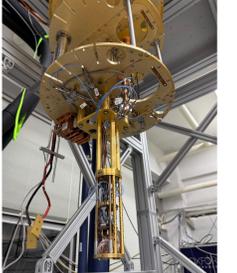


CEMS 理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子電子デバイス研究チーム



主要設備(東大): 希釈冷凍機2台 など

大学院生(研修生)もすべて利用可能

主要設備(理研): 希釈冷凍機5台、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

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

PCT/JP2023/025244 (国際特許出願)

Semiconductor Circuits for Quantum Computing with Electronic Wave Packets: arxiv.org/abs/2410.16244

現在の固体量子ビット: すべて局在した量子二準位系

2経路干渉計: 量子演算回路 (which-path qubit)



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

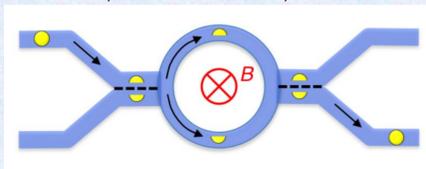
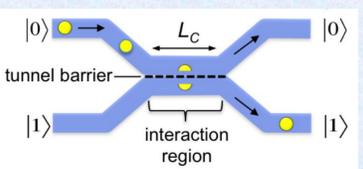
ハードウェアサイズ:
量子ビット数 N にほぼ比例
→ 大規模化が課題

理研 量子コンピューター (国産1号機 53量子ビット)

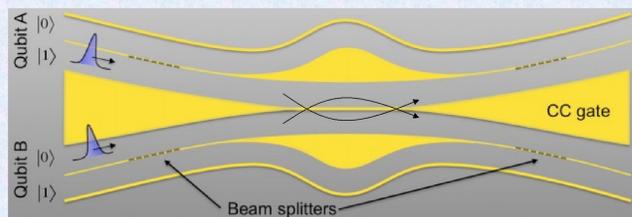
1量子ビット演算

• 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)

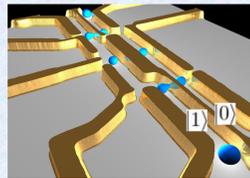


2量子ビット演算



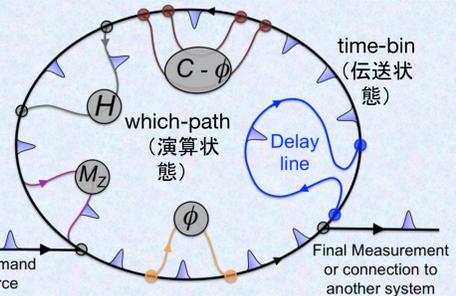
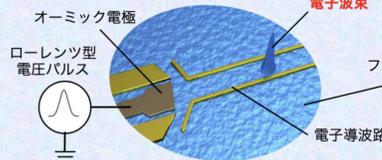
遅延回路を調整:
2つの波束が交差する際のクーロン相互作用を利用
→ 位相シフト

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



Nat. Nanotechnol. 7, 247 (2012)

電子波束励起: 低緩和飛行量子ビット



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

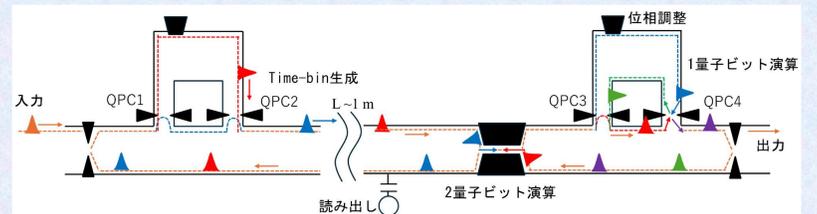
ハードウェアサイズ $\propto N^\alpha$ ($\alpha \leq 0.5$)

→ 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

量子ホール端チャンネルを伝搬する time-bin量子ビット

量子ホール状態: 理想的な量子回路

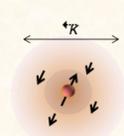
- 不純物や揺らぎの影響を受けない伝搬チャンネル(トポロジカル保護)
 - マクロなサイズでも正確に定義される伝導モード
- 電子波束のtime-bin量子ビットの生成と制御の新しい手法を提案(特許申請)
プロトタイプデバイスを作製



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)

Electrical control of a Kondo spin screening cloud: arXiv:2404.11955



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&制御

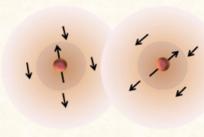


"Observation of the Kondo Screening Cloud" Nature 579, 210 (2020).

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

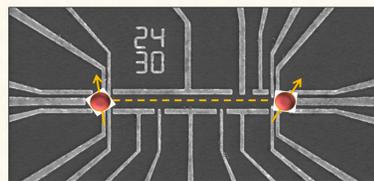
局在スピン間の距離 R , 近藤雲の大きさ ξ , 伝導電子のフェルミ波数 k_F

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

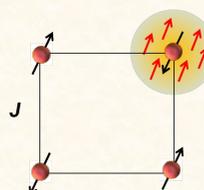
(既存の古典計算のリソースでは取得困難)

$I(R/\xi, k_F R)$ は符号を含めて制御可能

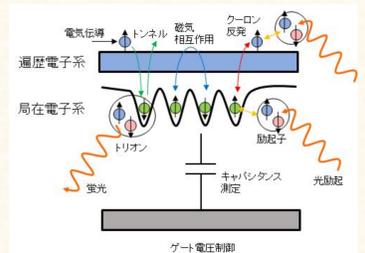
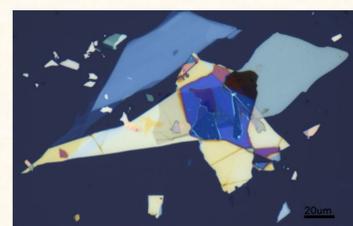


多彩なスピン格子系

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)



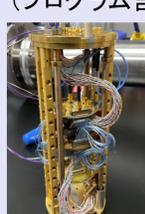
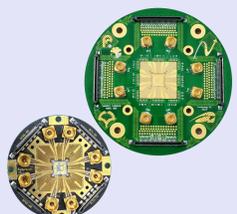
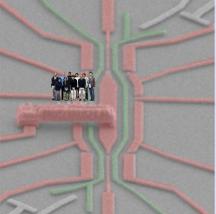
研究生活

・ 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
- ・