

革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)

情報ネットワーク社会を超える高度機能化社会の実現「人と社会を結ぶスマートコミュニティ」

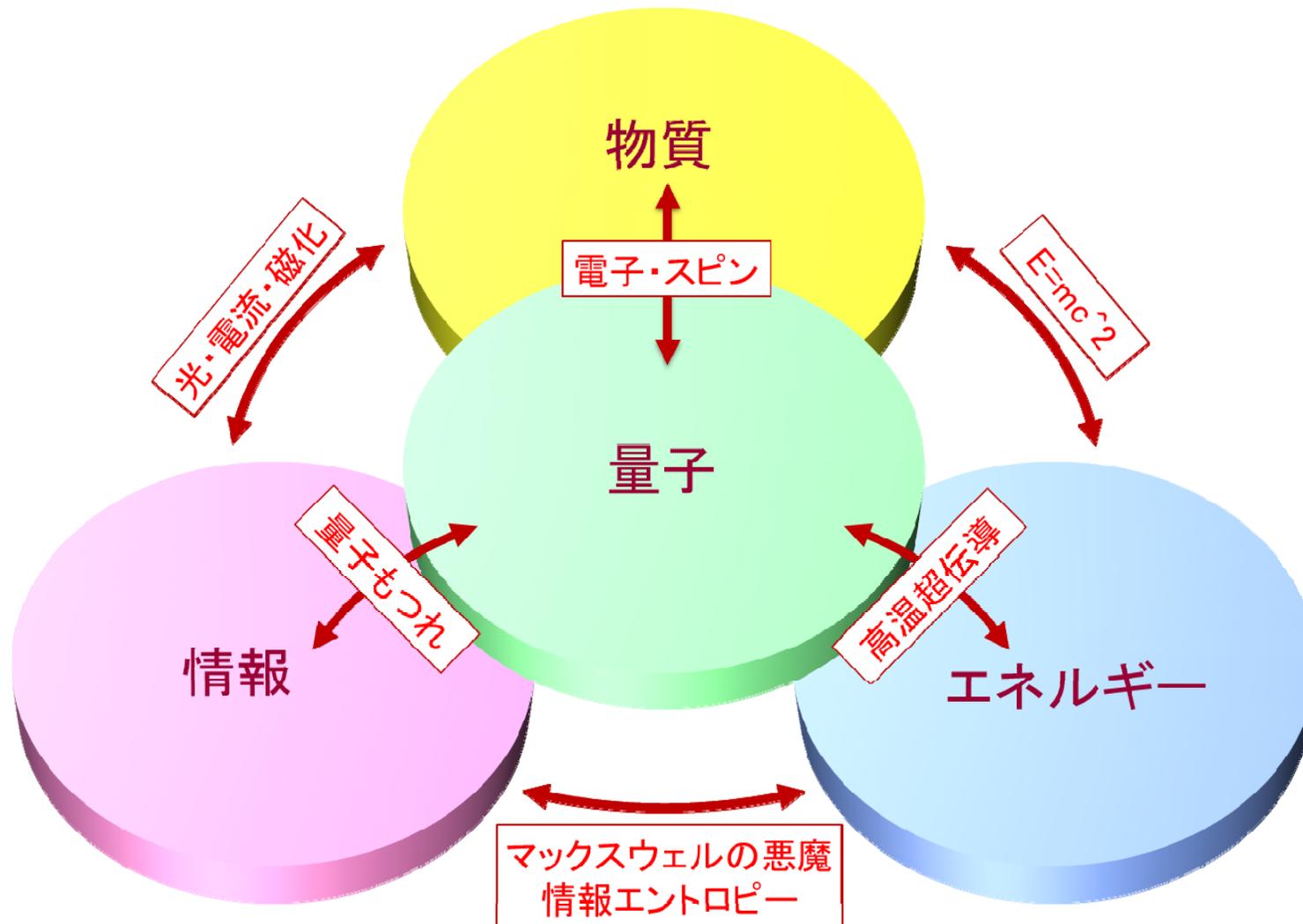


量子シミュレーター

永長 直人

理化学研究所 創発物性科学研究センター

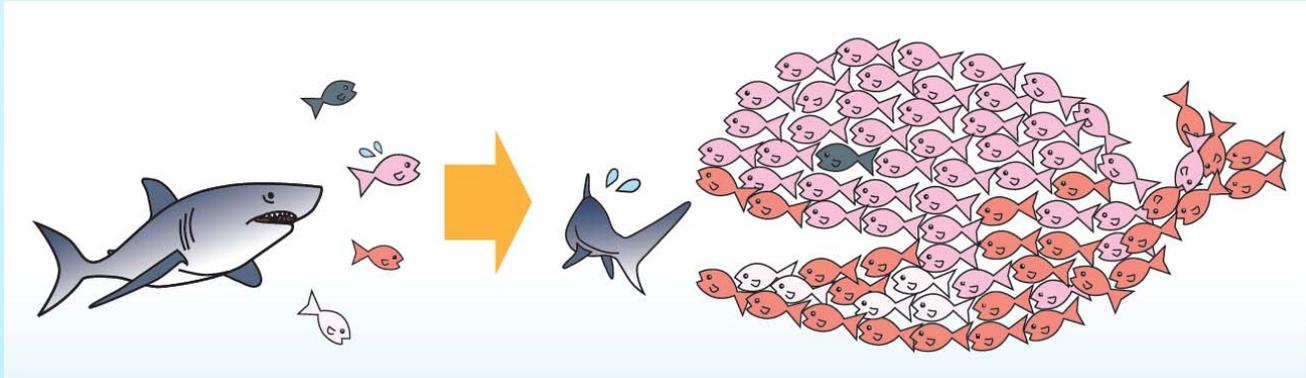
東京大学 工学系研究科 物理工学専攻



量子力学はすべての現象の背後に普遍的に存在
ある条件下で「古典的」振る舞いが現れる
どのように古典的挙動を発現させるか？

<創発性 (emergence)とは?>

→多数の要素が集まったときに、個々の要素からは予測できなかった性質が現れること

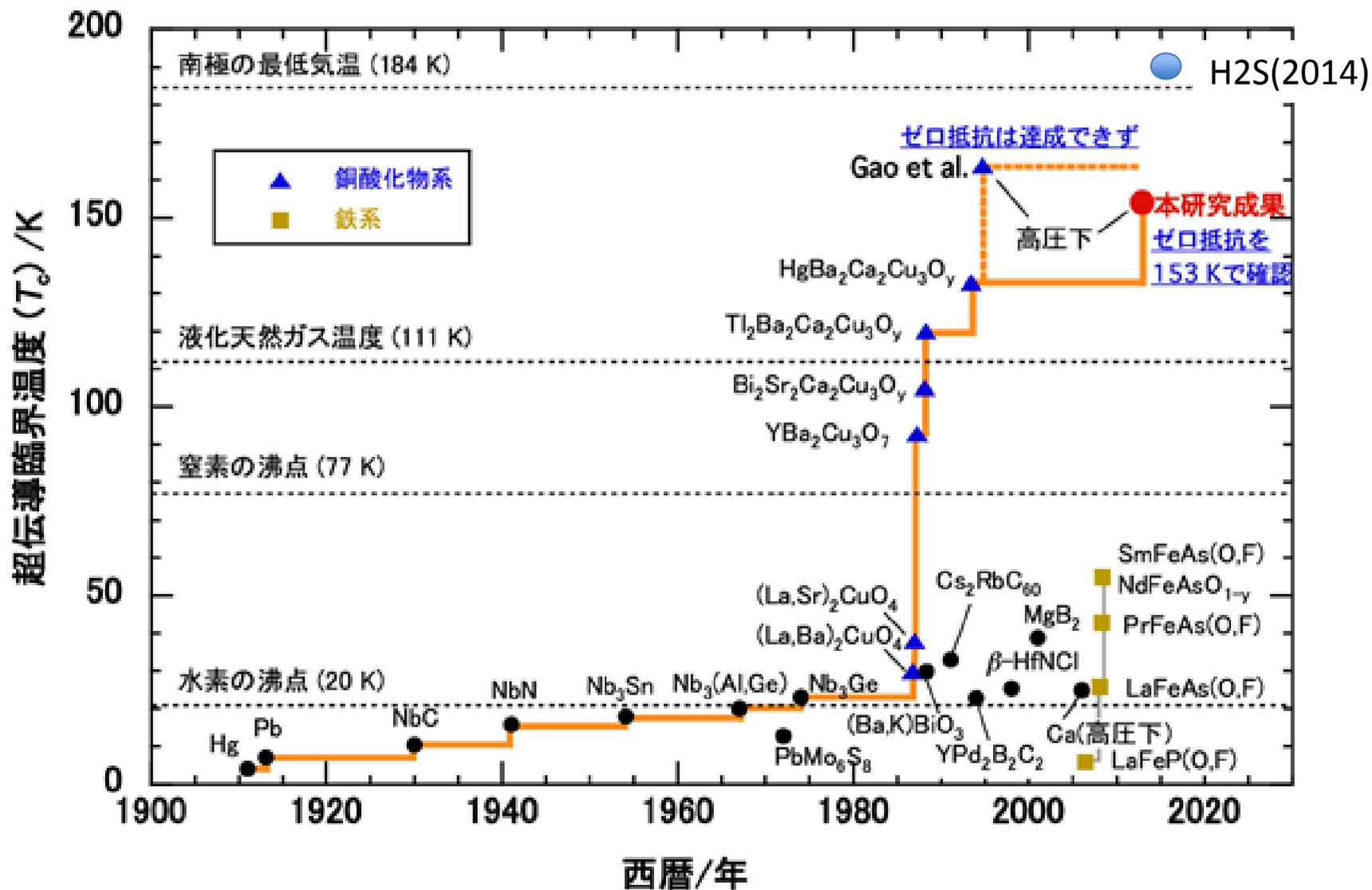


個々の構成要素（電子、スピン、分子等）を組み合わせることにより、単なる要素の集合としては予測不可能な、驚くべき物性や機能が現れる



**『創発物性科学』：創発現象の原理を明らかにして、新しい物性や機能を
を生ま出そうとする新しい学問領域**

超伝導転移温度



産総研HPより

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130130/pr20130130.html

広がる超伝導の応用分野

物質・材料開発

- 新しい高温超伝導体探索：酸化物 ⇒ ホウ化物・炭化物・窒化物(軽元素) **室温超伝導体**
- 線材開発：長尺(~10 km)・高臨界電流密度・低コスト・高信頼性 **電力応用・マグネット応用**
- 薄膜開発：大面積・界面制御・高歩留まり **素子開発：トンネル・ジョセフソン接合** **集積化：SQUID・SFQ** **エレクトロニクス応用**



住友電工 提供



産業技術総合研究所 提供

線材応用

- マグネット(強磁場)応用：MRI・NMR・磁気分離・加速器 **医療・バイオ・環境・物理**
- 輸送設備応用：超伝導リニア・モーター・発電機 **高速・省エネルギー輸送**
- 電力・エネルギー応用：電力貯蔵・送配電・核融合発電 **省エネルギー電力網**

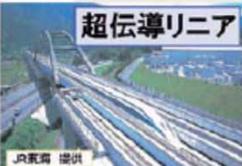
日立メテック 提供



住友電工 提供



出典：核融合科学研究所HP



JR東海 提供

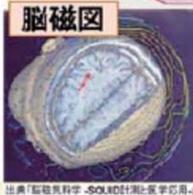


エレクトロニクス応用

- 計測応用：電波天文台・素粒子物理学用検出器 **先端科学**
- 診断・医療機器応用：心磁計・脳磁計・免疫診断・食品検査 **医療・生活・産業**
- 情報処理・通信応用：超高速CPU・ルータ **高速通信・高速情報処理**
- 量子情報：量子コンピュータ **超高速情報処理**



(C)ヨーロッパ天文台/ALMA



出典：脳磁図科学・SQUID計測と生体応用・藤岡・渡辺実徳著「SQUID計測と生体応用」



出典：CONNECT

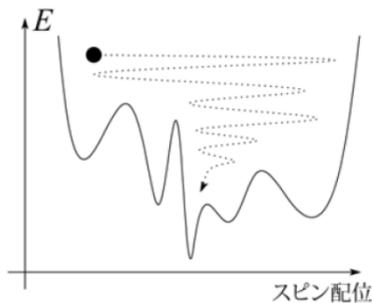
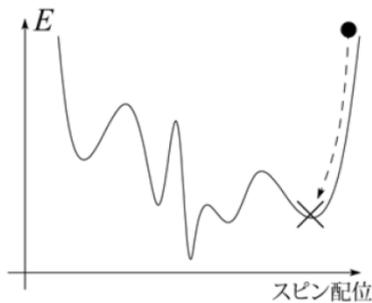
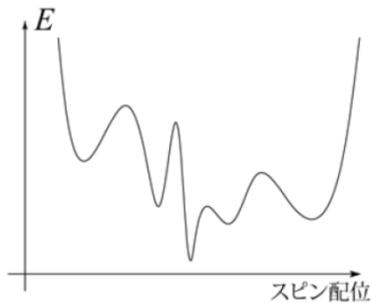


(C) J.S Teal, NEC

2005 2010 2015 2020 2025 2030 2035

量子多体系の非平衡ダイナミクス: 量子アニーリング

大関・西森
日本物理学会誌より

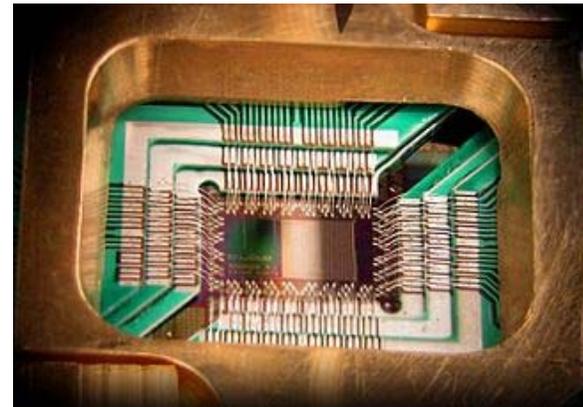


$$H(t) = H_0 + \Gamma(t)H_1$$

時間依存する量子系
非平衡量子ダイナミクス
による最適化問題の解法

ゆっくりした変化
量子断熱計算

➡ 高速化？



超伝導量子ビット
D-Wave
Wikipedia より

量子力学

数学的には巨大な行列の対角化問題

$$H\psi_n = E_n\psi_n$$

強相関系電子系： 行列の次元 $\sim e^{\alpha N}$

コンピューターによる対角化 原理的に不可能

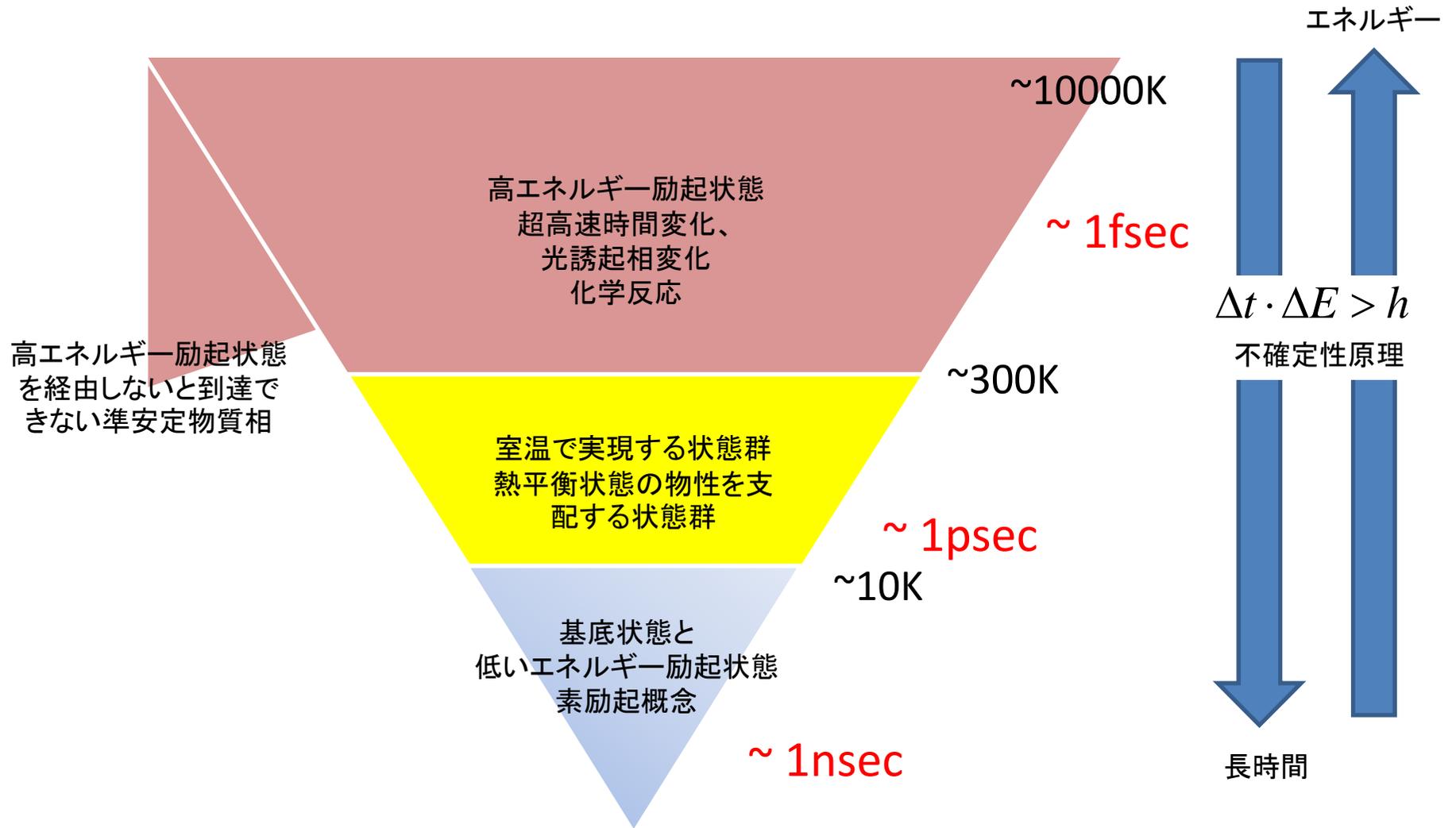
➡ 量子シミュレーター

不確定性原理

$$\Delta t \cdot \Delta E > h$$

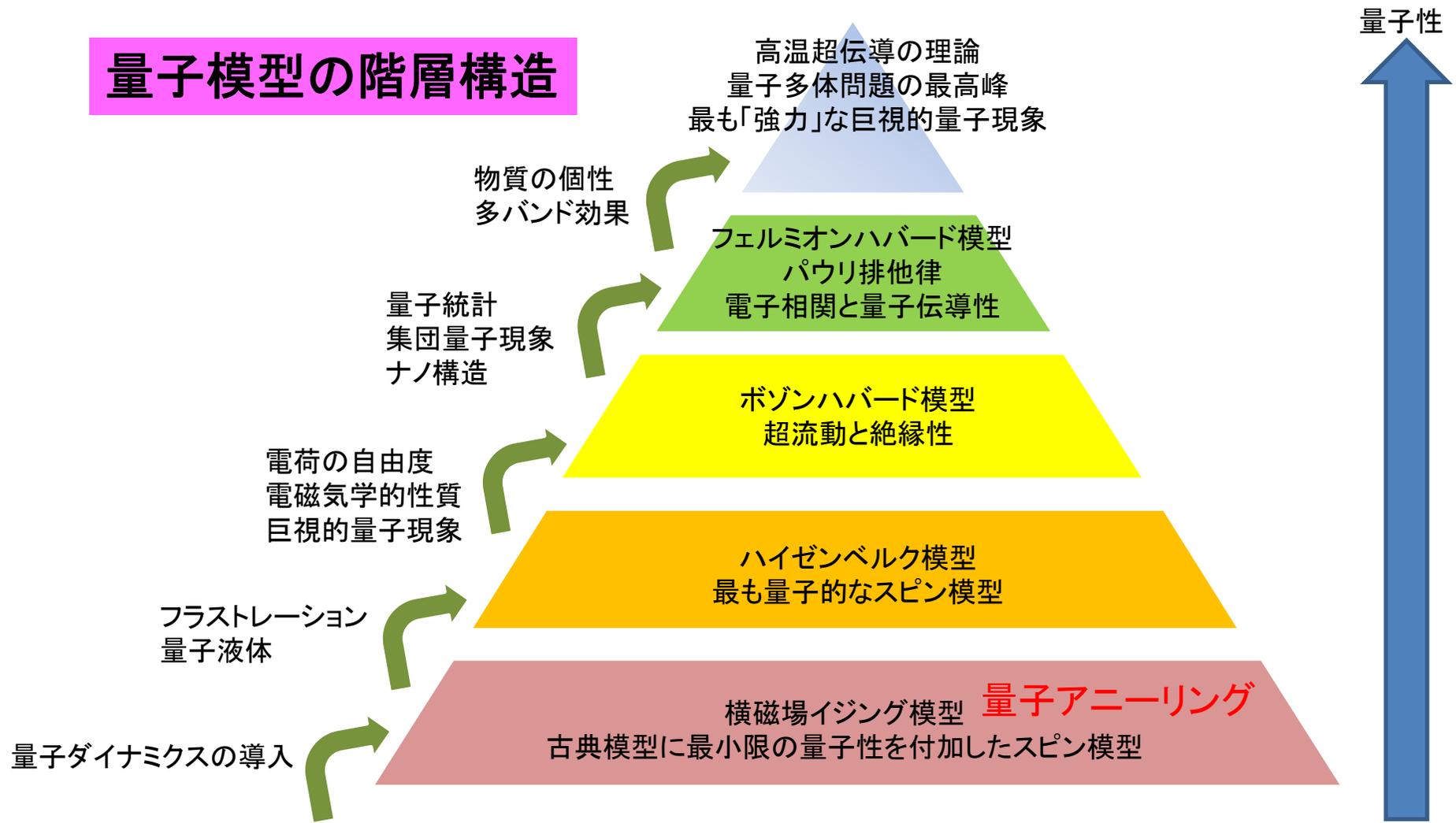
速い動作速度 \longleftrightarrow 高いエネルギー状態

量子多体系の固有状態群



従来の物性科学：エネルギーの階層構造を利用 低いエネルギー状態に着目
室温超伝導、超高速量子機能 のためには高いエネルギー状態の理解が必須

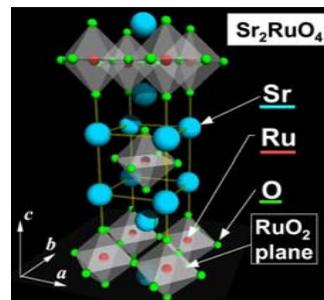
量子模型の階層構造



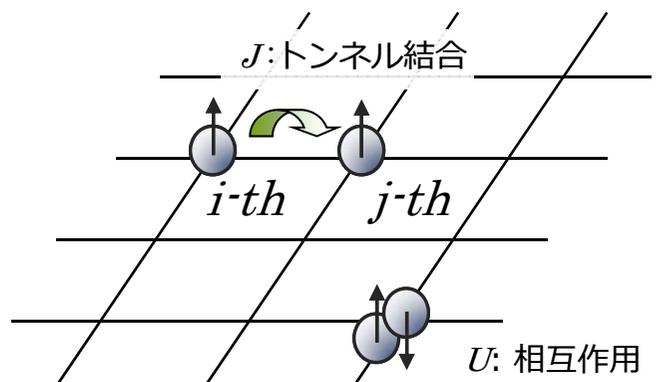
技術課題：量子シミュレーションは何故必要か？

材料研究者のインスピレーションに頼らない新機能物質探索を可能に

強相関電子系
(高温超伝導など)
の発現機構の解明



ハバードモデル



$$H = -J \sum_{i,j} c_i^\dagger c_j + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$

・ 厳密計算は計算機能力限界のため困難
→ 地球シミュレーターで最大24サイト

・ 各種近似計算手法の開発

動的平均場 (DMFT)、Gutzwiller

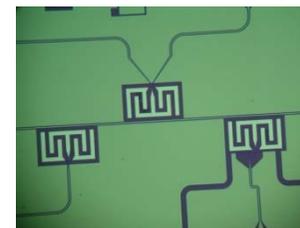
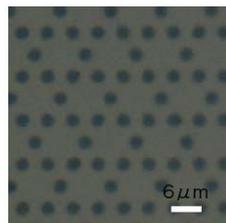
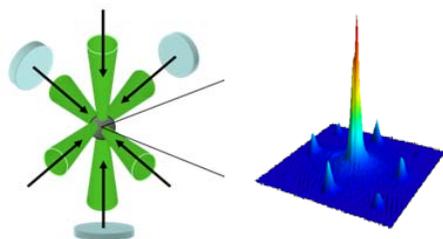
量子モンテカルロ、密度行列繰り込み群

重要な2次元フェルミオン系へ適応できない

↓ 量子を以って量子を制する

制御性の高い別の量子系を用いた模擬実験により答えを得る

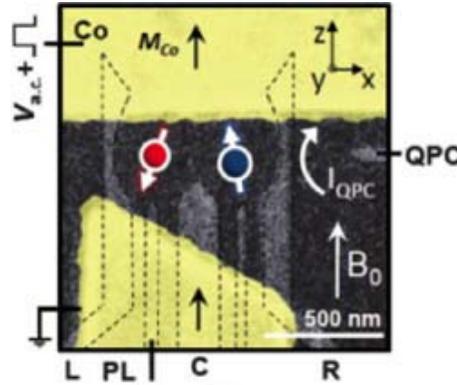
ハバード量子シミュレーターの比較



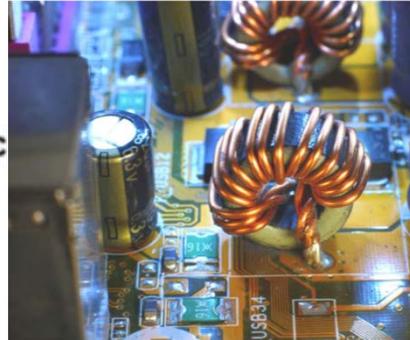
	冷却原子 (閉鎖系、熱平衡)	励起子ポラリトン (開放系、非平衡)	超伝導回路
サイト数	$\geq 10^5$	$\geq 10^3$	$\geq 10^2$
制御性	UとJの高精度制御	UとJのサイト別制御	UとJのサイト別制御
量子統計	ボーズ粒子 フェルミ粒子	ボーズ粒子	ボーズ粒子
周期閉じ 込め構造	光格子	光子閉じ込め構造	共振器回路
観測	実空間 (単一サイト) 運動量空間	実空間 (単一サイト) 運動量空間 時間分解測定	実空間 (単一サイト)
特徴	欠陥のない大規模システム を実現	動的輸送現象、非平衡現象の 観測が容易	大きな非線形相互作用、 小さい散逸を同時に実現

技術課題：量子シミュレーションは何故必要か？

超高速量子計算の設計と実装



半導体量子ドット



半導体量子ドット

断熱量子アニーリングを超えたアルゴリズムの設計と実装

開放系の非平衡量子ダイナミクス

非断熱ダイナミクス

散逸と量子トンネルの制御

時間依存パラメーター

予想される困難と対応策

材料研究者のインスピレーションに頼らない新機能物質探索を可能に

今までの超伝導物質開発が理論先行でなく、かつ停滞していること

量子臨界性と量子もつれに着目した物質設計、人工構造 永長、樽茶
実際の物質の複雑さ Forchel

第一原理計算のバックアップ、新しい量子シミュレーション法 青木
多電子の量子もつれの実験的検出が困難

冷却原子イオンや超伝導では～5粒子まで実現 高橋、福原
しかし電子には新しいアイデアが必要

超高速量子計算の設計と実装

「量子計算」は「予算を取るための便法」？

D-waveを始め、現実的になってきた広い意味での「量子計算」
中村、樽茶、蔡、福原、藤井

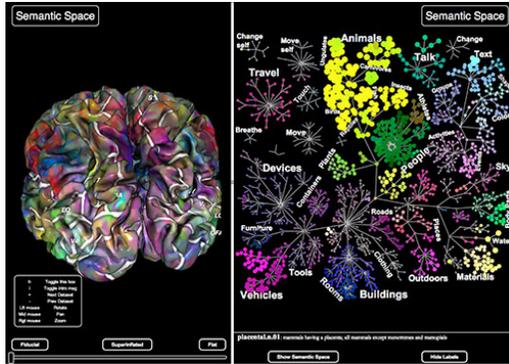
デコヒーレンスの制御は？

緩和をむしろ逆手に使って高速化 小川

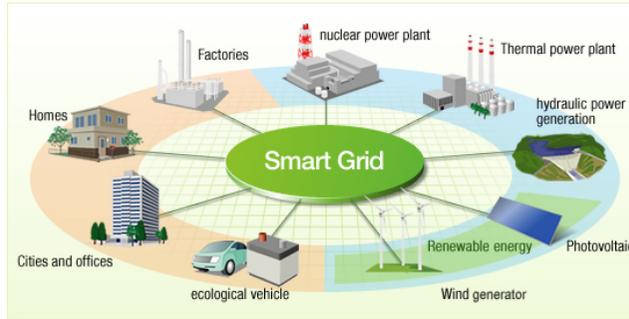
ビット数は？

超伝導量子ビットなら 10^4 まで可能 中村、蔡

産業や社会へのインパクト



巨大グラフ解析



動的ネットワーク最適化
(電力ネットワーク・
交通網・無線周波数割当)



暗号解読

産業競争力を支える
高度知識化コンピューティング

量子人工脳イジングマシン

大規模な組み合わせ最適化問題 (NP困難・NP完全) を高速に解くマシン・現代暗号解読

攻める

国家安全保障

守る

量子シミュレーション

- ・大規模科学計算による物質設計を可能にするマシン
- ・新しい非平衡量子計算スキーム

安全・安心・便利な
スマートコミュニティ

量子セキュアネットワーク

- ・機密情報、重要個人情報を安全に遅延なく伝送する
- ・どのような将来技術でも解読できない堅牢な安全性