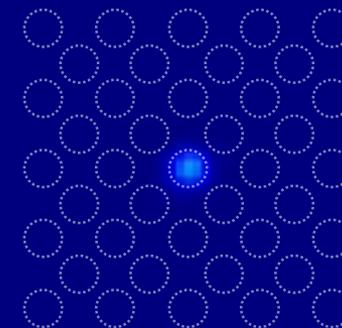
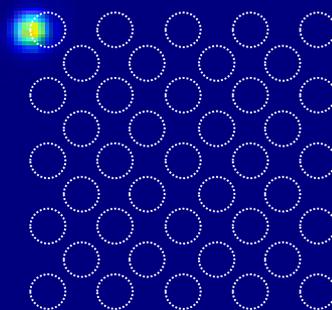
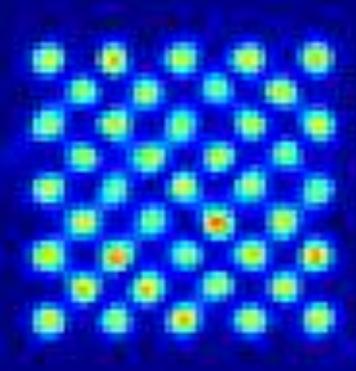


アト秒・ナノメートル精度の超高速量子シミュレータの開発 と量子コンピューティングへの応用

自然科学研究機構・分子科学研究所
光分子科学研究領域
研究主幹・教授 大森賢治



— → —
10 μm → 760 nm
633 nm 820 nm
NA: 0.045 NA: 0.75

量子シミュレータとは？

量子シミュレータ

量子多体問題のシミュレーションに特化した量子コンピュータ

量子多体問題

相互作用する3粒子以上の量子力学的な問題

強相関系

強く相互作用する多数の粒子の集団

量子シミュレータとは？

光格子中の冷却原子を使ってハバード模型をシミュレートする理論提案；
超流動 – Mott絶縁体相転移

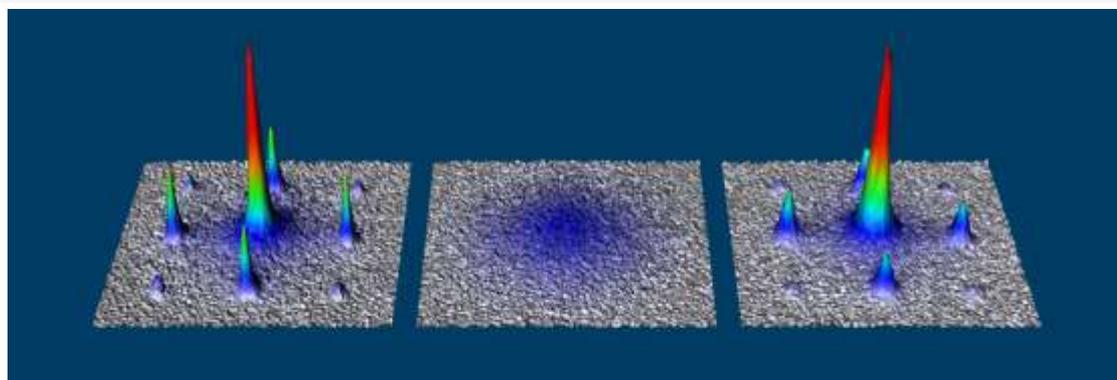


D. Jaksch

D. Jaksch *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3108 (1998).

実験: M. Greiner *et al*, *Nature* **415**, 39 (2002)

ポスト「京」スパコンで 10^{573} 年かかる計算が1秒以下でシミュレートできる



超流動

Mott絶縁体

超流動

<https://www.quantum-munich.de/media/mott-insulator/>

量子シミュレータとは？



EC Future & Emerging Technologies (FET) Flagships: 10億ユーロ / 10年 (2018 - 2027)

http://quopre.eu/system/files/u7/93056_Quantum%20

1. Communication

0 – 5 years

- A Core technology of quantum repeaters
- B Secure point-to-point quantum links

5 – 10 years

- C Quantum networks between distant cities
- D Quantum credit cards

> 10 years

- E Quantum repeaters with cryptography and eavesdropping detection
- F Secure Europe-wide internet merging quantum and classical communication

量子シミュレータ

- A Simulator of motion of electrons in materials
- B New algorithms for quantum simulators and networks

量子シミュレータは主要各国の量子科学技術政策におけるキラーコンテンツの一つ

- C Development and design of new quantum materials
- D Versatile simulator of quantum magnetism and electricity

- E Simulators of quantum dynamics and chemical reaction mechanisms to support drug design

3. Sensors

- A Quantum sensors for niche applications (incl. gravity and magnetic sensors for health care, geosurvey and security)
- B More precise atomic clocks for synchronization of future grids (incl. energy grids)

- C Quantum sensors for larger applications including automotive, construction
- D Handheld quantum navigation devices

- E Gravity imaging devices based on gravity sensors
- F Integrate quantum sensors with consumer applications including mobile devices

4. Computers

- A Operation of a logical qubit protected by error correction or topologically
- B New algorithms for quantum computers
- C Small quantum processor executing technologically relevant algorithms

- D Solving chemistry and materials science problems with special purpose quantum computer > 100 physical qubit

- E Integration of quantum circuit and cryogenic classical control hardware
- F General purpose quantum computers exceed computational power of classical computers

量子シミュレータの実装方式



方式	利点	最大サイト数	課題	研究グループ
冷却原子・分子	<ul style="list-style-type: none"> ・サイトの均一性 ・コヒーレンス ・大規模化 	数10万サイト	<ul style="list-style-type: none"> ・単一サイトの制御性 	Bloch@MPQ(ドイツ), Greiner@Harvard大(米国), Esslinger@ETHZ(スイス), Ye/Jin@JILA(米国), Ketterle@MIT(米国), etc.
イオントラップ	<ul style="list-style-type: none"> ・単一サイトの制御性 ・コヒーレンス 	約300サイト	<ul style="list-style-type: none"> ・サイトの均一性 ・大規模化 	Monroe@JQI(米国), Blatt@Innsbruck大(オーストリア), Bollinger@NIST(米国) Wineland@NIST(米国), etc.
超伝導量子ビット (量子アニーリング)	<ul style="list-style-type: none"> ・単一サイトの制御性 	約2000サイト (~60論理ビット)	<ul style="list-style-type: none"> ・サイトの均一性 ・コヒーレンス ・大規模化 	Martinis@UCSB(米国), D-Wave Systems(カナダ), etc.

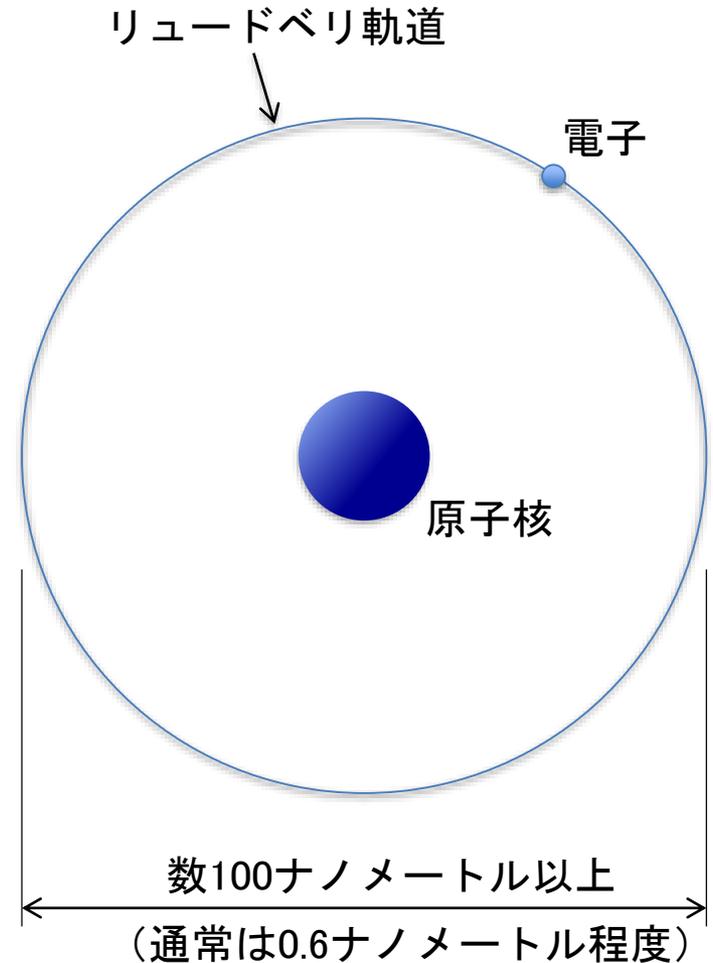
ここ1、2年で状況が激変しつつある

どうやって強相関関係を創り出すか？

- できるだけ遠くまで力を及ぼす粒子を使って組み立てる(極低温: マイクロ～ナノケルビン)
- 「リュードベリ原子」が最も期待されている

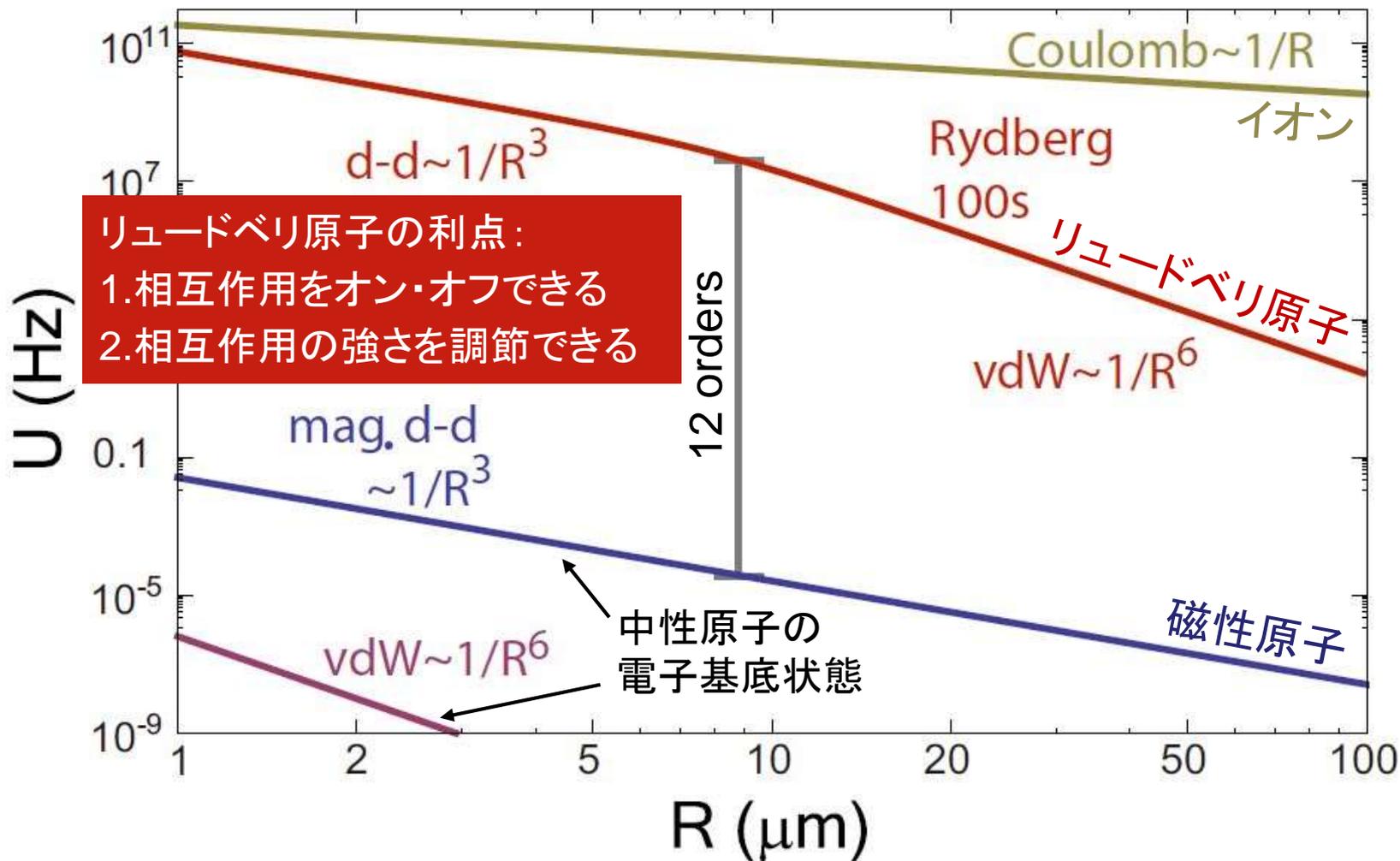
リュードベリ原子とは？

- 電子が原子核から遠く離れたリュードベリ軌道と呼ばれる電子軌道上を運動している原子
- 原子核の近くを回っている電子を光でリュードベリ軌道に励起して作ることが出来る
- 正の電荷を持つ原子核と負の電荷を持つリュードベリ電子の距離が長いので強い電気双極子モーメントが発生する



ナノ = 10^{-9}

リュードベリ原子の巨大な双極子モーメント

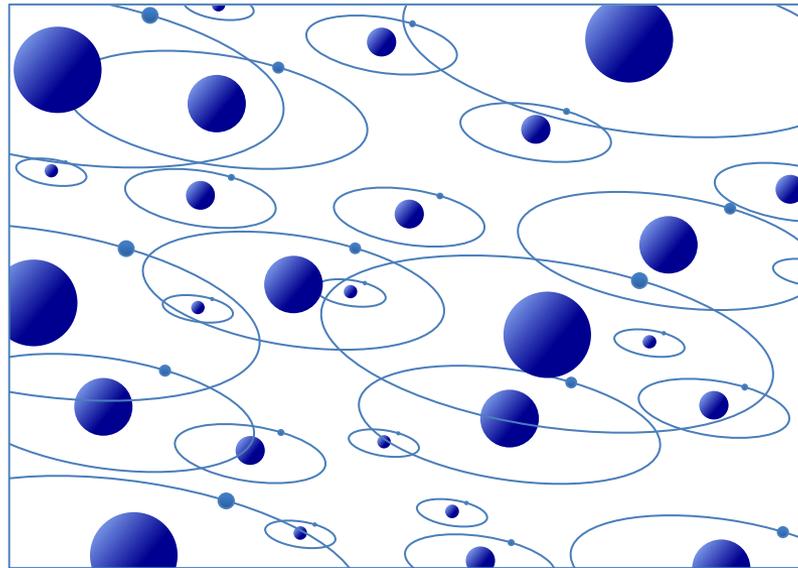


リュードベリ原子の利点:
1. 相互作用をオン・オフできる
2. 相互作用の強さを調節できる

M. Saffman et al. *Rev. Mod Phys.* **82**, 2313 (2010).

リュードベリ原子の強相関状態

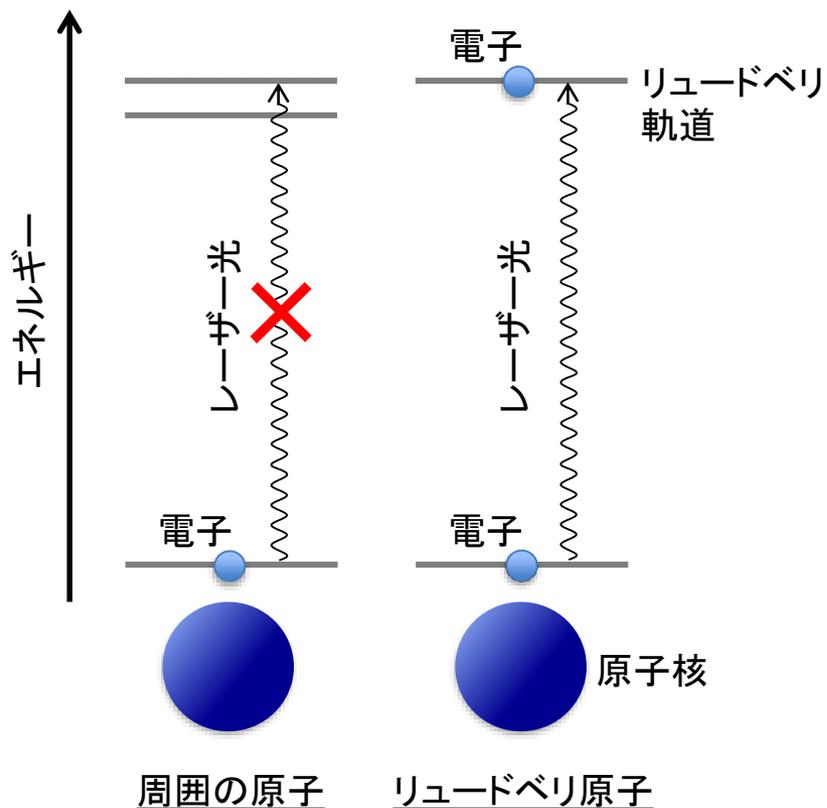
リュードベリ原子の集合体を作ることができれば**多数のリュードベリ原子が同時に相互作用する強相関系**になるはず



従来技術とその問題点

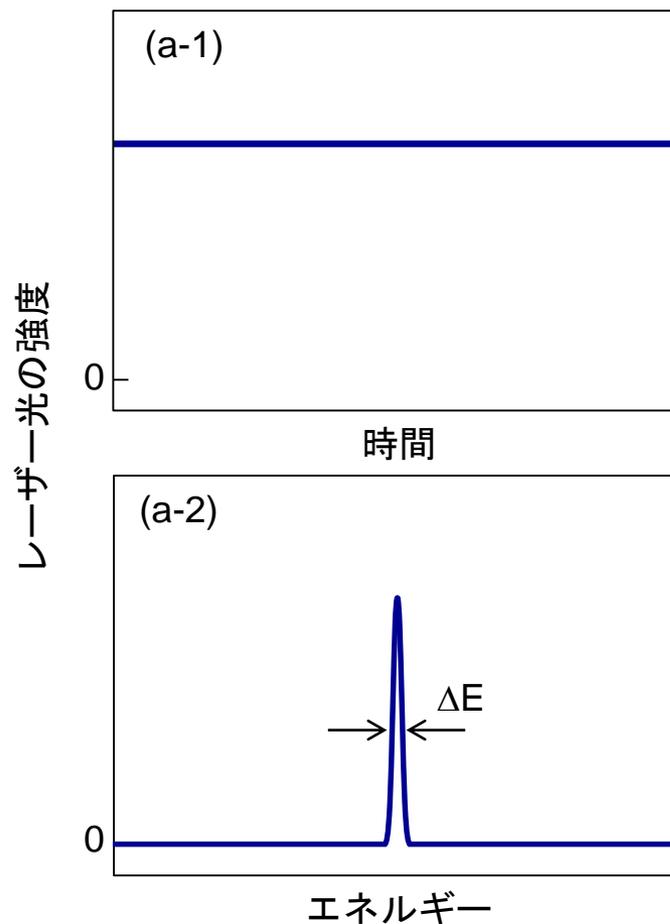
リュードベリ原子の問題点1

リュードベリ・ブロッケード



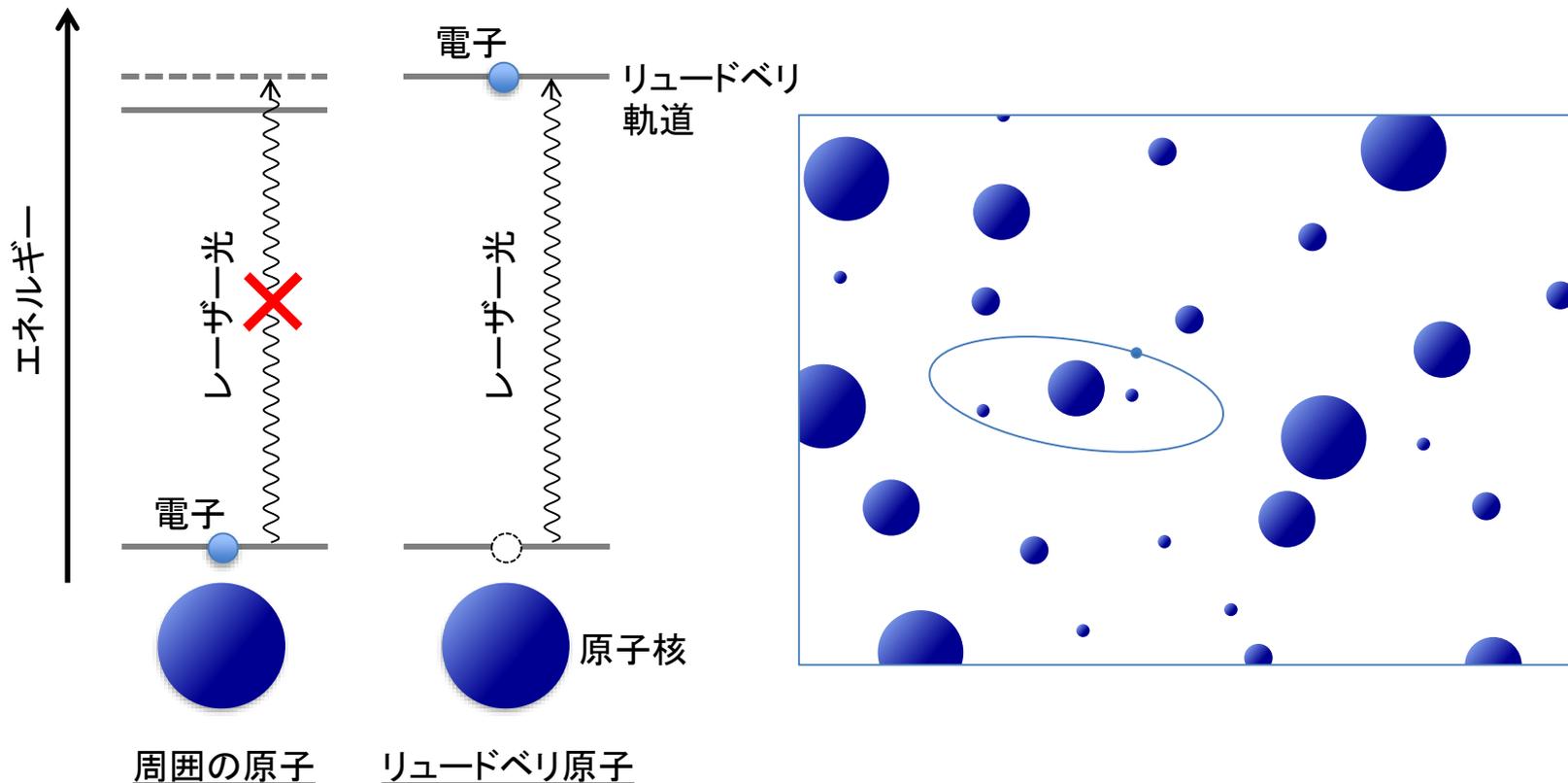
周囲の原子の電子をリュードベリ軌道に励起することができない

従来使われていたレーザー光



リュードベリ原子の問題点1

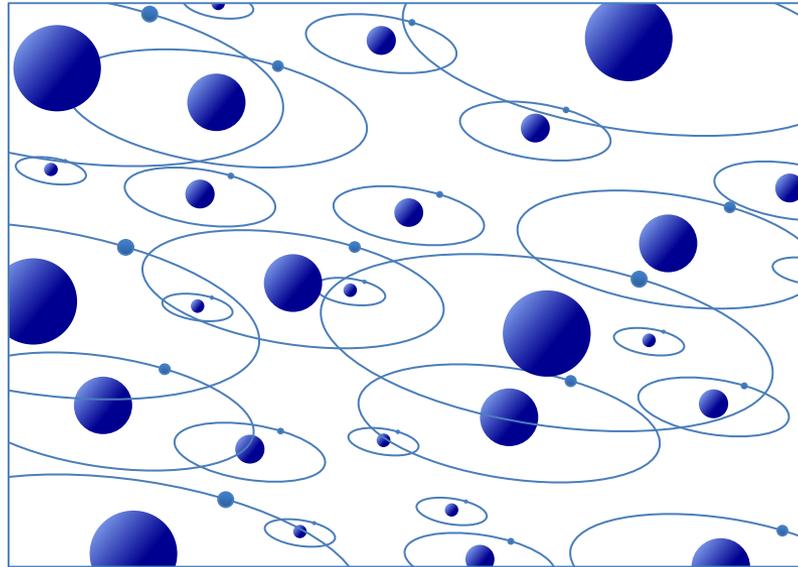
リュードベリ・ブロッケード



集団の中に1個のリュードベリ原子しか存在できない

リュードベリ原子の問題点2

時間スケールの問題



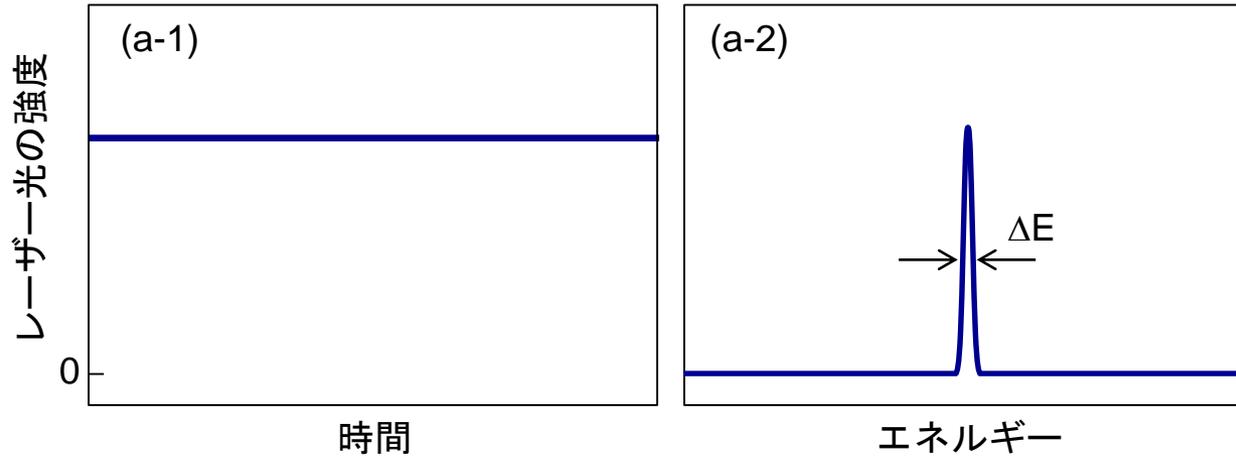
リュードベリ原子間の強い相互作用のせいで、それらの量子力学的な状態が**100ピコ秒スケール**で刻々と変化し続けることが予想される。**これまでの量子シミュレータ開発で想定されていた時間変化よりも1000万倍以上も速い。**

(ピコ = 10^{-12})

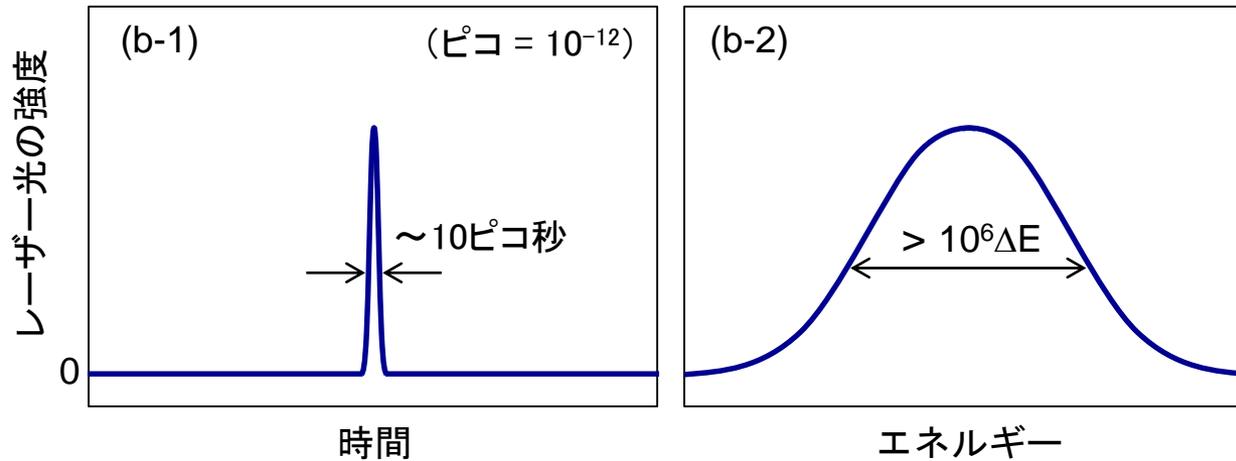
新技術の特徴・ 従来技術との比較

二つの本質的な問題点の解決

従来使われていたレーザー光

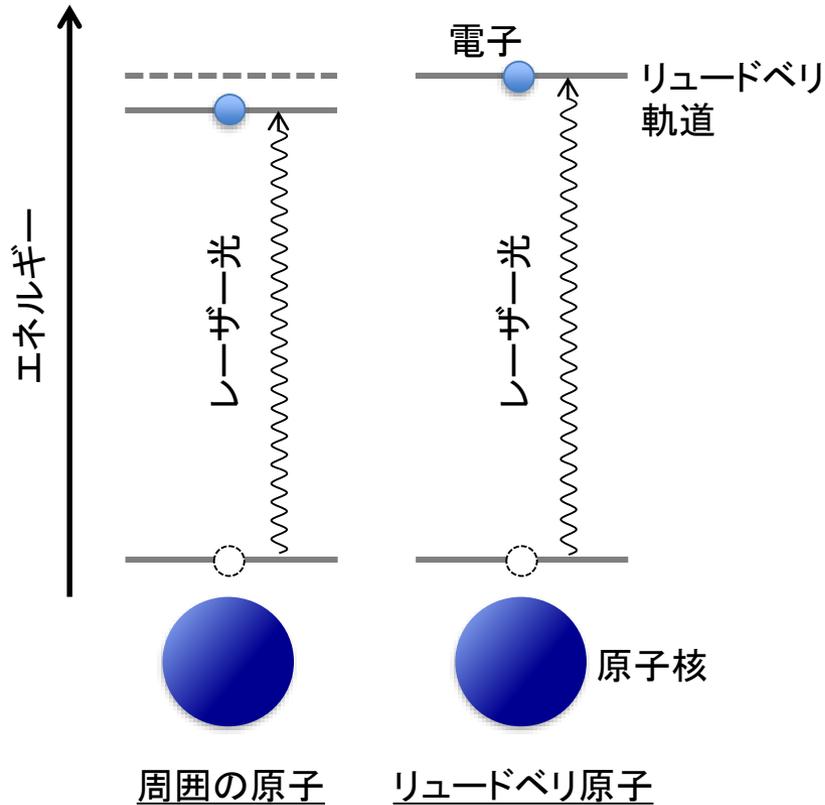


私達が新たに導入したレーザー光



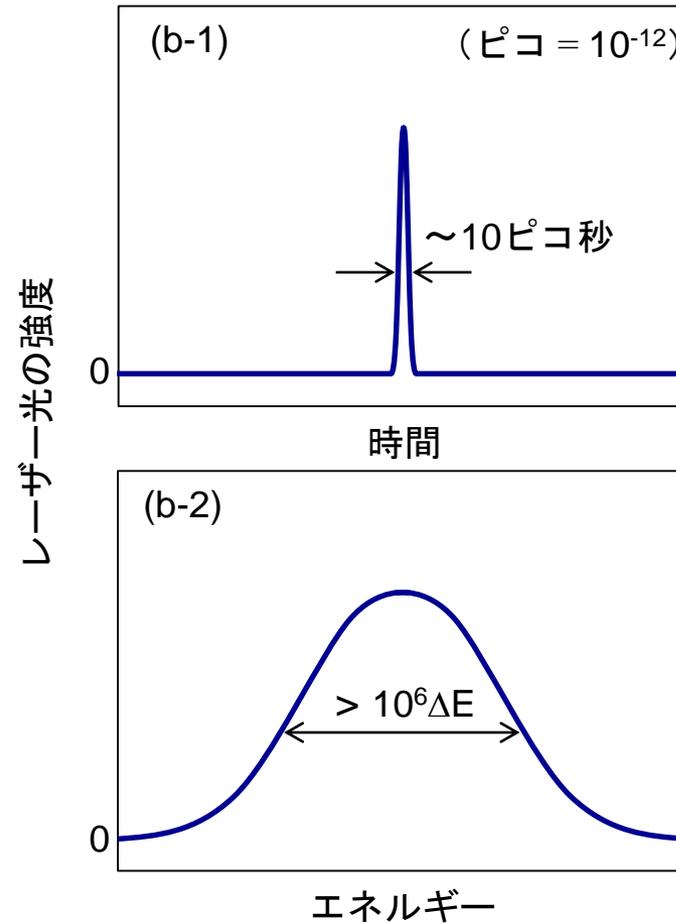
問題点1の解決

リュードベリ・ブロッケードを回避



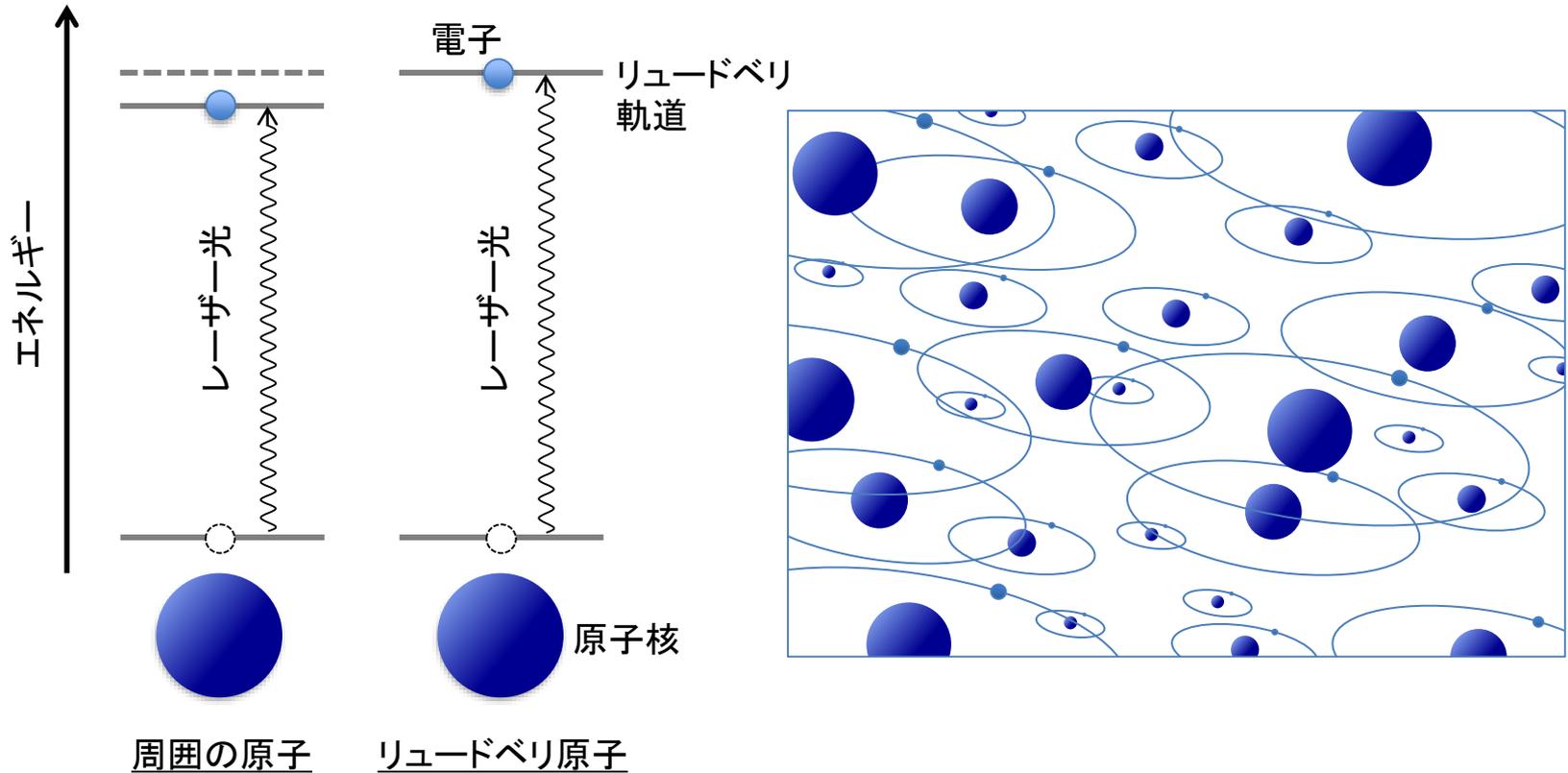
周囲の原子の電子をリュードベリ軌道に励起することができる

私達が新たに導入したレーザー光



問題点1の解決

リュードベリ・ブロッケードを回避

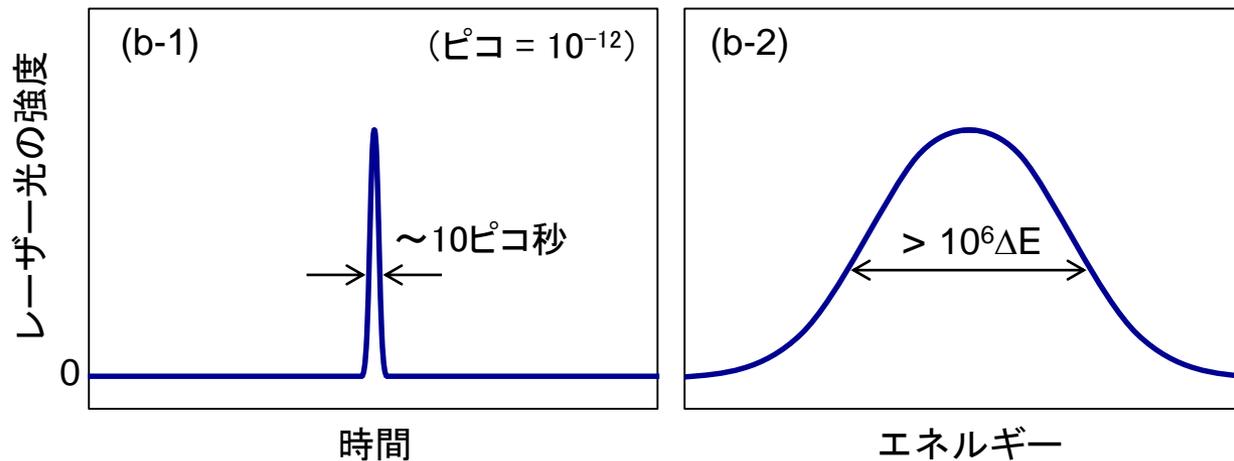


全ての原子をリュードベリ原子にすることができる

問題点2の解決

従来の1000万倍以上速い現象の観測

私達が新たに導入したレーザー光



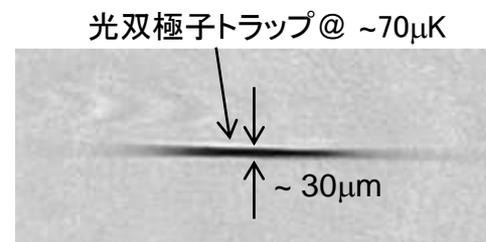
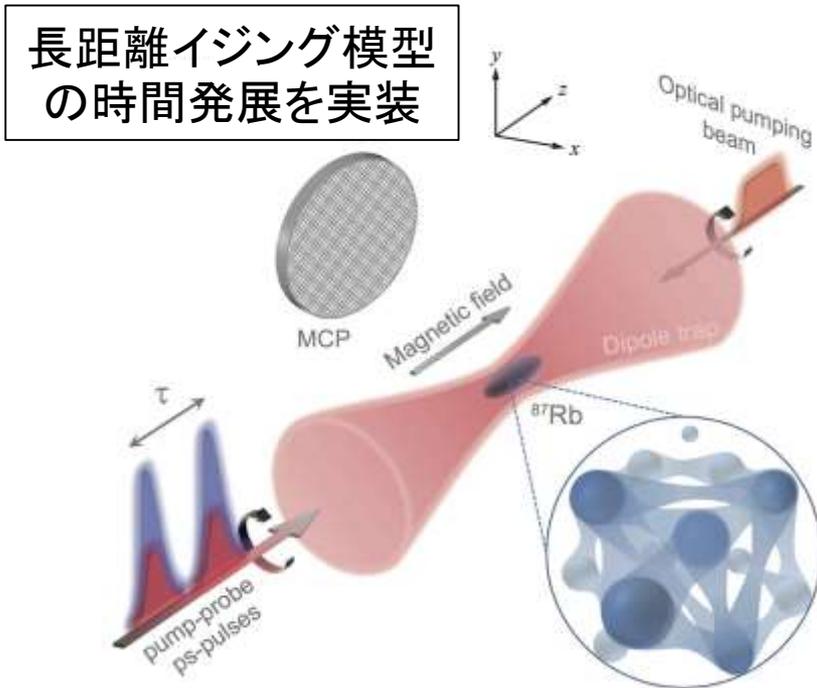
レーザーパルスの時間幅は予想される量子力学的な状態変化の時間スケール100ピコ秒よりもはるかに短いため、この変化をリアルタイムに観測できるはず。

分子研・大森グループの超高速量子シミュレータ・プロトタイプ

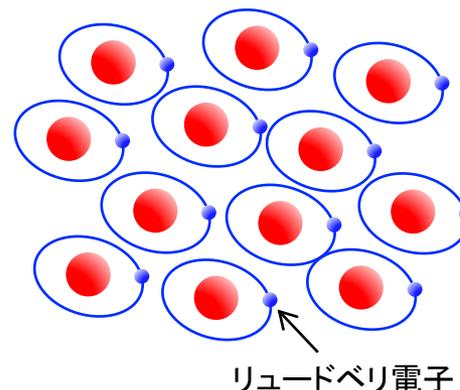
原子レベルで動作する世界最速の量子シミュレータ

(Nature Commun. 2016 ; Scienceハイライト ; 英国物理学会ハイライト ; etc.)

強相関・極低温リュードベリ原子集団における1フェムト秒オーダーの
超高速・多体電子ダイナミクスをアト秒精度で制御・観測する新しい光技術



極低温ルビジウム原子集団



超高速コヒーレント制御と極低温物理が融合した新しい科学技術の始まり

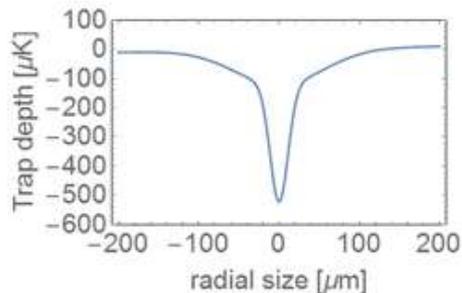
(JST・CREST研究 2010-2016 ; 科研費・特別推進研究 2016- ; Q-LEAP 2018-)

PRA **94**, 053607 (2016); Acc. Chem. Res. **51**, 1174 (2018); PRL **121**, 173201 (2018) etc.

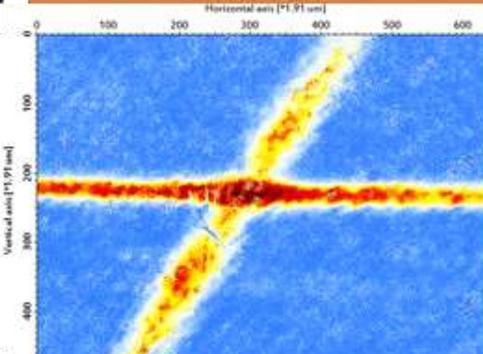
分子研・大森グループの超高速量子シミュレータ・アップグレード

レード
Forced evaporation = 0.0 s

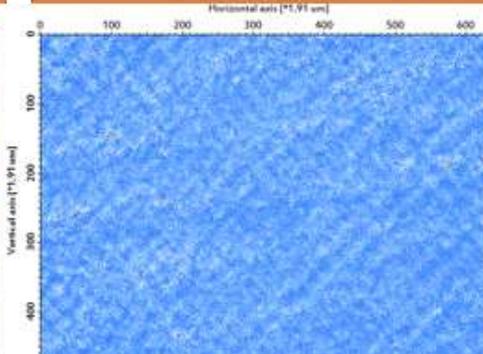
Potential



Spatial distribution

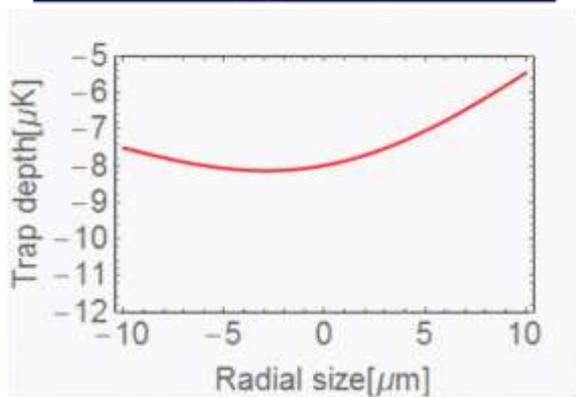


Momentum distribution



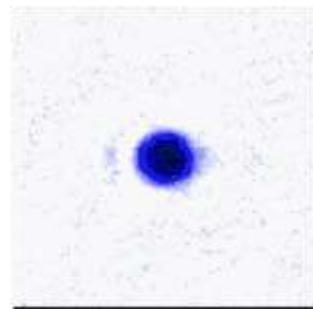
Rb原子のボース・アインシュタイン凝縮体(< 80nK)

Trap potential

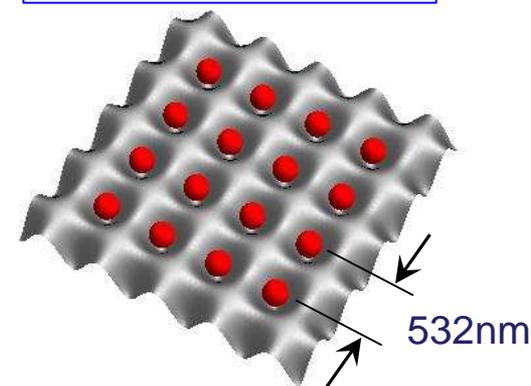


Momentum distribution

OE_R
Bose-Einstein Condensate



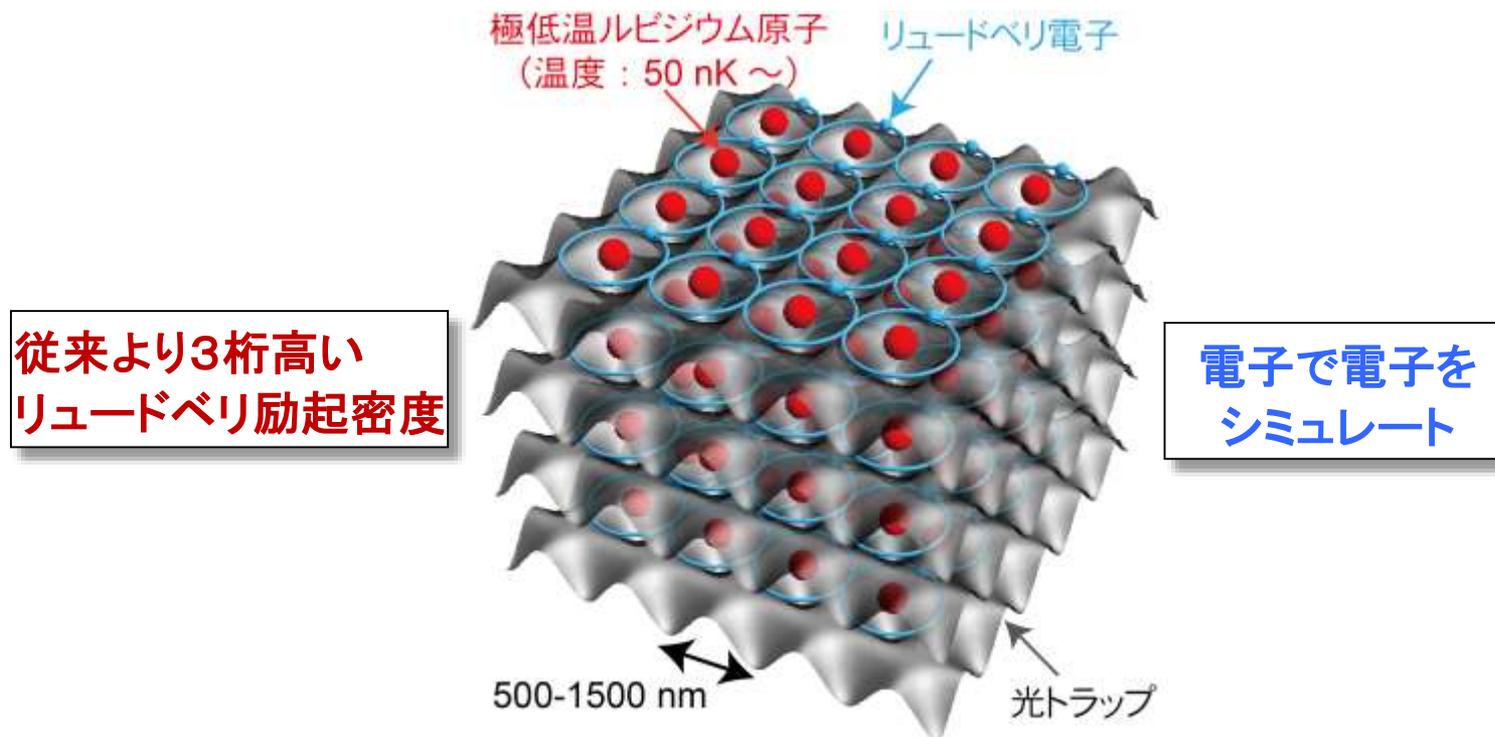
数ミクロンサイズの
Mott絶縁体



光格子

(交差するレーザー光の定在波)

大森グループの超高速量子シミュレータ・ハードウェア



分子研・大森グループの超高速量子シミュレータ（「経産省2018年度版ものづくり白書」より）

イジング模型・ハバード模型など各種量子格子模型 のダイナミクスの超高速量子シミュレーションに対応

特許公開番号：米国US 2018/0292786 A1；日本2018-180179，
「量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法」，
酒井寛人（浜松ホトニクス），大森賢治（自然科学研究機構）他，
公開日：2018年10月11日（米国）；2018年11月15日（日本）。

想定される用途

超高速量子シミュレータの用途

1. 量子磁性の理解(→ 磁性材料の開発)
2. 超伝導現象の解明(→ 高温超伝導材料の開発)
3. 未知の量子現象の探索と応用
例)トポロジカル現象の理解とトポロジカル材料・デバイス開発への応用
4. 量子アニーラへの応用(近未来の社会実装)

量子アニーラとは？

組み合わせ最適化問題に特化した量子コンピュータ



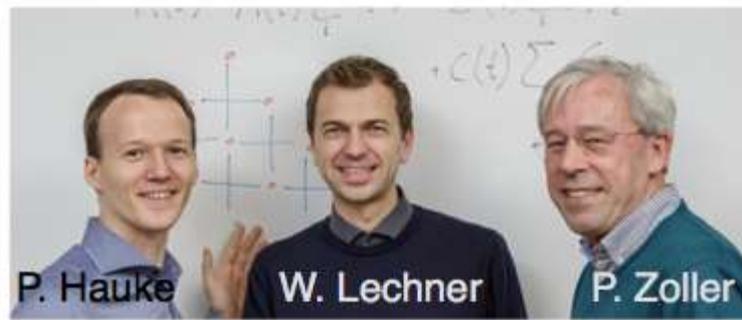
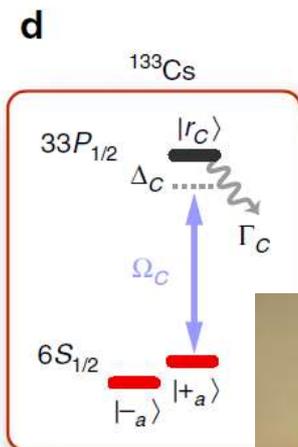
複数の組み合わせの中から欲しい価値を最大にするものを選ぶ問題

例) 宅急便の配送経路の距離を最小(効率を最大)にした
い:

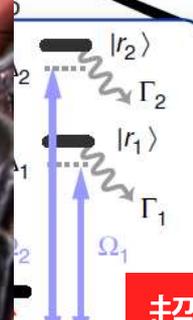
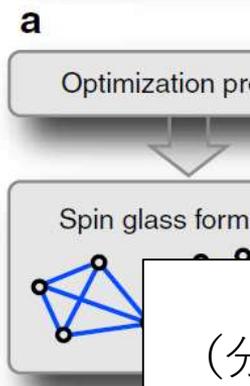
配達先30地点だと配送経路の組み合わせの数は10の32乗。
 スパコンで1000万年以上かかるが量子アニーラだと1秒以下。
 価値を下げるコストを数値化したコスト関数を量子スピン系(例えば2準位系の原子の集合)のエネルギーにマップして、エネルギーを最小(コストを最小)にする準位の組み合わせ(↑↓↑↑↓...)を探索する。古典計算機(スパコン)は全ての組み合わせのコストを1つずつ計算する必要があるが、量子アニーラは全ての組み合わせのコストを同時に比較するので桁違いに効率が高い。

社会実装への展開: 量子シミュレータから量子アニーラへ

冷却原子を用いたコヒーレント量子アニーラ LHZアーキテクチャ (Sci. Adv. 1, e1500838 (2015))



Ultraviolet-laser



冷却原子アニーラ開発チーム
(分子研 + 浜松ホトニクス + インスブルック大)

超微細構造:
スピン準位
として使用

A. Glätzle *et al.*, Nat. Commun. **8**, 15813 (2017).

社会実装への展開:量子シミュレータから量子アニーラへ

冷却原子と超伝導量子ビット(D-Wave2000)の比較

	冷却原子	D-Wave2000
論理ビット数	分子研で開発中	~60ビット
→ 個別操作性	○	○
コヒーレンス時間 TC	~ 1 秒	~ 10 ナノ秒
アニーリング時間 TA	< ~ 10 ミリ秒	~ 10 マイクロ秒
TC / TA	> 100	0.001
長距離相互作用	○	△
物理ビットの均一度	○	△

コヒーレンス時間 / 計算時間

大規模化に大きく影響

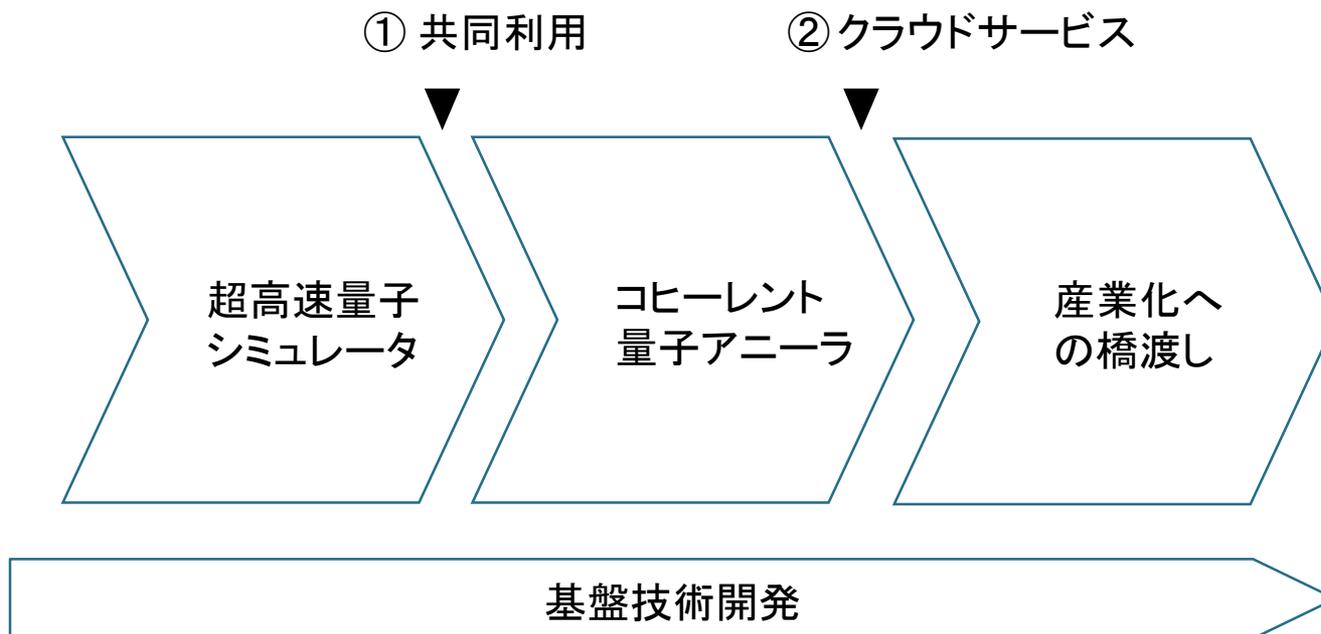
D-Wave2000: 少なくとも1000計算して1回正解
冷却原子: 1回の計算で正解

実用化に向けた課題と 企業への期待

ユーザーおよび開発コミュニティの開拓

■ユーザーおよび開発コミュニティの形成

- ①物性グループ(多体問題): 国際会議; 国内外学術セミナー; 国内学会... [2019~]
(例: 量子制御Gordon研究会議; FEMTO14; 日本物理学会年会...)
- ②IT企業等(社会課題): シンクタンク; 企業向けセミナー... [2019~]
(例: 経団連・産学連携セミナー; JST・CRDS; JST・新技術説明会...)
- ③コヒーレント量子アニーラ国際ネットワーク: UK・EU量子フラッグシップとの共同開発 [2018~]

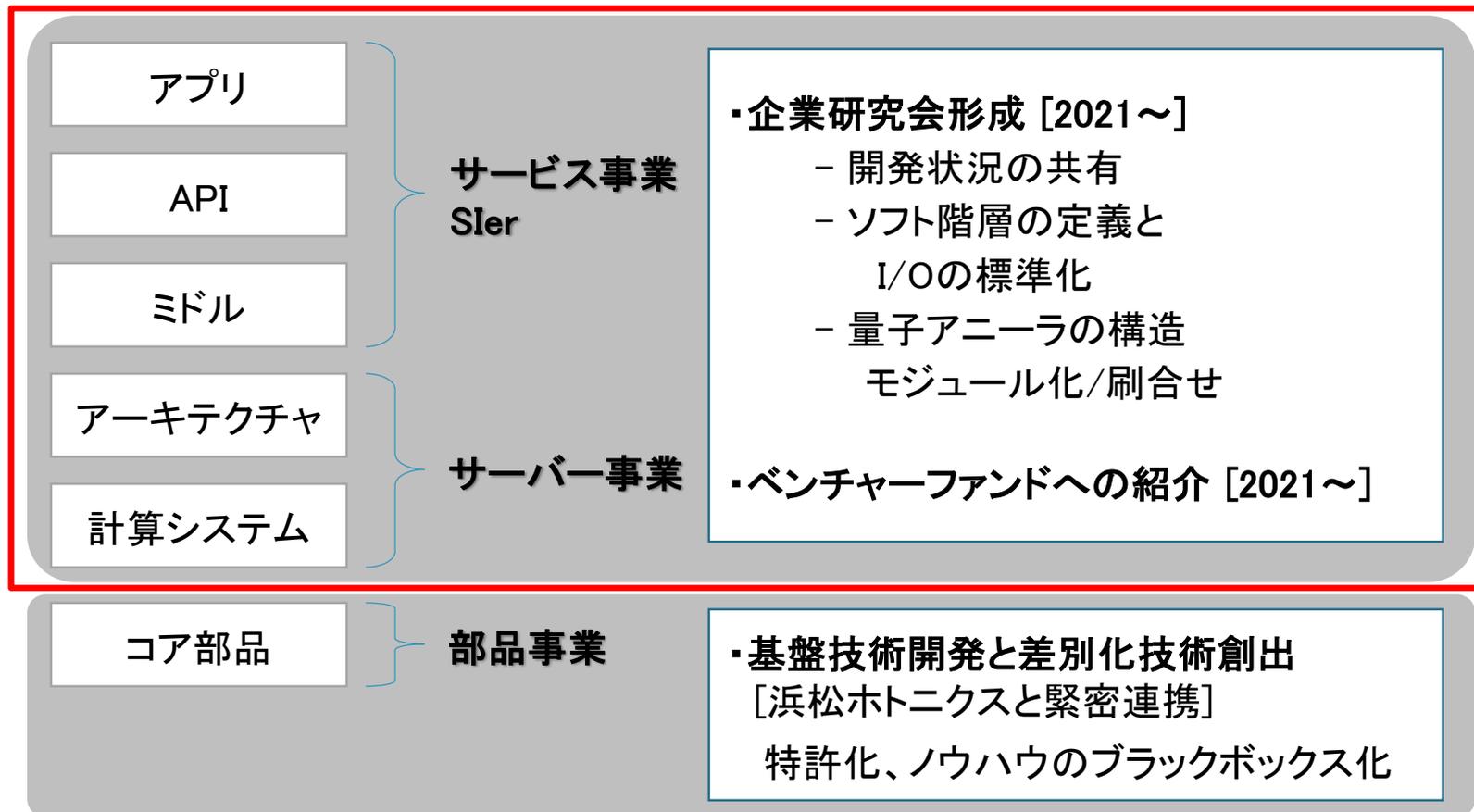


産業化への展開

■ 産業化への橋渡し

産業構造を見据えて、適切なプレーヤーに橋渡しを行う

企業への期待



本技術に関する知的財産権

特願2017-077478, 特開2018-180179,
「量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法」,
酒井寛人, 大森賢治, 安藤太郎, 武井宣幸, 豊田晴義, 大竹良幸, 兵土知子, 瀧口優
(浜松ホトニクス(株), 自然科学研究機構), 2017年.

Application number: US15/945,016, Publication number: US 2018/0292786 A1,
“Quantum simulator and quantum simulation method,”
H. SAKAI (Hamamatsu Photonics K.K.), K. OHMORI (NINS), T. ANDO
(Hamamatsu Photonics K.K.), N. TAKEI (NINS), H. TOYODA, Y. OHTAKE,
T. HYODO and Y. TAKIGUCHI (Hamamatsu Photonics K.K.),
Filing date: Apr. 4, 2018, Publication date: Oct. 11, 2018.

産学連携の経歴

文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP」(2018 - 2028)
大規模・基礎基盤研究
研究代表者: 大森賢治
連携先: 浜松ホトニクス(株)

日本学術振興会 科研費 特別推進研究 (2016 - 2021)
研究代表者: 大森賢治
連携先: 浜松ホトニクス(株)

問い合わせ先

氏名：中川 智景(なかがわ ちかげ)

所属：自然科学研究機構
岡崎統合事務センター
国際研究協力課・産学連携係
特任専門員

Tel: 0564-55-7136

E-mail: r7136@orion.ac.jp