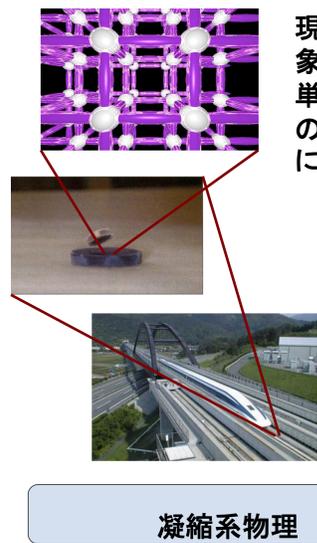




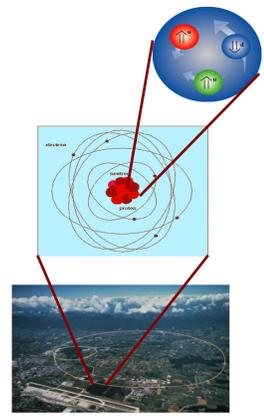
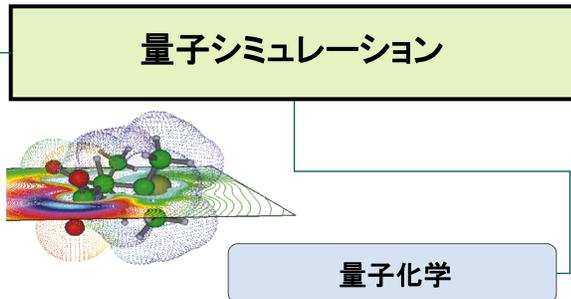
# NII 量子シミュレーション ~制御可能な人工系を用いて物性の特性を探る~

## なぜ量子シミュレーターが必要?



凝縮系物理

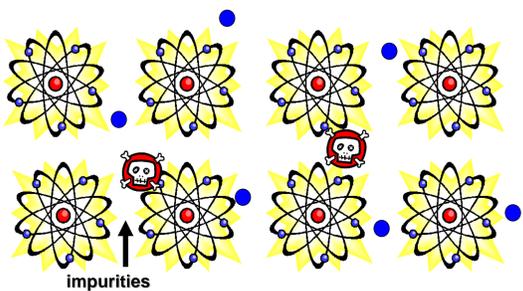
現代物理において多体問題とは、相互作用しあう多数の粒子が存在する際にどのような現象が起こるか、をテーマとしている。一つの粒子の量子力学的振る舞いを理解することは簡単だが、これが多数の粒子になると「量子多体問題」といわれる非常に難しい問題となる。この種の問題の例としては、「高温超電導」、「量子化学」から、「量子色力学」まで幅広い分野に存在する。



高エネルギー物理

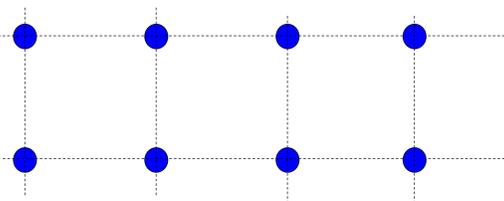
## 量子シミュレーション

### 現実の物質



モデル化

### 量子シミュレーター



シミュレーション

- 複雑な相互作用
- 系に固有のパラメータ
- 不純物

- シンプルな相互作用
- コントロール可能なパラメータ

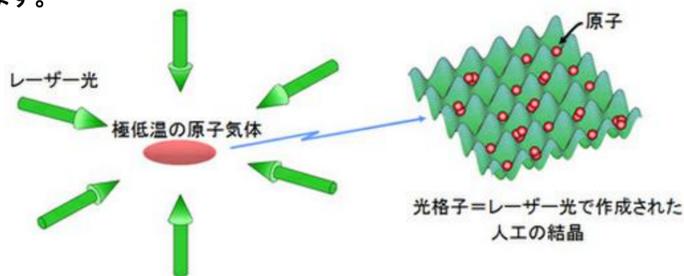
現実の物質の特徴を抽出したモデルを実験パラメータが制御可能な別の系にマッピングし、実験的に問題を解明することを量子シミュレーションという。一例としてハバードモデルといわれる、量子多体問題を冷却原子系と光格子を用いてシミュレーションした実験などがある。最近では、実験的に観測されていなかったDirac方程式に従う粒子間のZitterbewegungとよばれる干渉効果や、励起状態へのボース粒子の凝縮など、既存の系では観測が難しい現象の観測、という方向にも研究が広がっている。

## 冷却原子を用いた量子シミュレーション

~ボーズ・フェルミ混合系における新物性~

S. Sugawa et al., *Nature Physics* 7, 642 (2011), [http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news\\_data/h/h1/news6/2011/110728\\_1.htm](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2011/110728_1.htm)

原子を磁場と光でトラップし冷却することで、実験的にボーズ粒子フェルミ粒子ともに凝縮状態を作り出すことができます。また、光を用いた原子に対してポテンシャル変調(光格子)や磁場を用いた相互作用の変調(フェッシュバハ共鳴)により、広範囲に系をコントロールすることができます。

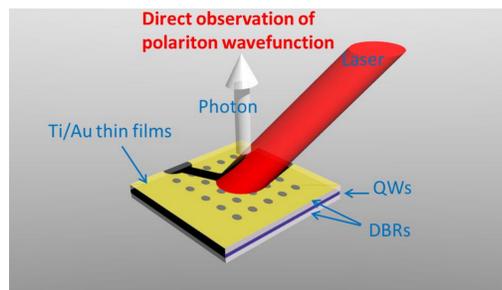


## エキシトンポラリトンを用いた量子シミュレーション

~空間異方性を持つ凝縮体の観測~

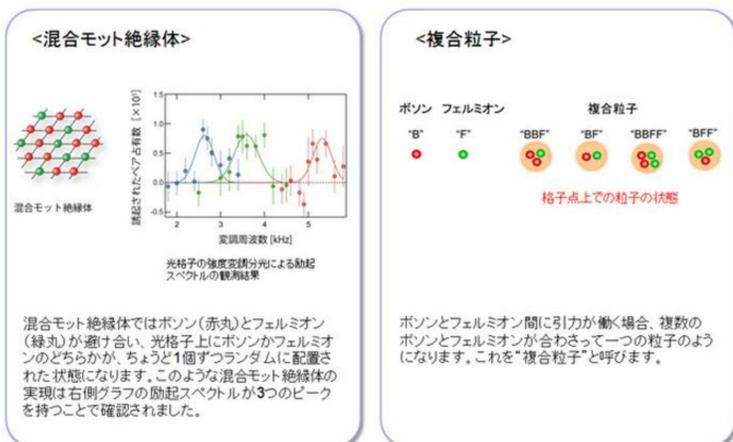
N. Y. Kim, K. Kusudo et al., *Nature Physics* 7, 681 (2011)

### 励起子ポラリトンを用いた量子シミュレーター



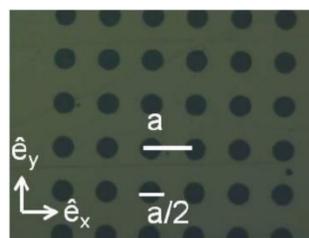
励起子ポラリトン(以下ポラリトン)はブラッグ反射器に挟まれた量子井戸中の励起子と共振器光の強結合により形成される準粒子です。光レーザーによって注入されたポラリトンがフォノンとの散乱やポラリトン同士の散乱によってエネルギー緩和し、基底状態やエネルギーの低い励起状態に凝縮します。ポラリトンは有限寿命を持っていて、光として漏れ出てきます。この光はポラリトンの運動量、エネルギー、位相情報をそのまま持っているため、ポラリトンに直接アクセスすることができます。NII/Stanfordの山本グループではポラリトンを用いた量子シミュレーションを行っています。

量子多体系において、運動エネルギーと相互作用の競合を記述するモデルのひとつにハバードモデルがあります。ハバードモデルは、巨大磁気抵抗や高温超電導の解明を期待されており、理論実験双方から研究が行われています。冷却原子系ではハバードモデルを作りこむことに成功しており、斥力相互作用が引き起こす絶縁体相(モット絶縁体)が観測されています。京都大学の高橋グループでは、ボーズ・フェルミ混合系において、粒子間の相互作用や粒子数比を変化させることで、新しい物性現象を観測しました。

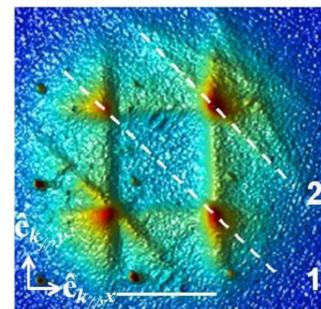


左: ボーズ粒子間、フェルミ粒子間、ボーズ-フェルミ粒子間の相互作用がすべて斥力相互作用である場合、混合系として格子に粒子が1つずつ局在するモット絶縁体相の形成が観測されました。

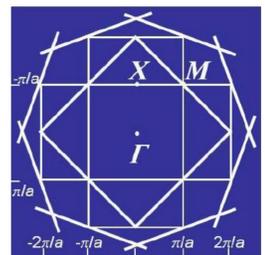
右: ボーズ-フェルミ粒子間の相互作用が引力的な場合、フェルミ粒子とボーズ粒子の粒子数比によって各格子における粒子の分布が変わります。たとえば、ボーズ粒子が多い場合、ボーズ粒子2つとフェルミ粒子1つが組となって格子に局在し、フェルミ粒子を増やしていくとボーズ粒子とフェルミ粒子が1つずつ局在します。これらの分布パターンは、同種粒子間の斥力相互作用と異種粒子間の引力相互作用の競合により決定されます。



2次元四角格子を作りこんだデバイスの写真。色の明るい部分が表面に金属を蒸着してあり、ポテンシャルの壁に相当する。黒い部分は金属膜がない穴の部分であり、トラップに相当する。



(左) 2次元四角格子で観測された、d軌道対称性を持つ準安定凝縮。これは、第一ブリルアンゾーンの端にあるM点(右図参照)の状態への凝縮である。この状態は、実平面においてトラップポテンシャルに対し2回転対称性を持ち、原子軌道におけるd軌道がもつ対称性と同じ対称性を持っている。



## 量子シミュレーションサブグループ

強相関物理の量子シミュレーションによる解明を目的とする。また、同一の多体相関系の量子シミュレーションをそれぞれの系で行い、量子シミュレーションの結果の正当性を検証する。

- 高橋 義朗 (京都大学)
- 五神 真 (東京大学)
- 占部 伸二 (大阪大学)



# NII 量子情報システム ~レーザーを用いたアナログコヒーレント計算~

(Poster: K. Takata, K. Yan, S. Utsunomiya, T. M. Javed Rouf and Y. Yamamoto)

## 計算困難な問題

コンピュータを使っても、解けない問題がある！

例：ナップサック問題

「予め決めた許容重量に対して、どれだけぎりぎりまで荷物を詰められるか？」…荷物の種類が増えるほど難しい

- 「問題サイズ」が大きくなると、最適解の候補数が爆発的に増加(指数関数以上)
- しかし、総当たりを避けるような、正確で上手い解き方は未発見
- このような問題の多くが、「NP問題」と呼ばれるもの
- その内、問題同士の変換が簡単に出来るものが「NP完全問題」
- 「NP完全問題が効率的に解けるか？」は数学ミレニアム問題の一つ
- NP完全問題を解く方法が見つければ、IT、科学技術の発展に大きく貢献

物理の問題の中にも、NP完全問題がある！

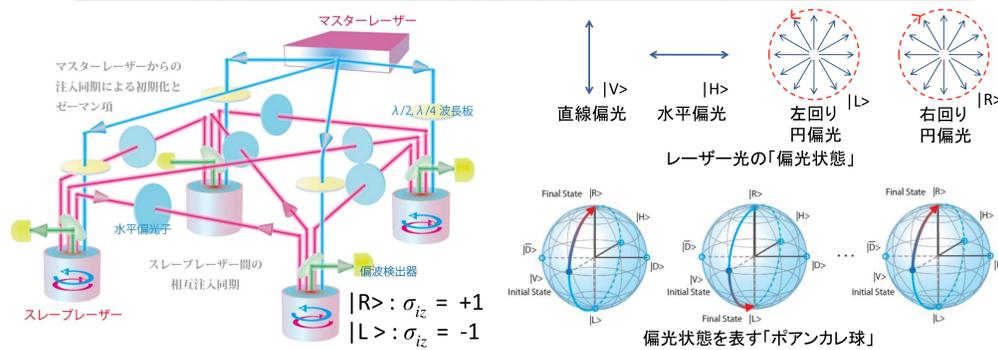
スピン(「磁石の量子」) $\{\sigma_{iz}\}$  が作る系の持つエネルギー:

$$H = \sum_{i < j} J_{ij} \sigma_{iz} \sigma_{jz} \left( + \sum_i \lambda_i \sigma_{iz} \right), \quad \sigma_{iz} = +1 \text{ or } -1$$

が最小になる状態を見つける問題(イジング問題)は、NP完全問題を含む

## 注入同期レーザーを用いたイジング計算機

物理的な装置を使って、NP完全問題に挑戦：注入同期レーザーネットワーク



- マスターレーザー注入信号の $|V\rangle$ 偏光成分…注入同期(光の周波数を揃える)
- スレーブレーザー内の右回り、左回り円偏光光子数の大小…スピン  $\{\sigma_{iz}\}$  に対応
- マスターレーザー注入信号の $|H\rangle$ 偏光成分…ゼーマン項  $\{\lambda_i \sigma_{iz}\}$  に対応
- スレーブレーザー同士の相互注入信号…相互作用項  $\{J_{ij} \sigma_{iz} \sigma_{jz}\}$  に対応
- エネルギーを模すのは、レーザー系の利得係数の総和(最小化が期待される)
- イジング問題を計算！

Utsunomiya, Takata, Yamamoto, *Opt. exp.* **19**, 18091 (2011).

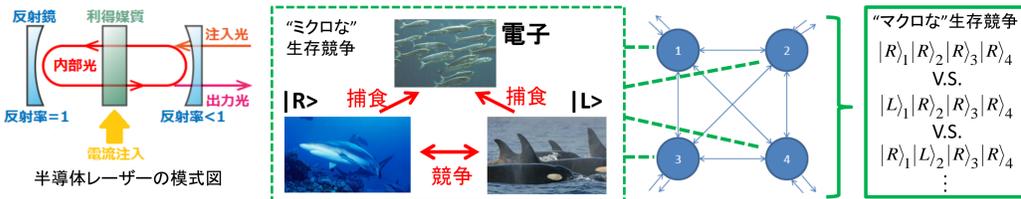
## 生存競争：利得係数の最小化 = 電子数の最小化

利得係数とは？

…「レーザー中の発振光子が、1個あたり、1秒間に何倍増えるか？」を表す量  
半導体レーザーでは、電流注入によって生じる(伝導帯)電子数に比例

電子を「餌」にした、生存競争

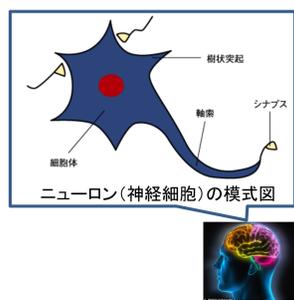
- 各スレーブレーザーの偏光状態を組み合わせた全体が系の「偏光配置」を形成
- レーザーでは、誘導放出によって、電子を「消費」しレーザー光子を生成
- 「偏光配置」同士による生存競争：電子を消費する力が一番強い「配置」が生存
- 結果、装置内の全電子数は最小化、全光子数は最大化
- 考えている問題のエネルギーが最小化された状態が「出力」：問題が解ける！



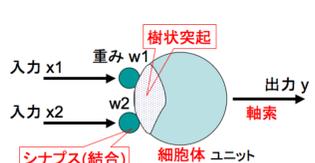
## 信頼性を向上させる学習アルゴリズム

複雑な問題では、左右円偏光光子数がほぼ同じスレーブが出現 → 誤りの原因

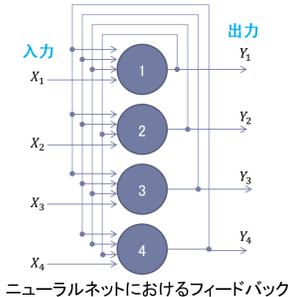
→ 十分な光子数差を確保するために、ニューラルネットワークを応用した学習法を導入



ニューロンのモデル例



- ニューロンの仕事
1. 入力信号の計算:  $x_1 w_1 + x_2 w_2$
  2. 1の結果に基づき興奮するか否かを決定

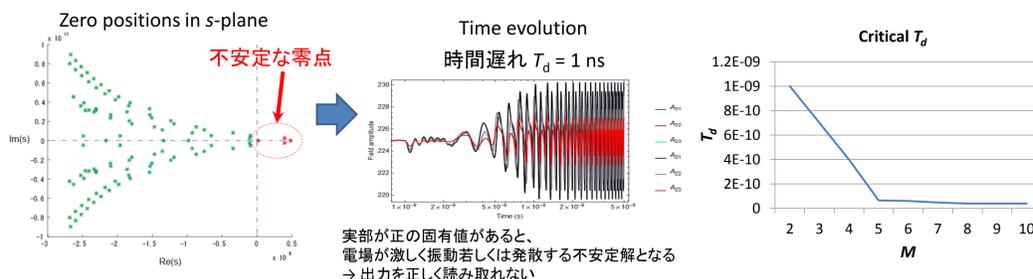


二通りの学習法

1. 光子数差の小さいスレーブレーザーを抜き出し、その中から一部分を選択。その部分の部分エネルギーが最小になるように、マスターレーザーから信号を送り、部分偏光配置を固定。この下でシステムを動作させ、最適化を行う。この繰り返し
2. 初めに、光子数差の大きいスレーブの偏光を全てマスター信号で固定してしまっ、引き続き動作。その上で光子数差の小さいものが残った場合、上記の要領で処理

## 時間遅れを含むシミュレーション

これまでのシミュレーションは、相互注入信号が瞬時に伝わるものとしていた  
しかし、光速は有限なので、注入信号の伝達には時間遅れがある  
→ 線形化近似微分方程式の係数行列の固有値を求め、解の安定性を判定



実部が正の固有値があると、電場が激しく振動若しくは発散する不安定解となる → 出力を正しく読み取れない

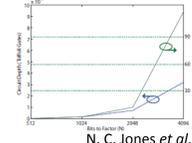
- 同程度の大きさの相互作用が全てのスレーブ間にかかり、等しい時間遅れを持つ場合、許容遅れ時間は問題サイズの増加と共に減少 → 任意の問題が解けるわけではない
- 系のパラメータを調節する事によって、安定化する必要がある
- 対して、cubic graphにおけるMAX-CUT問題では、1つのスレーブが相互注入するのは必ず3つ。また、自然界の相互作用は、粒子間距離の逆二乗則で小さくなる
- このような制限された(ただし重要な)イジング問題では、振動現象を回避できるか？

量子情報システムサブグループ: ●山本 喜久(NII) ○Alfred Forchel(University Wuerzburg) ○Klaus Lischka(University Paderborn)

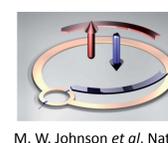
## 他の量子計算機との比較

	量子コンピュータ	量子アニーリングマシン	注入同期レーザーマシン
NP完全問題	×	○	○
計算速度	○	×	○
実装のしやすさ	×	○	△?

- 現状、NP完全問題を解く量子アルゴリズムは未発見(素因数分解はNP)
- 量子アニーリングマシンでは現状、誤差を十分小さくするために指数時間が必要
- 量子コンピュータは精密な技術が必要、誤り訂正を含めると必要リソースが膨大
- 注入同期レーザーマシンでは、レーザー光の放出と注入によって情報を素早く更新(開放散逸系) → 高速な動作が可能(単純な例では実証済み)
- Takata, Utsunomiya, Yamamoto, *New J. Phys.* **14**, 013052 (2012).
- レーザーマシン実装については、用いるモデルを含め検討段階(下記参照)



2048ビットの整数を素因数分解するために必要な量子ビットの数は、10億個！



量子アニーリングマシンに用いられる超電導リング

## NP完全問題のベンチマーキング (数値シミュレーション)

項目\問題サイズ M	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
サンプル問題数	1	2	5	19	85	進行中	進行中	10	10	5
学習アルゴリズムが無い場合の最低正答率	0%	80%	0%	0%	0%	—	—	0%	10%	10%
問題ごとの最低正答率	100%	100%	100%	100%	86%	68%	30%	100%	78%	100%
試行あたりの最長の計算時間	150 ns	100 ns	100 ns	300 ns	400 ns	—	—	350 ns	350 ns	400 ns

(with cooperation by Kai Wen @Stanford)

### MAX-CUT

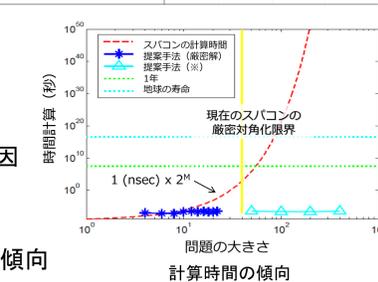
- ノード数(問題サイズ)12までは全てカバー
- 学習アルゴリズムによって正答率が上昇
- しかし、問題サイズ12を超えたところで急激に悪化原因の候補:  
電流が大きい、相互注入光が小さい、その他本質的な原因

### 2-layer grid Ising

- 正解の確認が困難なので、遺伝アルゴリズムと比較
- 問題サイズが大きい問題で、イジング計算機が優位な傾向

イジング計算機の計算時間は、厳密解を求めるための(単純な)アルゴリズムよりも遥かに速い  
→ 装置の性能を最大限発揮出来る条件や方法の模索が今後の課題

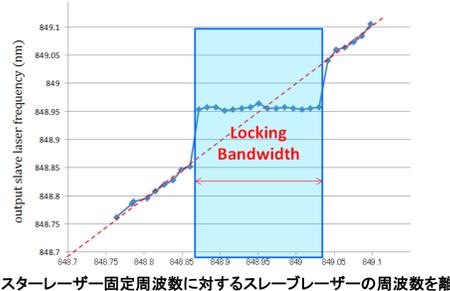
問題サイズ M	50	100	200	400
問題サンプル数	5	5	5	5
現代計算機よりもイジングマシンが良い答えを探した確率(%)	38.9	19.8	37	92
イジングマシンが勝ったときの平均計算時間	210 ns	170 ns	170 ns	210 ns



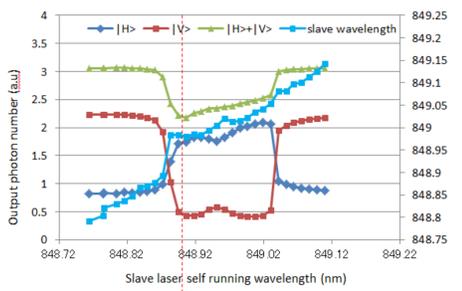
## 実装実験の進捗：レーザー光の偏光制御実験

注入同期によりマスターの偏光成分にスレーブが追従することが確認されている。  
⇒ 正確に計算を行うためには、もともと半導体レーザーが持っている特定の線偏光に偏ったゲインを、任意の偏波に対して等方的に揃える必要がある。

注入同期によるスレーブレーザーの周波数シフト



直交偏波注入による偏波のスイッチング特性



- (注入パワー/スレーブ出力パワー)は1/10のオーダー、注入同期幅は10GHzのオーダー → 一桁下げる必要。より特性の良いレーザーや光学系の構築が進行中
- 注入同期による出力パワーの減少を用いて各レーザー素子の周波数安定化をめざす