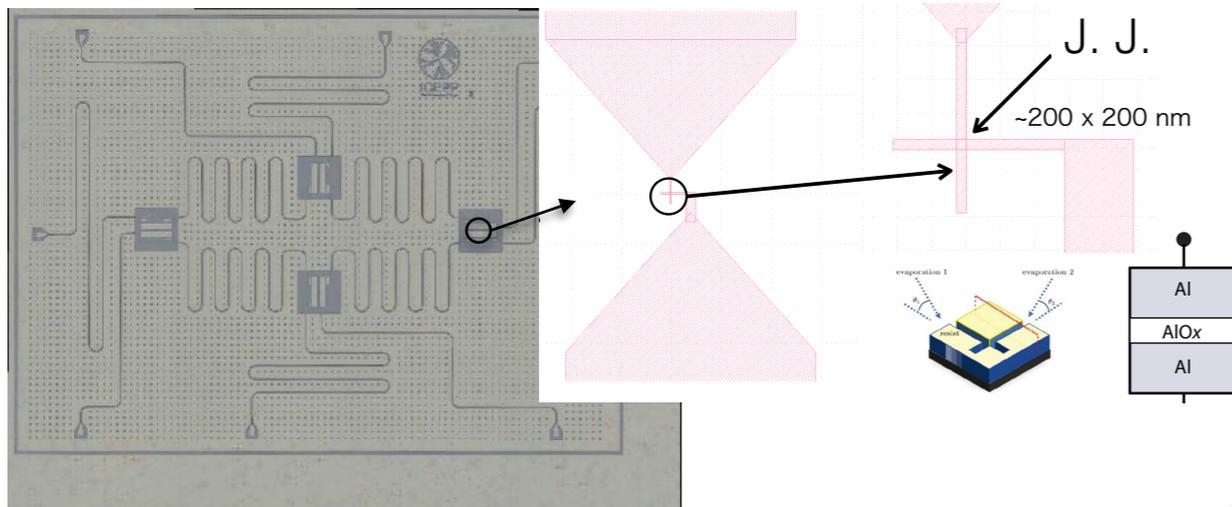


$\omega_{01} = E_1 - E_0$ (O(1) GHz) で電圧をかけると
 $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ ラビ振動 (~MHz)

理想的な射影に近く、繰り返し測定可能

実装

半導体チップ上にアルミなどを蒸着
 希釈冷凍機で~10mKまで冷却



コヒーレンス時間

- T_1 (relaxation time):
 $|1\rangle$ から $|0\rangle$ に脱励起する時定数
 → 商用量子コンピュータ用量子ビットで $\geq 400\mu\text{s}$
- T_2 (dephasing time):
 Bloch球赤道上の状態が赤道面への射影を失う時定数
 ⇔ 密度行列の非対角成分が消滅する時定数
 → 同じく商用量子ビットで $\geq 300\mu\text{s}$

量子コンピュータ開発に伴い、コヒーレンス時間の向上と多ビット化が急速に進展している

トピック3: 超伝導量子ビット

Photon counterとして

Dixit et al., Phys. Rev. Lett. 126, 141302 (2021)

量子ビットと共振器のシステム (J-C Hamiltonian)

$$H = \omega_r \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \omega_q \sigma^z + g(a^\dagger \sigma^- + a \sigma^+)$$

ω_r, ω_q : 共振器と量子ビットの固有振動数

a, a^\dagger : 共振器中の光子の生成消滅演算子

σ^z, σ^\pm : 量子ビットのスピン及び昇降演算子

↓ $\Delta := \omega_q - \omega_r$ として

dispersive regime: $g/|\Delta| \ll 1$

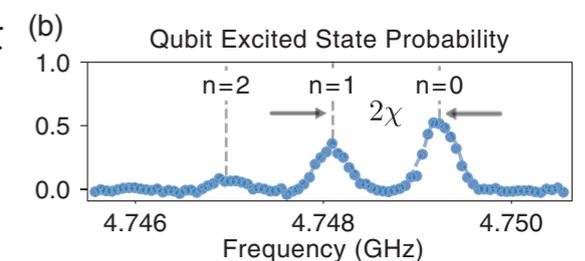
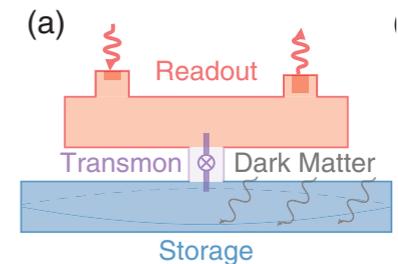
$$H \sim \omega_r a^\dagger a + \frac{1}{2} \omega_q \sigma^z + \frac{g^2}{\Delta} a^\dagger a \sigma^z$$

解釈:

- 共振器の振動数が量子ビットの状態に依存
→ 量子ビットの読み出しに利用
- 量子ビットの振動数が共振器中の光子数に依存
→ 量子ビットをphoton counterに使える

Transmon (量子ビット) が2つの共振器 (ReadoutとStorage) とカップル

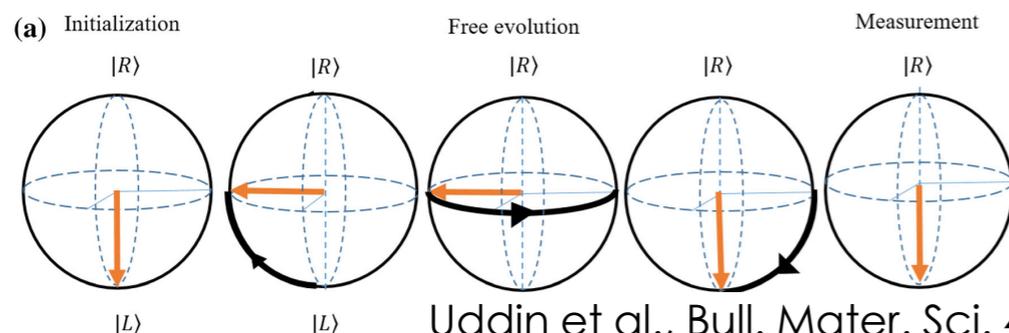
→ Storageの光子数でTransmonの状態を変え、Readoutの振動数として読み出す



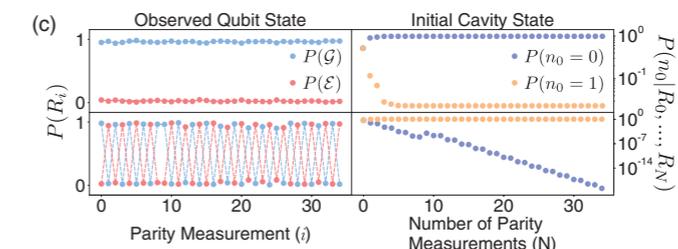
光子数→量子ビットの状態: Ramsey interferometry

Bloch球赤道上に置かれた状態の回転の速さが量子ビットの振動数で決まる

→ 回転時間の調整で光子数の偶奇↔終状態の $|0\rangle/|1\rangle$ となる



Uddin et al., Bull. Mater. Sci. 45 46



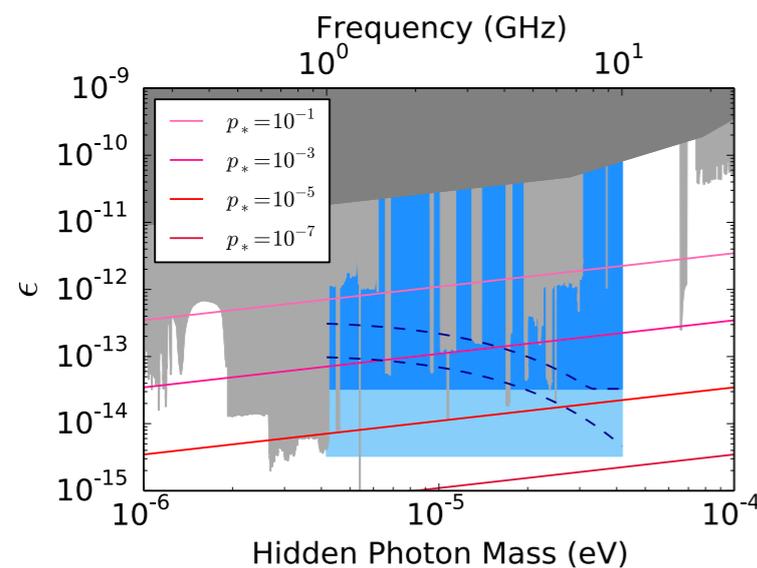
さらに分散読み出しが非破壊測定であることを利用し、測定を繰り返すことで精度を上げている

トピック3: 超伝導量子ビット

その他の用途アイディア

Dark photonアンテナ

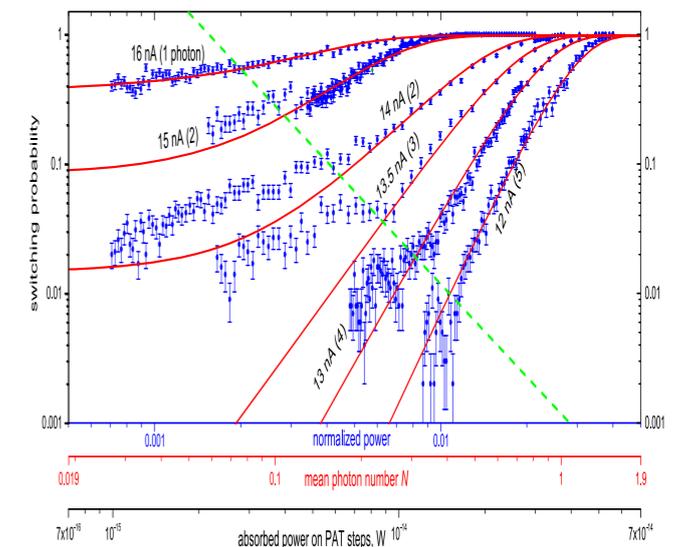
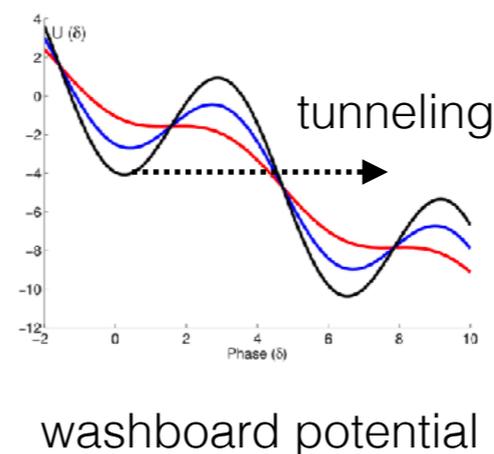
- 質量 μeV スケールのHidden photon dark matterは $O(1-10)$ GHzで振動する古典場のように振る舞う
- 光子とのkinetic mixingによって同じ周波数の電磁波を生じる
- 量子ビットの ω_{01} と共鳴すれば、 $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ 遷移を誘引する
→ $|0\rangle$ に初期化した量子ビットの一定時間後の測定で $|1\rangle$ が得られる確率からmixingパラメータと暗黒物質密度の積を算出できる



Chen et al., 2212.03884

Single-photon counter

- Phase qubit: JJにバイアス電流 I_b をかけると、Josephson equation $I = I_0 \sin \delta$ に従ってジャンクションの位相差 δ がwashboard potential (下図) の元で運動する粒子のように振る舞う
→ ポテンシャル極小近傍に留まる
- 光子を吸収すると極小から抜け出し、一気にポテンシャルを駆け下りて常電導状態に遷移する
- Transition-edge sensorのように単一光子検出に使い、マイクロ波領域で感度を持つ

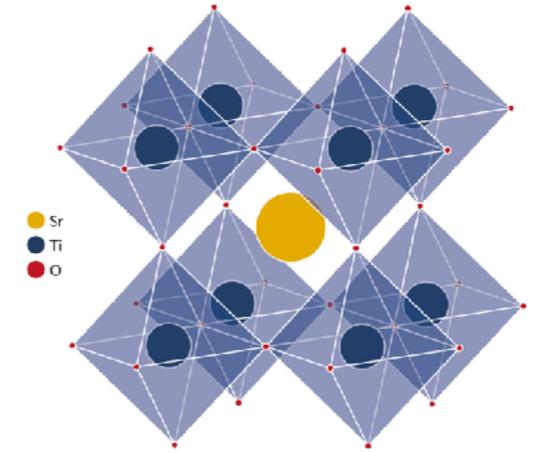


Pankratov et al., npj Quant. Info. 8, 61 (2022)

トピック4: ペロブスカイト半導体

ポイント

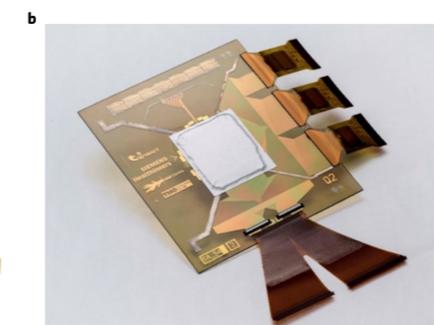
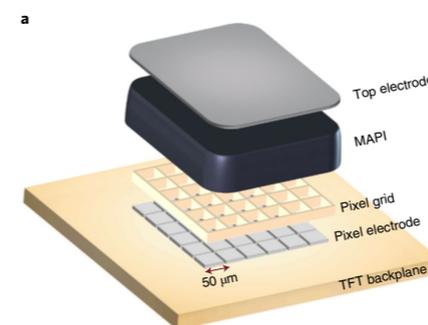
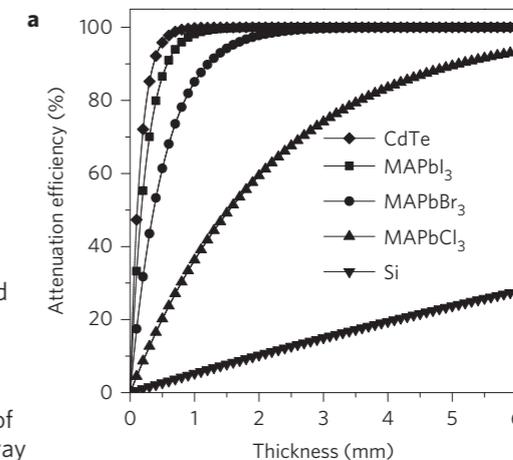
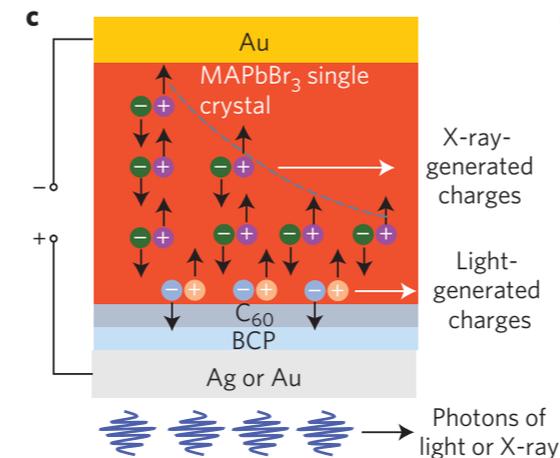
- もともと天然ペロブスカイト = CaTiO_3
- 現在は ABX_3 構造を持つ結晶の総称
- A, B, Xによって様々な性質を発揮
- 高効率・安価なペロブスカイト太陽電池の発見 (2009)
 - 太陽光スペクトルでの発電に適したバンドギャップ ($\sim 1.5\text{eV}$)
 - GaAs (1.4eV) より遥かに安価
- 一般に、バンドギャップを調整できる・安価である、加工しやすいなどの点がアドバンテージ



高質量半導体のX線検出器

- $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbX}_3$ (X=I, Brなどハロゲン)
 - PbとXのZが大きく、X線の吸収効率が高い
 - 半導体として電荷回収効率が高い
 - 安価、加工しやすい
- 高感度・大面積なX線検出器に
- 医療用に注目されているが、HEPでも応用可能か
 - γ 線や荷電粒子の検出への応用検証が進行中

Wei et al., Nat. Photon. 10, 333 (2016)
Deumel et al., Nat. Electron. 4, 681 (2021)



2次元ピクセル型も

トピック5: ピコ秒タイミング測定

“Timing revolution”:

コライダー用検出器での「第四次元」活用の本格化

$$\delta t = 100 \text{ ps} \quad (c\delta t = 3 \text{ cm})$$

- トラックでパイルアップ識別
同一バンチ交差中バーテックスの時間広がりを利用

$$\delta t = 10 \text{ ps} \quad (c\delta t = 3 \text{ mm})$$

- カロリメータで荷電粒子と中性粒子の分離
- ToFで $\pi / K / p$ の分離 (up to 5-10 GeV/c)

$$\delta t = 1 \text{ ps} \quad (c\delta t = 0.3 \text{ mm})$$

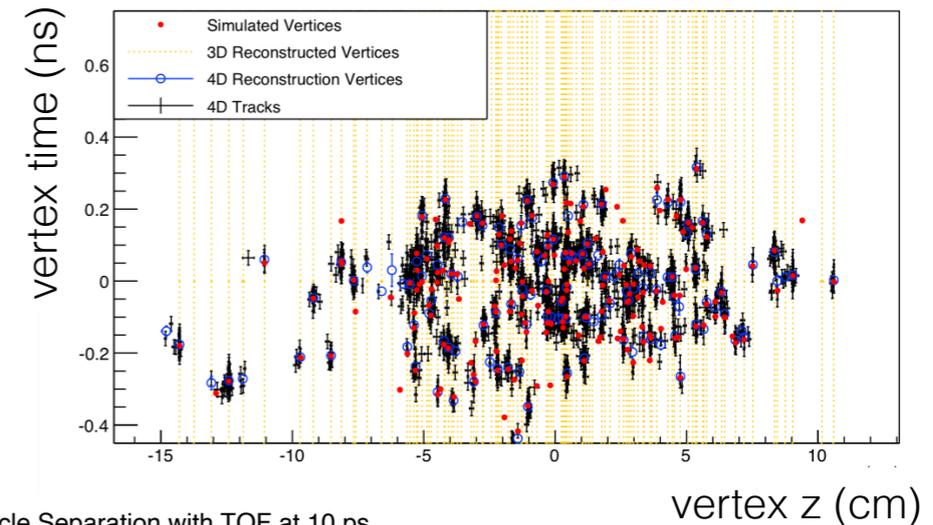
- b / c ジェット中の中性粒子識別

高時間分解能センサー (荷電粒子)

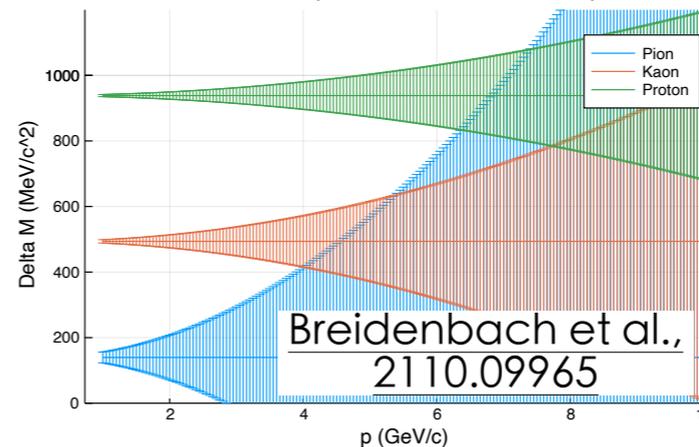
検出技術	δt 実証値
シリコン	$\geq 10 \text{ ps}$
シンチ (LYSO, plastic) +シリコン光検出器	$\geq 10 \text{ ps}$
ガス検出器 (Micromegas)	$< 100 \text{ ps}$
マイクロ波チェレンコフ	$< 1 \text{ ps}$ (sim. only)

Chekhanov et al. Snowmass 21

CMS Collaboration, CMS-TDR-020 (2019)



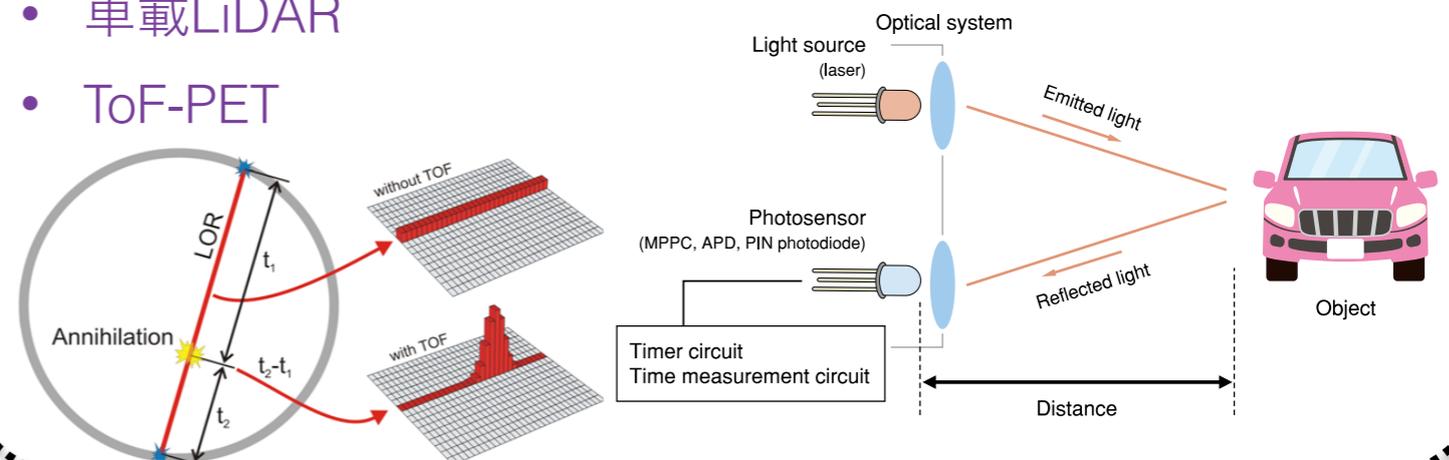
Particle Separation with TOF at 10 ps



Schwartzman, LCWS 2023

特に $\delta t = 10 \text{ ps}$ は他分野でも重要 (光センサー)

- 車載LiDAR
- ToF-PET



トピック5: ピコ秒タイミング測定

電荷増幅シリコンセンサー

原理

シリコンセンサーのタイミング測定：

- 荷電粒子が欠乏層中で電子・ホール対を生成（連続分布）
- 電荷は一定速度で電極へ移動 → 時間広がりを持った電流信号
- 信号のピーク／立ち上がりなどで粒子の通過時刻を決定

時間分解能 $\sigma_t = \sigma_s \oplus \sigma_n$

電荷量のランダウゆらぎ + 電場の不均一性

電荷の移動時間の >1 乗でスケール

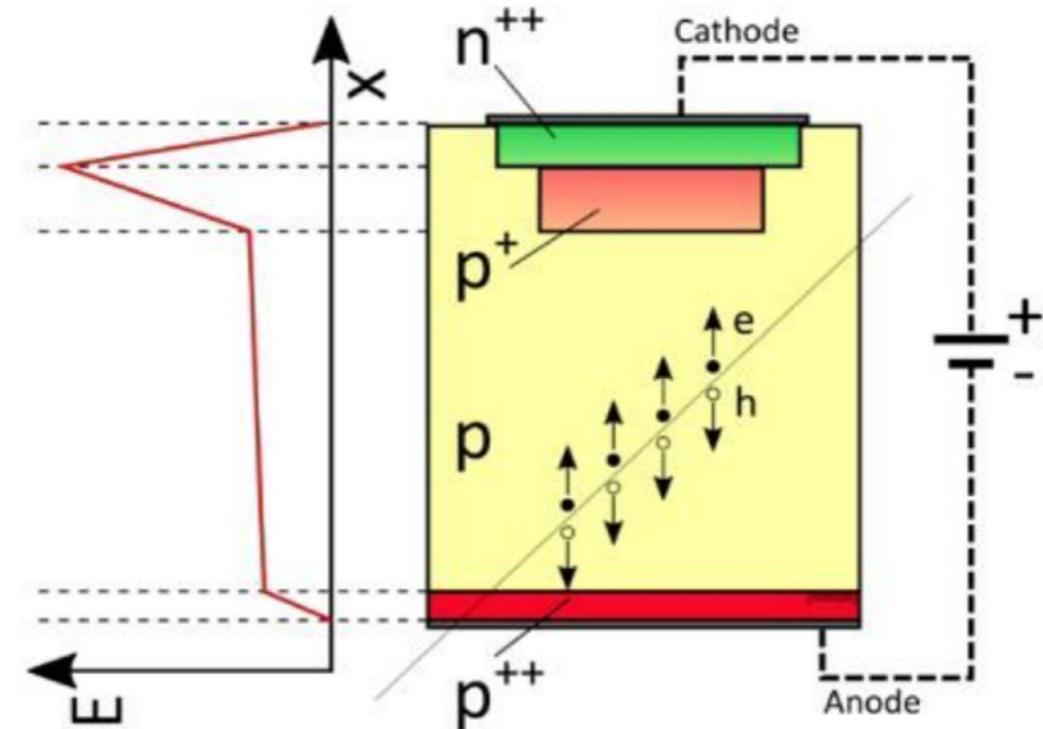
→ 薄く広いセンサーがよい

アンプのノイズ

S/N比に反比例

→ 電荷量が多いとよい

LGAD模式図



Currás et al., NIMA 1031, 166530 (2022)

Low-gain avalanche diode (LGAD)

- 薄い欠乏層とカソードの間に強電場領域
→ 電子雪崩の発生、電荷が比例増幅
- ゲインはO(10)程度
- Avalanche photodiode (APD) とほぼ同原理
 - ただしAPDは欠乏層厚い&ゲイン高い

Single-photon avalanche diode (SPAD)

- ガイガーモード ($V_{\text{bias}} > V_{\text{breakdown}}$) APD
→ 比例増幅ではないので単一光子検出向け
- $\delta t = O(10)$ psの光検出器

↓ アレイ化してフォトンカウンターに

Silicon photomultiplier (SiPM)

トピック6: 量子計算

概要

広義：量子系を特定の状態に初期化し、操作を施して得られる状態を計算に利用

→ 量子回路型、測定型、アニーリングなど多くの方式が存在

→ 超伝導共振回路、イオントラップ、中性原子、光学系、ダイヤモンドNVCなどで実装

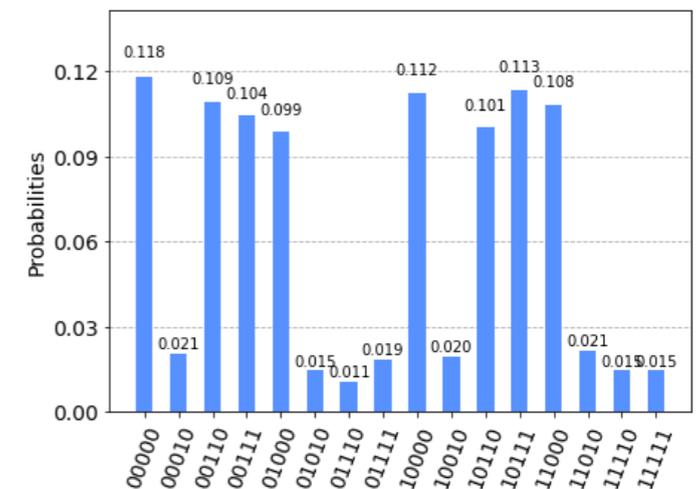
主流は量子回路型。超伝導共振回路量子ビットの開発に多くの資源が集中

- ゲートの実行時間が短い ($O(10)$ ns)
- コヒーレンス時間 ($O(100)$ μ s) はイオントラップなどより短い
- エラー訂正が実現すると、速いことが大きなアドバンテージに

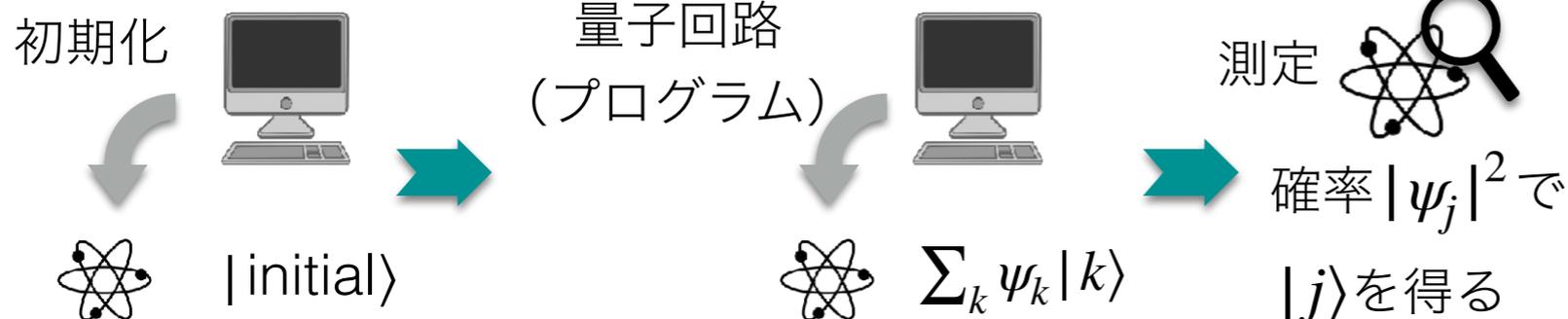
- 量子ビット (=2準位系) n 個の系 = 量子 2^n 次元系
- → $\text{Poly}(n)$ の操作 (ゲート) を使って、 2^n 次元の変数空間を利用
- → 特定の演算が (古典) 計算機より「指数関数的に」早くなる

$$\text{例：離散フーリエ変換 } \{c_j\}_{j=0}^{N-1} \rightarrow d_k = \sum_{j=0}^{N-1} e^{2\pi ijk/N} c_j$$

演算回数 = 古典 $O(N \log N)$ 、量子 $O((\log N)^2)$



計算原理



j のヒストグラムから
計算結果を読み取る

×多数回繰り返し

トピック6: 量子計算

キーワード・展望

物理研究で何に使えるか？

i.e. **量子超越** (対応する古典計算より指数関数的に早くなる) のあるアプリケーションは？

既知のアプリケーション：

- 素因数分解 ← フーリエ変換の応用
- 量子系のダイナミクスシミュレーション
- 勾配降下によらない最適化 (主にアニーリングマシン)

量子系の状態を量子ビットの状態にマップし、ハミルトニアンをゲートで表現する

有用可能性 (未証明)：

- 機械学習 (データ点の超多次元空間への埋め込み → 相関の検知)

エラーと展望

ゲート操作や読み出しが可能 = 必然的に外部からノイズあり

⇒ エラーをリアルタイムで訂正しながら量子回路を実行する必要

現在：Noisy, intermediate-scale quantum (NISQ) systems → エラー訂正未実装

エラー訂正の実現には

- 多数の高品質量子ビット
- 高速読み出し
- 高速フィードバック

など多数のマイルストーンがある

各社・研究所がそれぞれの技術で2020年代中のエラー訂正実現を目標に開発を進める

- 超伝導 → 量子ビットのコヒーレンス・エラー率がネック
- イオントラップ・中性原子 → スピードがネック

小規模なエラー訂正は実証済み

トピック7: 機械学習

原理

確率分布 $p(x)$ から無作為に抽出されたサンプル $x_i \in \mathbb{R}^d$ をもとに、 $p(x)$ の近似 $\tilde{p}(x)$ を得る

- 分布推定: $p(x)$ そのもの
 - 未知データの識別: $p(x_1)/p(x_2)$ ニューラルネットワークなど
 - 疑似データの生成: $p(x)$ からのサンプリング バックプロパゲーション+勾配降下法など
- $\tilde{p}(x)$ はパラメトライズされた関数 (モデル)。サンプルデータにフィットする (訓練)。

過去10年の最も大きなブレイクスルー
→ HEPでも大いに注目・利用拡大

CompF3: Machine Learning

Phiala Shanahan, Kazuhiro Terao, Daniel Whiteson (Editors)

Including contributions from White Paper authors:

Gert Aarts^{1,2}, Andreas Adelmann³, N. Akchurin⁴, Andrei Alexandru^{5,6}, Oz Amram⁷, Anders Andreassen⁸, Artur Aprisyian⁹, Camille Avestruz¹⁰, Rainer Bartoldus¹¹, Keith Bechtel¹², Kees Benkenfelder^{13,14}, Gabriele Bellini¹⁵, Catrin Bernius¹⁶, Alexander Bogatskiy¹⁷, Blaz Borlato¹⁸, Denis Boyda^{17,18}, Gustaaf Brooijmans¹⁹, Paolo Calafura¹³, Salvatore Caligiò^{20,21}, Florencia Canelli²¹, Grigoris Chachamis²², S.V. Chekanov¹⁷, Deming Chen²³, Thomas Y. Chen⁴⁰, Aleksandra Czirjanovic², Jack H. Collins¹¹, Andrew J. Connolly²⁴, Michael Coughlin²⁵, Biwei Dai²⁶, J. Damgov⁴, Gage DeZoor²⁷, Daniel Diaz²⁸, Barry M. Dillon^{16,29}, Ioan-Mihail Dinu⁷, Zhongzhan Dong³⁰, Julien Donini³¹, Javier Duarte²⁸, S. Dugad³², Cora Dvorkin³³, D. A. Faroughy²¹, Matthew Feickert²⁸, Yongbin Feng³, Michael Fenton³⁸, Sam Foreman¹⁷, Felipe E. De Freitas³⁴, Lena Funcke^{20,18,35}, P. G. C³, Abhijith Gandrakota³, Sanmay Ganguly³⁶, Lehman H. Garrison¹⁵, Spencer Gessner¹¹, Aishik Ghosh³⁸, Julia Gonsk¹⁹, Matthew Graham³⁷, Lindsey Gray³, S. Gronroos³⁸, Daniel C. Hacken^{31,19}, Philip Harris³⁹, Scott Hauck³⁴, Christian Herwig⁷, Burt Holzman⁴, Walter Hopkins¹⁷, Shih-Chieh Hsu²⁴, Jin Huang³⁸, Yi Huang³⁸, Xiao-Nong Jin¹⁷, Michael Kagan¹¹, Alan Kahn¹⁹, Jernej F. Kamenik^{16,39}, Raghav Kansal²⁹, Georgia Karagiannis⁴⁰, Gregor Kasieczka⁴¹, Erik Katsavounidis²⁰, Elham E. Khodja³⁴, Charanjit K. Khosa^{42,43}, Thomas Kip⁴⁴, Patrick Komiske²⁰, Matthias Komm³⁷, Risi Kondor⁴⁵, Evangelos Kourlitis¹⁷, Claudius Krause⁴⁶, K. Lamichhane⁴, Luc Le Pottier^{13,10}, Meifeng Liu³⁸, Yin Liu^{20,18}, Mia Liu⁴⁷, Nan Lu⁴⁸, Biagio Lucini^{49,1}, J. Martinez⁴, Pablo Martín-Ramiro^{13,50}, Andrej Matevc^{16,39}, William Patrick McCormack²⁰, Eric Metodiev²⁰, Vinicius Mikun²¹, David W. Miller⁴⁵, Siddharth Mishra-Sharma^{33,18,6}, Samadrita Mukherjee³², Daniel Murnane¹³, Benjamin Nachman^{13,51}, Gautham Narayan²³, Mark Neubauer²⁹, Jennifer Ngadiuba⁹, Scarlet Norberg⁶⁰, Brian Nord^{9,4}, Inés Ochoa⁵², Jan T. Offermann⁴⁵, Sang Eon Park⁴⁰, Kevin Pedro⁹, Cristian Peña⁹, Aless Perloff⁵¹, Mariel Petree¹³, Maurizio Pierini²⁷, T. Quast²⁷, Dylan Rankin²⁰, Yihui Ren³⁸, Marcel Rieger²⁷, Jean-Roch Vlimant⁴⁶, Avik Roy⁴³, Veronica Sanz^{42,53}, Nilai Sarda⁴⁰, Claire Savard⁴¹, Alexander Scheinker⁵⁴, Uros Seljak^{13,51,26}, Brian Sheldor²⁶, David Shih⁴⁶, Chase Shimmick⁵⁵, Aleks Smolkovic⁵, George Sten^{13,26}, Cristina Mantilla Suarez⁵, Manuel Szwec⁴⁶, Savannah Thain²⁷, Jesse Thaler²⁰, Dmitrii Tereshchenko⁴, Nhan Tran⁵⁶, Steven Tsun⁵⁷, Silvia-Marian Udrescu⁵⁸, S. Uedels⁵⁹, Louis Vahle⁴¹, Francisco Villaseca-Navarro^{13,27}, W. Ashley Villar²⁷, Brent Viren³⁸, Jean-Roch Vlimant⁴⁶, A. Whitbeck⁴, Daniel Williams¹⁹, Daniel Winklehner²⁰, Si Xie⁴⁸, Tingjun Yang⁶, Haiwang Yu³⁸, and Mikael Yumuk²⁰

Modern Machine Learning



Modern Machine Learning will enable us to extract much more **physics** from data than ever before



Snowmass 2021

JAHEPコミュニティアンケート (2023年3月) の結果

現在の実験で、MLで改善できそうな局面は？

- 大気や気象変化などの影響の抑制
- 飛跡・イベントetc再構成
- 系統誤差の見積もり
- 統合解析 (global fit)
- 実験の異常検知、制御、安定化
- 実験装置のデザイン、最適パラメータ探索
- 自動翻訳、資料作成

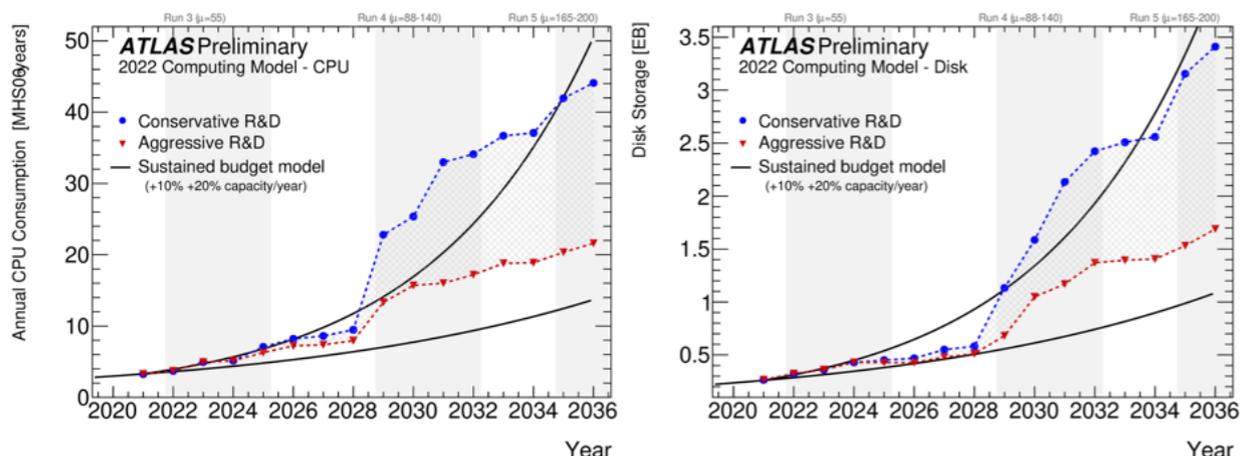
導入への障壁は？

- (教師) データが準備できない
- 新たなプロジェクトに着手する余裕 (人手) がない
- ブラックボックス化・誤差の不明確さへの懸念

トピック8: 計算機

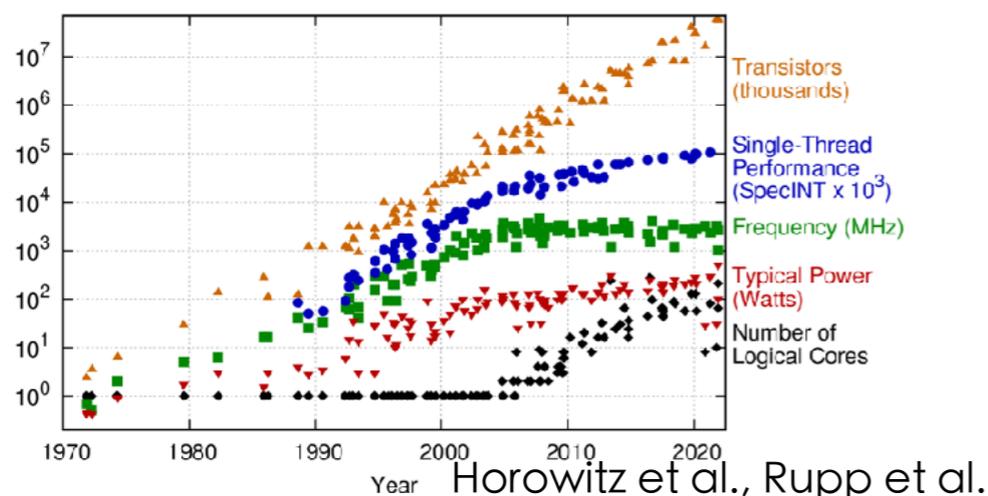
HEPの現状・展望

- 現行の計算機利用法をHL-LHCなど次世代実験のデータ量に外挿 → 計算資源不足と予測
- CPU計算性能&ディスク容量単価は下げ止まり
- 機械学習の利用が広がり、さらに逼迫する可能性



業界のトレンド

- 回路集積度は向上、1コアあたりの速度は横ばい
→ メニーコア化、コプロセッサ利用拡大



異種計算機の活用



資源共有化

複数の実験/分野/機関で共通の計算機インフラを利用

- 利用効率の改善、運用コストの削減
- 実験データの共有や長期保存 → オープンサイエンス

例 ESCAPE (EU) NII RDC (JP) mdx (JP)



トピック8: 計算機

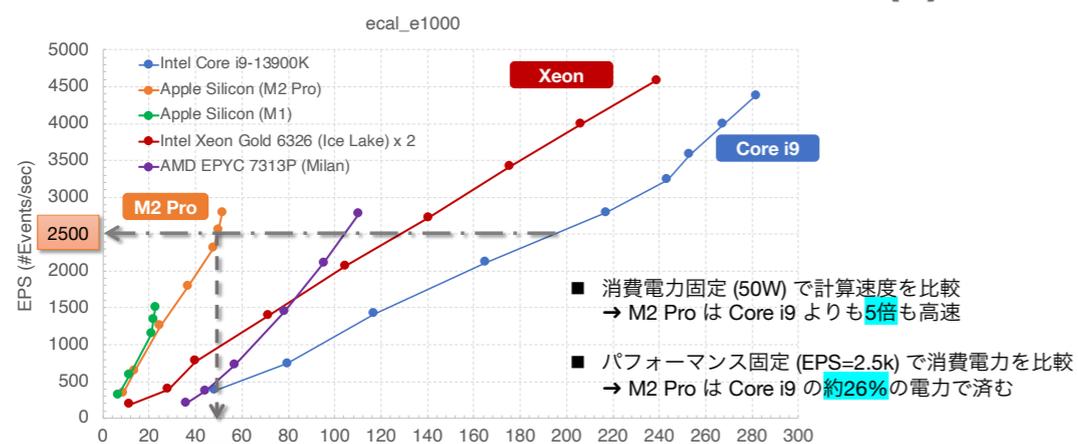
異種計算資源

ARM

- IntelなどのCPUと異なる命令セットアーキテクチャ
- 低コスト、省電力



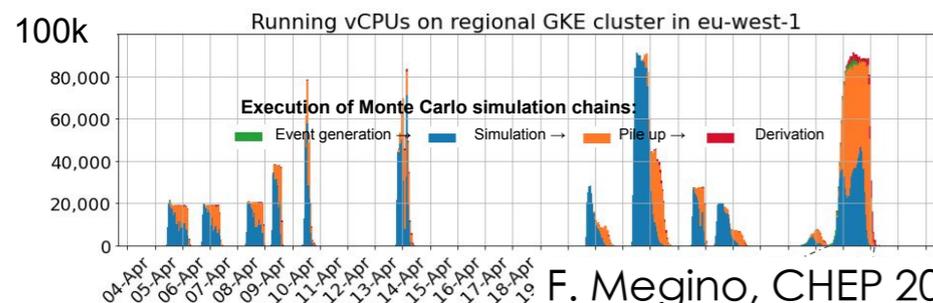
Geant4によるCPUの電力性能評価 (2)



S. Okada, 計算機ワークショップ2023

クラウド

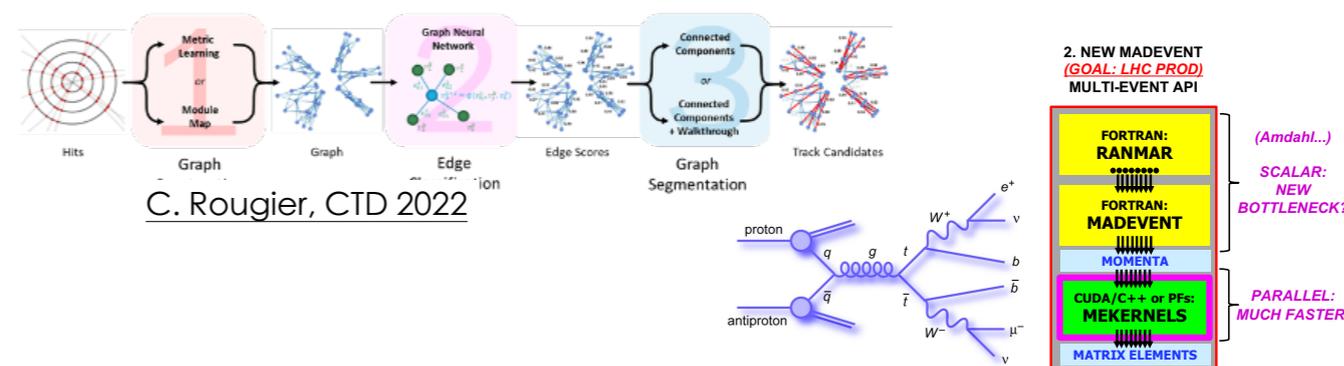
- 使いたいときに使いたい分だけ使える
- 運用コストが省ける
- 実際のコスト見積もり・計算は複雑



F. Megino, CHEP 2023

GPU

- 単純な計算を多数並列に実行する
→ 配列の全要素に同じ演算を施す場合などに有効
- 深層学習以外の応用も広がっている
 - トラッキング、シミュレーションなど

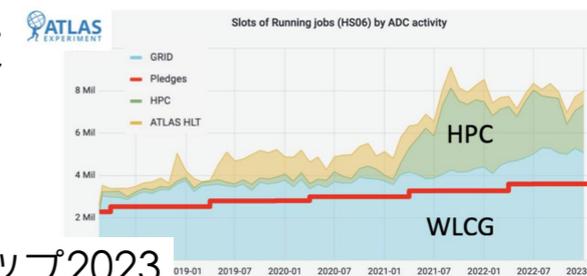


C. Rougier, CTD 2022

S. Hageboeck, CHEP 2023

HPC

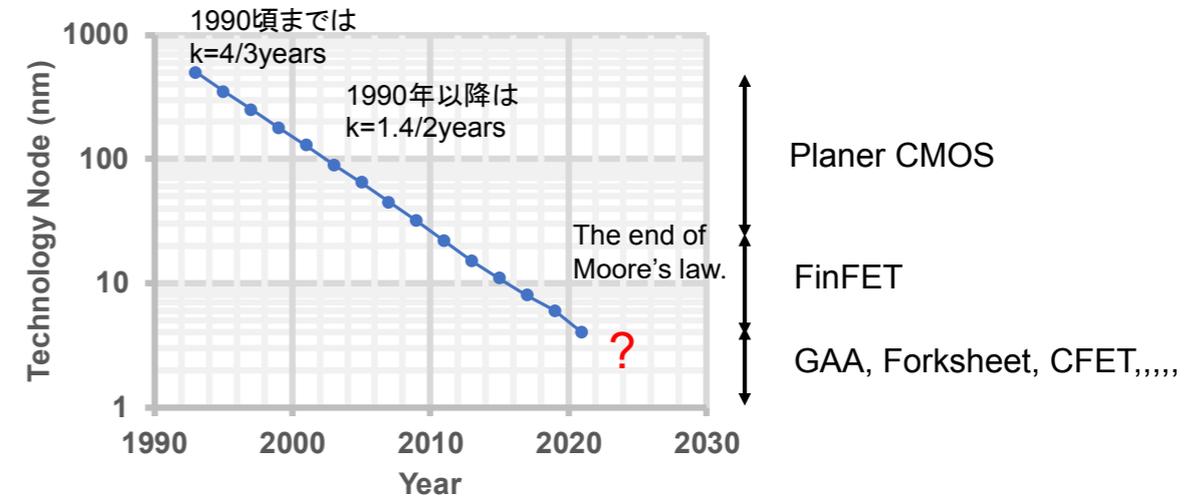
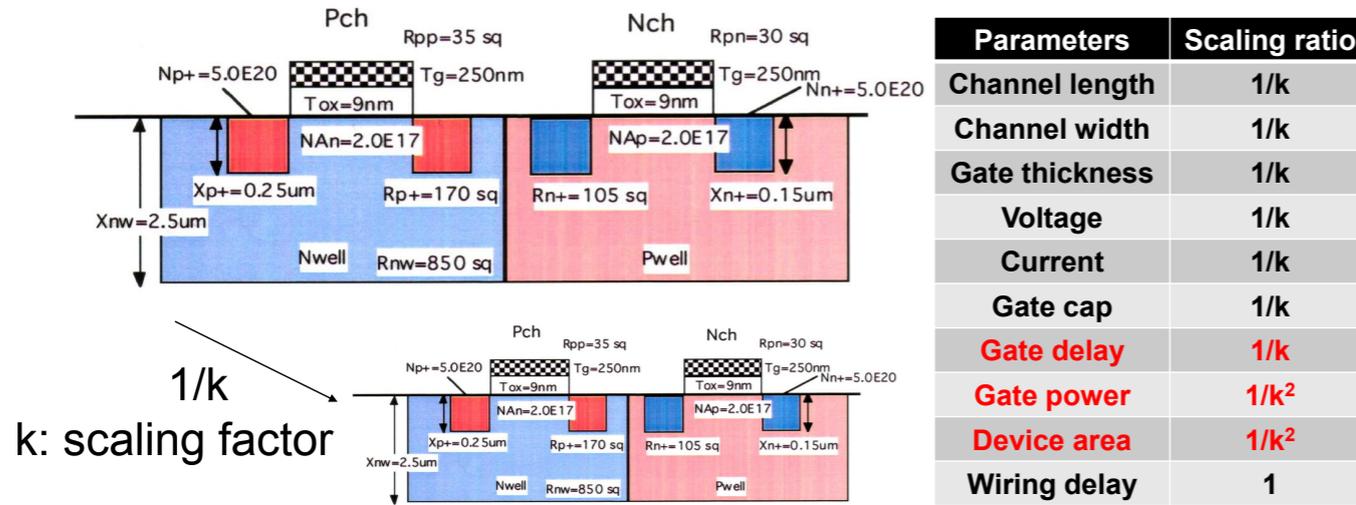
- 多数の計算ノード（サーバー）を繋げて構成
→ 小規模の計算を多数こなすこともできる
- 各国で大規模投資 → 科学研究利用が促されている
- LHC実験などでも実際に利用が拡大



A. Filipcic, 計算機ワークショップ2023

トピック9: 集積回路 テクノロジースケールリング

スケールリング則・ムーアの法則



- 回路をより小さくすることで性能向上、消費電力削減、製造コスト低減を同時に達成できていた
- ムーアの法則＝面積あたりのトランジスタ数（集積度）が2年ごとに約2倍
→ かつてはkに対する法則。しかし線幅が原子サイズに達し、単純な微細化は続かなくなった
- 構造の工夫、材料変更などで集積化自体は今後も続く

Logic device roadmap and EUV lithography technology trend

Production timing	2020	2022	2024	2026	2028	2030
Technology node	5 nm	3 nm	2 nm	1.4 nm	1 nm	0.7 nm
Device trend	2 Fin	2~1 Fin	GAA NS	Forksheet	CFET	2 nd Gen. CFET
Minimum metal pattern pitch [nm]	28	22	20	18	16	12
EUV patterning technology	EUV MP	EUV MP	EUV MP	EUV MP High NA EUV	EUV MP High NA EUV MP	EUV MP High NA EUV MP
Resist	CAR	CAR+MOR	CAR+MOR	CAR+MOR	CAR+MOR	CAR+MOR

CAR: Chemically amplified resist, MOR: Metal oxide resist, MP: Multi-patterning

出典: MNC2021 発表資料 東京エレクトロン 永原氏

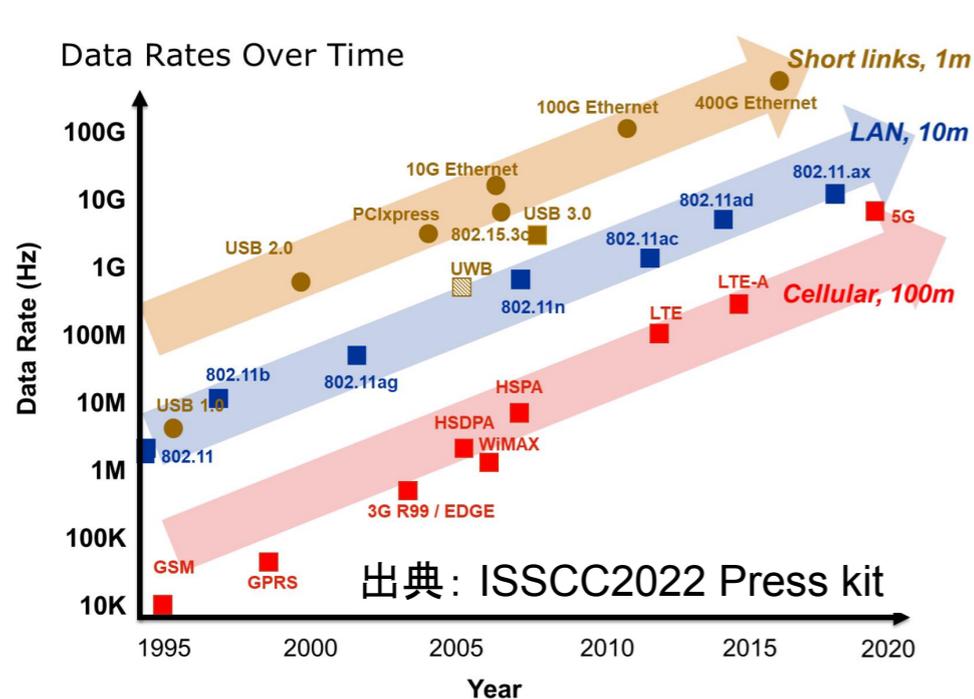
チップレット

- 集積度向上 → 面積あたり発生しうる製造上の問題増
→ 歩留まり悪化
- チップを機能で分割し、機能ごとに適切な集積度で製造し、集積化する＝「チップレット」
- 例: AMDのCPU歩留まり monolithic 4% → chipset 21%

トピック9: 集積回路

その他回路技術のトレンド

データ転送



データ転送（有線・無線）速度も指数スケーリング

- プロトコル（エンコーディング+エラー訂正）の改善
- 高度なプロトコルを両端でリアルタイム処理する演算能力の改善

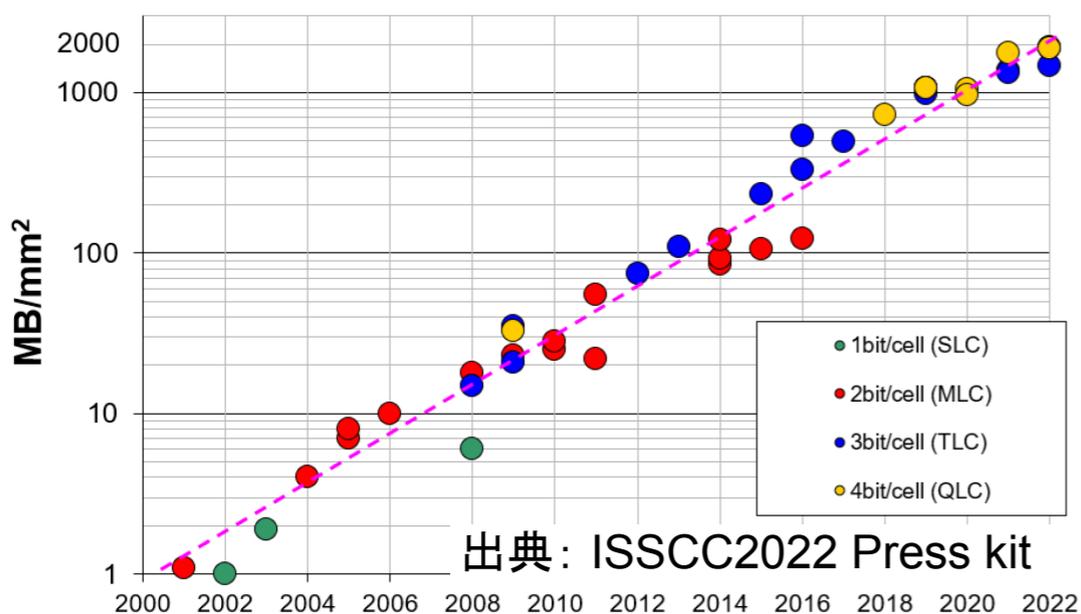
有線の伝送距離が長い場合は光通信

光↔電気コンバージョンの伝送速度や消費電力が課題

→ シリコンフォトニクス（基板上に導波路やマルチプレクサ）

無線でも1Tbit/s級の伝送速度達成に向けた研究が進行

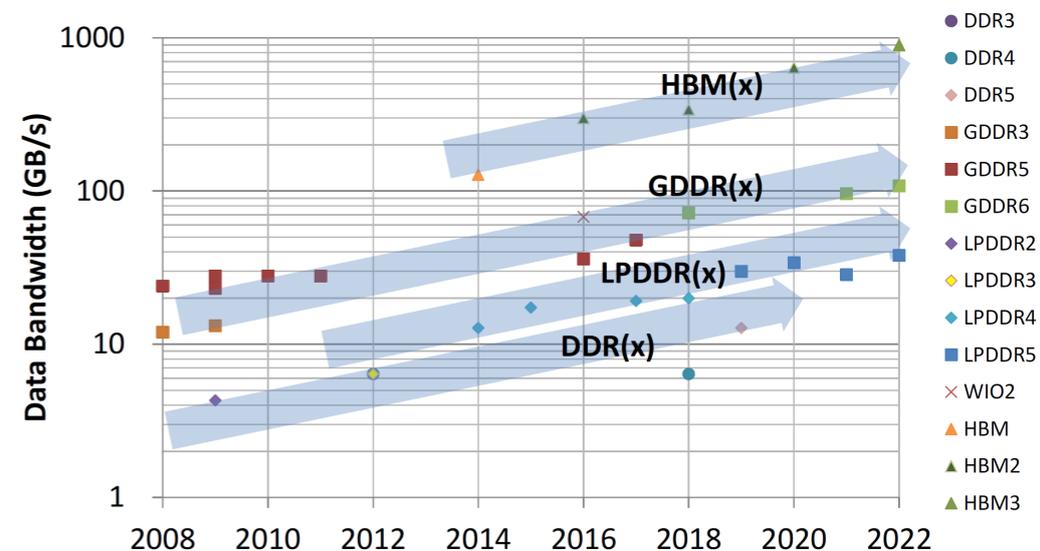
Flashメモリ



メモリ密度も指数スケーリング

- 微細化、積層化、素子多値化

DRAMメモリ帯域も



ECFA detector R&D roadmap

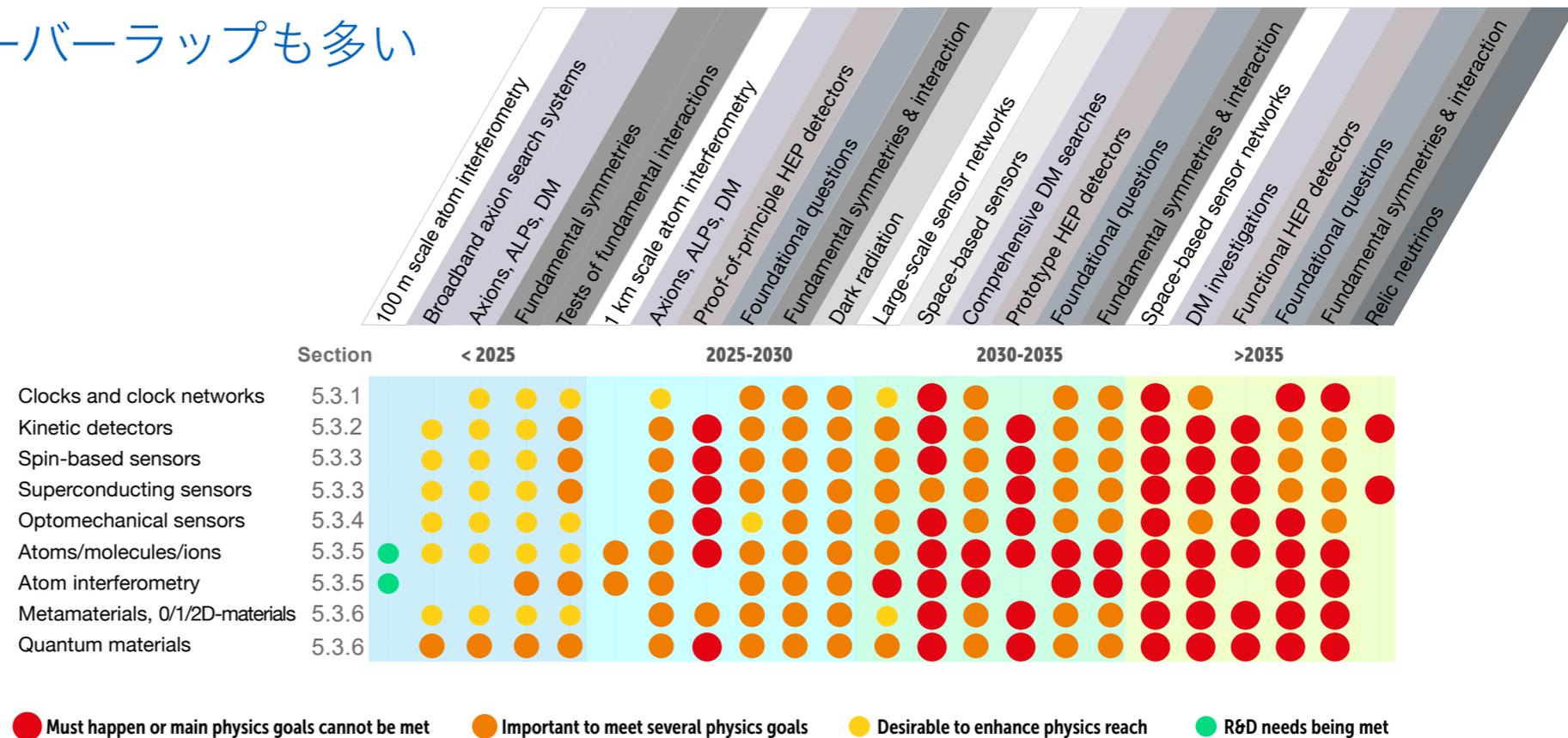
- European Strategy of Particle Physicsにしたがって、ECFAの下で検出器のR&Dのロードマップが策定されている
 - ガス/液体/半導体製検出器、光検出器、量子センサー、カロリメータなどカテゴリーにわけて既存&新興技術をサーベイ
- 現在はImplementation phase → トピックごとにDetector R&D Collaboration
 - 日本からも「半導体」「量子&新興技術」「カロリメータ」分野で参加
- ドキュメントのChapter 5 (Quantum & emerging technologies) を委員会でスタディした



ECFA 2021

- 原子時計
- スピン系センサー
- 超伝導センサー
- キャビティ
- オプトメカニクス
- 原子系センサー
- 低次元物性

委員会でレビューしたトピックと
オーバーラップも多い



国内の検出器開発リソース：KEK ITDC

今回取り上げた技術の多くはKEK測定器開発センター（ITDC）でも扱っている



まとめ・今後の展開

- 量子技術・新奇素材・機械学習・計算などのトレンドに結びついて様々な革新的技術が生まれている
- それらを素粒子実験に取り入れる動きも確実にある
 - ただし、新興技術は概して量産（大型実験）応用されていない
 - 小規模実験でノウハウを蓄積すれば将来的に量産化も可能か
 - HEPでの独創的な応用・技術発展を若手にアピールすべき
- 日本のHEPコミュニティがより広く新興技術に慣れ親しむには？
 - この資料でまとめたような内容を気軽に話し合える場を設ける（例：大学・研究機関毎、実験毎、コミュニティ内・外など）
 - 「新技術を組み合わせる新実験（の夢）を考案するハッカソン」の企画などを積極的に開催する

付録：技術レビュー担当者一覧

(敬称略・所属は2023年11月現在)

- 原子系量子センサー：三部勉 (KEK)
- 量子ドット：南條創 (大阪大学)
- 超電導量子ビット：新田龍海 (東京大学)
- ペロブスカイト半導体：山中隆志 (九州大学)
- タイミング測定：末原大幹 (東京大学)
- 量子計算：飯山悠太郎 (東京大学)
- 機械学習：中浜優 (KEK)
- 計算機：齊藤真彦 (東京大学)
- 集積回路：宮原正也 (KEK)