

可視～遠赤外域単一光子検出のための半導体・超伝導体複合型検出器(SOI-STJ)の開発

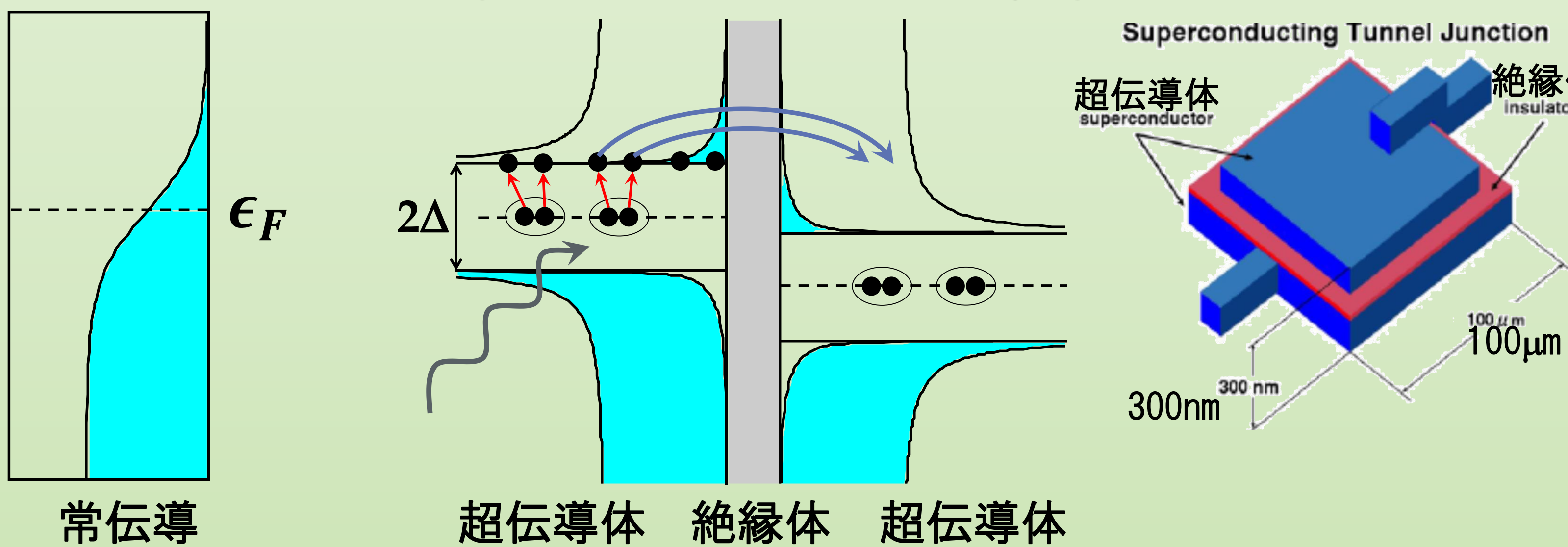
武内 勇司 (筑波大学数理物質系・数理物質融合科学センター)

ニュートリノ崩壊探索実験 Collaboration

S.H.Kim , K. Takemasa, K.Kiuchi , K.Nagata , K.Kasahara , K.Moriuchi, R.Senzaki, S. Yagi (筑波大), S.Matsuura (関西学院大), H.Ikeda, T.Wada, K. Nagase (JAXA/ISAS), H.Ishino, A.Kibayashi (岡山大), S.Mima (理研), Y.Kato (近畿大), Y.Arai, M.Hazumi , I. Kurachi(KEK), T.Yoshida, R. Hirose, Y. Kato, C. Asano, T. Nakamura (福井大), S. Shiki, M. Ukibe, G. Fujii, M. Ohkubo (産総研), S. Kawahito (静岡大), E.Ramberg, J.H.Yoo, M.Kozlovsky, P.Rubinov, D.Sergatskov (Fermilab), S.B.Kim(ソウル大)

Superconducting Tunnel Junction (STJ) 原理

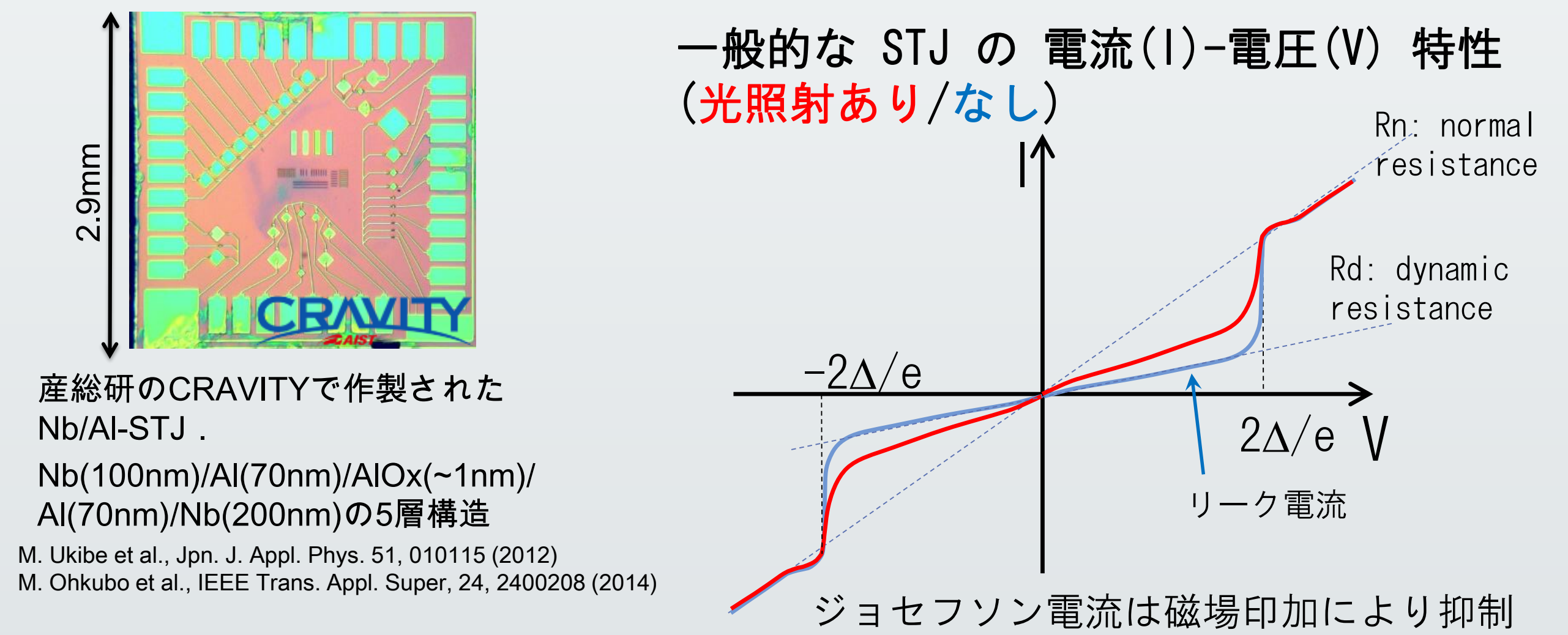
- 超伝導には，エネルギーギャップが存在： Δ
- ニオブの場合， $\Delta \sim 1.5\text{meV}$ (\Leftrightarrow 半導体 $\sim 1\text{eV}$)
- 超伝導体/絶縁体/超伝導体の構造
- 上部と下部の超伝導体の間にバイアス: $0 < |V| < 2\Delta/e$
- 光入射によるエネルギー(E_γ)でクーパー対電子が励起(準粒子)
 - 入射エネルギーに比例した数の準粒子： $N_{qp} = E_\gamma / 1.7\Delta$
 - エネルギー分解能(発生準粒子数のゆらぎ)： $\frac{\delta N_{qp}}{N_{qp}} = \sqrt{\frac{F}{N_{qp}}} = \sqrt{\frac{1.7\Delta \cdot F}{E_\gamma}}$
- 励起した準粒子が絶縁体をトンネルし，電流として観測
- 信号の時定数が短い (超伝導体がNbの場合 $\tau \sim 1\mu\text{s}$)



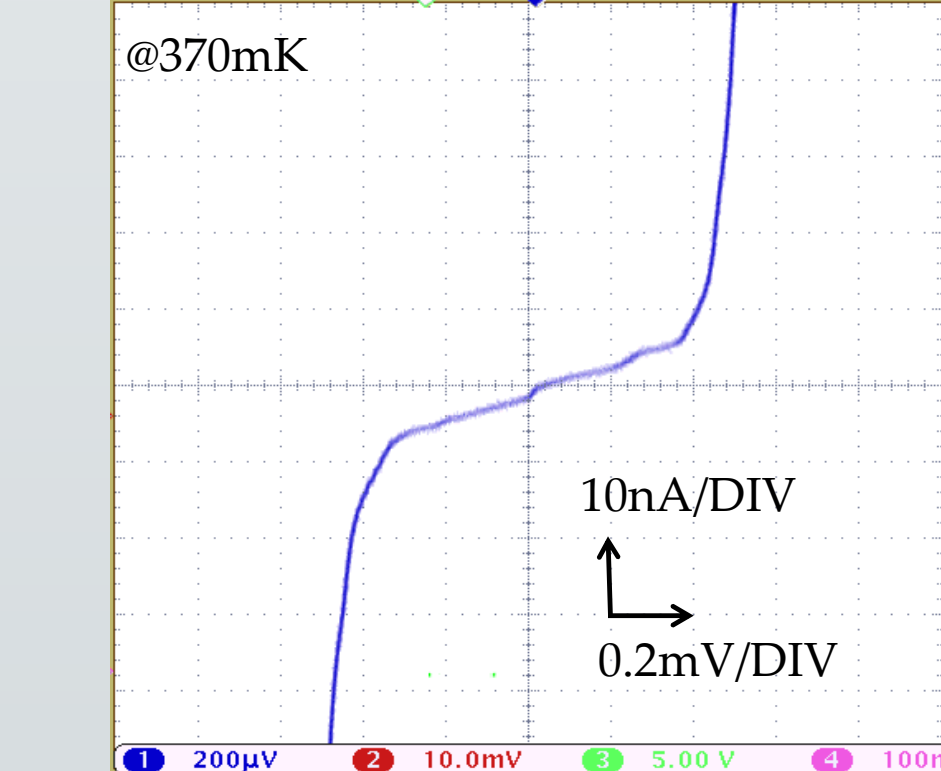
	Si	Nb	Al	Hf
Tc[K]		9.23	1.20	0.165
Δ[meV]	1100	1.550	0.172	0.020

例えば超伝導体がNbの場合
 $E_\gamma = 1\text{eV}$ (波長1.24μm) なら
 $N_{qp} \sim 380$, $\frac{\delta N_{qp}}{N_{qp}} \sim 2\%$ (F=0.2を仮定)
 →可視光～近赤外領域ならば一光子分光も可能
 $E_\gamma = 25\text{meV}$ (波長50μm) なら $N_{qp} \sim 16$
 →遠赤外領域でも一光子計数なら可能

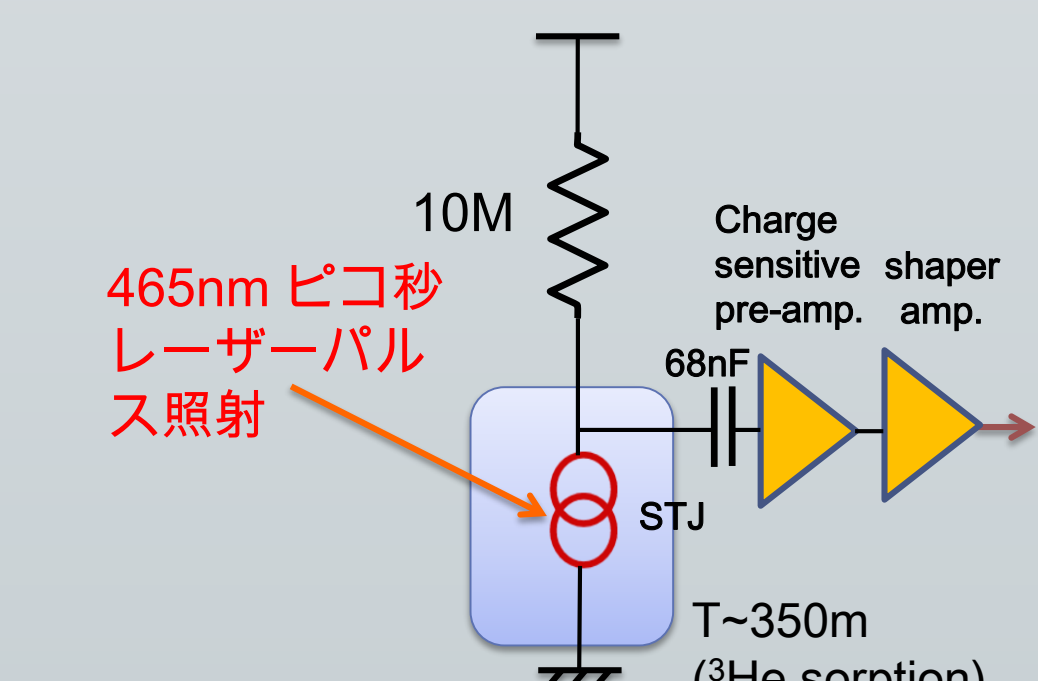
一光子検出のためのNb/Al-STJ開発



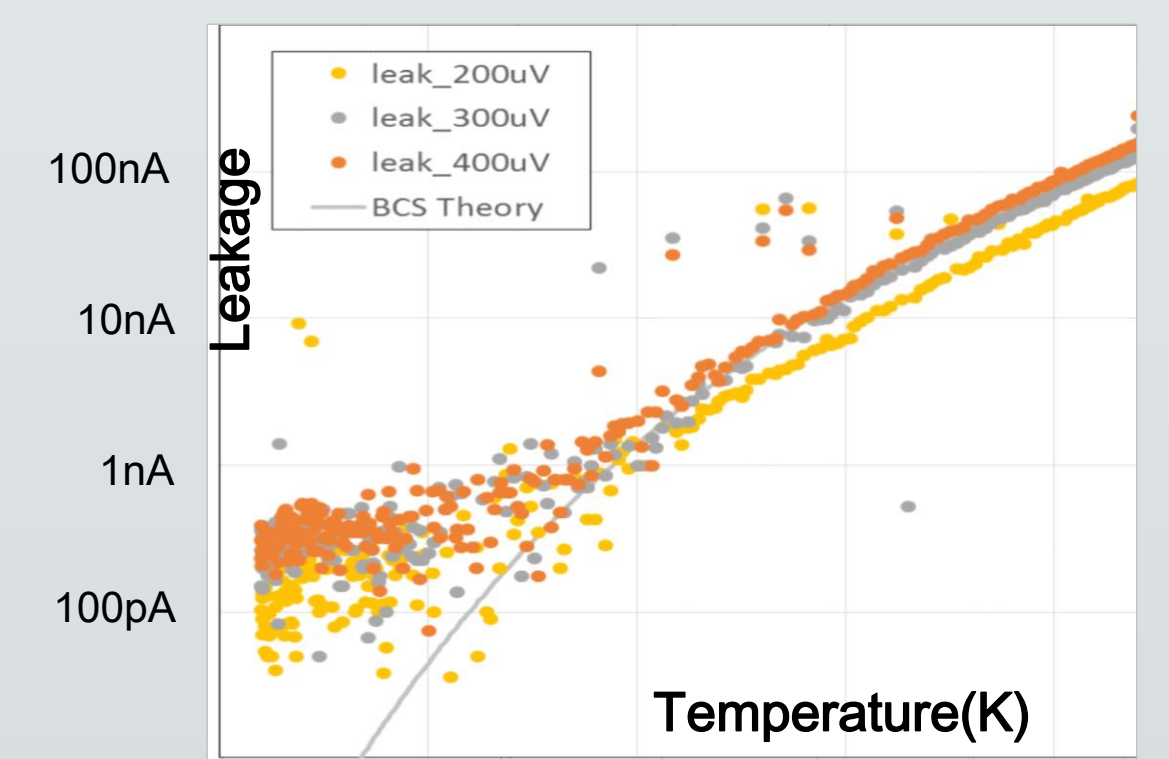
AIST製 100μm角 Nb/Al-STJ



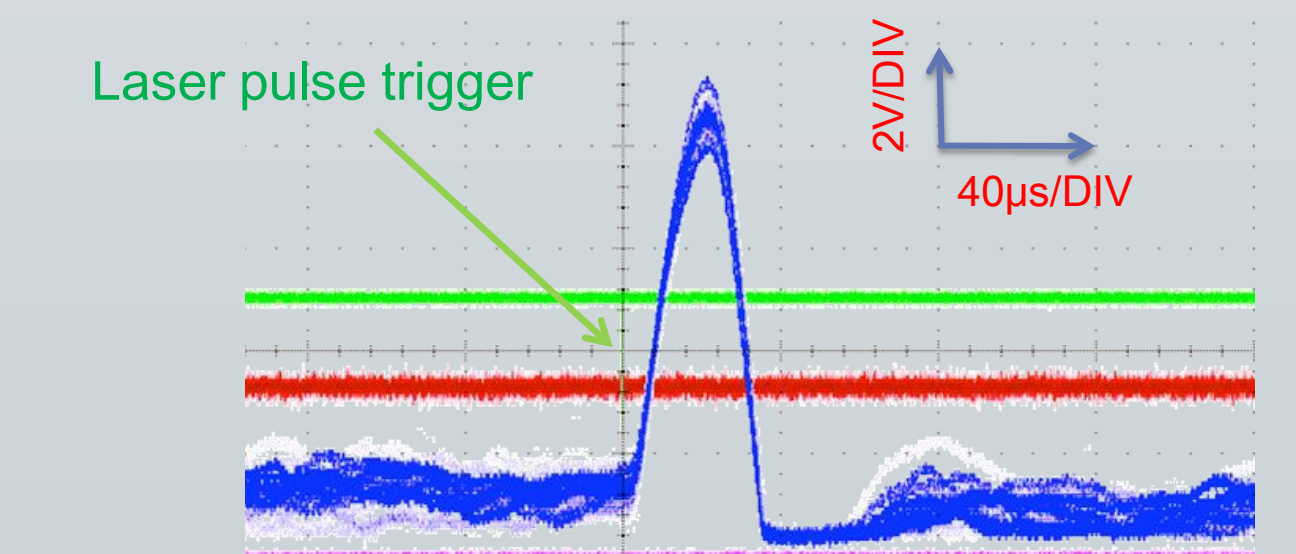
100μm角Nb/Al-STJのI-V特性．筑波大の測定環境では，リーク電流はV=0.4mVにおいてI=5nAを示している．



電荷積分型プリアンプ(室温)+シェーパーアンプを用いた100μm角Nb/Al-STJのパルス出力信号の読出



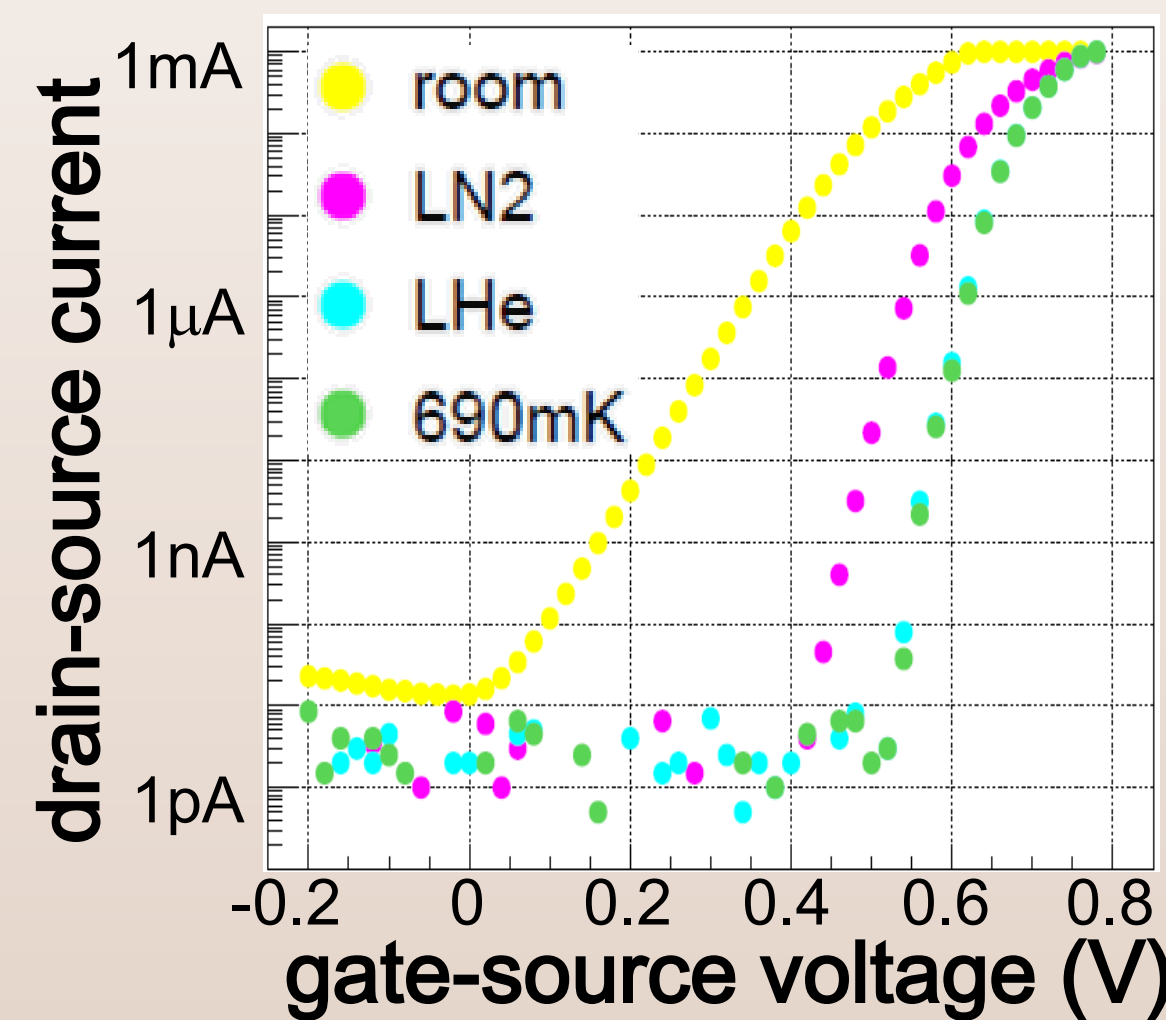
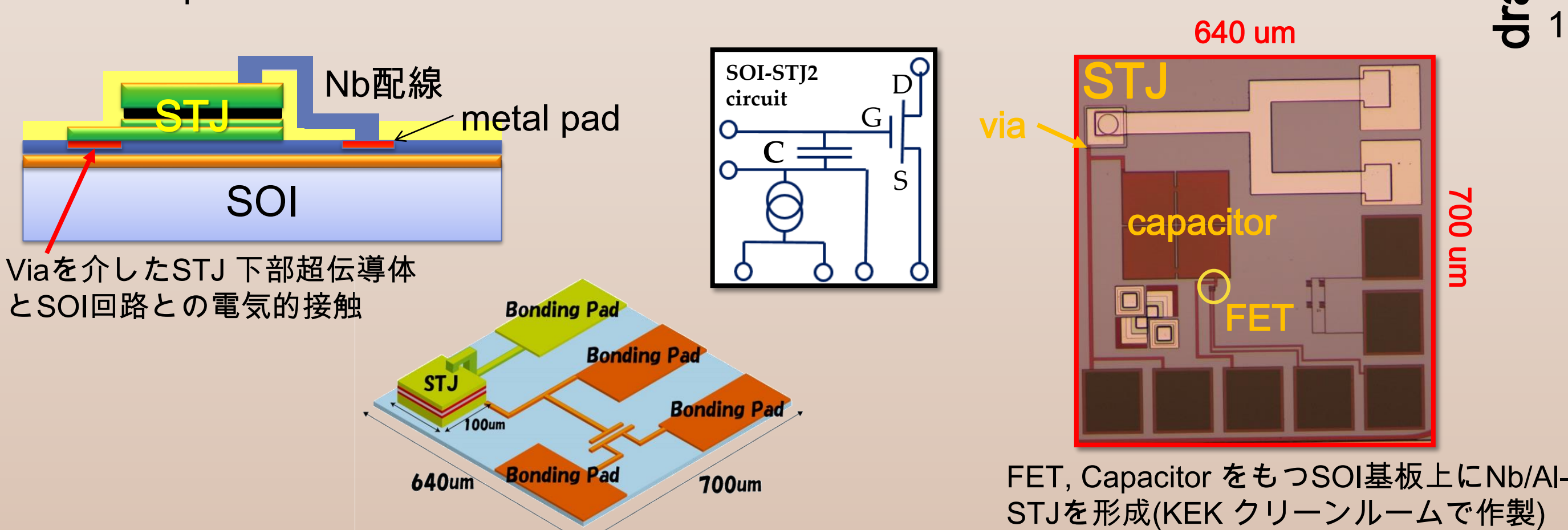
AIST製50μm角Nb/Al-STJリーク電流の温度依存性 産総研の測定環境では，50μm角Nb/Al-STJにおいてリーク電流220pA@0.4mVを達成している．



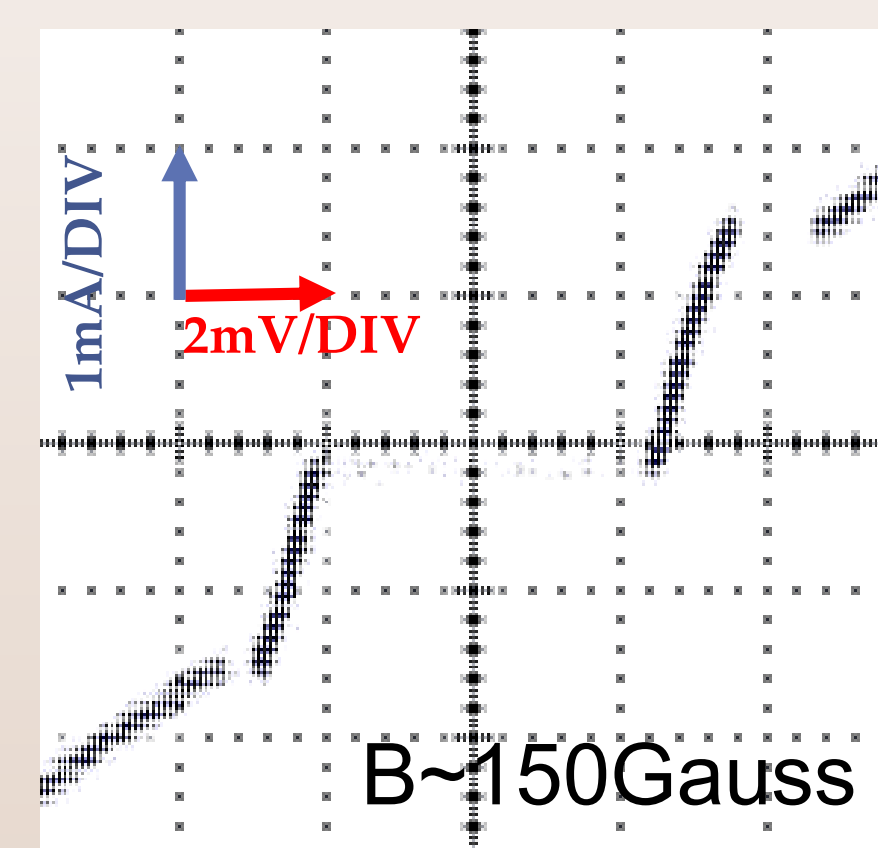
465nmのピコ秒レーザーパルス照射に対する応答 (シェーパーアンプ出力)．検出光子数は，約10光子相当．465nm一光子レベルの検出に対する応答も確認できたが，ノイズが大きく事象ごとの0/1光子分離はできていない → プリアンプを冷凍機内部のSTJ付近に配置したい

SOI (Silicon-On-Insulator) 技術をもちいた極低温アンプの開発

- FD-SOI: Fully depleted Silicon-On-insulator
 - FD-SOI プロセス中の CMOS FET が4K以下の極低温で動作することが JAXA/KEKのグループにより報告 T. Wada et al, Phys. 167, 602 (2012)
- STJの至近に配置でき，光パルス信号検出に特化した極低温アンプとしてFD-SOIを用いたアンプの開発を開始
 - STJをSOIで作製したアンプ基板上に直接形成するSTJ-アンプ一体型検出器の可能性も検討
 - SOIに p-MOS と n-MOS FET のみが入った基板を作成してテストを開始

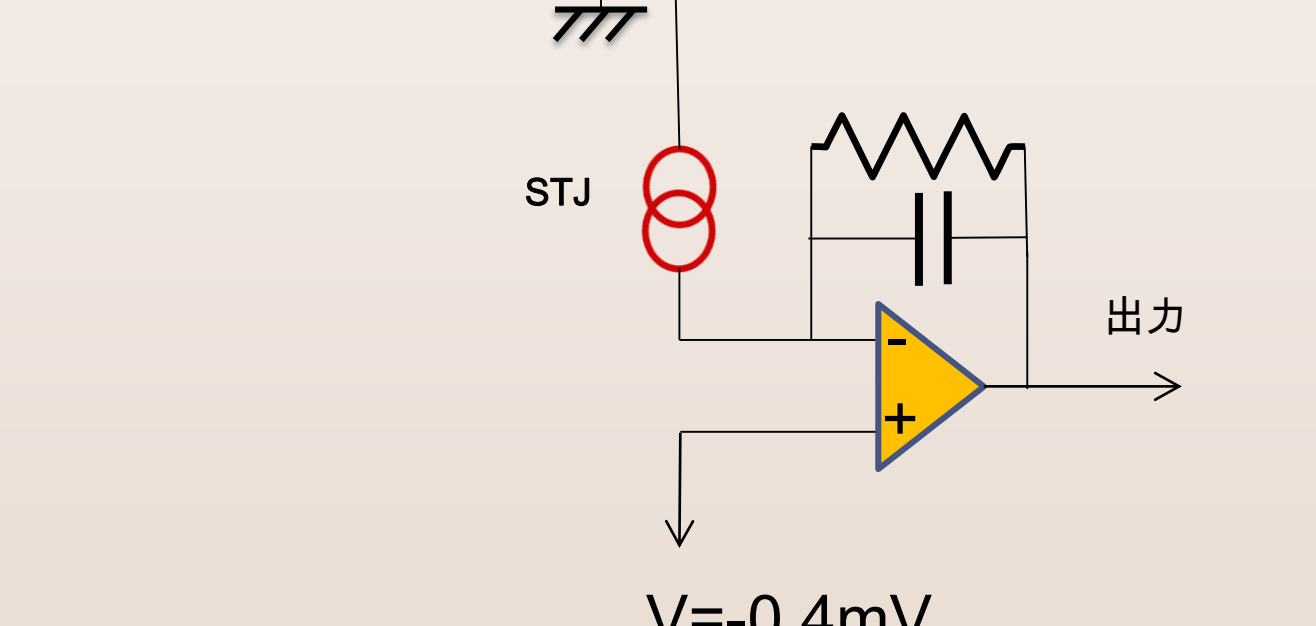


Nb/Al-STJを形成したFD-SOI基板中の nMOS-FET のゲート電圧-ドレイン電流特性の極低温での振る舞い．閾値電圧は，シフトするが極低温でもトランジスタとして動作している．



FD-SOI基板上に形成した50μm角Nb/Al-STJのI-V特性．ジョセフソン電流を抑制するために磁場を印加している．SOI基板上に形成されたSTJが期待通りに動作している．

SOIによるSTJのパルス出力信号の読出回路の設計



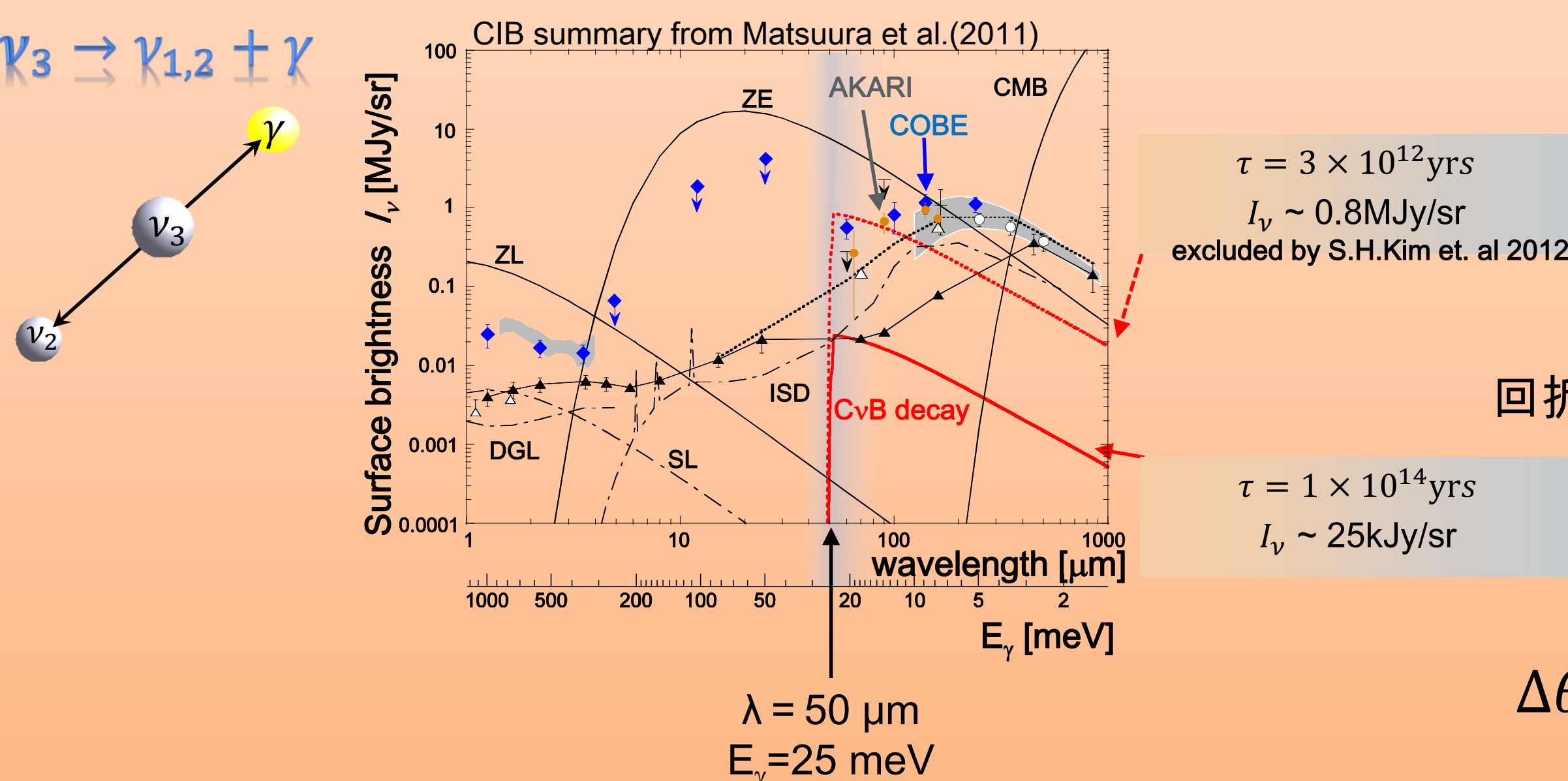
オペアンプでSTJに定電圧バイアスを印加しつつ，STJからの出力電流を積分する

- FD-SOI基板上にスパッタ形成したNb/Al-STJの動作を確認
- STJを形成したFD-SOI基板中の n-MOS および p-MOS FETの極低温での動作($\sim 100\text{mK}$ まで動作を確認)
- SOIによるSTJ光パルス応答読出し回路の設計を進めている

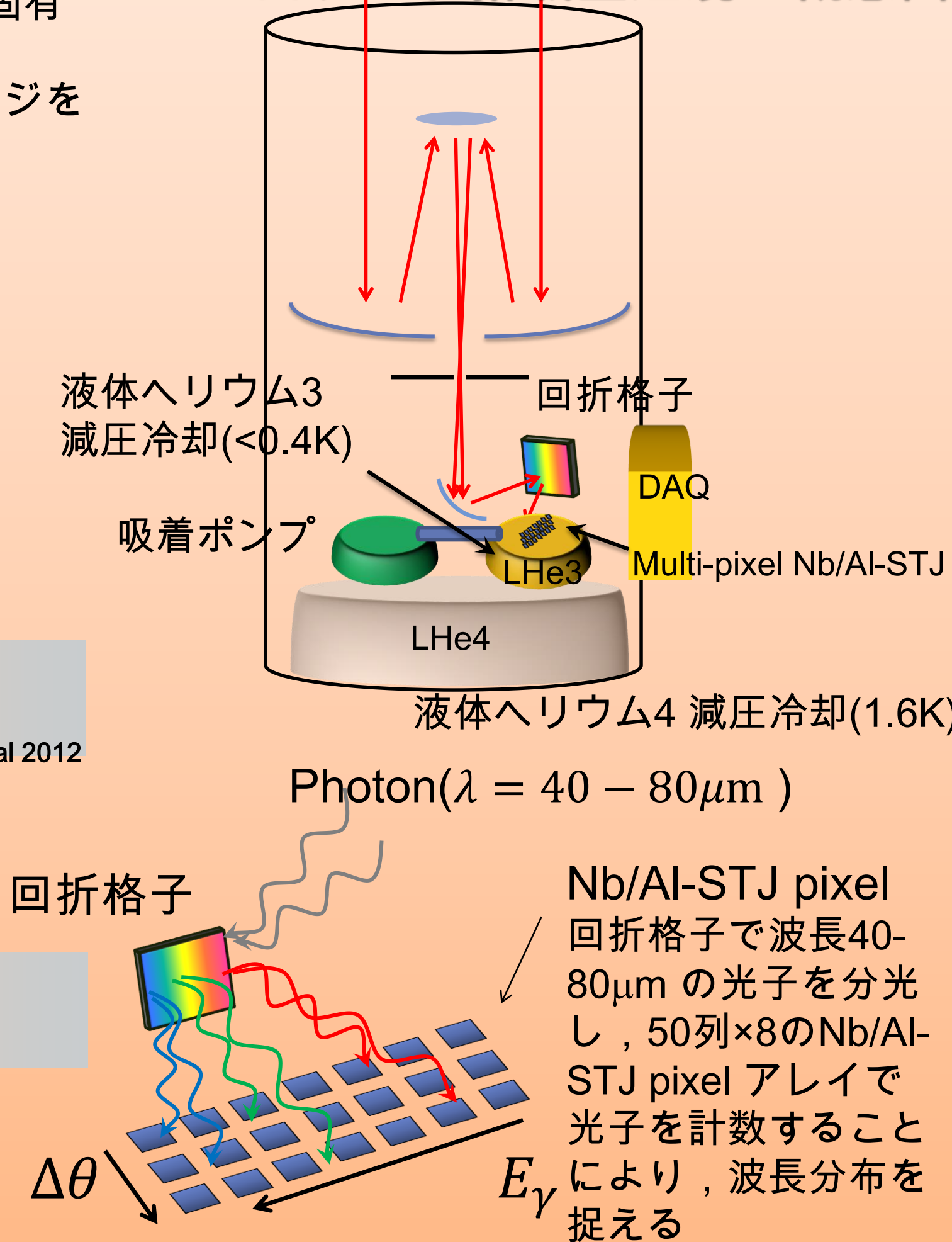
宇宙背景ニュートリノ(CvB)の崩壊探索への応用

宇宙に遍く存在すると予想されている宇宙背景ニュートリノCvBの重たい質量固有状態のニュートリノから軽い質量固有状態への光子を伴った崩壊を探索する．CvBニュートリノの崩壊からの光子の信号は，波長およそ50μm付近に鋭いエッジを持った長波長側に裾を引く分布と予想される．

- ロケット実験
 - 望遠鏡主鏡直径：15cm
 - 回折格子(波長: 40-80 μm)で分光された光子を50×8ピクセルのSTJ で計数
 - STJ 1素子あたりの視野角：100μrad×100μrad
 - 測定時間：200秒
- を仮定するとニュートリノの寿命に対して10¹⁴年の下限値が設定可能．(現在の寿命下限値を100倍改善)



ロケット搭載望遠鏡の概念図



まとめ

- 可視～遠赤外域の一光子分光・一光子計数が可能な光検出器の開発を行っている．
 - 半導体と比べてエネルギーバンドギャップが極めて小さい超伝導体を用いた検出器で且つ，パルス応答が高速なNb/Al-STJの使用を検討
 - STJ信号読出しとして極低温で動作することが確認されたSOI技術によるアンプ回路が有望．STJと一体型，もしくはSTJの至近で極低温アンプとして用いることを検討
 - STJからの光パルス応答の電荷を積分するSOI回路を設計中
- 遠赤外域一光子計数検出器の応用として，ロケット実験による宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験を計画中
 - 200秒の測定で現在のニュートリノ寿命下限値を100倍改善することが可能

謝辞

本研究は，科研費新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」計画研究B02班(科研費番号25105007)および，KEK測定器開発室SCDプロジェクトのサポートを受けています．本研究に使用されたNb/Al-STJは，KEK先端計測実験棟・大実験室内クリーンルーム，および(独)産業技術総合研究所(AIST)の超伝導クリーンルームCRAVITYにおいて作製されました．本研究に使用されたSOI基板は，東京大学大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC)を通し，シノプシス株式会社，日本ケイデンス株式会社およびメンター株式会社の協力で設計されました．