

科学技術・学術審議会 先端研究基盤部会
量子科学技術委員会(第4回)

6月20日 2016年 文部科学省

量子シミュレーションについて
主に冷却原子系の動向

京都大学

高橋義朗



量子シミュレーション

(ハバードモデル等による量子シミュレータ)について
(特に冷却原子(光格子)を中心に)

- 国内外の研究の動向、現状について
 - ・ 国内外でどのような投資・研究が進められているか
 - ・ 展望としては、何年後にどれくらいの規模のものができて何が計算できると考えているか
 - ・ 日本の強み、看過できない弱み
- 等
- 今後の方向性(日本は何に注力すべきか)
- 日本で関係研究を推進していく上で課題と思われること

背景：室温超伝導に向けた取り組み

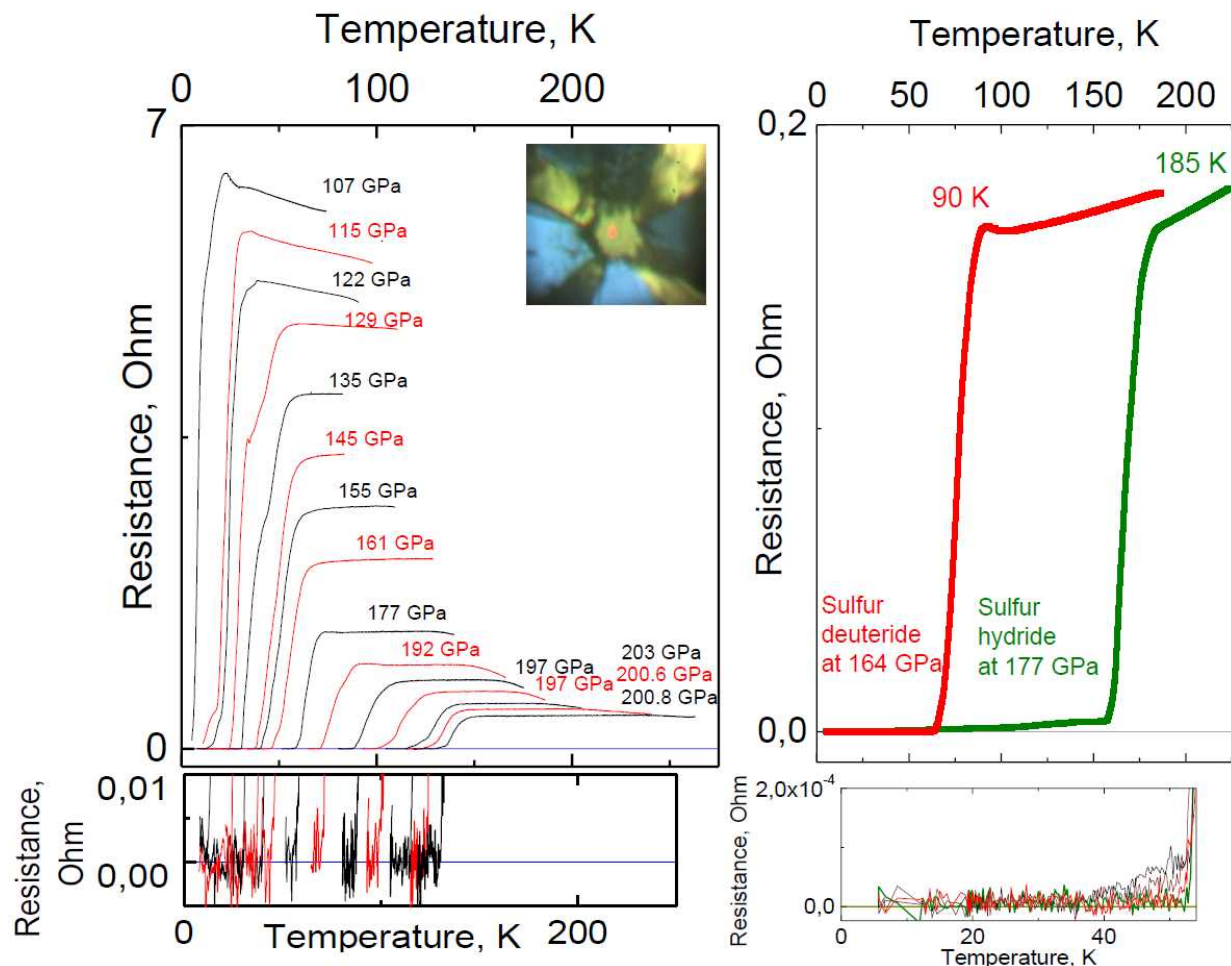
“**従来型の超伝導** が **203 K** で実現！ただし、超高压”

A. P. Drozdov, et al, Nature 525, 73(2015)

物質： H_2S

$3\text{H}_2\text{S}$

$\rightarrow 2\text{H}_3\text{S} + \text{S}$



“精密なバンド計算”と“**信頼性の高い** BCS 理論”
に基づいた“理論的予言”を指針にして行われた！

— 量子シミュレーションって何？ —

R. Feynman



強相関電子系

量子多体系モデル:
ハバードモデル

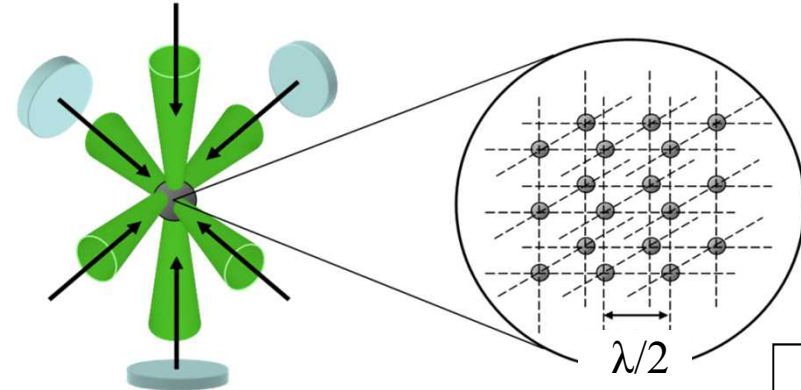
”Tractable”
=扱いやすい

”Intractable”
=手に負えない

(制御性の高い)
量子多体系

古典系
/古典計算機

“光格子中の冷却原子”



DMFT(動的平均場)

Gutzwiller

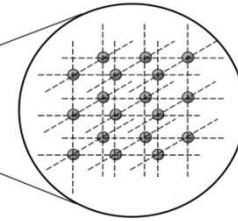
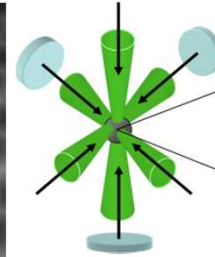
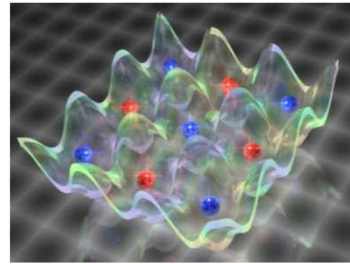
QMC(量子モンテカルロ)

DMRG(密度行列繰り込み群)

Exact Diagonalization (厳密対角化): 町田先生

冷却原子量子シミュレーターの特徴

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} a_i^+ a_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$$



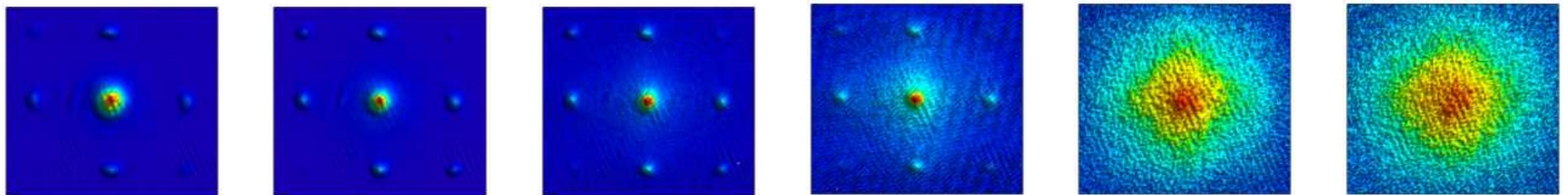
$$V = V_0 \sin^2(kx)$$

物質の中の電子の振舞いを光格子の中の原子で模擬

⇒例：高温超電導物質の模擬

- 1)大規模量子多体系：典型的原子数 $\sim 10^5$ 個以上
- 2)クリーンな系：不純物・格子欠陥(← 現実の固体サンプルの問題点)
- 3)高い制御性：(← シミュレーターとして大きな利点)

UとJの比を光格子レーザーの強度を変えることで高精度に制御可能

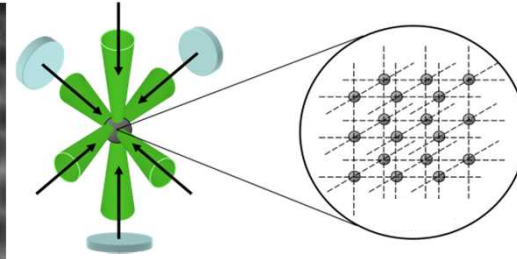
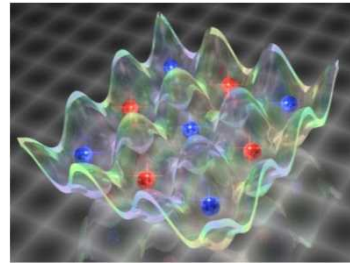


(超流動ーモット絶縁体転移の原子波干渉による観測)

Uをフェッシュバハ共鳴を用いて任意の大きさに制御可能
長距離双極子・双極子相互作用の導入も可能

冷却原子量子シミュレーターの特徴

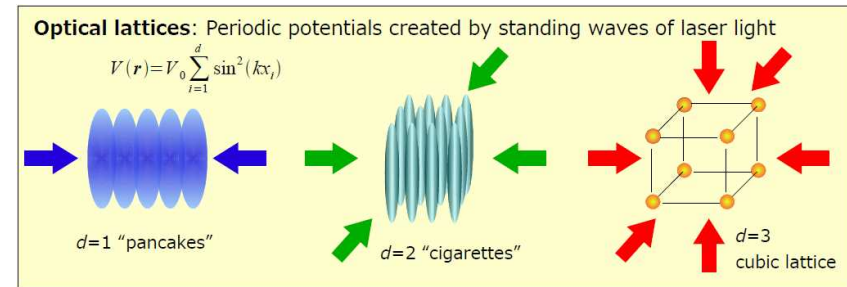
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} a_i^+ a_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i (n_i - 1)$$



$$V = V_0 \sin^2(kx)$$

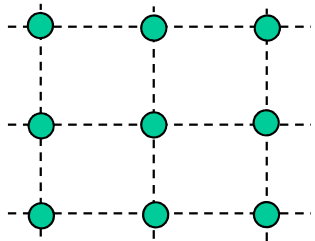
4) 多様性:

量子統計 (ボース・フェルミ・混合系)
次元性 (0次元、1次元、2次元)

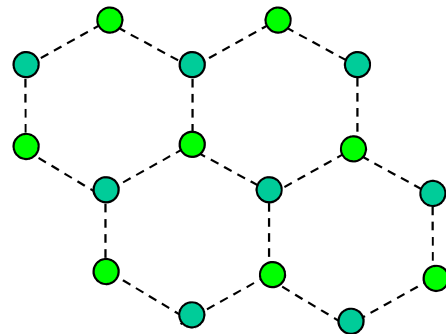


立方格子・非標準格子 (三角、カゴメ、ハニカム、リーブ)

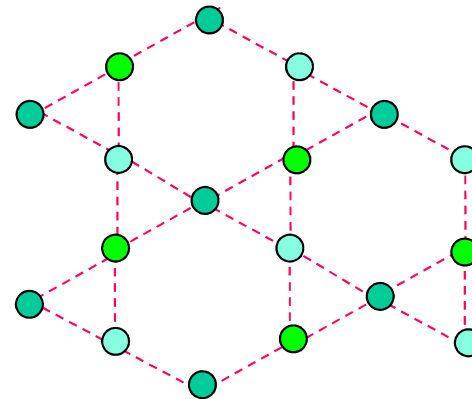
Cubic(Square)



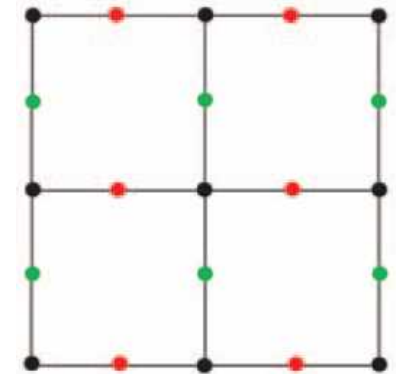
Honeycomb
(hexagonal)



Kagome



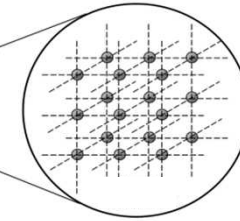
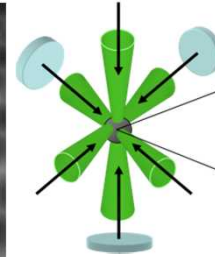
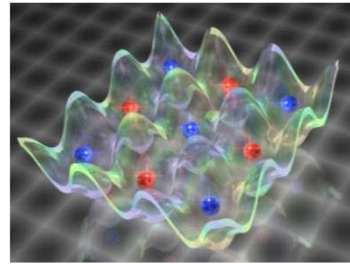
Lieb



➡ 物質の多彩な構造にも対応

冷却原子量子シミュレーターの特徴

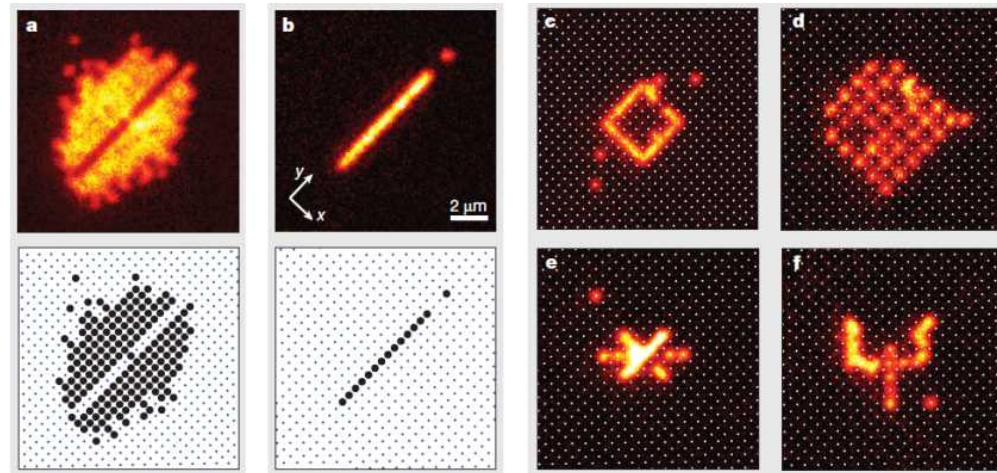
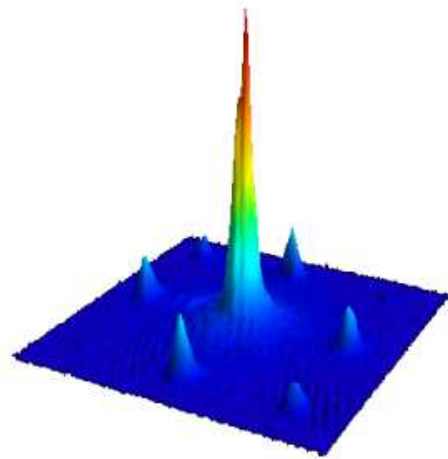
$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} a_i^+ a_j + \frac{U}{2} \sum_i n_i(n_i - 1)$$



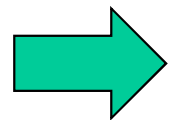
$$V = V_o \sin^2(kx)$$

5)優れた観測法

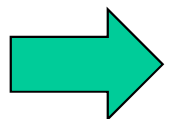
運動量測定 (ToF法)、単一サイト観測・制御 (量子気体顕微鏡)



[C. Ewittenberg *et al*, Nature 471, 319(2011)]



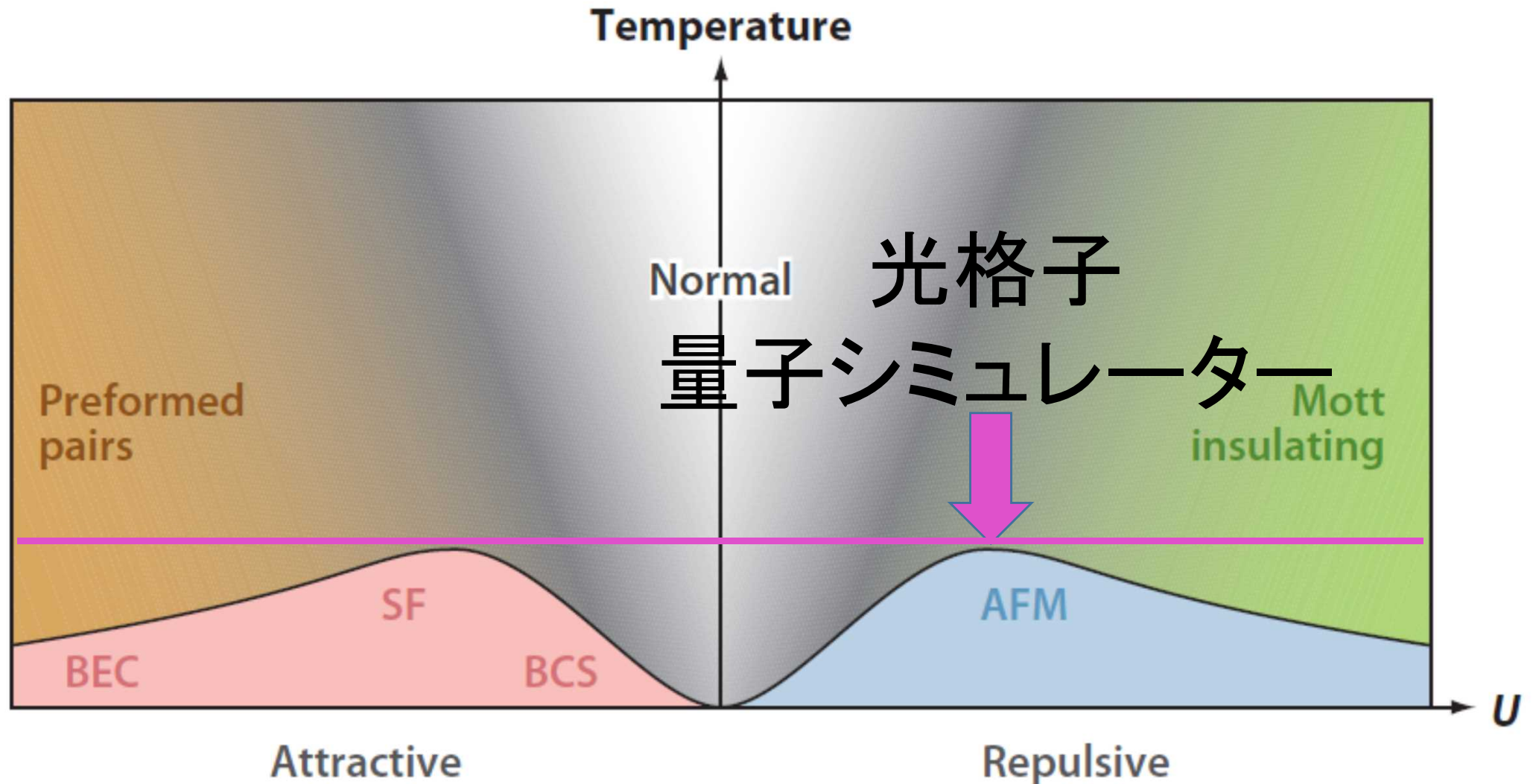
局所的に、物質の状態を観測可能



一つ一つの原子 (→量子ビット) の状態を測定・操作できる
→量子コンピューティングにも応用可能:

量子誤り訂正操作、量子フィードバック制御

フェルミハバードモデル



[T. Esslinger, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 2010. 1:129-152,
R. Micnas, J. Ranninger, S. Roaszkiewicz, Rev. Mod. Phys. 62, 113(1990)]

国内外の研究動向・現状、と発展の方向性

(日本は何に注力すべきか)

赤: 実現
緑: 現在
青: 今後

太字: 国内

低温化

多様性: 物質の多様性に対応

d-波超流動

散逸

SU(N)

反強磁性

乱れ・不純物

人工ゲージ場

モット絶縁体

非平衡

非標準格子

(クエンチ)

長距離

混合系

BEC・
フェルミ縮退

相互作用

アンサンブル

1サイト分解
(QGM)

量子フィードバック制御

観測・制御

— 量子シミュレーション —

理論研究の必要性

理論計算で解析可能な系に関して理論と実験の比較を重ねることで量子シミュレーターの信頼性を高めておく必要あり。

量子シミュレーションと量子計算

個別量子測定・制御に基づく量子フィードバック制御を量子多体系に対して行い、量子状態を安定化させることは、誤り耐性を有するユニバーサル量子計算に必須な量子誤り訂正の操作に他ならない。

●国内外の研究の動向、現状について

・国内外でどのような投資・研究が進められているか

ヨーロッパ：

2012年ERC Synergy Grants : Ultracold Quantum Matter
(10M Euro、I. Bloch, J. Dalibard, P. Zoller, E. Altman)

アメリカ：

DARPA のOLE (Optical Lattice Emulation) プログラム
AFOSRプログラム

日本：

JST-CREST 「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」
(平成15～20年度)

JST-CREST 「先端光源駆使した光科学・光技術の融合展開」
(平成20～25年度)

FIRST 「量子情報処理プロジェクト」 (平成21～25年度)

科研費新学術領域「量子サイバネティクス」 (平成21～25年度)

ImPACT 「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」
(平成26～30年度)

●国内外の研究の動向、現状について

- ・展望としては、何年後にどれくらいの規模のものができるか
何が計算できると考えているか

→ 量子(原子)の規模はすでに 10^5 以上!

ボトムアップ型の開発ではなく、トップダウン型の開発!

低温化:

現在: $T > T_N$

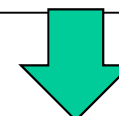
→ 数年後 $T < T_N$ (反強磁性), $T \sim T_c$ (高温超流動) →

個別観測・制御の高度化:

現在: 量子気体顕微鏡

→ 数年後, 量子非破壊測定、量子フィードバック操作

高温超伝導現象
の定量的理解



信頼性の高い
理論的予言

多様性:

現在: 非標準格子、乱れ、人工ゲージ場、 $SU(N)$ 、...

→ 数年後、上記高精度化・多様性の組み合わせ

→ 数年後、非ユニバーサル量子計算の実証

●国内外の研究の動向、現状について

・日本の強み:

→ 優れた理論研究者(若手も):

量子物性理論(強相関研究の伝統)

量子情報理論

→ 優れた周波数標準研究・国内メーカー:

光格子時計、

光学素子・ガラス加工・エレクトロニクス

・日本の看過できない弱み:

→ 実験グループの数の少なさ(若手も):

ハードルの高さ(理論も実験も、海外との競合、実験
設備、情報量、PD・学生の人材交流、
(若手への)大規模初期投資、...)

参考: 国際会議BEC(スペイン): 出席者約200名中日本人10名以下