

スピンメーザーを利用した 極低温量子マイクロ波増幅装置

量子ダイナミクスユニット グループリーダー
久保 結丸



OIST

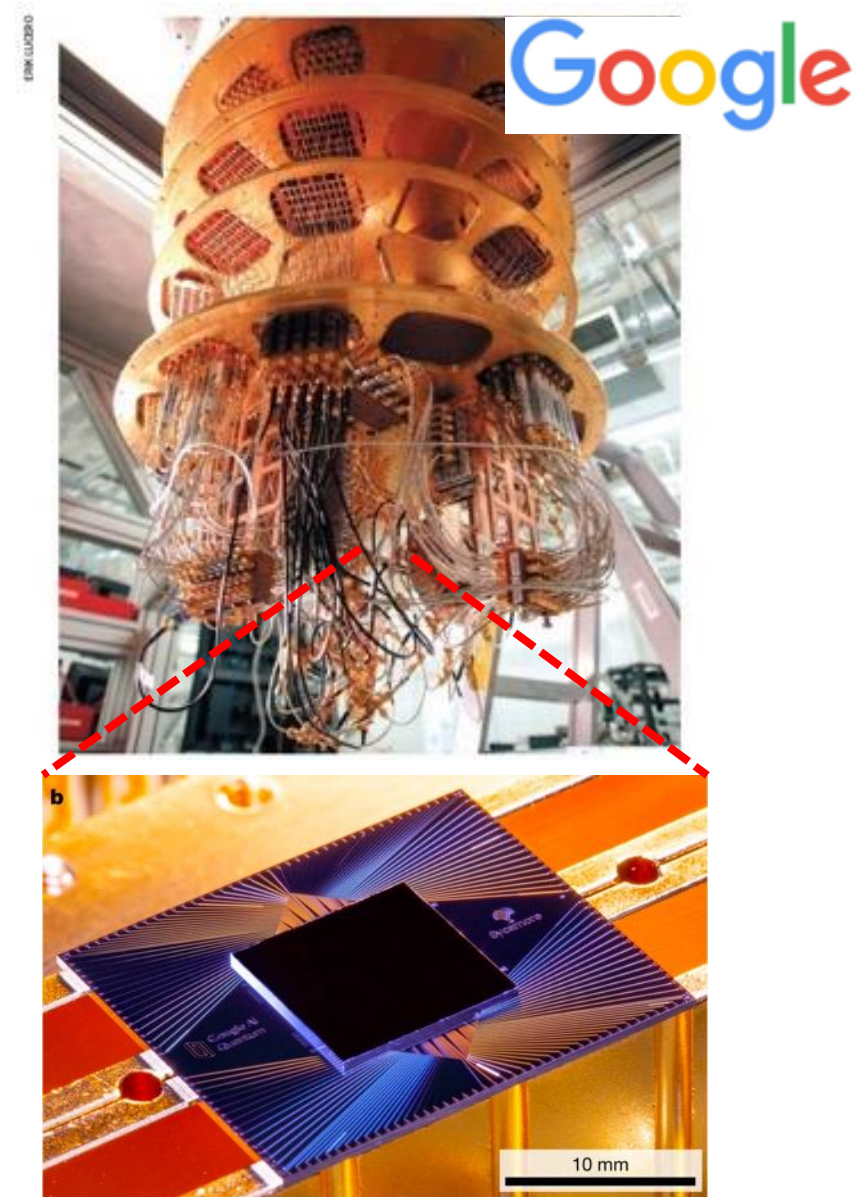
OKINAWA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY GRADUATE UNIVERSITY

沖縄科学技術大学院大学

- 最も研究開発が進んでいる量子コンピュータの方式
- 基本素子はNECで実証
- 巨大IT企業が巨額の投資



- 絶対零度近くの極低温で動作
($0.01\text{ K} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- 超微弱なマイクロ波量子信号
→ 超高効率のマイクロ波増幅器が必要

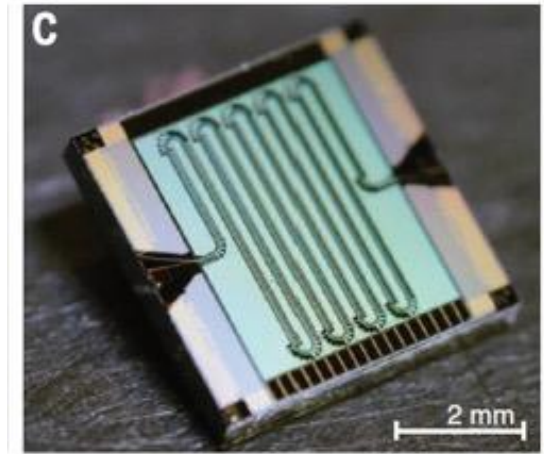


Arute et al., Nature **574**, 505 (2019)

従来技術とその問題点

ジョセフソンパラメトリック増幅器

- 超伝導式量子コンピュータに使用されている超伝導デバイス
- 超低雑音（超高効率）のマイクロ波増幅が可能
- 低パワー（0.1 pW程度）で飽和
- 1量子ビットにつき約0.005 pWが必要
→ 100万量子ビットには5000 pW！
- 磁場中で動作不可能
→ 磁気共鳴やイメージングなどへの応用の障害

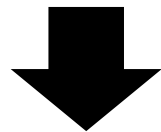


ジョセフソンパラメトリック増幅器の一例
[Macklin et al., Science **350**, 307 (2015).]

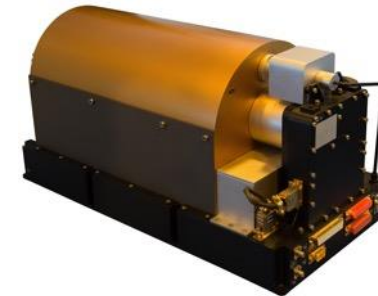
新技術の特徴

スピンメーザーを利用した極低温量子マイクロ波増幅装置

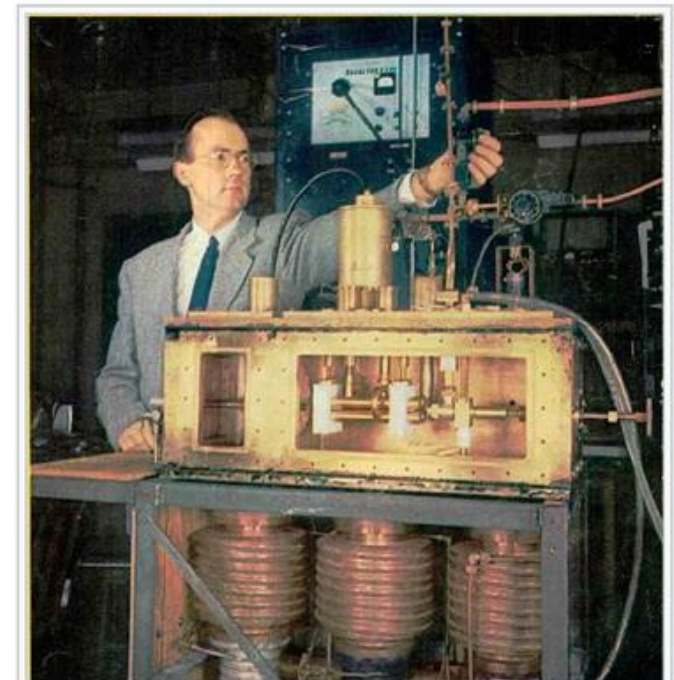
- メーザー: マイクロ波周波数帯のレーザー
- レーザーより先に（1950年代）に発明
 - 多くの場合低温（液体ヘリウム以下-269 °C）が必要
 - 安価で室温動作する半導体技術の台頭



「従来の」情報通信産業においては優位性がなく、1960年代半ばで研究開発が衰退



水素メーザー
(wikiwand.com
より転載)

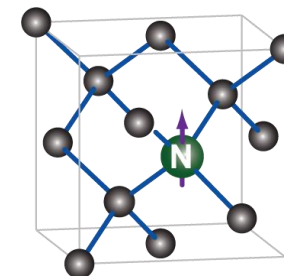
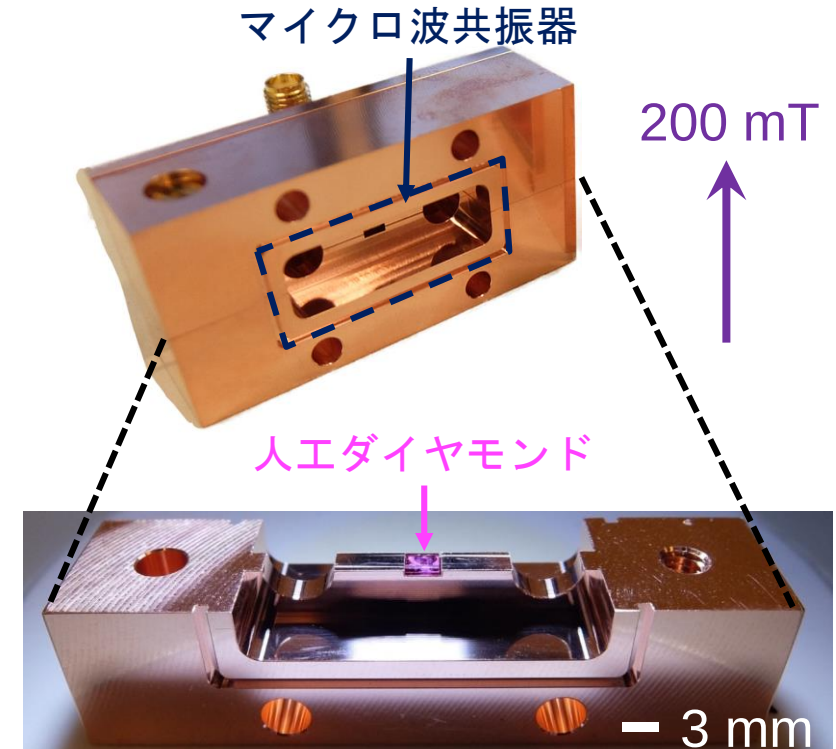


チャールズ・タウンズ (1964年ノーベル賞)

新技術の特徴

スピンメーザーを利用した極低温量子マイクロ波増幅装置

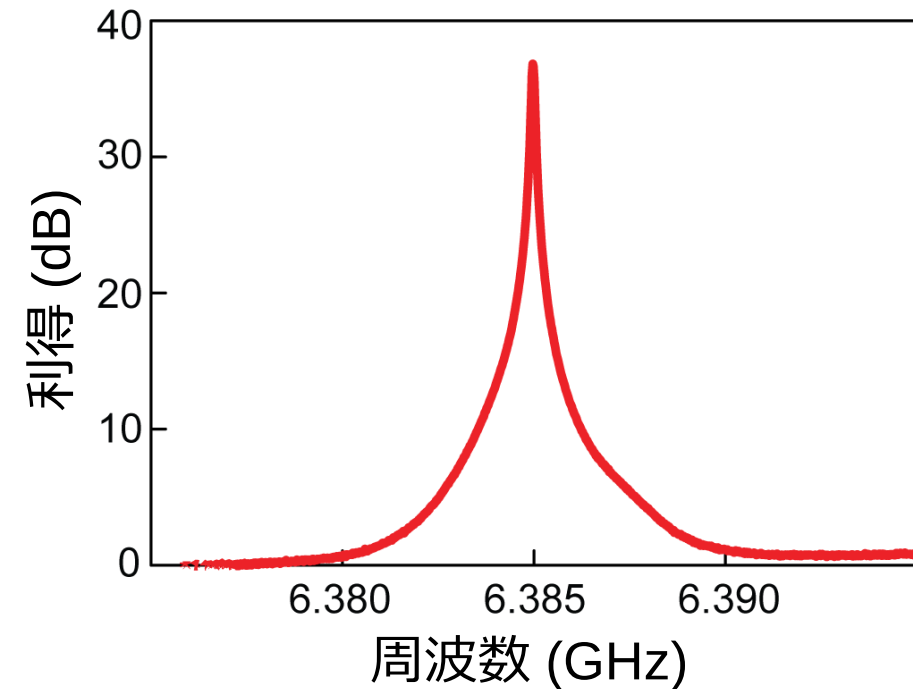
- では, そもそも極低温が必要な「量子」情報技術においては?
- 「量子コンピュータが動作する」ような極低温においては超低雑音増幅が原理的に可能 (50年代に既に予測)
- 原理的に高い飽和パワー
- 原理的に磁場中で動作可能



ダイヤモンド窒素中心

スピンメーザーを利用した極低温量子マイクロ波増幅装置

- 「量子コンピュータが動作する」極低温における超低雑音メーザー増幅を初めて実証
- 飽和パワーを少なくとも3桁以上改善
- 従来技術（ジョセフソンパラメトリック増幅器）並みの超低雑音も達成
- 磁場中（テスラ以上でも）動作可能



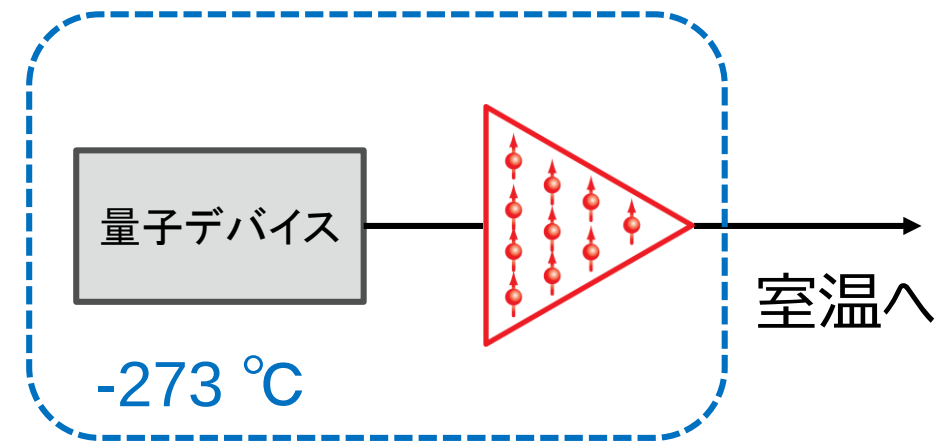
従来技術との比較

	新技術 (スピンメーザー増幅)	従来技術 (ジョセフソンパラメトリック増幅器)
飽和パワー	(少なくとも) 100 pW 以上	0.1 pW以下
磁場中での動作	可	不可 (10 – 100 mTまでは可能かもしれないが性能が顕著に低下)

- 従来技術：飽和パワーの問題があり、超伝導式量子コンピュータへの実装には多数（現状：5量子ビットにつき1つ）必要
- 新技術：飽和パワーを3桁以上改善できたため、原理的に増幅器の数を減らすことが可能→増幅器の製造コスト削減が期待できる
- 磁場中での動作が可能になり、磁気共鳴分光器（電子スピン共鳴、核磁気共鳴）への実装も可能

想定される用途

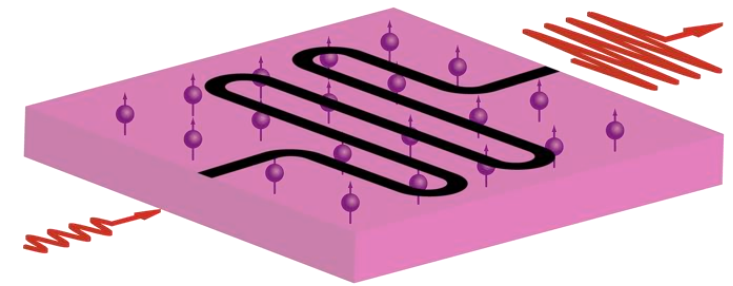
- 極低温動作の量子コンピュータ
(超伝導に限らない)
- 関連する量子デバイス
→ 超低雑音、かつ高い飽和パワー・
磁場中動作を兼ね備えた量子技術
- 量子コンピュータのネットワーク化技術
(ムーンショット開発研究が進行中)
→ 中継地点における増幅器、など
- 極低温磁気共鳴分光器
(電子スピン共鳴, 核磁気共鳴)
→ 感度を1-2桁向上可能
→ 微小試料からの信号検出が可能



「ネットワーク型量子コンピュータによる
量子サイバースペース」
(目標6: 誤り耐性型汎用量子コンピュータ)

実用化に向けた課題

- 帯域幅をどこまで広げられるか
 - 広帯域化を目指して、進行波型メーザー増幅デバイスの設計・作製・評価を進行中
- 適切な物質（コストと性能）の選定
 - ルビーを用いたデバイスを試作・評価中
- デバイスのパッケージ化・小型化
 - 現在は外部素子のマイクロ波部品（結合器，サーキュレータなど）も同一パッケージ内へ統合が望ましい
 - 高周波回路の品質の向上（遅延導波路など）



進行波型メーザー増幅デバイスの概念図

企業への期待

- **マイクロ波の設計・実装技術**を持つ企業と共同研究を希望
 - **広帯域マイクロ波2次元導波路**（遅延導波路）の設計
 - **2次元マイクロ波結合器，サーキュレータ**の設計
 - **マイクロ波集積回路**
などの技術が特に重要
- 量子コンピュータおよび周辺技術を開発中の企業、量子情報技術分野への参入を考えている企業、
 - 本技術の導入が有効と思われる

特許

発明の名称 : 超低雑音極低温マイクロ波増幅

出願番号 : 日本 2020-035699
米国 16/806,874

出願人 : 沖縄科学技術大学院大学（単独）

発明者 : 久保 結丸 (グループリーダー)
デニス・コンスタンチノフ Denis Konstantinov (教授)
ジェイソン・ボール Jason Ball (PhD学生)
ピーター・モロシュキン Petr Moroshkin (スタッフサイエンティスト)

お問い合わせ先

沖縄科学技術大学院大学 (OIST)
技術移転セクション

TEL : 098-966-8937
FAX : 098-982-3424
E-mail : tls@oist.jp



OIST

OKINAWA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY GRADUATE UNIVERSITY
沖縄科学技術大学院大学