

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 —

国立情報学研究所
科学技術振興機構

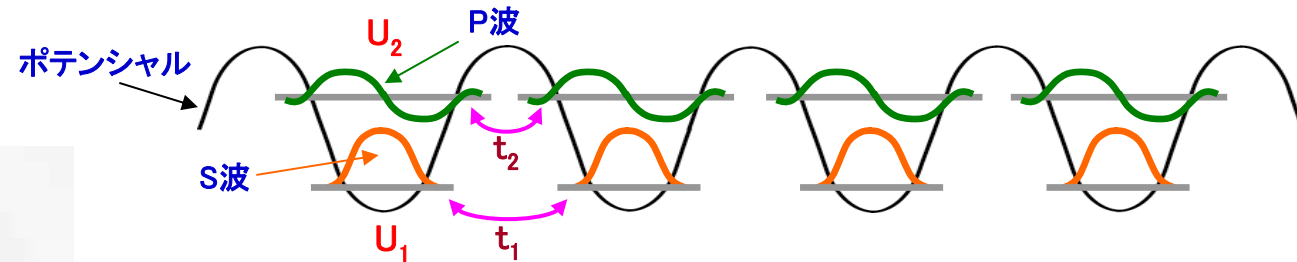
- 液体ヘリウムや冷却原子気体などの多粒子系に現れるボーズ凝縮、超流動、超伝導などの量子多体現象をシミュレートできる光半導体素子を開発した。
- これまでスーパーコンピュータを用いても解明の進まなかった相互作用のある多粒子系が示す複雑なふるまいを、光を情報の入・出力に用いることにより、高速で解き明かすことが可能になる。
- 新タイプの量子コンピュータとして注目される。

ハバード・モデル

J. Hubbard (1963) 周期ポテンシャル中で相互作用しながらトンネルする多数の粒子を扱う最も基本的なモデル



J. Hubbard



$$H = \sum_i (\varepsilon_{i1} \hat{n}_{i1} + \varepsilon_{i2} \hat{n}_{i2}) - t_1 \sum_{\langle i,j \rangle} \hat{b}_{i1}^+ \hat{b}_{j1} - t_2 \sum_{\langle i,j \rangle} \hat{b}_{i2}^+ \hat{b}_{j2} + \frac{1}{2} U_1 \sum_i \hat{n}_{i1} (\hat{n}_{i1} - 1) + \frac{1}{2} U_2 \sum_i \hat{n}_{i2} (\hat{n}_{i2} - 1)$$

(2バンド・ハバードモデル)

多体モデルの量子シミュレーション

- 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

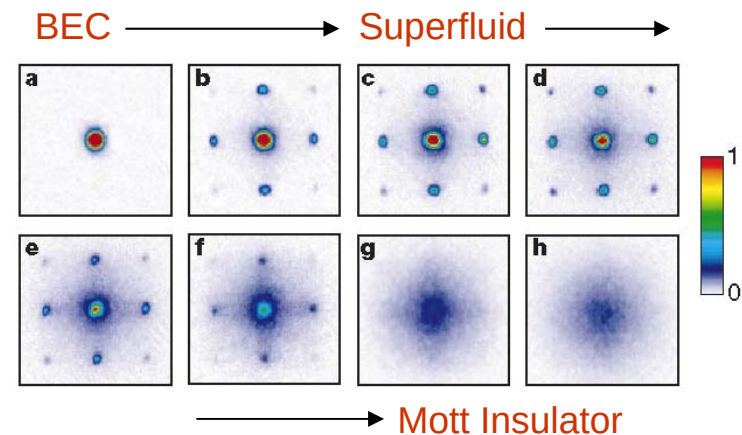
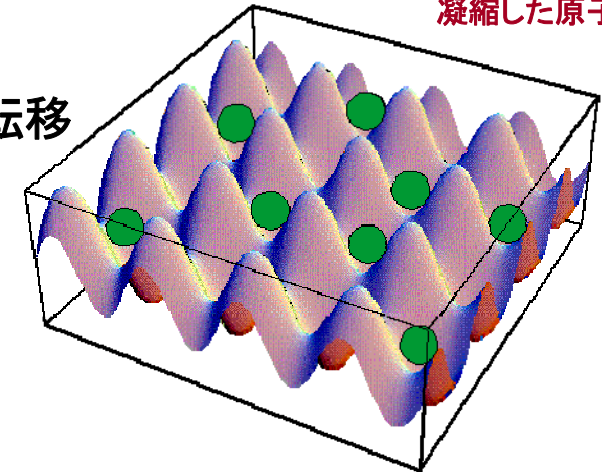


高温超伝導体の発現機構

- スピン格子・モデル

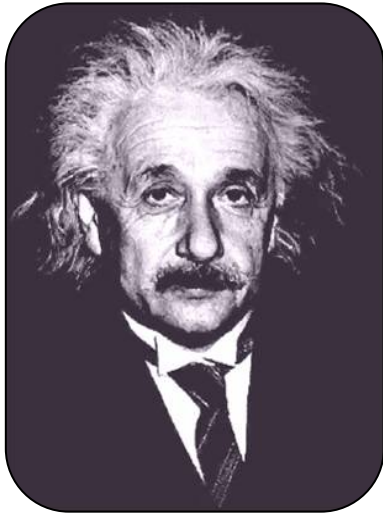
磁性秩序相、スピングラス、スピン波

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



M. Greiner et al., (2002)

ボーズアインシュタイン凝縮



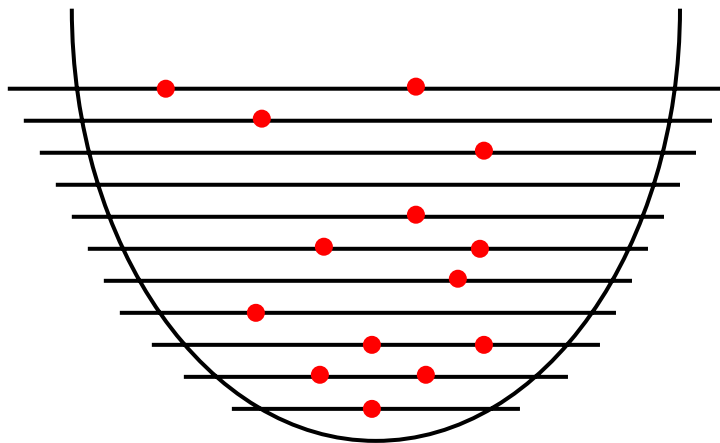
相互作用のない自由原子 → 理想気体

$$T < T_c = \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B} \left(\frac{n}{2.62} \right)^{2/3}$$

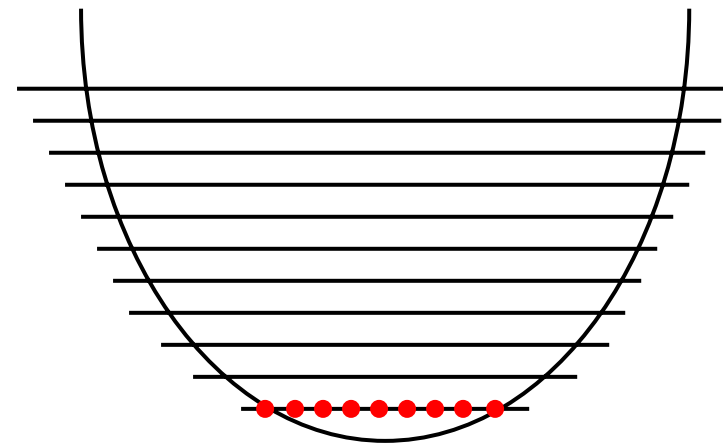
n: 粒子密度
m: 粒子質量



全ての粒子は基底状態へ落ち込む (1925)

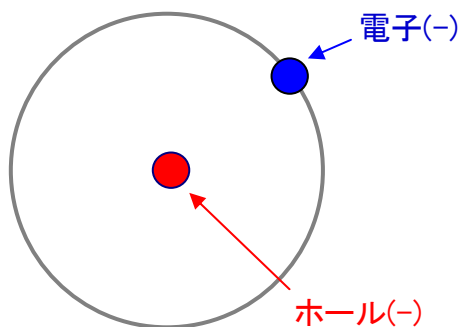


熱的状态
($T > T_c$)



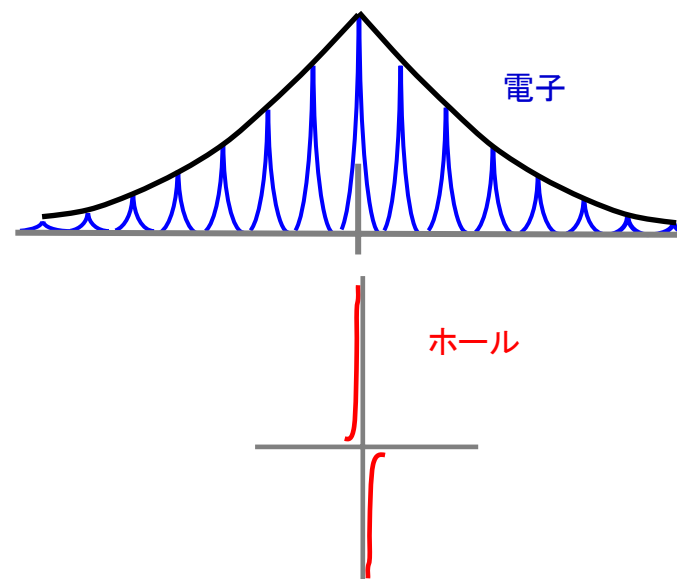
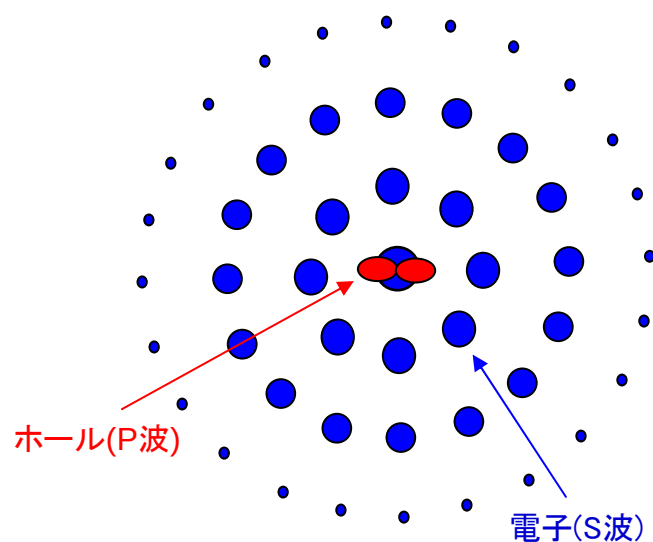
ボーズアインシュタイン凝縮
($T < T_c$)

励起子 – 半導体中の水素原子 –



	水素原子	励起子(GaAs)
大きさ	$\sim 0.5\text{\AA}$	$\sim 100\text{\AA}$
エネルギー	$\sim 10\text{eV}$	$\sim 5\text{meV}$

電子(フェルミ粒子)+ホール(フェルミ粒子)=励起子(ボゾン粒子)



励起子のボーズアインシュタイン凝縮



M. Keldysh

提案(1965)

問題点

- 臨界点に到達する前に励起子が崩壊する
(高密度→オージェ再結合、パウリ排他律、電荷遮蔽)
- 励起子が局在する(結晶欠陥、結晶不均一性)
- 運動量分布にアクセスできない
(ランダムに放射する自然放出光)

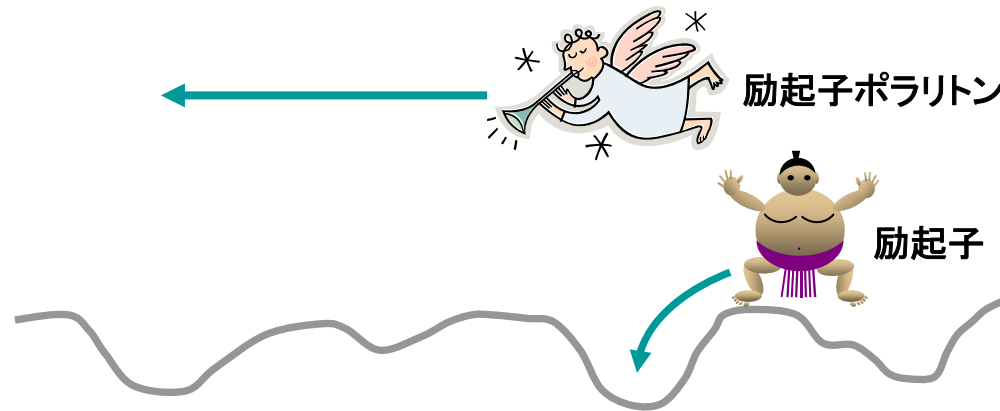
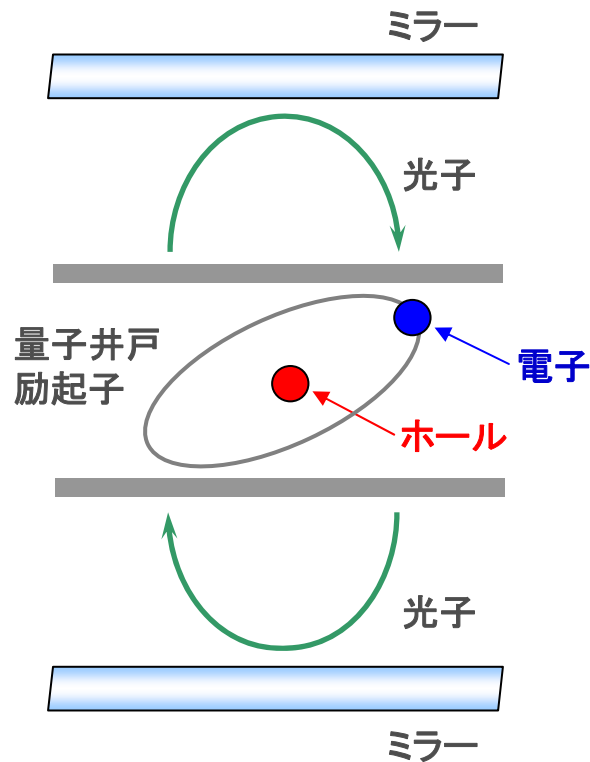


提案から40年経過した現在も実現されていない

励起子ポラリトン – 励起子に光子という着物を着せる –

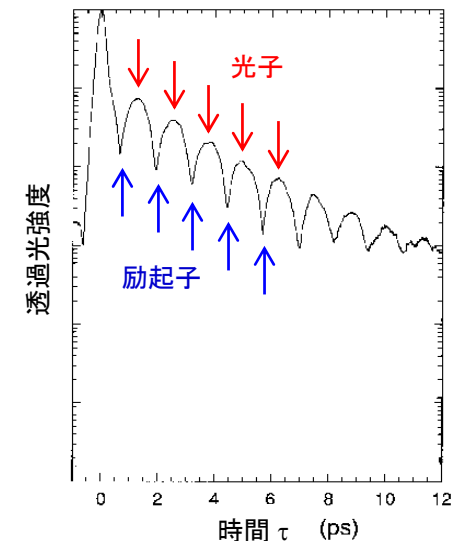
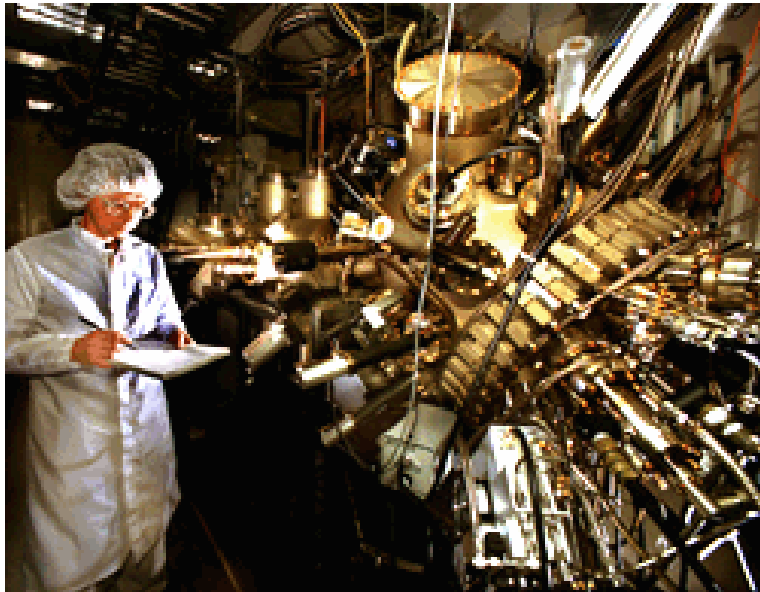
発明のポイント

- 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



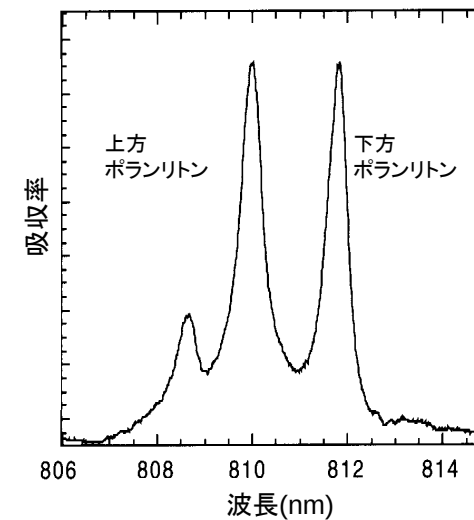
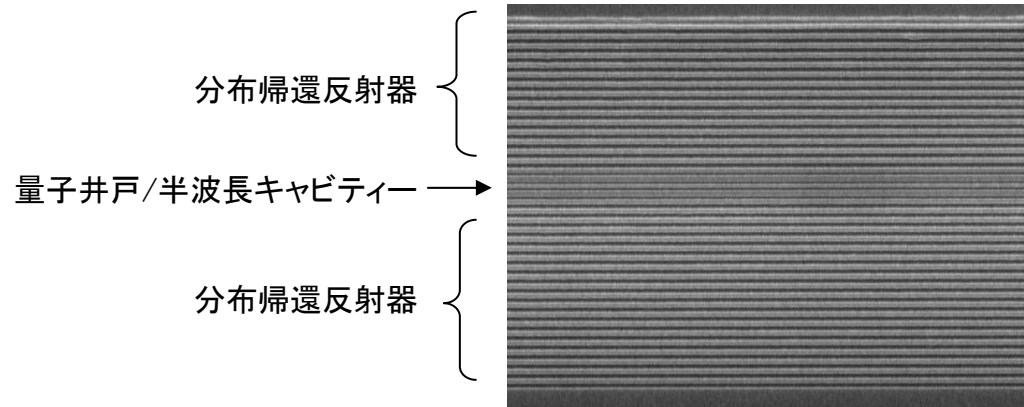
半導体マイクロキャビティーと励起子ポラリトン

MBE装置



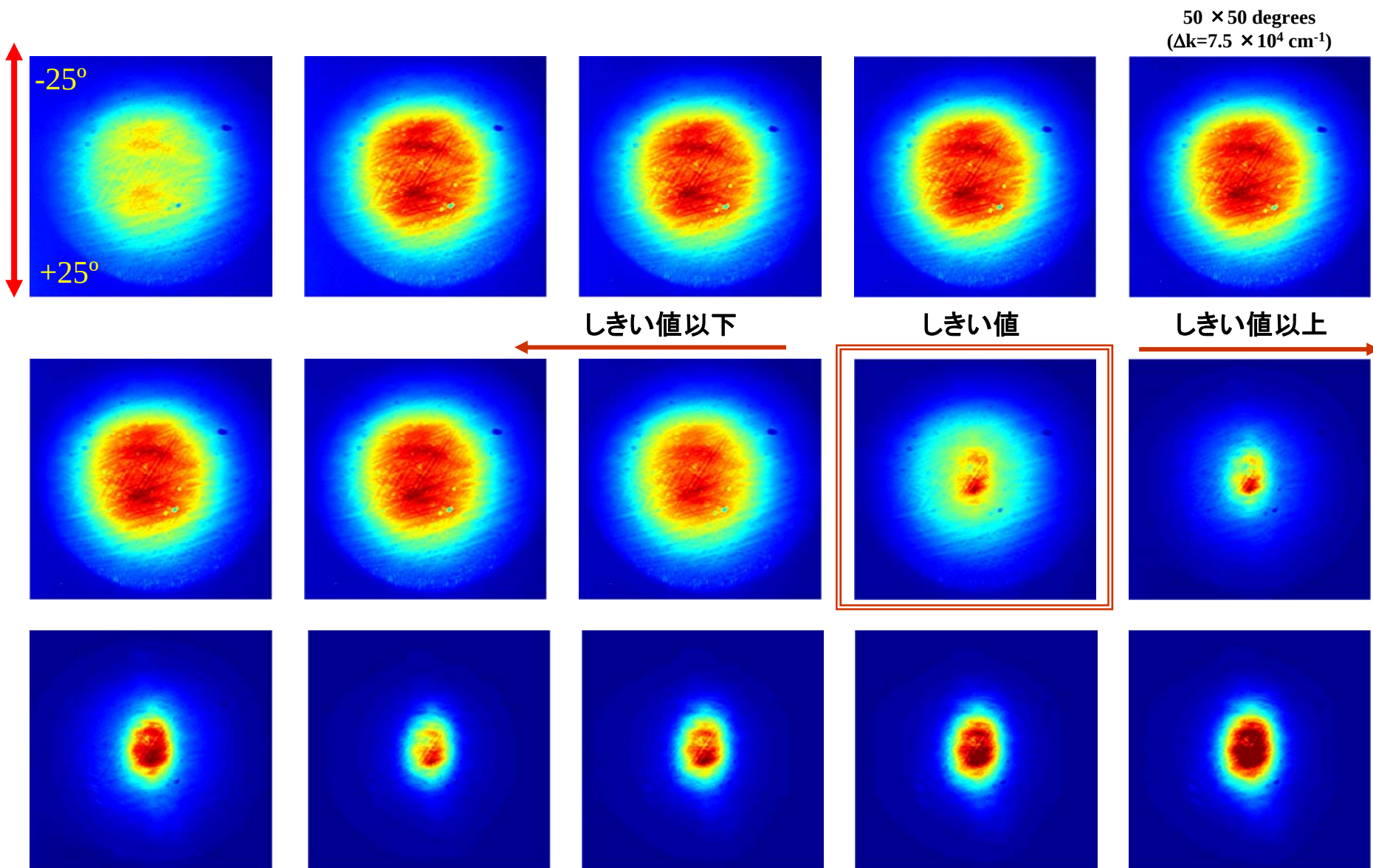
量子振動の観測

半導体マイクロキャビティー

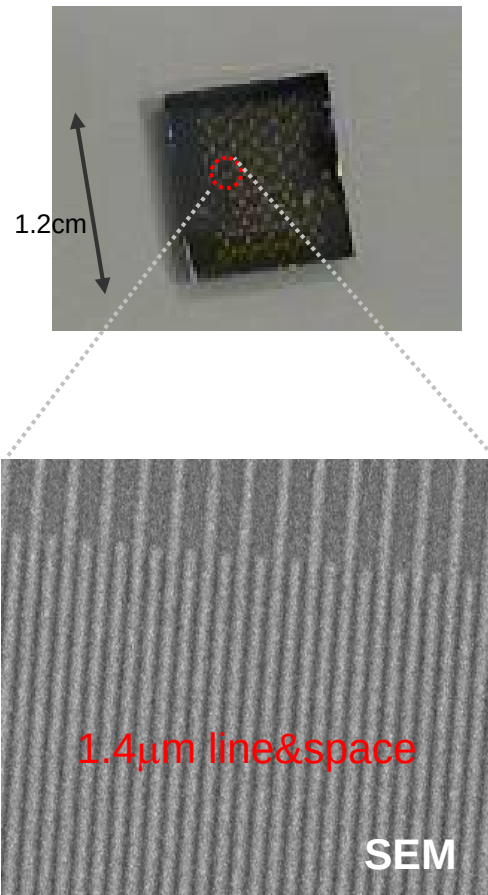


アンチクロッシングの観測

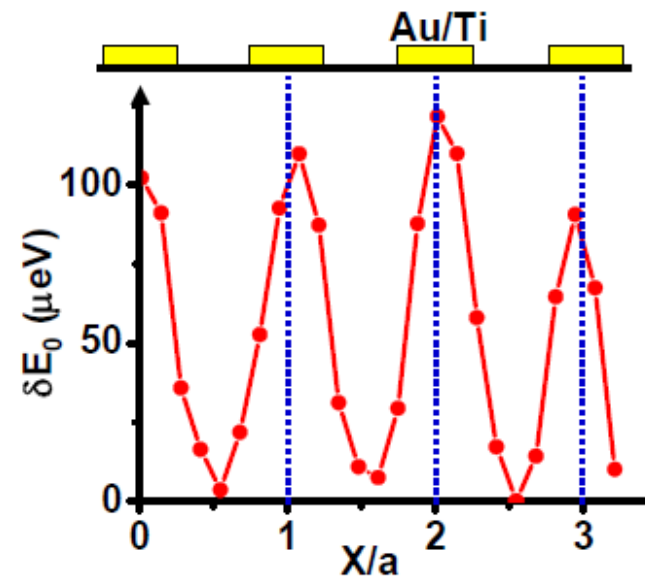
運動量分布



励起子ポラリトンの一次元アレイ



GaAsマイクロキャビティー上に
形成されたTi/Au金属電極

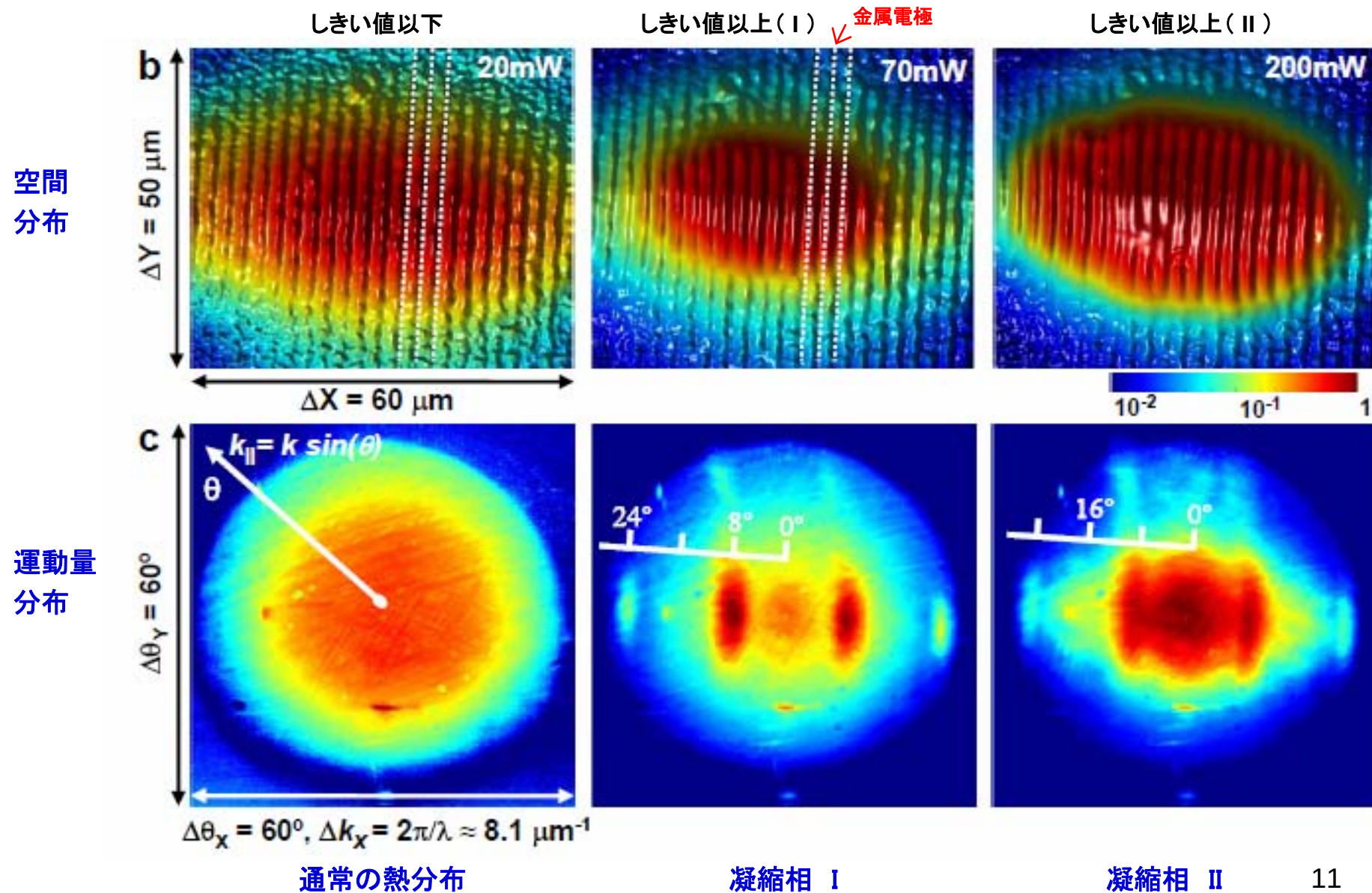


金属電極により作られる
一次元周期ポテンシャル



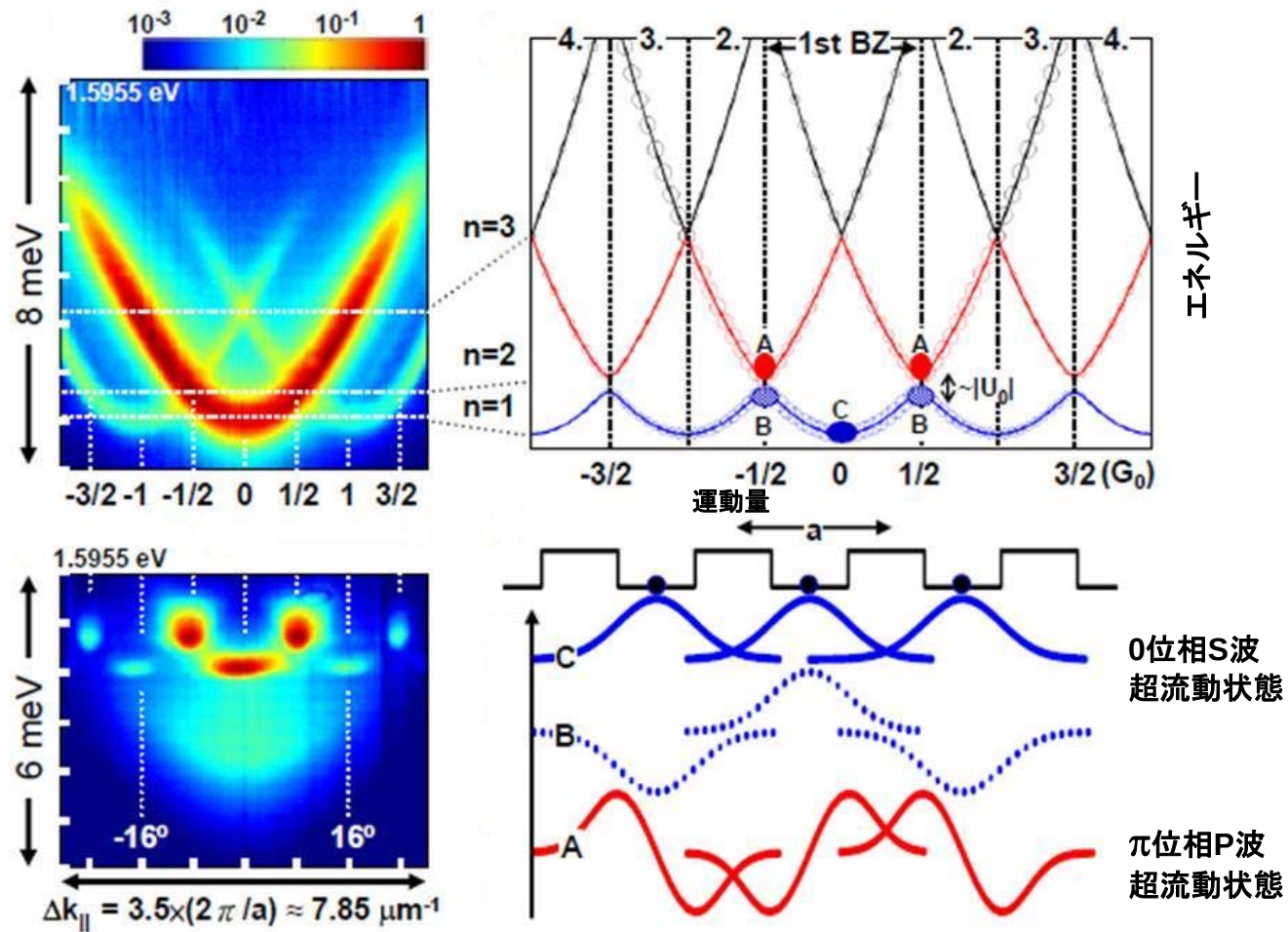
励起子ポラリトンは電極間に閉じ込められる

2つの凝縮相



2つの凝縮相 (II)

– 0位相S波超流動状態 対 π 位相P波超流動状態 –



➡ 励起状態でのボーズ・アインシュタイン凝縮 が初めて発見された

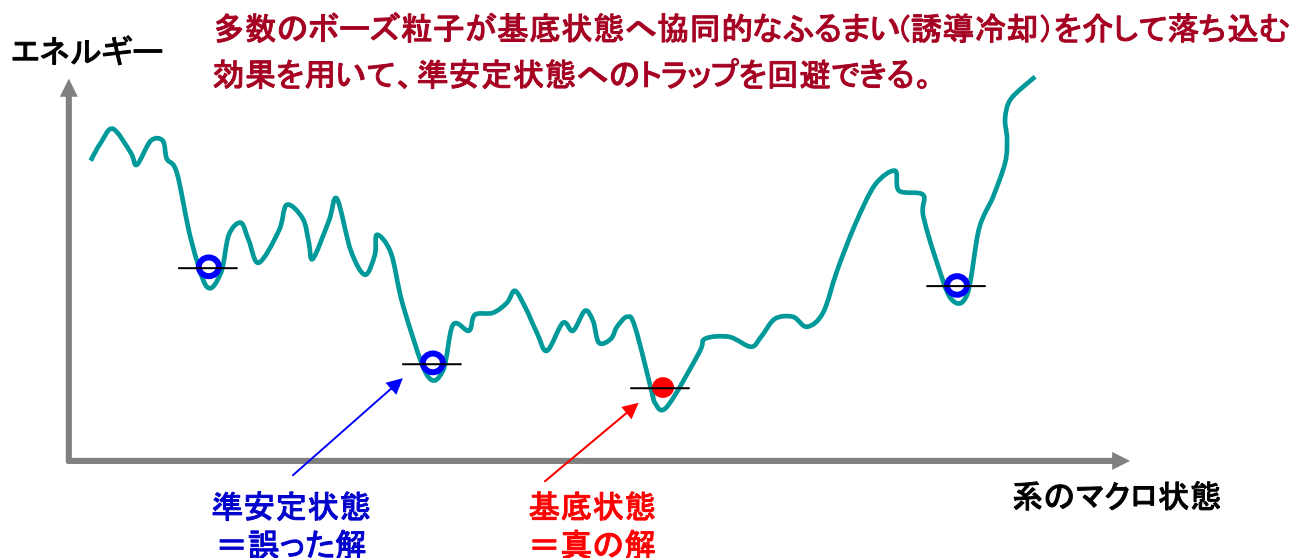
量子コンピュータの実現法

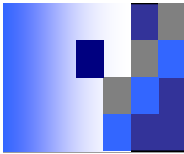
- ユニタリ変換による可逆量子計算 (数学的モデル)
A. Barenco et al. (1995)
- 断熱変化による可逆量子計算
E. Farhi et al. (2000)
- 量子測定による非可逆量子計算
R. Raussendorf and H.J. Briegel (2001)
- ボーズ凝縮 (誘導冷却) による散逸量子計算

孤立系



開放系





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

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