

平成 19 年 11 月 21 日



光半導体素子を用いた量子シミュレータを開発 — 新タイプの量子コンピュータへ道 —

概要

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所（所長：坂内正夫（さかうち まさお））（以下、NII という）とスタンフォード大学（学長：ジョン・ヘネシー）（以下、SU という）の山本喜久（やまもと よしひさ）教授と宇都宮聖子（うつのみや しょうこ）研究員らは、独立行政法人科学技術振興機構（理事長：北澤宏一（きたざわ こういち））（以下、JST という）と共同で、多数の相互作用する粒子からなる系で現われる様々な量子多体現象をシミュレートできる光半導体素子を開発することに成功しました。具体的には、量子井戸と呼ばれる半導体薄膜を周期的な光の閉じ込め機能を持った微小光共振器アレイに埋め込んだ光半導体素子を作製し、この系において、「エキシトンポラリトン」と呼ばれる粒子のボーズアインシュタイン凝縮体を多数平行して同時に形成し、これらを相互に結合させることにより、新しい超流動現象を観測することに成功したものです。

多数のボーズアインシュタイン凝縮体が相互に結合し合うと、通常は S 波と呼ばれる特性を持った個々のボーズアインシュタイン凝縮体と同じ位相に同期されて、いわゆる超流動状態を示すことが、これまで冷却原子気体や液体ヘリウムなどを用いた実験で明らかになっていました。今回の光半導体素子を用いた実験では、この S 波超流動状態以外に、個々のボーズアインシュタイン凝縮体が P 波と呼ばれる特性を持ち、相互に 180° ずつ位相が反転して結合する新しいタイプの超流動状態が存在することが初めて発見されました。

相互作用する多数の粒子系が示すボーズアインシュタイン凝縮、超流動、超伝導などの量子多体現象は、これまで超高速超並列計算機を用いても解明の進まなかった複雑な問題でした。今回の実験は、これらの量子多体現象をミクロなレベルで解明していく新しい解析手段を与えるものです。また、ボーズアインシュタイン凝縮体間の結合を人工的に制御することにより、多数の粒子の協同的な冷却過程を利用して数学上の問題を解いていく新タイプの量子コンピュータとして発展していく可能性が期待されます。

本研究の詳細は、「Nature」2007 年 11 月 22 日号に発表される予定です。

ポイント

- ・液体ヘリウムや冷却原子気体などの多粒子系に現われる量子多体現象であるボーズアインシュタイン凝縮、超流動、超伝導などをシミュレートできる光半導体素子を開発した。
- ・これまで超高速超並列計算機を用いても解明の進まなかった相互作用のある多粒子系が示す複雑なふるまいを、光を情報の入・出力に用いることにより、高速で解き明かすことが可能になる。
- ・新しいタイプの量子コンピュータとして注目される。

研究の背景

高温超伝導体に代表される一連の物質や様々な磁性材料では、電子間の相互作用が物質の特性を決める大きな要因になっています。このような物質の特性は多数の電子の協同的なふるまいにより決定されますが、これを記述する理論モデルの代表的なものとしてハバードモデルが知られています。ハバードモデルは非常に複雑な問題であり、解析的、数値的にこれを解くことは、現在の超高速超並列計算機（スーパーコンピュータ）を用いても容易ではありません。このことが、この分野の研究の進展を大きく妨げている要因でした。

そこで、ハバードモデルを数値的に解析するかわりに、ハバードモデルを人工的な実験系で実現し、この系を用いた「模擬実験」を行うことにより、必要な情報を得ることが模索されています。このようなアプローチは量子シミュレーションとか量子エミュレーションと呼ばれ、近年注目を浴びるようになってきました。特に、2002 年に独マックスプランク研究所の研究グループが、レーザー光が作り出す干渉縞にボーズアインシュタイン凝縮した冷却原子を閉じ込め、この系を用いてハバードモデルの模擬実験に成功して以来、原子を用いた量子シミュレーション/エミュレーションの実験が世界的に盛んに行われるようになっていきます¹⁾。

しかし、冷却原子を用いた量子シミュレーション/エミュレーションの実験には、大がかりな装置を必要とする、実験に長い時間がかかる、などの問題点もありました。

研究の経緯

NII と SU の研究グループは、半導体量子井戸に閉じ込められたエキシトン(電子とホールが束縛されて作る複合粒子)と半導体微小共振器に閉じ込められたフォトン強く結合させた時に生成される新しい粒子「エキシトンポラリトン」(図 1) の量子統計性の解明を長年にわたって行ってきました。それらの成果を生かして、2003 年度からは、JST の戦略的創造研究推進事業発展研究 (SORST) の研究課題「光を用いた量子情報システムの研究」(研究代表者：山本喜久 SU 応用物理・電気工学科 教授/NII 量子情報研究グループ 教授) で、エキシトンポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮の実現とその応用研究に取り組んでいます²⁾。

この研究課題では、エキシトンポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮の特性の一つである、熱平衡条件下での量子縮退効果の観測 (Physical Review Letters 誌 2006 年 10 月号に発表)、ボーズアインシュタイン凝縮に伴う巨大な空間コヒーレンスの形成の観測 (Physical Review Letters 誌 2007 年 7 月号に発表) などの成果を上げてきました。これらの成果を踏まえて、本研究ではエキシトンポラリトンを一次元方向に閉じ込めることができるトラップを半導体微小共振器に多数平行して形成し、エキシトンポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮体が相互にトンネル結合できる素子を開発しました。この光半導体素子を用いて、上述のハバードモデルの模擬実験を試みました。

¹⁾ 2007 年より米国においては、国防総省国防高等研究事業局 (通称 DARPA) の大型プロジェクトが冷却原子を用いた量子エミュレーションに対して開始された。

²⁾ 励起子ポラリトンは原子、励起子に比べて質量がそれぞれ 10^{-8} 、 10^{-4} 倍軽いために、ボーズアインシュタイン凝縮が起る温度はそれぞれ 10^8 、 10^4 倍高くなる点にその魅力があります。

研究の内容

今回の実験に用いた半導体微小共振器の構造を図 2.a に示します。AlAs と GaAlAs から形成される共振器中に閉じ込められた光の定在波の腹の部分に、4 つの GaAs 量子井戸からなる活性層を 3 組挿入しました。このプレーナ形の半導体微小共振器中に形成されるエキシトンポラリトンがボーズアインシュタイン凝縮を起こす様子を図 3 に示します。図 3 には、エキシトンポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮に伴う運動量分布の変化が示されています。ボーズアインシュタイン凝縮のしきい値以下のポラリトン密度では、エキシトンポラリトンの運動量は熱的に大きく広がっています。しかし、エキシトンポラリトンの数がしきい値に達すると、急激に運動量分布が狭くなり、ボーズアインシュタイン凝縮が起こったことが確認されます。このような微小共振器の上に金とチタンからなるストライプ形状の電極を付けることにより、エキシトンポラリトンを一次元方向に閉じ込めることが可能となります（図 2.b）。観測されたポテンシャルエネルギーは、電極下で高く、電極間で低くなっており、エキシトンポラリトンが電極間に閉じ込められることがわかります。

図 4 左側の 2 つの図は、ボーズアインシュタイン凝縮のしきい値以下の条件でのエキシトンポラリトンの実空間分布（上側）と運動量分布（下側）を示しています。エキシトンポラリトンは、電極間に閉じ込められ、また運動量は熱的に広がっています。エキシトンポラリトンの数を次第に多くし、しきい値に達すると、図 4 中央の 2 つの図に示すように、エキシトンポラリトンは電極間ではなく、電極下に閉じ込められ（上側の図）、運動量分布は $\pm 8^\circ$ の方向に集中します（下側の図）。この実験結果は、P 波の特性を持ったボーズアインシュタイン凝縮体が相互に 180° ずつ位相が反転して結合する新しいタイプの超流動状態が形成されたことを示唆しています。さらに、エキシトンポラリトンの数を増やしていくと、図 4 右側の 2 つの図に示すように、エキシトンポラリトンは再び電極間に閉じ込められ（上側の図）、運動量分布は 0° の方向に集中することがわかります（下側の図）。この実験結果は、S 波の特性を持ったボーズアインシュタイン凝縮体が同位相で結合する通常の超流動状態が形成されたことを示唆しています。

これらの 2 つの超流動状態が存在することは、ハバードモデルの新しい世界を示すもので、今回の実験で初めて明らかにされたものです。

今後の発展

今回開発された光半導体素子を改良して、より現実の電子材料、磁性材料、超伝導材料に近い理論モデルを模擬実験することにより、新材料開発に繋げていくと共に、新しい物性の発見を目指していく予定です。また、現在のスーパーコンピュータを用いても数値的に解くことが難しい数学上の問題を、光半導体素子構造の中に書き込み、多数の粒子が示すボーズアインシュタイン凝縮現象を利用して、この数学的問題を模擬実験から解くことが考えられます（図 5）。このような計算手法はアニーリング・マシーンと呼ばれてきましたが、真の解である基底状態に必ずしも系が冷却していくとは限らず、準安定状態（誤った解）へトラップされることがしばしばあります。ボーズアインシュタイン凝縮という協同冷却現象を利用して、高速に真の基底状態へ系を冷却させることができると期待されています。これは、ボーズアインシュタイン凝縮という新しい冷却過程を利用した新タイプの量子コンピュータと考えられ、その可能性も併せて探っていく予定です。

用語の説明

- ボーズ粒子

整数のスピンを持った粒子をいう。光子、水素原子、クーパー電子対、エキシトンなどがこれに属する。奇数のスピンを持った粒子はフェルミ粒子と呼ばれ、電子、中性子などがこれに属する。

- ボーズアインシュタイン凝縮

多数のボーズ粒子がある臨界密度と臨界温度の条件下で、全てエネルギーの最も低い基底状態へ落ち込む現象をいう。1925 年アインシュタインにより予言され、1995 年冷却原子気体で実現された。

- 超流動・超伝導

液体が摩擦を受けずに流れる現象、電流が抵抗を受けずに流れる現象をいう。どちらもボーズアインシュタイン凝縮に伴う現象として理解される。

- エキシトンポラリトン

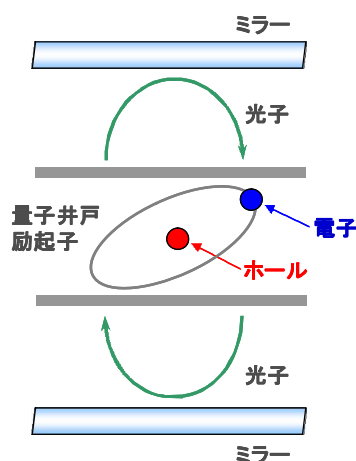
電子-ホール対が束縛状態（ペア）となったエキシトンと共振器にトラップされた光子が強く結合して作り出された新しい複合粒子で、ボーズ粒子としてふるまう。（図 1）

- ハバードモデル

粒子を周期的に閉じ込めるポテンシャル中での多数の粒子の集団的ふるまいを記述する理論モデル。金属-絶縁体相転移、高温超伝導体などを記述できるモデルとして注目されている。（図 6）

発明のポイント

- 励起子ポラリトンの質量は励起子の質量の 10^{-4} 倍
→ BECしきい値温度は 10^4 倍高くなる ($10^2 \sim 10^3 \text{K}$)
→ BECしきい値密度は 10^{-6} に減少する ($10^9 \sim 10^{10} \text{cm}^{-2}$)
→ 結晶欠陥などにトラップされにくい
- 位置・運動量・エネルギー分布に直接アクセスできる
励起子ポラリトンの位置・運動量・エネルギー
= ミラーから透過してくる
光子の位置・運動量・エネルギー



A. Imamoglu, R.J. Ram, S. Pau and Y. Yamamoto (1996)

図 1. エキシトンポラリトンとボーズアインシュタイン凝縮

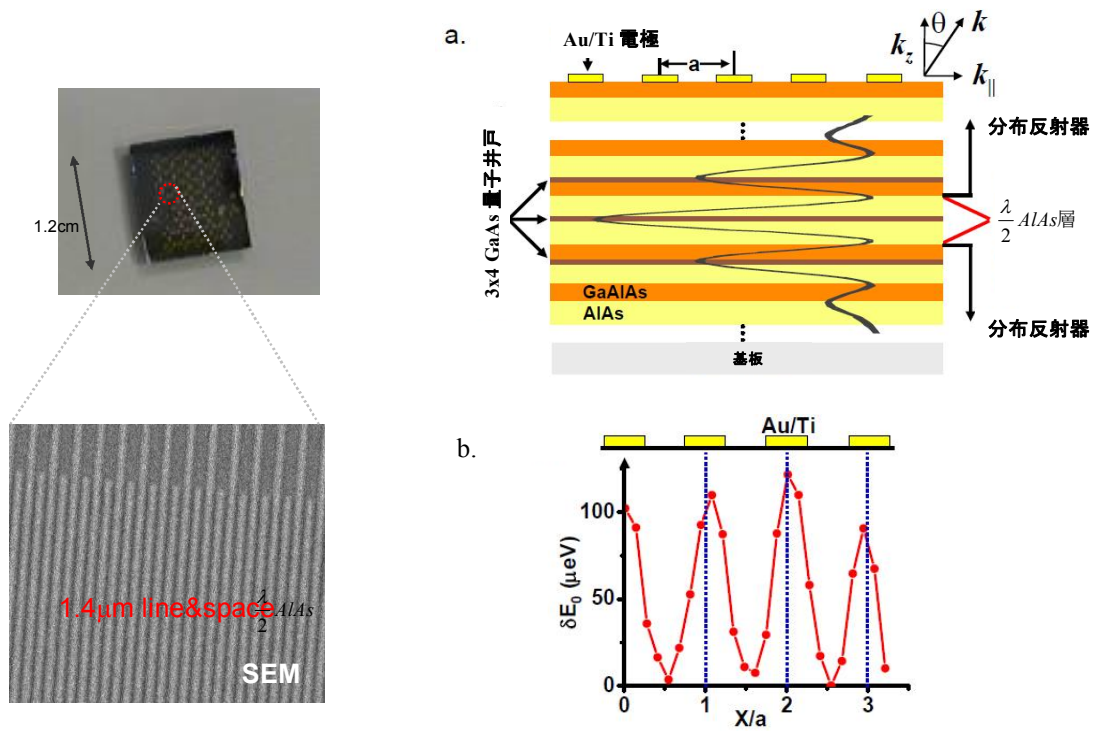


図 2. ハバードモデルをシミュレートする光半導体素子

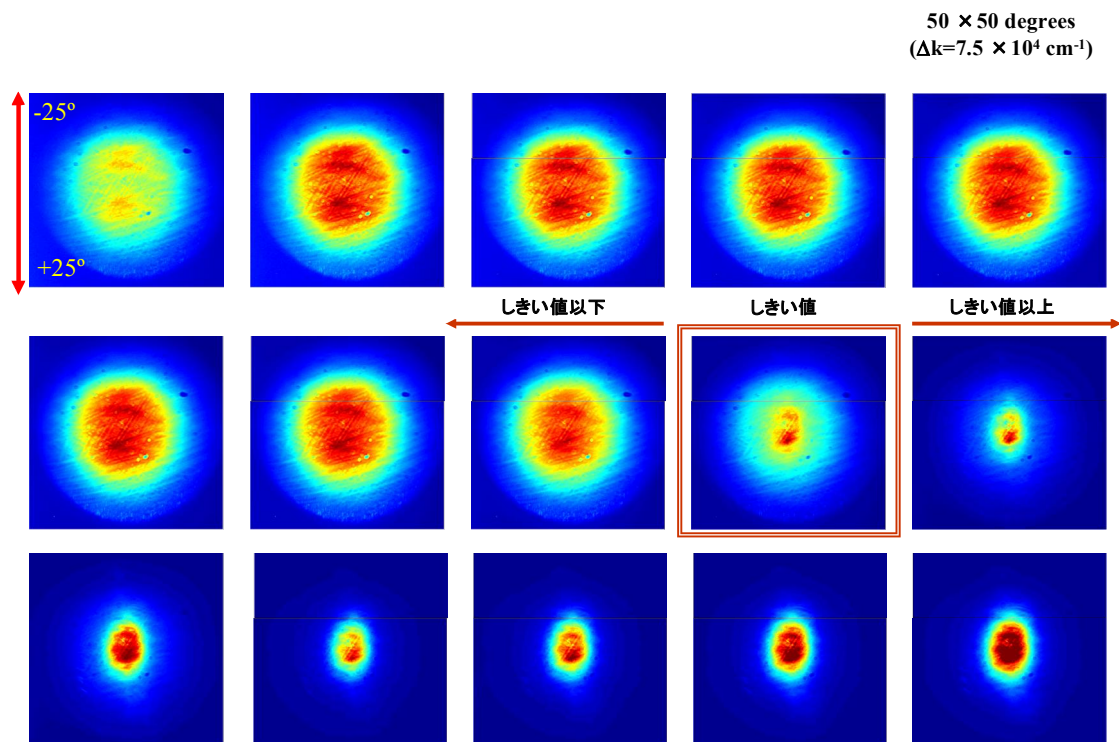


図 3. エキシトンポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮に伴う運動量分布の劇的な減少

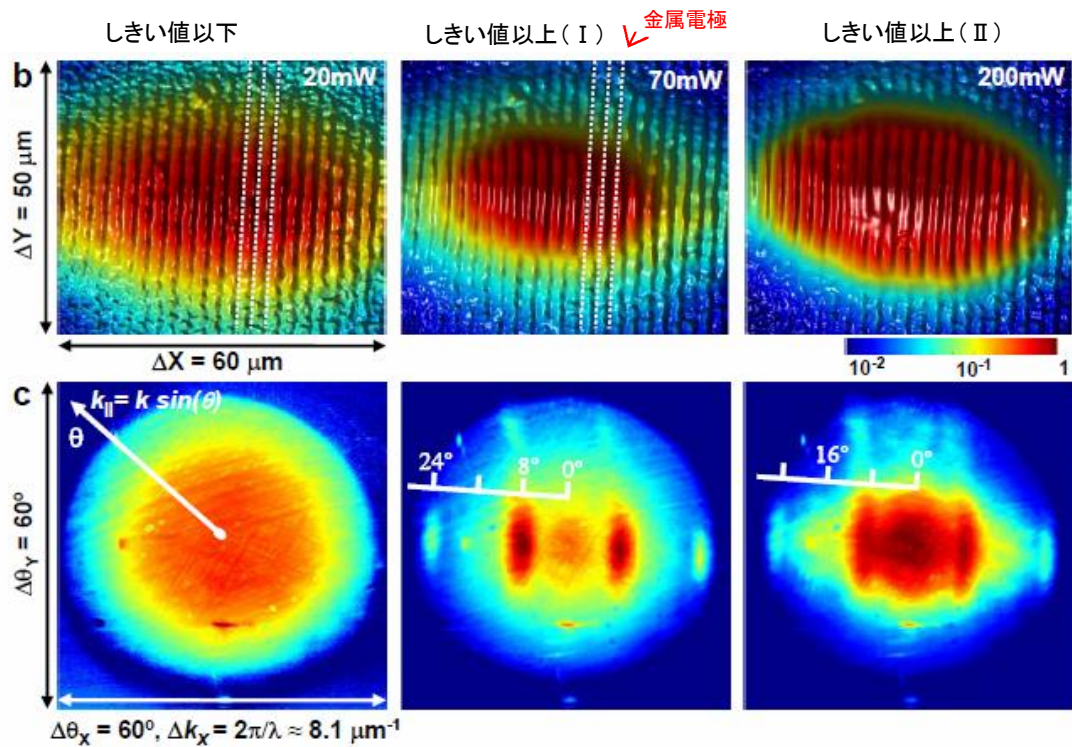


図4. エキシトンポラリトンの熱平衡状態（左）、P波超流動状態（中央）、S波超流動状態（右）の実空間分布（上側）と運動量分布（下側）

- ユニタリ変換による可逆量子計算（数学的モデル）
A. Barenco et al. (1995)
- 断熱変化による可逆量子計算
E. Farhi et al. (2000)
- 量子測定による非可逆量子計算
R. Raussendorf and H.J. Briegel (2001)
- ボーズ凝縮（誘導冷却）による散逸量子計算

孤立系
↑
↓
開放系

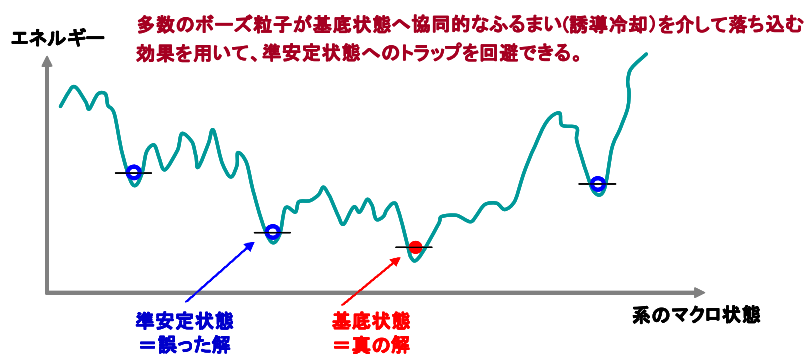


図5. 量子コンピュータの実現法

- ボーズ・ハバード・モデル
超流動 – モット絶縁体 – バンド絶縁体相転移
- アンダーソン・ハバード・モデル
超流動(金属) – ガラス相転移
- フェルミ・ハバード・モデル
金属 – d波超伝導体 – 反強磁性絶縁体相転移
↓
高温超伝導体の発現機構
- スピン格子・モデル
磁性秩序相、スピンガラス、スピン波

光格子にトラップされたボーズアインシュタイン
凝縮した原子

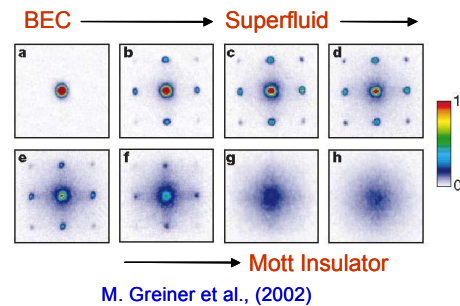
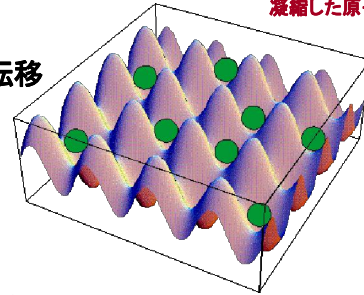


図 6. 様々なハバードモデル

共同研究

本研究は、NII と SU の研究グループが JST、NTT 物性科学基礎研究所、東京大学(科学技術振興調整費プロジェクト)と共同して行ったものです。

本件の問い合わせ先

国立情報学研究所 量子情報研究グループ

教授 山本 喜久

研究員 宇都宮 聖子

住所：〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

プレス/取材に関する窓口

国立情報学研究所 企画推進本部広報普及チーム (担当：小野・早川)

TEL：03-4212-2135 FAX：03-4212-2150

E-mail：kouhou@nii.ac.jp

独立行政法人科学技術振興機構 広報・ポータル部広報課

TEL：03-5214-8404