

山本研究室 研究室紹介

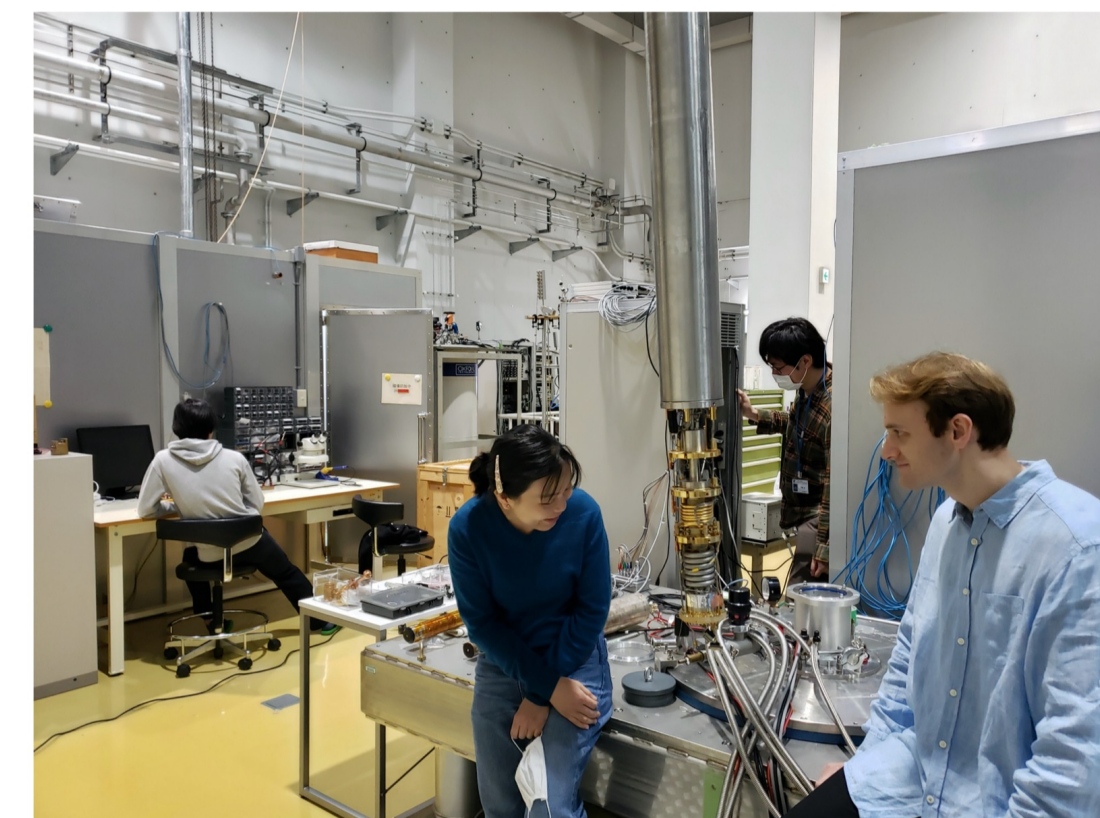
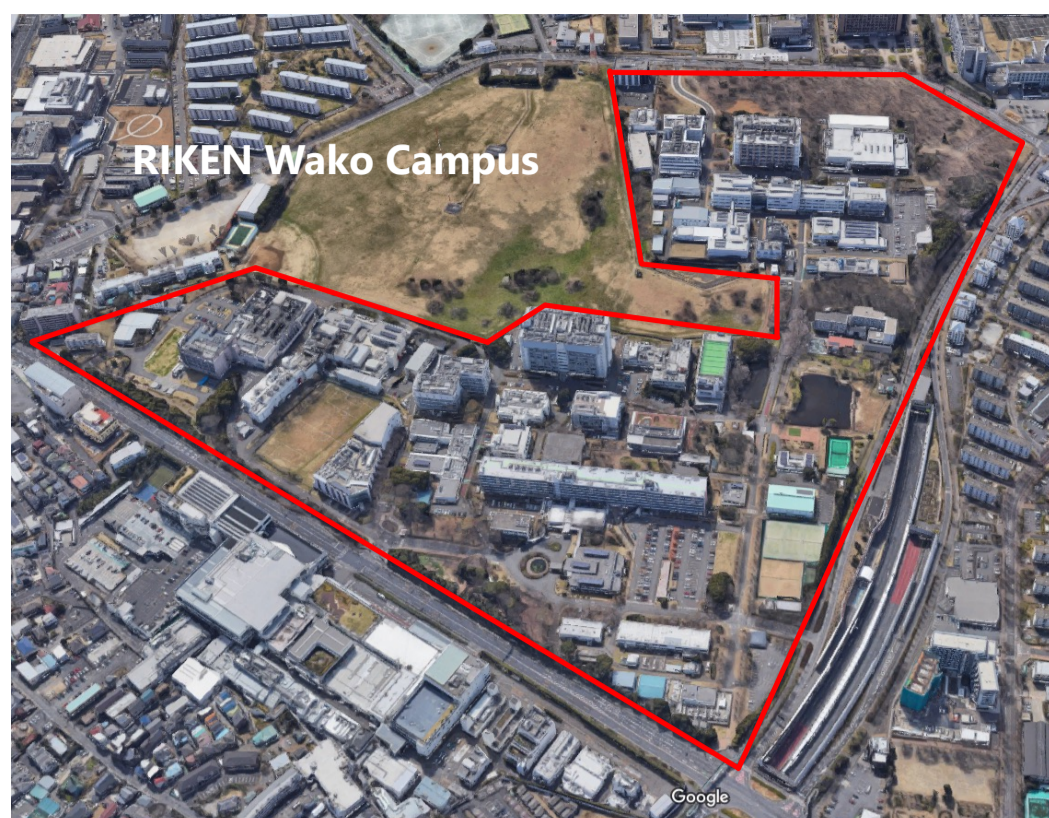
半導体の量子物理学実験

山本 倫久 (教授)

myamamoto@ap.t.u-tokyo.ac.jp

2004年3月 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程修了
 2004年4月 東京大学 大学院工学系研究科 助手
 2007年4月 東京大学 大学院工学系研究科 助教
 2014年6月 東京大学 大学院工学系研究科 講師
 2017年8月 東京大学 大学院工学系研究科 特任准教授
 2017年8月 理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー
 2020年4月 理化学研究所 創発物性科学研究センター チームリーダー
 2023年7月 東京大学 大学院工学系研究科附属 量子相エレクトロニクス研究センター 教授 (クロスアポ)

CEMS 理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子電子デバイス研究チーム



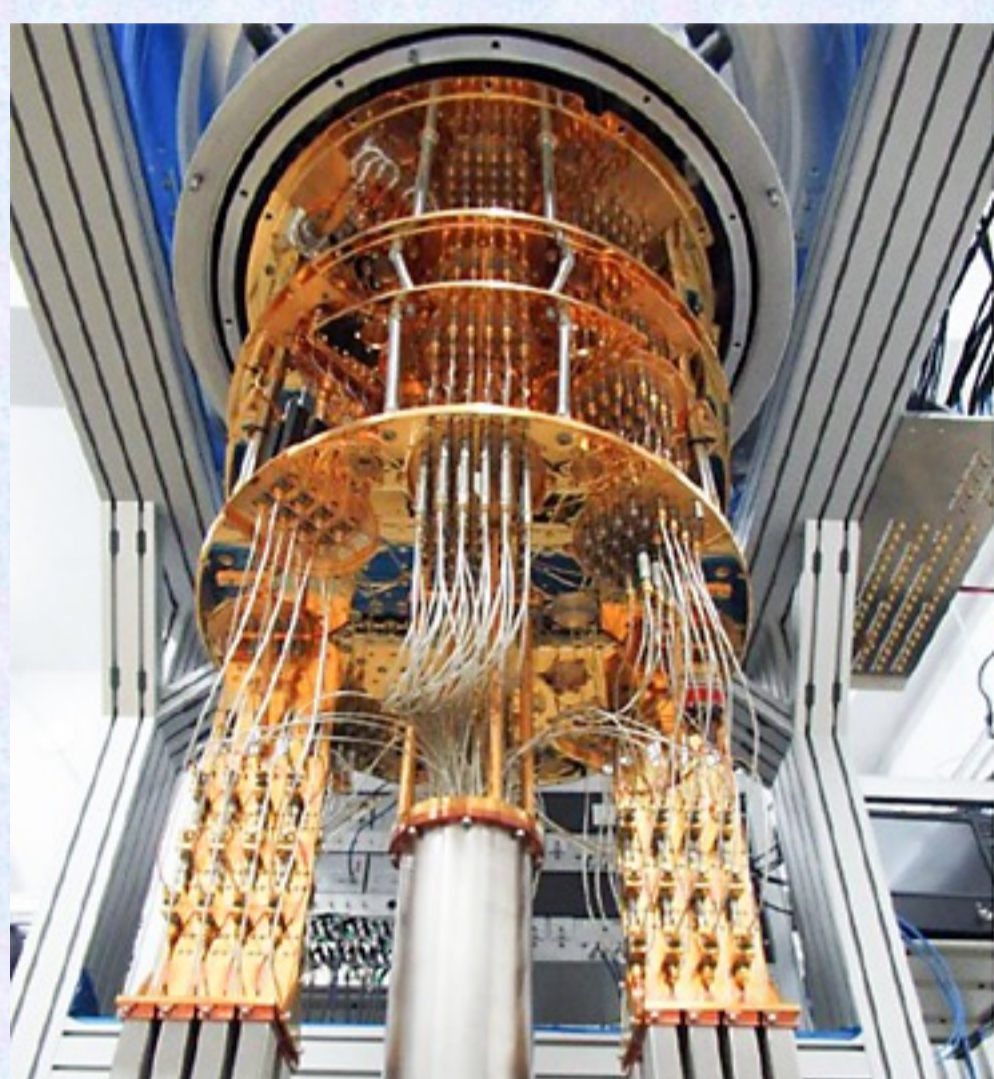
主要設備 (東大) : 希釈冷凍機2台 (予定) など
 主要設備 (理研) : 希釈冷凍機5台 (予定)、0.3K冷凍機2台、1.5K冷凍機2台、光学測定用冷凍機1台、グローブボックス1台、プラズマエッチング装置1台、原子層積層システム1台など
 共用設備 : クリーンルーム (電子線描画装置、電子線蒸着装置、マスクレス描画装置、プラズマエッチング装置、スパッタ装置、CVD装置)、電子顕微鏡など

大学院生 (研修生) もすべて利用可能

共同研究 : 仏国立科学研究所 NEEL、産総研、独Ruhr大学Bochum校、物材機構、韓国科学技術院、米Texas A&M大学、慶應大学、東北大学など

新原理の電子波束量子コンピューター

現在の固体量子ビット : すべて局在した量子二準位系

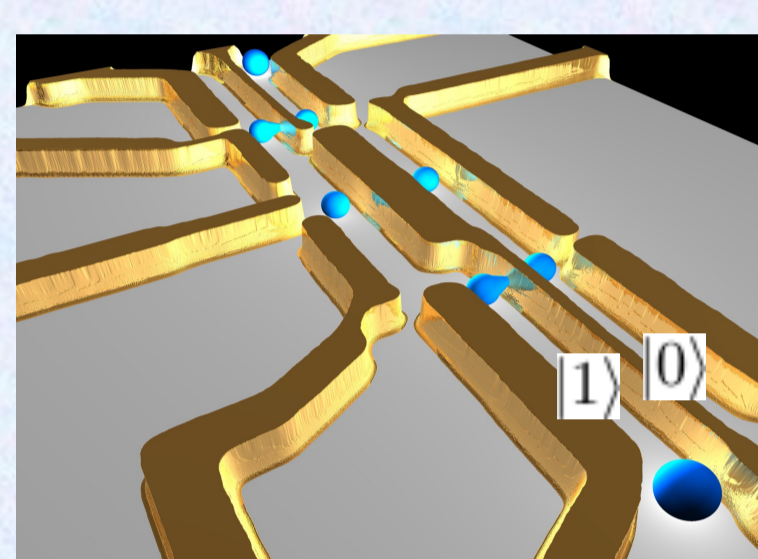


誤り訂正が必要
 → 膨大な物理量子ビットが必要
 全ての局在量子ビットに配線し、誤り訂正のために演算をし続ける
 → 途轍もない困難とコスト

ハードウェアサイズ :
 量子ビット数 N にほぼ比例
 → 大規模化が課題

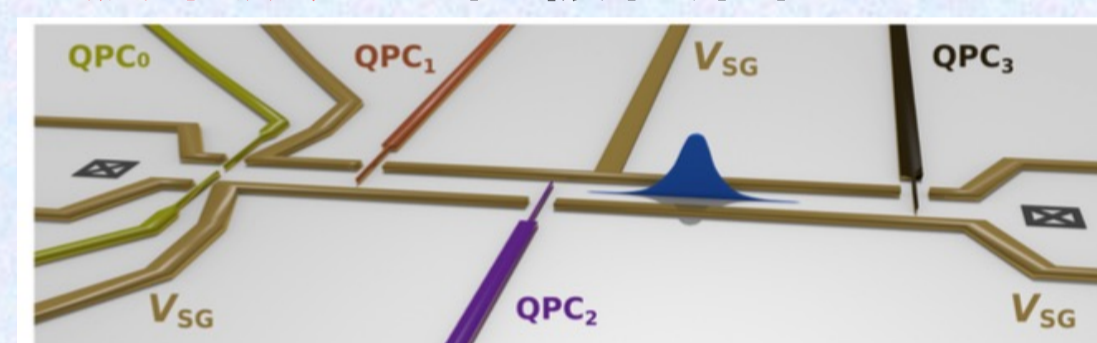
理研 量子コンピューター
 (国産1号機 53量子ビット)

2経路干渉計 : 量子演算回路 (which-path qubit)

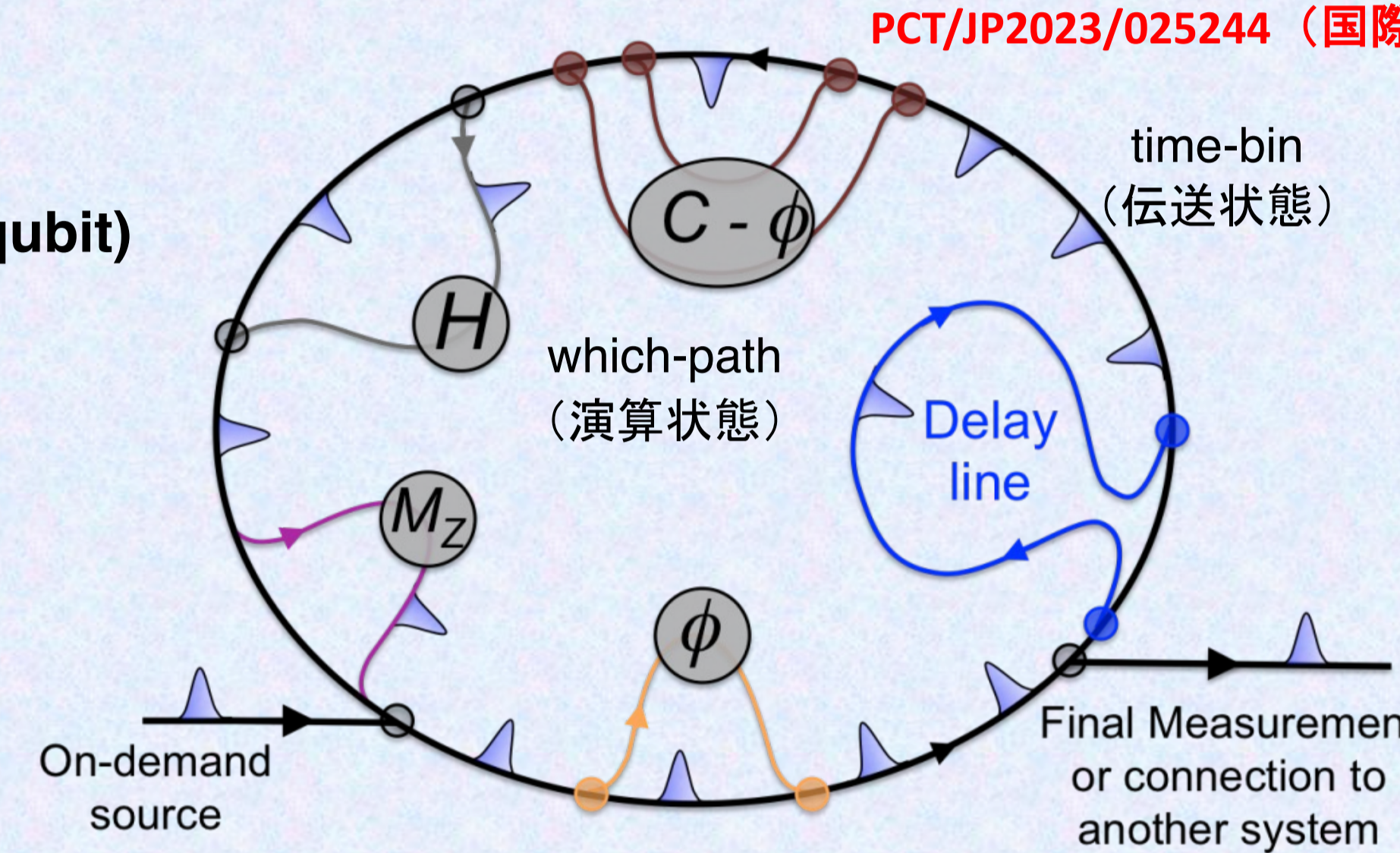


Nat. Nanotechnol. 7, 247 (2012)

電子波束励起 : 低緩和飛行量子ビット



Nat. Commun. 9, 2811 (2018)



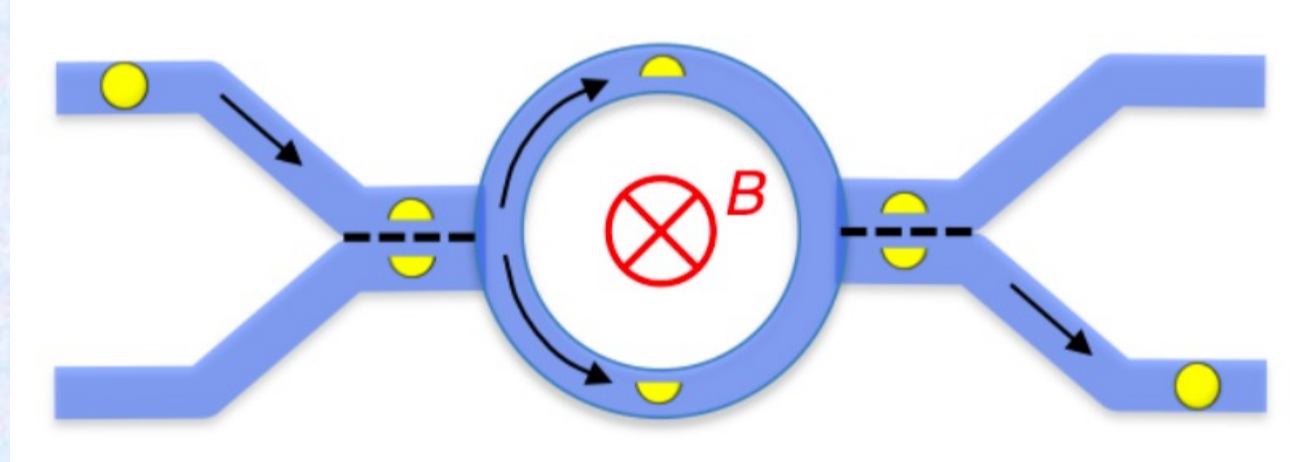
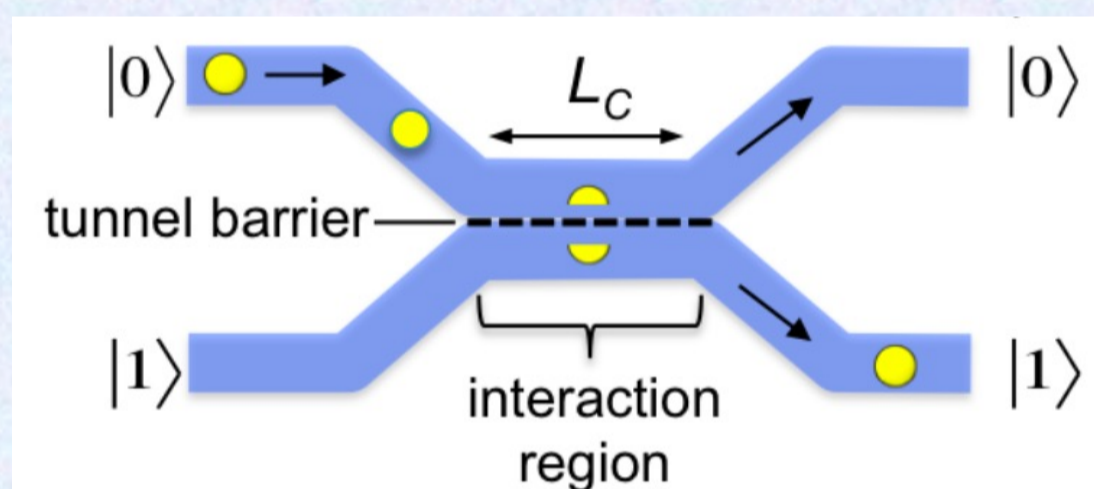
短い電子波束 (整数電荷、ローレンツ型、プラズモン)
 電子間相互作用などによる量子情報損失がない
 → 高忠実度の量子演算

ハードウェアサイズ $\propto N^\alpha$ ($\alpha \leq 0.5$)
 → 数千の配線 (1台の冷凍機) で実用的な量子コンピューターに必要な数の量子ビットを制御

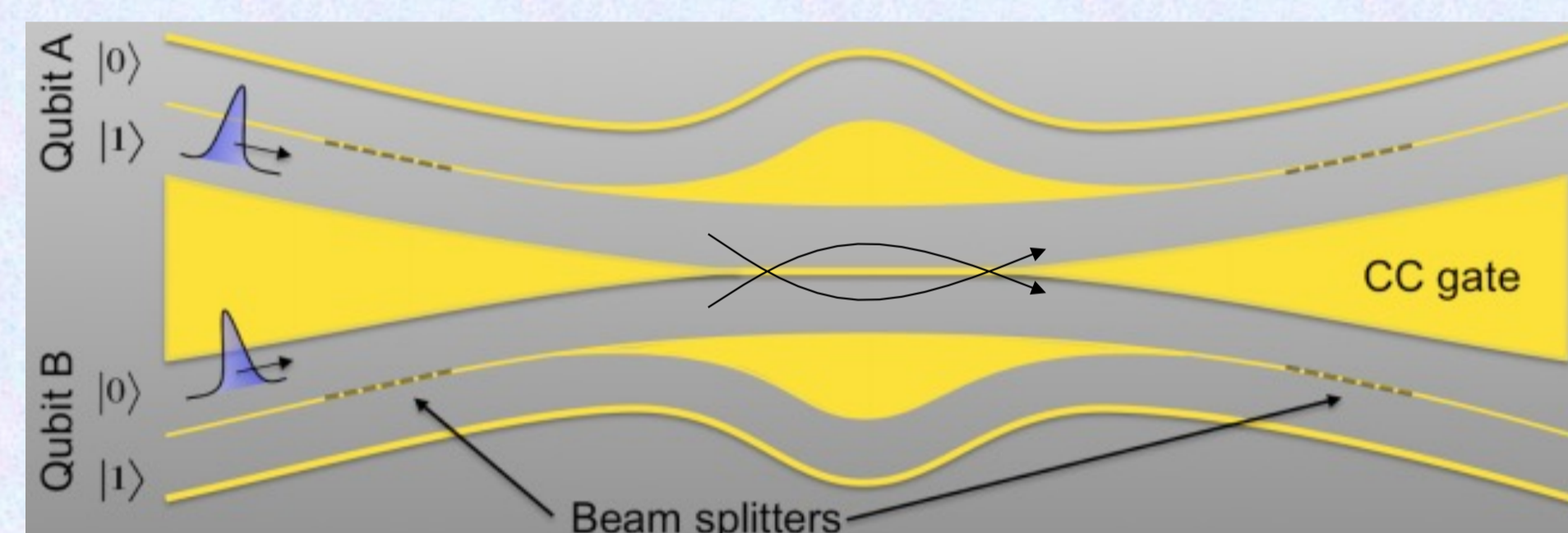
1量子ビット演算

• R_x : 経路間のトンネル結合

• R_z : 経路間の位相差 (位相 $L \cdot k_F$: 経路幅を介して k_F を電気制御)



2量子ビット演算

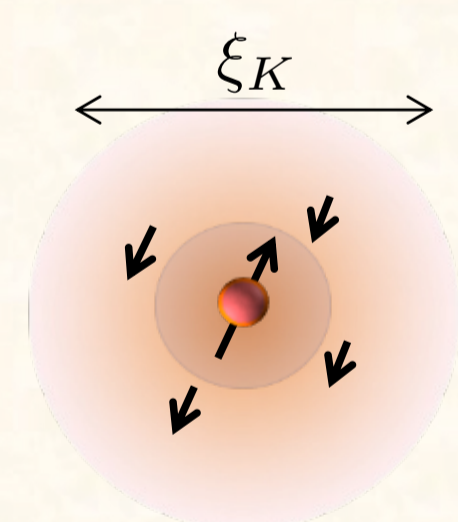


遅延回路を調整 :
 2つの波束が交差する際のクーロン相互作用を利用
 → 位相シフト

$$U = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & e^{-i\theta_c} & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix}$$

強相関電子系 (スピン格子系) の量子シミュレーション

近藤状態 (近藤雲)

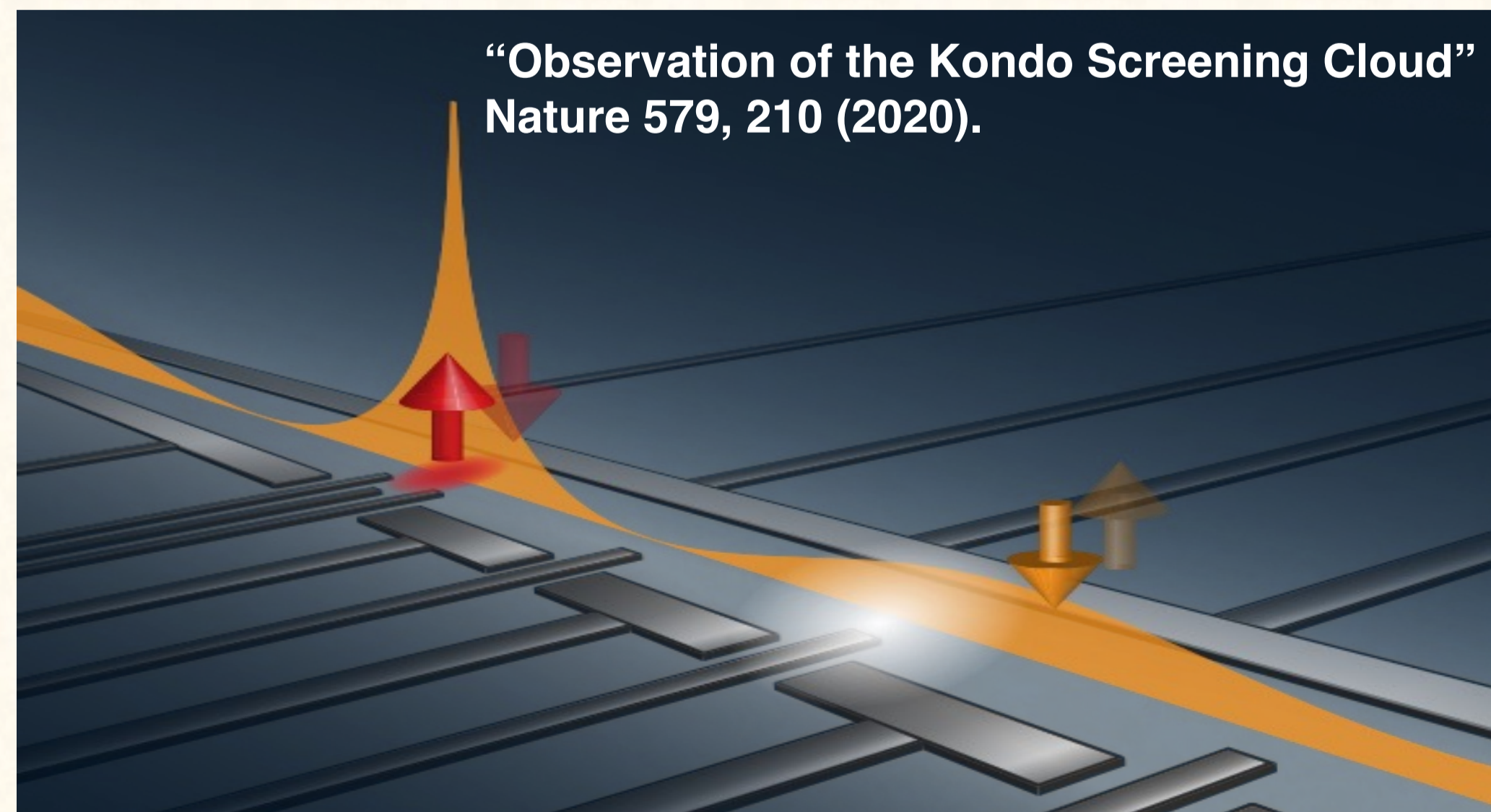


局在スピン+伝導電子 : 強相関系の基本的な構成要素 (基本単位)
 局在スピンと多数の伝導電子の間の多体スピン-重項
 → 局在スピンを遮蔽するひとつの量子もつれ状態
 物理的な理解や物理量の計算手法が確立 (数値繰り込み群法 : 最も確実な計算手法)
 ただし、確実な計算は単一の局在スピンまで

近藤雲の広がり

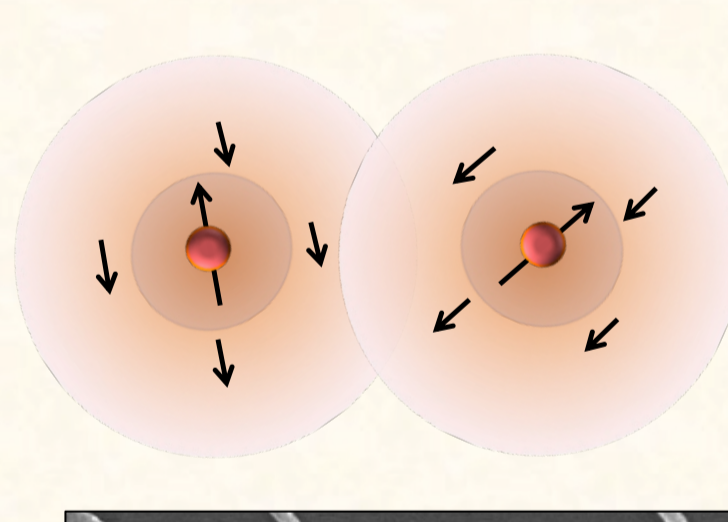
- 大きさは近藤温度 (スピン-重項結合のエネルギー) だけに依存
- 形状は普遍 (他のパラメータの詳細に依らない)

半導体の人工原子 (量子ドット) に局在スピンを閉じ込め、電子干渉を利用して近藤雲を観測



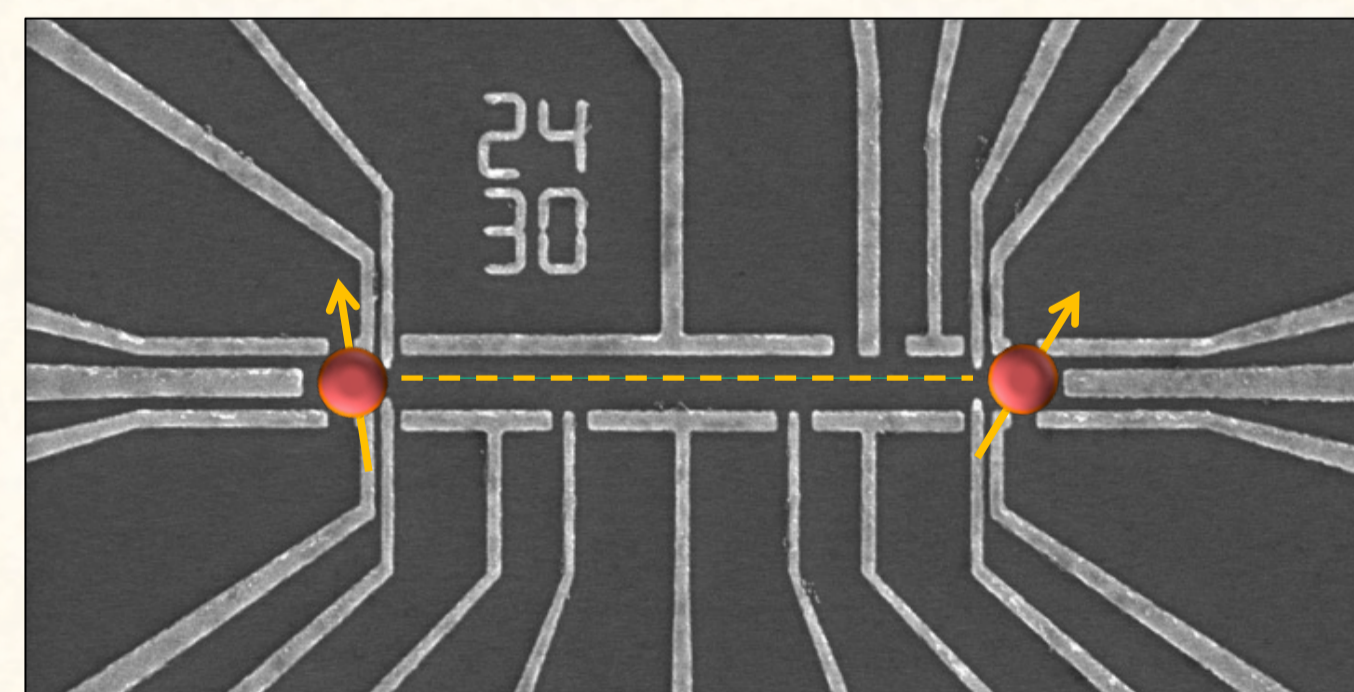
"Observation of the Kondo Screening Cloud" Nature 579, 210 (2020).

Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida interaction (RKKY相互作用)



伝導電子を介した局在スピン間の相互作用
 スピンのコヒーレンス長を考慮した表式はない (計算困難、未知量)

2不純物近藤効果 : 2つの局在スピン+多数の伝導電子
 → スピンの状態を計算することが困難



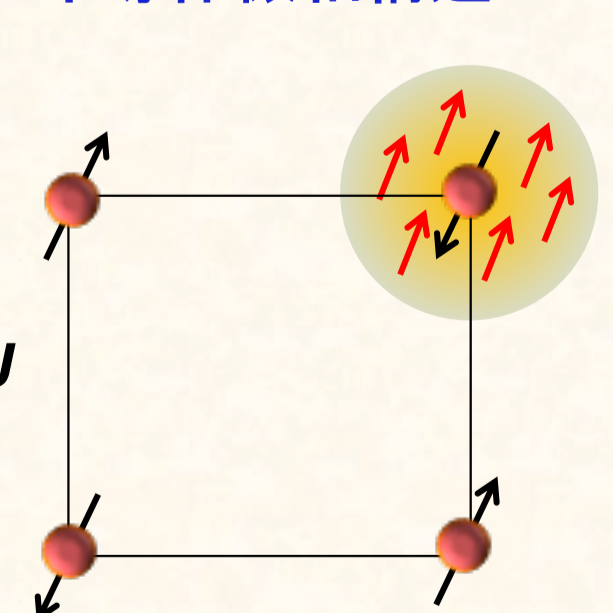
状態を決めるパラメータ

局在スピン間の距離 R , 近藤雲の大きさ ξ , 伝導電子のフェルミ波数 k_F

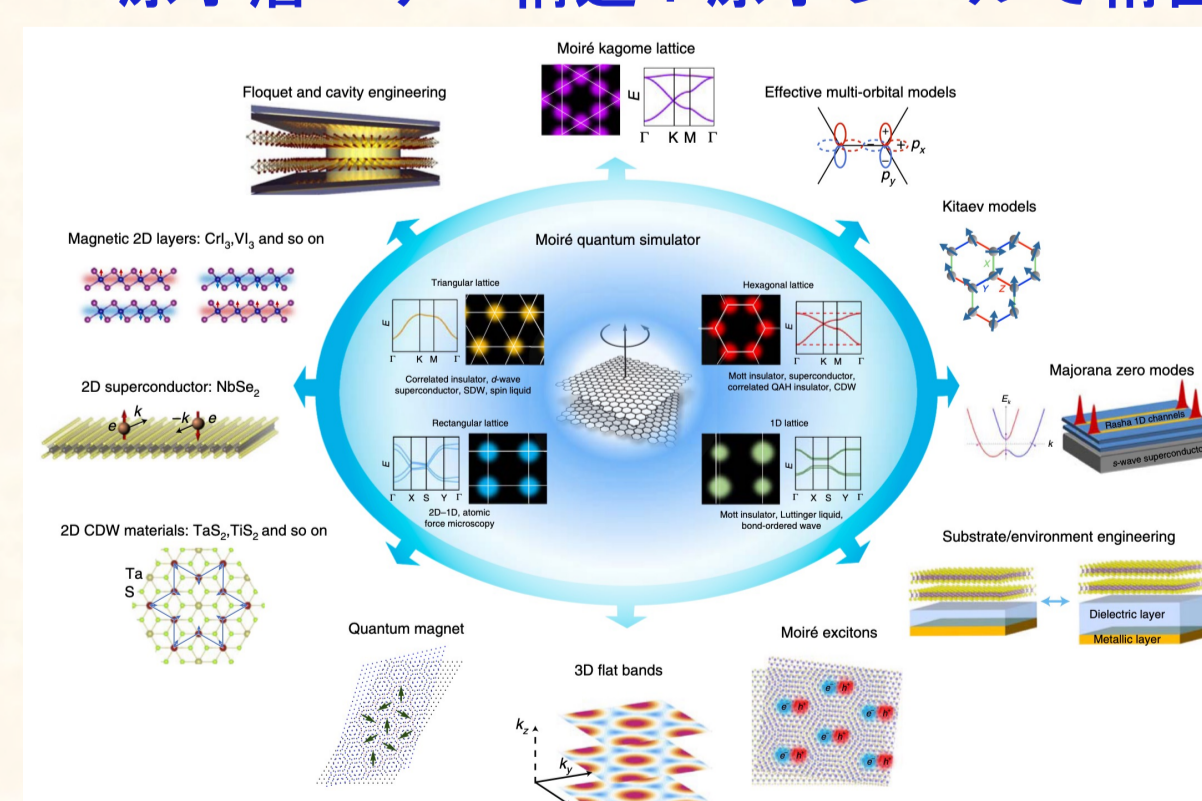
RKKY相互作用 $I(R/\xi, k_F R)$ を実験的に取得 :
 量子シミュレーション (既存の古典計算のリソースでは取得困難)
 $I(R/\xi, k_F R)$ は符号を含めて制御可能

多彩なスピン格子系

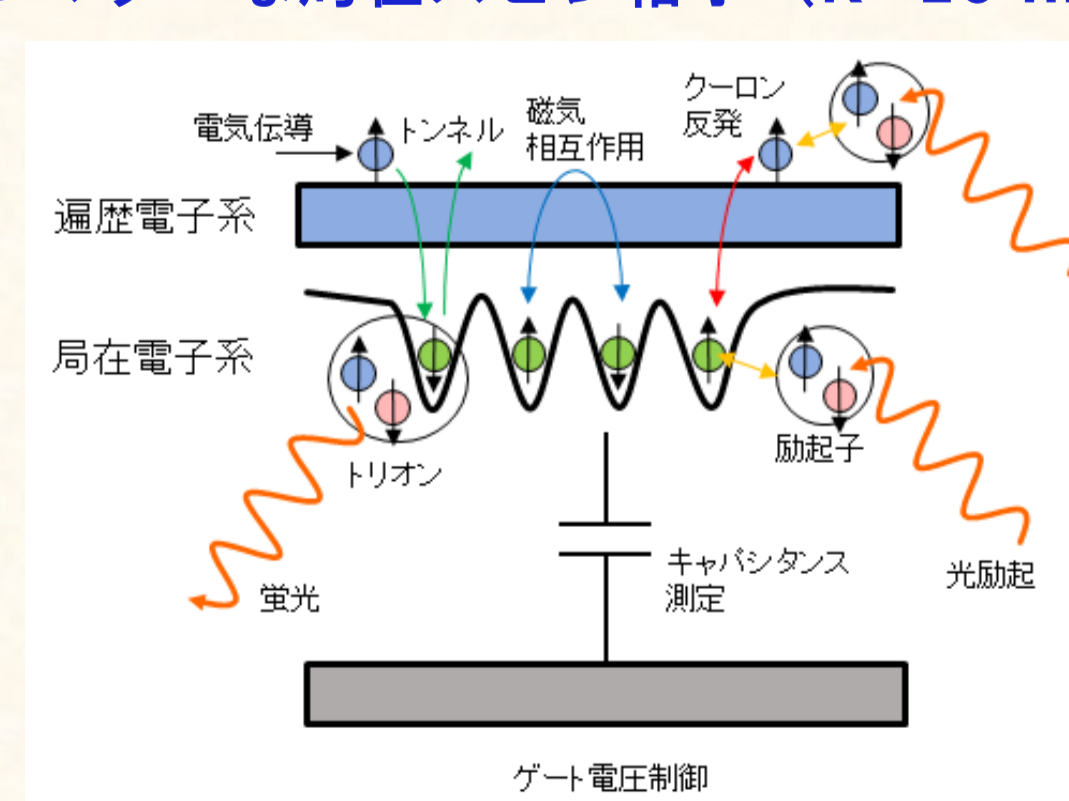
半導体微細構造



原子層ヘテロ構造 : 原子レベルで精密かつマクロな局在スピン格子 ($R \sim 10$ nm)

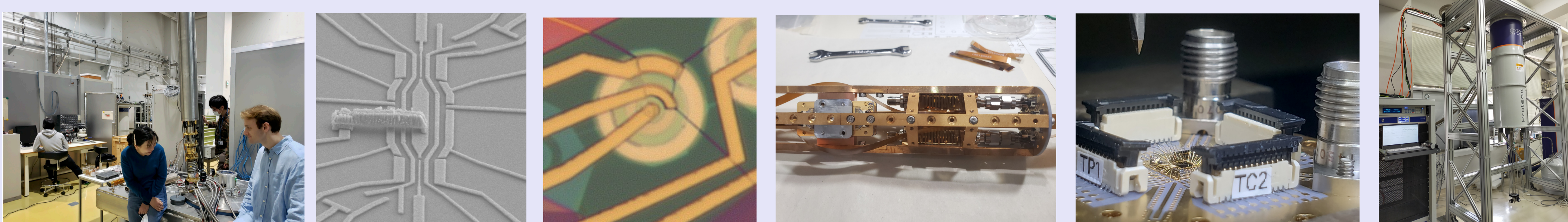


Nat. Phys. 17, 155-163 (2021)



研究生生活

- アイデアを議論する
- デバイスをデザインし、作製する
- 測定系・制御系をつくる (プログラム含む)
- 実験を行う



見学・訪問歓迎

- 普遍的な物理を追求したい人
- 実験を楽しんで、多彩な量子技術を習得したい人
- 人とちょっと違うことをしてみたい人
- 自分の手で電子あるいは量子を1個単位で操ってみたい人
- 新しいものを作ったり使ったりしたい人
- 旅行が好きな人
- 様々な文化に触れたい人
-