



筑波大学

University of Tsukuba

COBAND実験に向けたSTJ遠赤外領域 単一光子分光検出器の開発

高橋光太郎, 笠島 誠嘉, 辻 悠汰, 寺田 侑史 for COBAND Collaboration

“TIA 2019”

Mar 8th, 2019, TIA, Japan

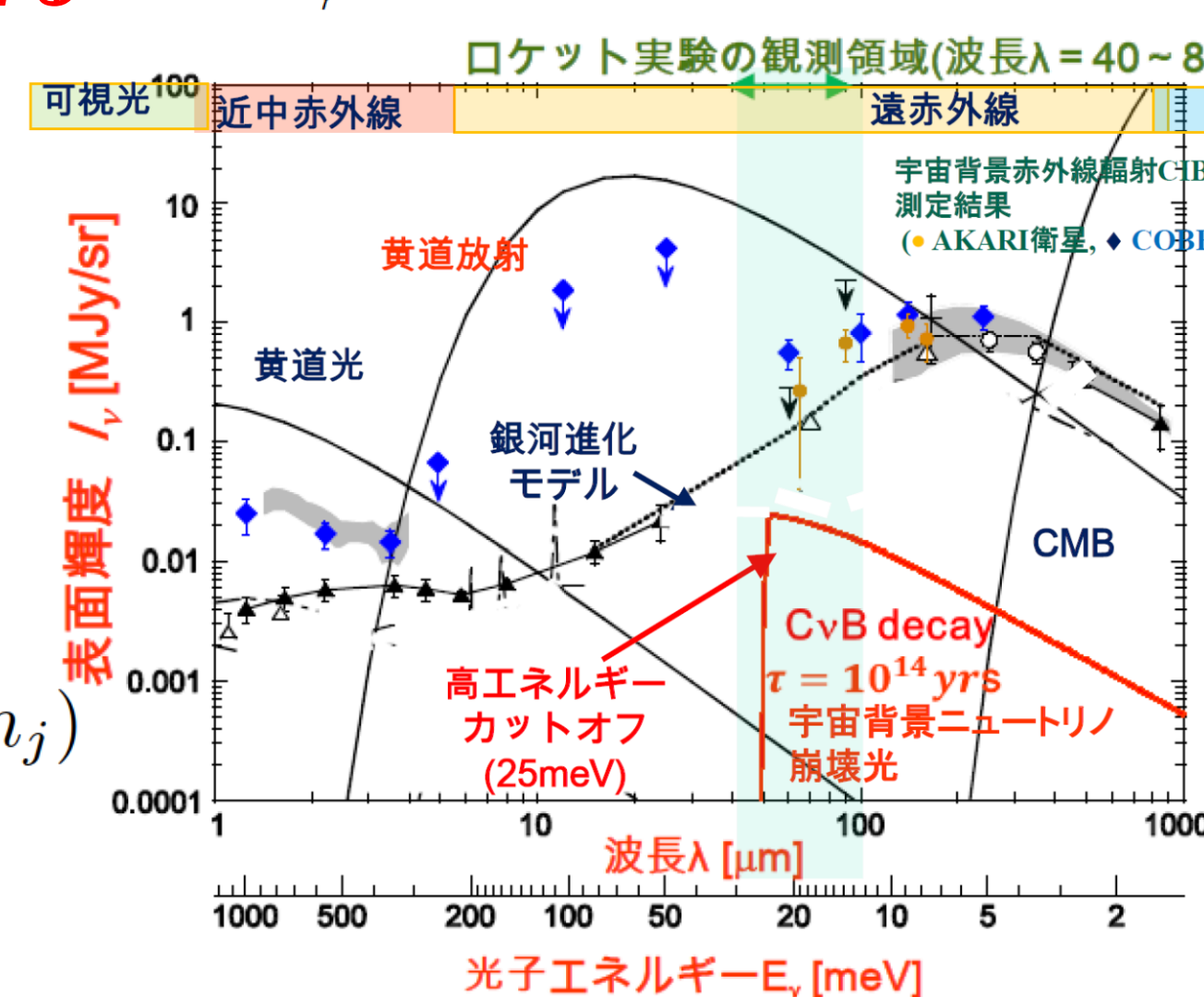
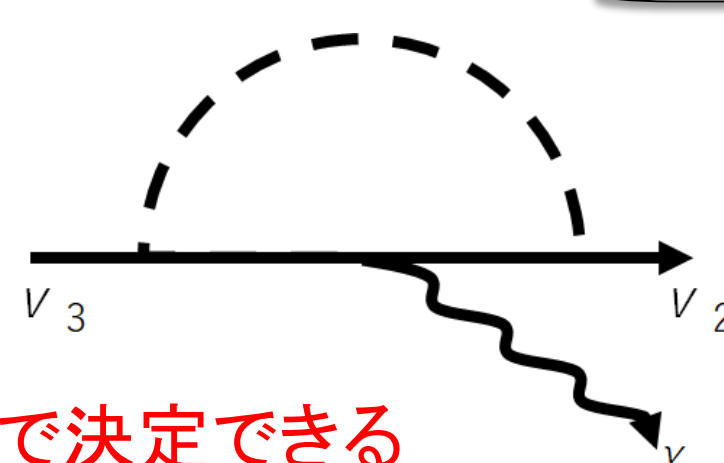


COBAND実験

COBAND実験

- ニュートリノの質量絶対値は未測定
 - 質量2乗差は測定済み
 - ニュートリノ崩壊光のエネルギーを測定で決定できる
- ニュートリノの寿命は非常に長い
 - 標準理論: $O(10^{43})$ 年
 - Left-Right Symmetric Model: $O(10^{17})$ 年
 - 膨大なニュートリノ源が必要
 - 宇宙背景ニュートリノを利用(110 個/ cm^3)
- 衛星実験とロケット実験を予定
 - 現在衛星実験用のコンポーネントを開発中

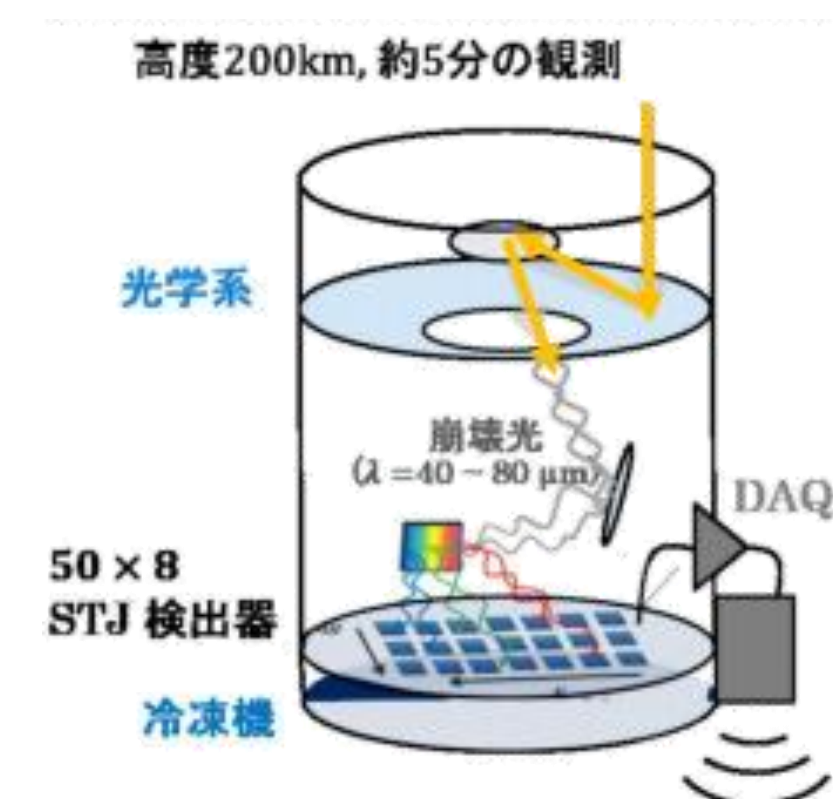
$$m_i = \frac{m_i^2 - m_j^2}{2E_\gamma} \quad (m_i > m_j)$$



出典: S. Matsuura Astrophys. J. 737 (2011) 2

ロケット実験

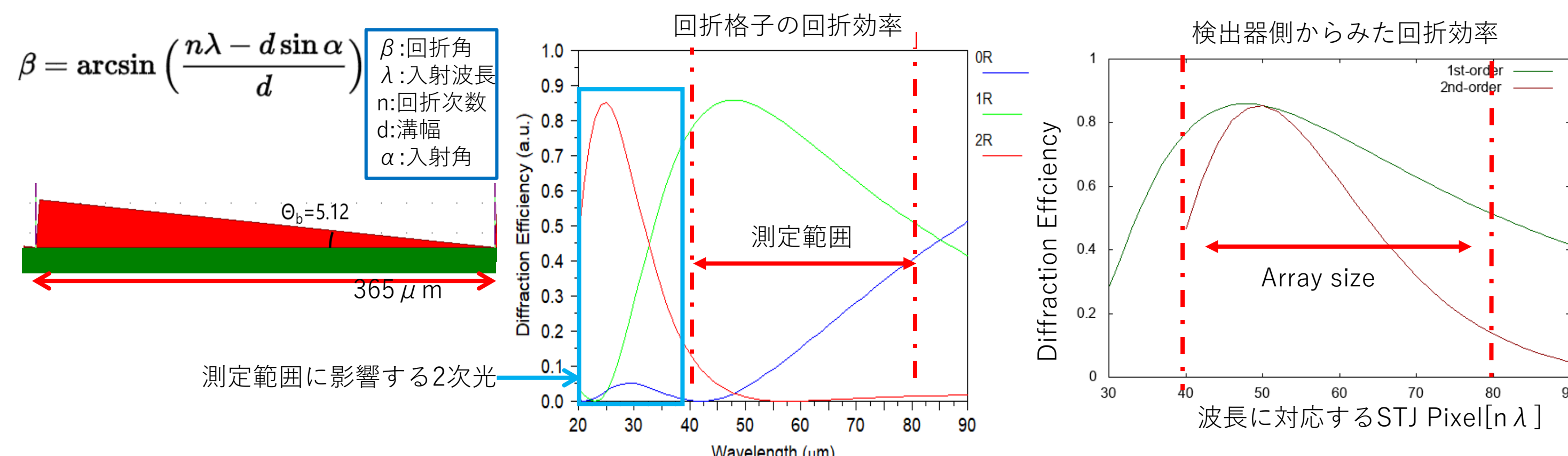
- $m_3=50\text{meV}$ を仮定: ニュートリノ崩壊光のエネルギーは 25meV 程度
 - 波長では $50\mu\text{m}$
 - 大気に吸収されるため地上での測定は不可
 - 大気圏外での測定
- COBANDロケット実験: ニュートリノの寿命の下限値 $O(10^{12})$ から $O(10^{14})$ 年に引き上げる
 - $40\mu\text{m}$ - $80\mu\text{m}$ 付近の光子のエネルギースペクトルを測定し信号カットオフを測定
 - エネルギー分解能2%での測定
 - 回折格子+Nb/Al-STJ Arrayで実現
- STJ検出器の信号は微弱
 - 3Kで動作する極低温増幅器で増幅



光学系 (分光)

回折格子設計

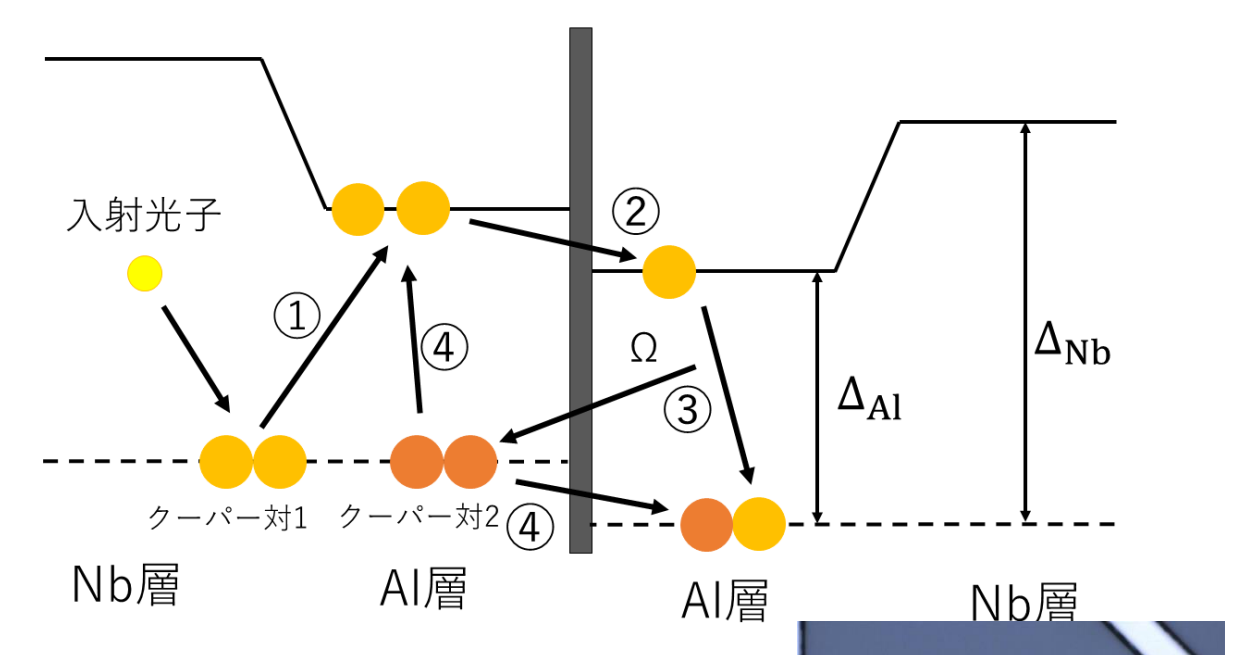
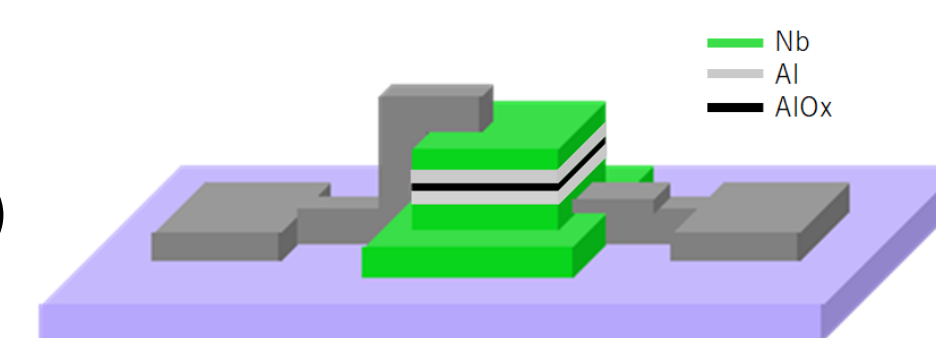
- 望遠鏡で集光した光を回折格子で分光し, Nb/Al-STJに入射
 - 遠赤外領域用回折格子は既成品がありません
 - COBAND用回折格子を設計する必要あり
 - 設計に用いるシミュレーターの妥当性は評価済み
- COBAND用回折格子への要求は次の通り
 - $40\mu\text{m}$ ~ $80\mu\text{m}$ での回折角の差が 8° ~ 16°
 - Nb/Al-STJ ピクセルサイズ $200\mu\text{m}$ ~ $400\mu\text{m}$ に対応
 - 波長 $\lambda=50\mu\text{m}$ で回折効率が最大
- 回折角の差が 8° および 16° の2種類のブレード回折格子を設計
 - ブレード回折格子は特定の回折次数と波長に対して高い回折効率を示す
- シミュレーションの結果, 波長 $20\mu\text{m}$ ~ $40\mu\text{m}$ の2次光が測定範囲に影響することが判明
 - 長波長フィルタで波長 $20\mu\text{m}$ ~ $40\mu\text{m}$ をカット



STJ 検出器

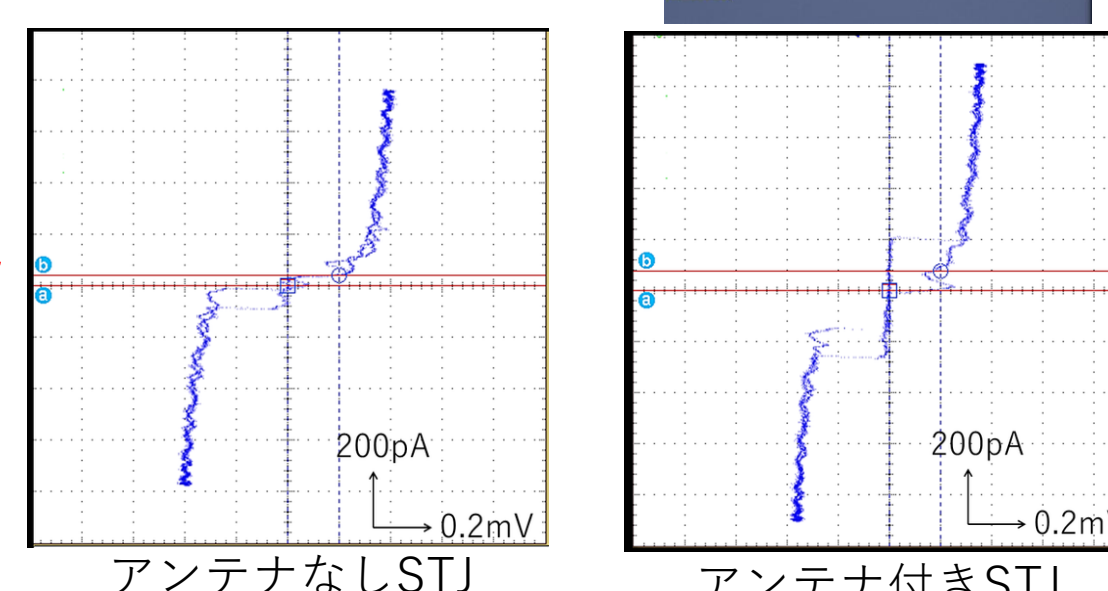
STJ: Superconducting Tunnel Junction 原理

- 超伝導エネルギーギャップ: Δ
 - Nbでは $\Delta \sim 1.5\text{meV}$ (\leftrightarrow 半導体 $\sim 1\text{eV}$)
- 構造: 超伝導体(Nb/Al)/絶縁体(AIOx)/超伝導体(Al/Nb)
- 入射光子がクーパー対を壊し準粒子を励起
 - 励起した準粒子が絶縁膜をトンネル
 - 電流として観測
- COBAND実験への要求
 - リーク電流が 100pA 以下
 - 波長 $50\mu\text{m}$ の遠赤外線1光子を測定可能



アンテナ付きSTJ

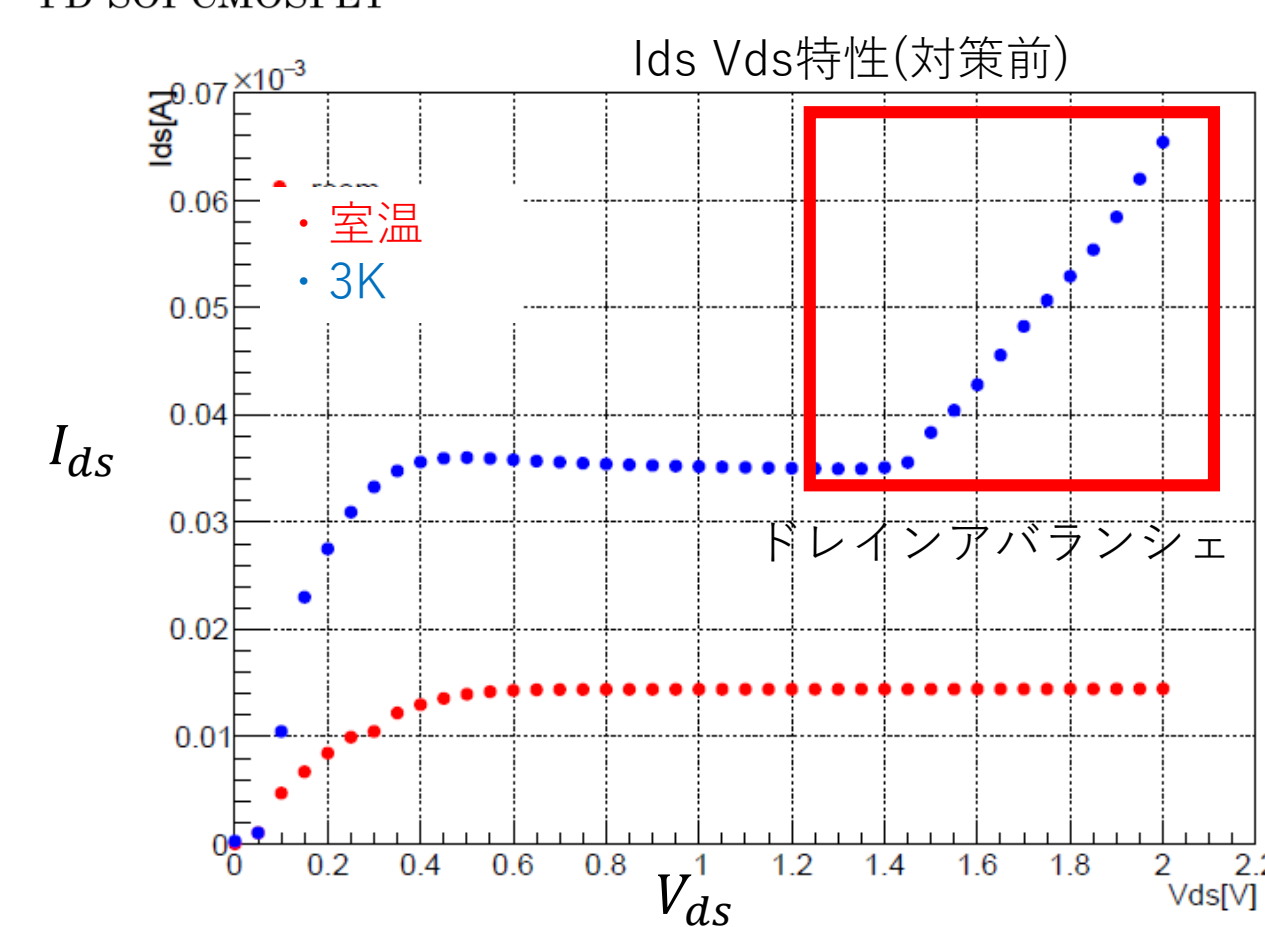
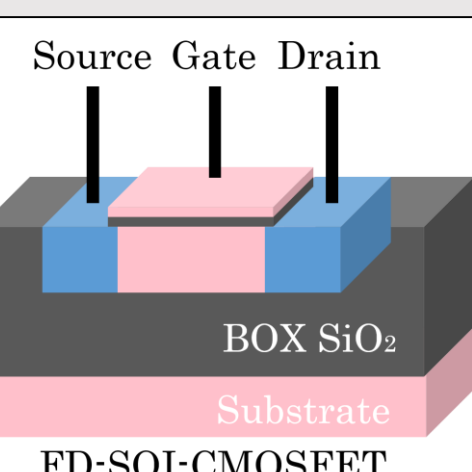
- アンテナを付加し受光効率を改善
 - リーク電流はピクセルサイズに比例
- 光子とSTJの結合を強める
- アンテナによるリーク電流増加の懸念
 - アンテナの有無によるリーク電流の評価
- $20\mu\text{m}$ 角のアンテナ付き, アンテナ無し両方でリーク電流 100pA @ $200\mu\text{V}$ を達成
 - アンテナを付加してもリーク電流の要求を達成



極低温増幅器

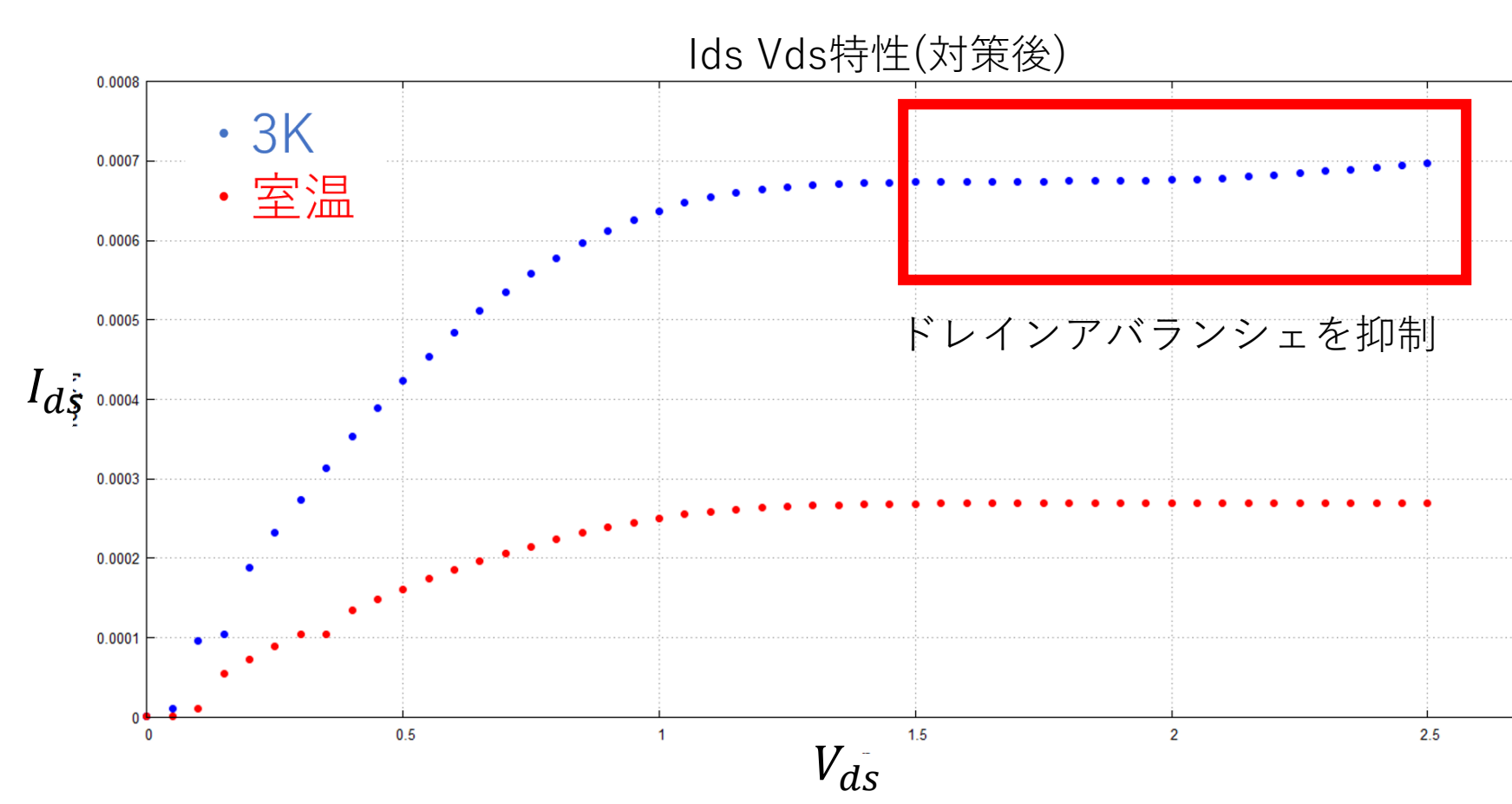
FD-SOI CMOSFET

- 極低温増幅器への要求
 - 3K以下で動作する
 - STJ検出器の信号($<10\mu\text{s}$)を増幅できる
 - 冷凍機の配線容量負荷(数 100pF)の下でも増幅できる
 - 低消費電力
 - ノイズが小さい(ノイズ等価電力 $\sim 1 \times 10^{-19}\text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$)
- Bulk-CMOSでプロセスされたMOSFETは低温では動作しない
- Fully Depleted-Silicon On Insulator CMOSFET
 - SiO_2 上にMOSFETを形成したもの
 - ボディ部分が薄い($\sim 50\text{nm}$)
 - 寄生容量が小さく, 低消費電力
 - 浮遊帯効果が起きない
 - 低温で動作
 - 3Kでドレインアバランシェを起こす



ドレインアバランシェ対策

- 低温時にドレインアバランシェが発生
- 3K時でドレイン電流の上昇が抑制するためにFETの形状を変更
 - ドレインアバランシェの抑制を確認



まとめ・今後の展望

まとめ

- 分光系
 - ロケット実験用回折格子の設計は可能
 - 2次光の影響を長波長フィルタで取り除く必要あり
- STJ検出器
 - アンテナ付きSTJのリーク電流評価
 - アンテナの有無によらず 100pA @ $200\mu\text{V}$ を達成
- 極低温増幅器
 - SOI-FETは低温でドレインアバランシェを起こす
 - FETの形状を変化させ対策
 - 3K時にドレインアバランシェを抑制

今後の展望

- 分光系
 - 設計した回折格子の制作・評価
 - 長波長フィルタの選定
- アンテナ付きSTJ検出器
 - アンテナ付きで遠赤外領域の光応答を確認
 - アンテナパラメータの最適化
- 極低温増幅器
 - ドレインアバランシェ対策をしたFETでの増幅器の開発, 評価

COBAND

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索
Cosmic Background Neutrino Decay search

