

## 人工格子中で d 波ボーズアインシュタイン凝縮体を初めて実現 —半導体チップ上の量子シミュレーション実験に成功—

情報・システム研究機構 国立情報学研究所（以下 NII、所長：坂内 正夫）の山本 喜久 教授とそのグループは、内閣府 最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」の支援を受け、半導体チップ上に構成されたマイクロ共振器デバイスを用いて、d 波ボーズアインシュタイン凝縮体を実現することに初めて成功しました。

本最先端プロジェクトでは、理論的にも数値的にも解析困難な数学、物理学、化学上の難問を解くことの出来る量子シミュレーターの開発を、目標の一つにしています。今回の成果は、半導体マイクロ共振器中に 2 次元正方格子を持つデバイスを開発し、その中で生成された励起子ポラリトンのボーズアインシュタイン凝縮体を用いて、銅酸化物高温超伝導体などを実現していると言われる d 波凝縮体を世界で初めて人工的に実現しました。

これまで、現実の物質に対する限られた実験手段によってのみ研究されてきた d 波凝縮体ですが、今後はこの人工格子に基づく量子シミュレーターを用いて、その特性・発現機構がより一層明らかにされ、新たな物性現象の発見に繋がるものと期待されます。

この成果は、平成 23 年 6 月 19 日（日）（英国時間）発刊の「Nature Physics」誌（電子版）に掲載されました。

■この成果は 6 月 19 日（電子版）発刊の「Nature Physics」誌（電子版）に掲載されました。

掲載論文名：“Dynamical d-wave condensation of exciton-polaritons in a two-dimensional square-lattice potential” (Na Young Kim, Kenichiro Kusudo, Congjun Wu, Naoyuki Masumoto, Andreas Löffler, Sven Höfling, Norio Kumada, Lukas Worschech, Alfred Forchel and Yoshihisa Yamamoto)

### 【背景】

ボーズアインシュタイン凝縮 (BEC) は、摩擦を受けずに原子が流れる超流動現象、抵抗を受けずに電子が流れる超伝導現象の発現メカニズムと理解されています。にもかかわらず、BEC の物理の解明は超流動や超伝導自体の研究に比べ遅れていました。特に、理論的には可能な励起状態 [d 波] での凝縮に関しては、ほとんど研究が行われておりませんでした。それは、原子を使った実験系においては、粒子の冷却の効率が良いために、基底状態 (s 波) への冷却が素早く行われ、仮に励起状態での凝縮が起こっていたとしても、観測が難しいためでした。

その点、半導体中の励起子と光子の混合粒子である励起子ポラリトン（以下、ポラリトン）系では、冷却時間と寿命が同程度であることから、励起状態で凝縮しているポラリトンの観測が容易であります。また、このポラリトン凝縮体からの発光を観測することで、凝縮体の運動量分布だけでなく、空間分布も正確に測定することができます。

### 【今回の成果】

NII 研究グループは、特殊な半導体マイクロ共振器デバイスを作製して、ポラリトンに対する弱い周期的なポテンシャル変調を実現しました。本研究では、円柱型ポテンシャルを正方格子状に配置し、2 次元正方格子ポテンシャルを構築し、レーザー励起によりデバイス中にポラリトンを注入しました。注入されたポラリトンは、半導体を構成する原子の振動モード（フォノン）との相互作用やポラリトン同士の散乱により冷却されますが、周期ポテンシャルによるバンドギャップが存在すると冷却が非効率的となり、励起状態に蓄積されます。今回、この励起状態におけるボーズアインシュタイン凝縮体を高解像度の実空間、運動量空間分布測定により読み出し、d 波凝縮体となっていることを確認しま

した。

半導体チップ上の2次元人工格子に形成された励起子ポラリトンのd波ボーズアインシュタイン凝縮体を実現した今回の実験は、量子シミュレーターとしてのこの種の半導体デバイスの有効性を示すものであり、今後、新しい物性現象の発見に威力を発揮するものと期待されます。

### 【今後の展望】

今後は様々な格子構造中の新しい凝縮相の探索を目指していく予定です。高温超電導体や巨大磁気抵抗などの量子材料のシミュレーションと共に新しい物性物理、統計力学の発見につながることを期待できます。

### ■ 成果の補足

半導体デバイスは、マイクロ共振器中に12層の量子井戸が埋め込まれた構造をしており、レーザー光でポンプすることによって、共振器中の光子と量子井戸中の励起子の混合状態である励起子ポラリトンが注入されます(図1)。この半導体表面に薄い金属膜を蒸着することで、ポラリトンに対して弱いポテンシャル変調をかけることができます。図2aには正方格子ポテンシャルを実装したサンプルの表面の写真が示されています。図2bに、弱い正方格子ポテンシャルが作るバンド構造を示しています。運動量空間の特異点であるMと呼ばれる点では、第4バンド(下から4番目のバンド)の状態は、エネルギー最小であり、かつ下の状態(下から3番目のバンド)とエネルギーギャップがあります。このような状態は、(準安定)励起状態となりえます。また、理論計算でこの状態がd波対称性を持つことが分かります。この(準安定)励起状態でのボーズアインシュタイン凝縮を、運動量空間におけるポラリトン分布測定で確認しました(図2d)。図2cに示されている正方格子のブルリアンゾーンと比べると、図2dに示されている実験結果においてM点に分布が集中していてボーズアインシュタイン凝縮が起こっていることが分かります。

実空間においては、図3bに示されているようにd波凝縮体はトラップの中心に対して2回転対称性をもち、トラップの中心ではポラリトンの分布が0、トラップとトラップの間に粒子密度のピークが存在します。一方、基底状態であるs波状態は、図3aに示されているように、各トラップの中心に分布のピークを持ちトラップとトラップの間は分布が小さくなっています。このとき、図3a,b中の赤い線で囲まれた領域に対して、図の縦軸に沿ってポラリトンの分布をプロットしてみると、図3cのようになります。つまり、s波とd波ではポラリトン分布のピークがちょうど周期の半分だけずれているのが分かります。これを実験的に観測したのが図4です。このデバイスでは、ポンプレートを選ぶことにより、金属超伝導体に見られるs波凝縮体と酸化物超伝導体に見られるp波凝縮体のどちらかを実現することが出来ます。

上記のように、実空間、運動量空間において、d波のポラリトン凝縮体が理論的な予測通り観測されました。

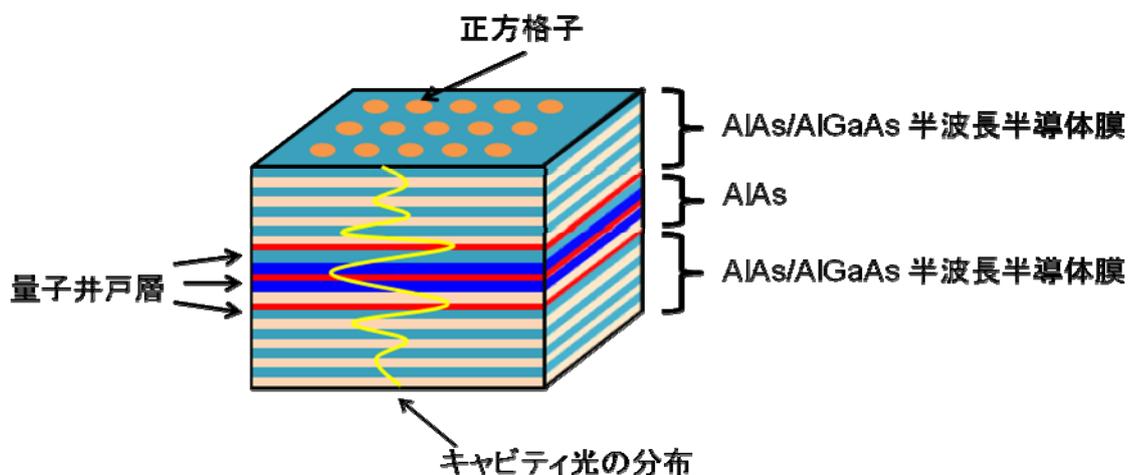


図 1: 半導体サンプルの概念図。AlAs/AlGaAs 半波長半導体膜により形成されるマイクロ共振器中に、1 層に 4 つの GaAs 量子井戸が埋め込まれた量子井戸層が 3 層埋め込まれている。表面には、正方格子を形成する金属パターンを作りこんでいる。

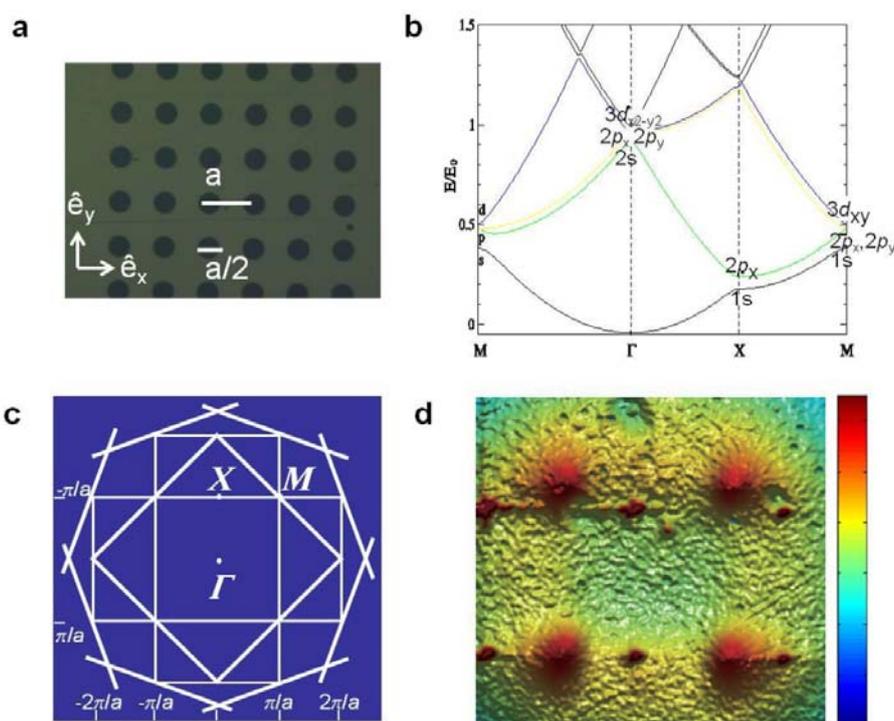


図 2: (a) 半導体サンプル表面の写真。色の薄い部分が、金属が蒸着されている領域でポテンシャルの壁に相当します。色の濃い部分は、金属がない穴の部分で、ポテンシャルのトラップに相当します。正方格子の周期  $a$  に対して、トラップの直径、トラップ間の距離はそれぞれ  $a/2$  です。(b) 弱い正方格子ポテンシャルによるバンド構造の計算結果。M 点第 4 バンド状態が、d 波対称性を持つ (準安定) 励起状態です。(c) 正方格子のブリュアンゾーン。(d) 実験で得られた、ポラリトンの運動量空間分布。軸は運動量空間。

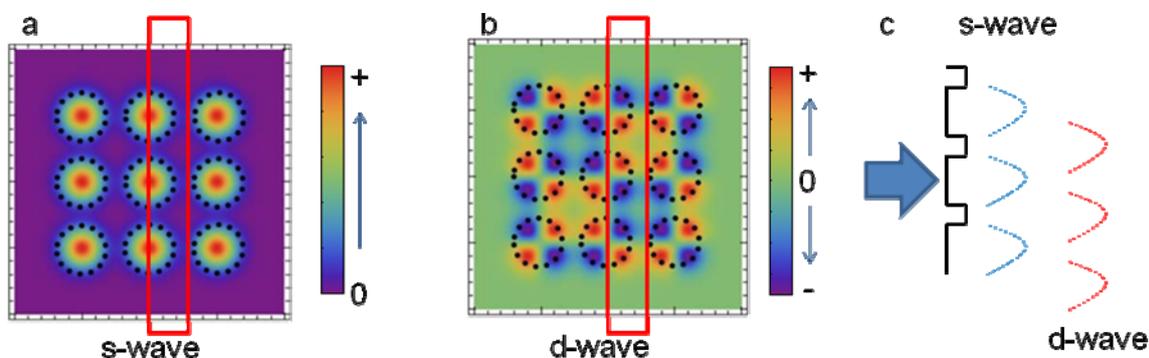


図 3: s 波状態(基底状態)の波動関数(a)と、d 波状態の波動関数(b)をプロットしたもの。黒い点線は、トラップの位置を示しています。s 波がトラップの中心にピークを持っているのに対して、d 波はトラップ間にピークを持っています。また、1 つのトラップに対して 2 回転対称性を持つことが分かります。(c) 赤いラインで示された領域について、図の縦軸にそってポラリトン分布をプロットしたものです。黒い線は、トラップポテンシャルを示しています。s 波(青い点線)と d 波(赤い点線)でポラリトン分布のピークがちょうど反対にずれていることが分かります。

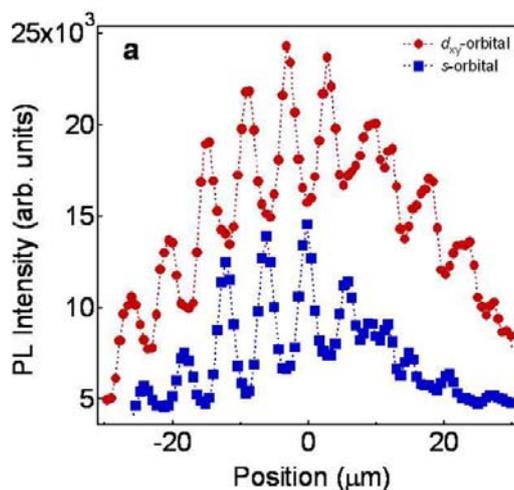


図 4: 実験で得られた s 波状態と d 波状態の凝縮体中のポラリトン空間分布。図 3 で見た理論的予想通りに、d 波凝縮体のポラリトン分布(赤点)は s 波凝縮体の分布(青点)と空間的に周期の半分だけずれていることを実験的に確認しました。

## <用語解説>

### ● ボーズアインシュタイン凝縮

多数のボーズ粒子からなる系は、低温に冷やすと無限に近い非常に多くの状態の中から1つの状態だけが選ばれて、ここに全てのボーズ粒子が集まり、集団として位相のそろった1つの波(物質波、またはド・ブロイ波)としてふるまうようになる。この現象をボーズアインシュタイン凝縮という。1924年アインシュタインによって予言され、1995年冷却原子を用いて実現された。

### ● 超伝導

2つの電子が引力で結びつき電子対(クーパー対)を作るとボーズ粒子となる。このボーズ粒子であるクーパー対が低温でボーズアインシュタイン凝縮を起こすと、超流動の場合と同じく摩擦を受けることなくクーパー対が流れることができる。クーパー対は電荷を持っているので、このことは抵抗(損失)のない電流が流れることを意味する。この現象を超伝導現象という。

### ● フォノン

主に結晶中において、それを構成する原子の振動を量子化したもの。

### ● 半導体マイクロ共振器

光の波長の半分の厚さを持った半導体膜を、両側から高い反射率を持つ半導体多層膜ミラーで挟んだプレーナ構造で、光を2次元面内に閉じ込める機能を持つ。その半導体膜の中央に電子とホールを同時に閉じ込められる量子井戸を埋め込む(図1)。

### ● 励起子ポラリトン

上記半導体マイクロ共振器において、2次元の共振器に閉じ込められた光子と2次元の量子井戸に閉じ込められた励起子(電子-ホール対)が強く結合すると、半分は光子で半分は電子-ホール対である新しいボーズ粒子が誕生する。これを励起子ポラリトンという。

### ● バンド、バンドギャップ、ブルリアンゾーン

周期ポテンシャル中を運動する質量を持った粒子は、エネルギーと運動量間の分散関係が変調される(図2b)。この変調された分散関係をバンド構造と呼ぶ。実空間の周期条件により、運動量空間にも周期条件が現れる。運動量空間をこの周期条件で、分割していったものがブルリアンゾーンである。また、周期ポテンシャルによりブルリアンゾーンの端で分散曲線に飛び(状態が存在しない領域)が現れる。この飛びをバンドギャップと呼ぶ。

● s 波、d 波

原子に束縛された電子の軌道は、エネルギーの低いほうから s, p, d, f... 軌道と呼ばれている。それぞれ、空間的な対称性が異なり、s 軌道は等方的であり d 軌道は1つの軸に対して2回転対称性を持つ。この電子軌道の対称性との類似性から、2次元等方的なトラップに対して、等方的な分布を持つ状態を s 波状態、2回転対称性を持つ状態を d 波状態と呼んでいる。通常の金属超伝導体では、その波動関数は s 波対称性を持つが、銅酸化物高温超伝導体では、その波動関数は d 波対称性を持つと言われている。

<研究に関する 問い合わせ先>

山本 喜久 (ヤマモト ヨシヒサ)

楠戸 健一郎 (クスド ケンイチロウ)

情報・システム研究機構 国立情報学研究所

情報学プリンシプル研究系

Tel : 03-4212-2506

Fax : 03-4212-2641

E-mail : [yyamamoto@nii.ac.jp](mailto:yyamamoto@nii.ac.jp)

[kusudo@nii.ac.jp](mailto:kusudo@nii.ac.jp)

<広報 問い合わせ先>

国立情報学研究所 企画推進本部 広報普及チーム (岡本)

Tel : 03-4212-2131 E-mail : [kouhou@nii.ac.jp](mailto:kouhou@nii.ac.jp)