

超伝導検出器と SOI 極低温アンプ

2016年3月2日 /光量子計測器ワークショップ

@筑波大学総合研究棟

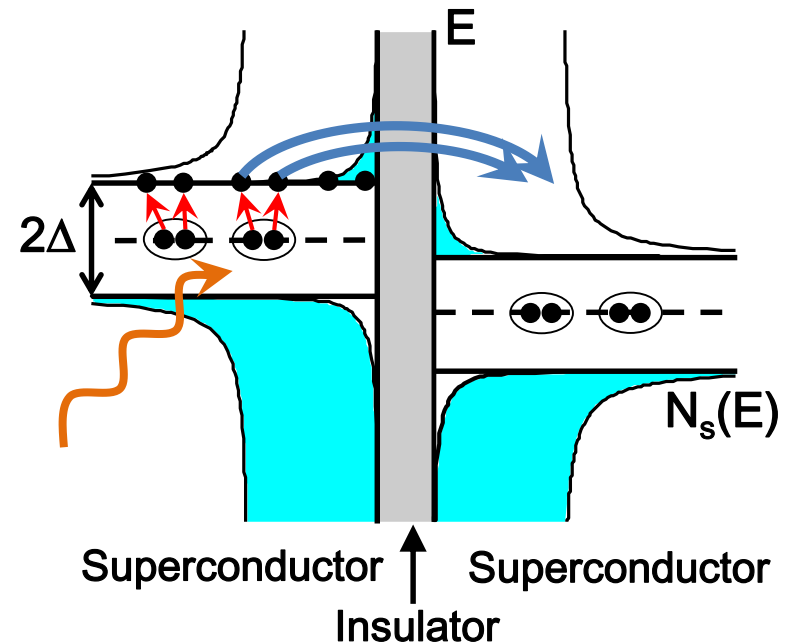
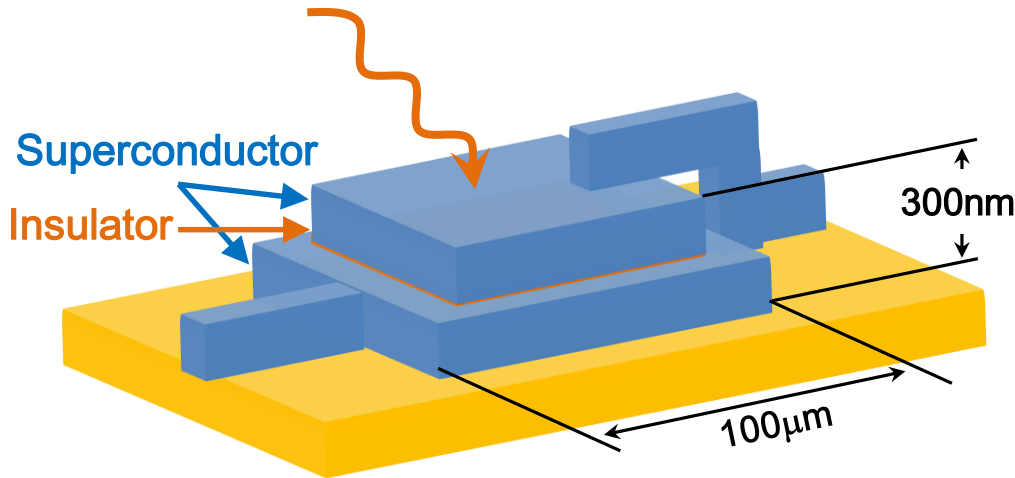
武内勇司 (筑波大 数理物質融合科学センター)

on behalf of Neutrino Decay Collaboration

S. H. Kim, K. Takemasa, K. Kiuchi, K. Nagata, K. Kasahara, K. Moriuchi, R. Senzaki, S. Murakami, S. Yagi (U. Tsukuba), S. Matsuura (Kwansei Gakuin U.), H. Ikeda, T. Wada, K. Nagase (JAXA/ISAS), H. Ishino, A. Kibayashi (Okayama U.), S. Mima (RIKEN), T. Yoshida, R. Hirose, Y. Kato, C. Asano, T. Nakamura (U. Fukui), Y. Kato (Kinki U.), Y. Arai, M. Hazumi, I. Kurachi (KEK), S. Shiki, M. Ukibe, G. Fujii, M. Ohkubo (AIST), E. Ramberg, J. H. Yoo, M. Kozlovsky, P. Rubinov, D. Sergatskov (FNAL), S. B. Kim (Seoul National U.) and S. Kawahito (Shizuoka U.)

Superconducting Tunnel Junction (STJ)

- Superconductor / **Insulator** / Superconductor Josephson junction device



Δ : Superconducting gap energy

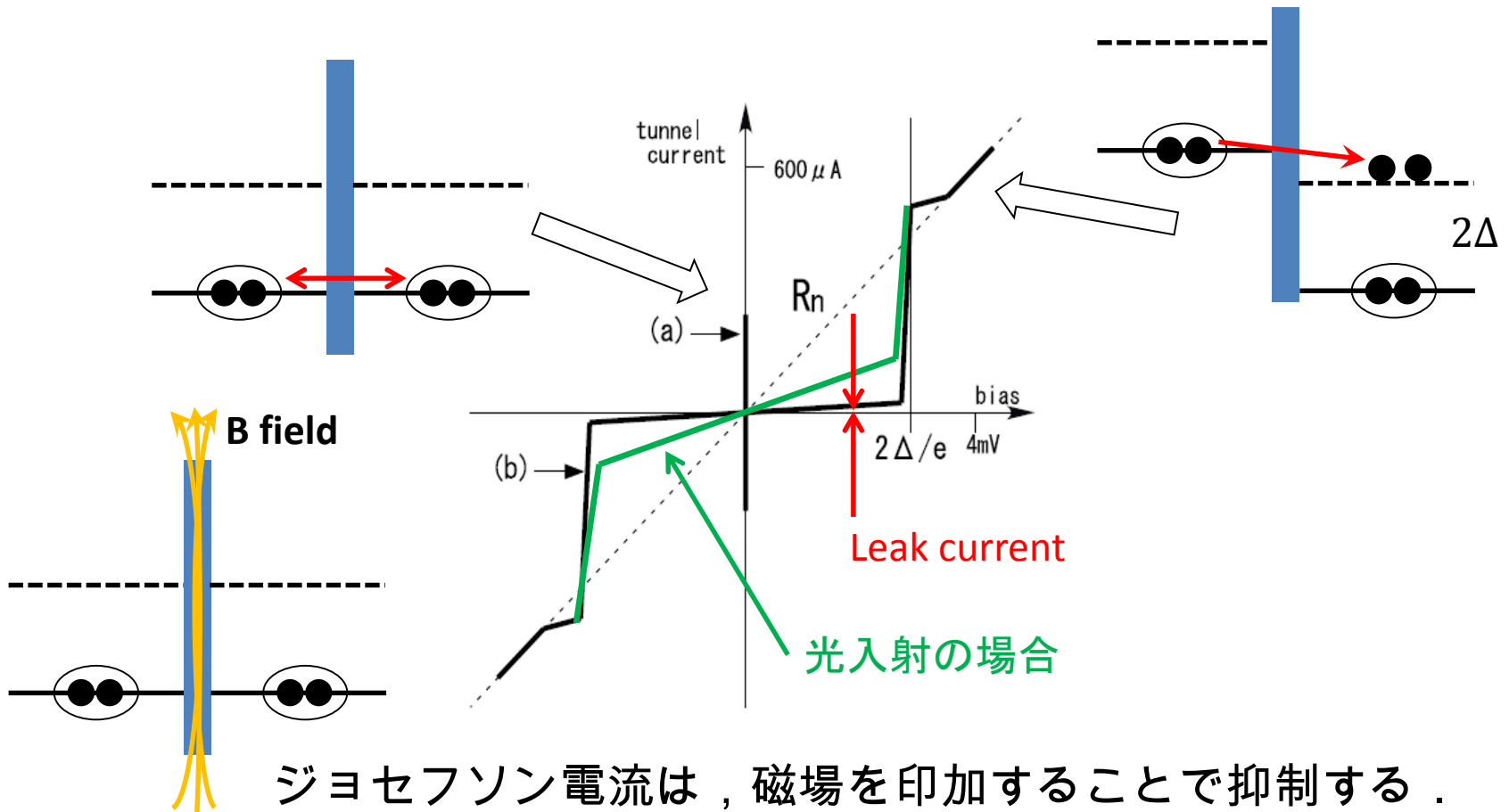
接合面を挟んで電位差 ($|V| < 2\Delta$) を印加.

超伝導体に吸収された光子のエネルギーにより複数のクーパ対が解離(励起)し、生成された準粒子によって、エネルギーに比例したトンネル電流が発生.

- 超伝導ギャップ (Δ) は遠赤外光子のエネルギーよりもずっと小さい → 原理的には、遠赤外域一光子を検出可能
- $\sim \mu\text{s}$ 程度の比較的高速なパルス応答 (Nb の場合) → 光子計数することで S/N の著しい向上

STJ I-V 特性

- STJの電圧—電流特性(I-Vカーブ)
→ $V=0$ においてクーパー対のトンネル電流(直流ジョセフソン電流), $|V| > 2\Delta$ の領域で準粒子の電流(通常の抵抗)が見られる



ジョセフソン電流は，磁場を印加することで抑制する．

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索への応用

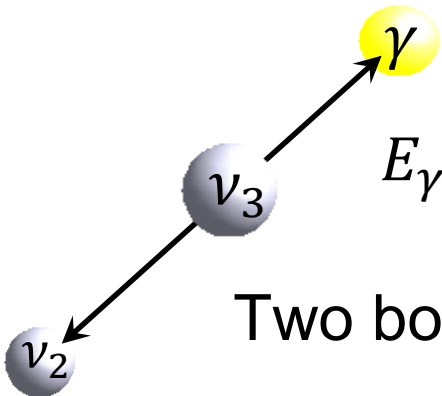
- 宇宙背景ニュートリノ(CνB)におけるニュートリノ崩壊 $\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$
 - 標準模型を超えるニュートリノの異常磁気能率の探索
 - 宇宙背景ニュートリノの直接観測
 - ニュートリノ質量の絶対値の決定
- 標準模型による寿命予言値 : $\tau = O(10^{43} \text{ yrs})$
- 測定による寿命下限値 : $\tau > O(10^{12} \text{ yrs})$

$$\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$$

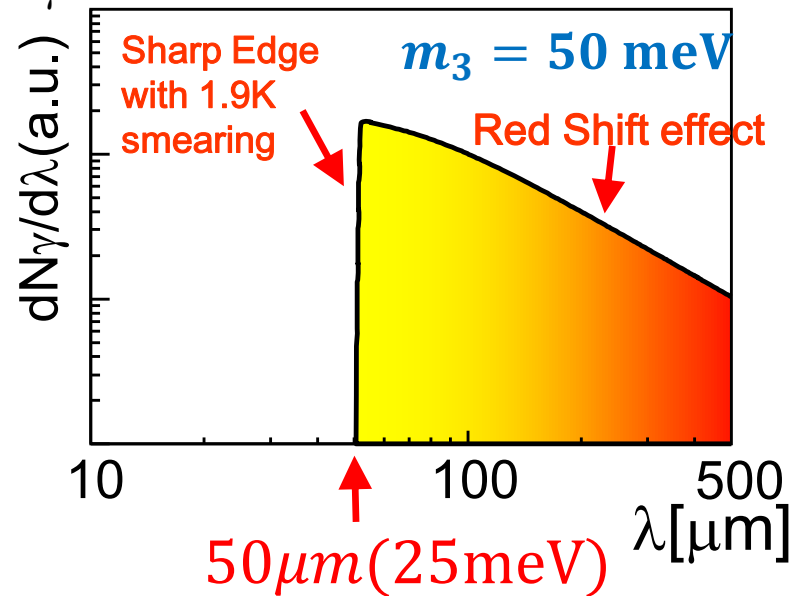
in the ν_3 rest frame

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_{1,2}^2}{2m_3}$$

Two body decay

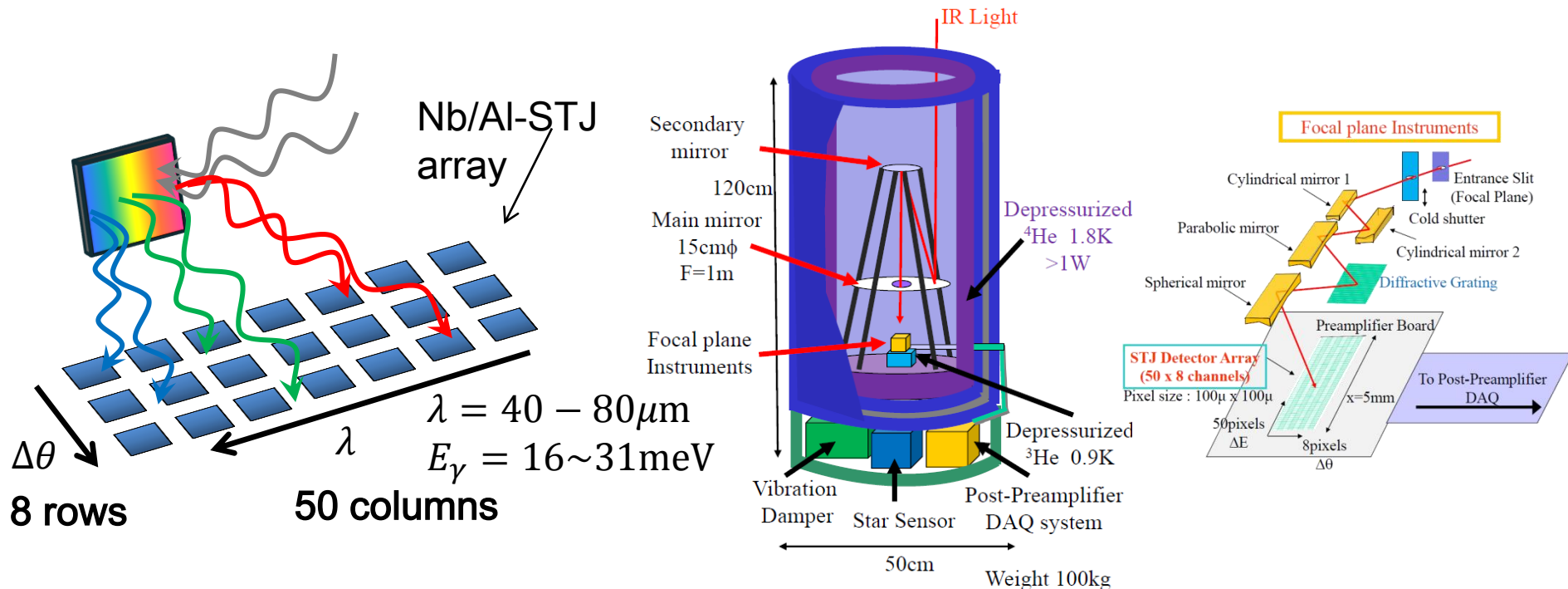


λ_γ distribution in $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$

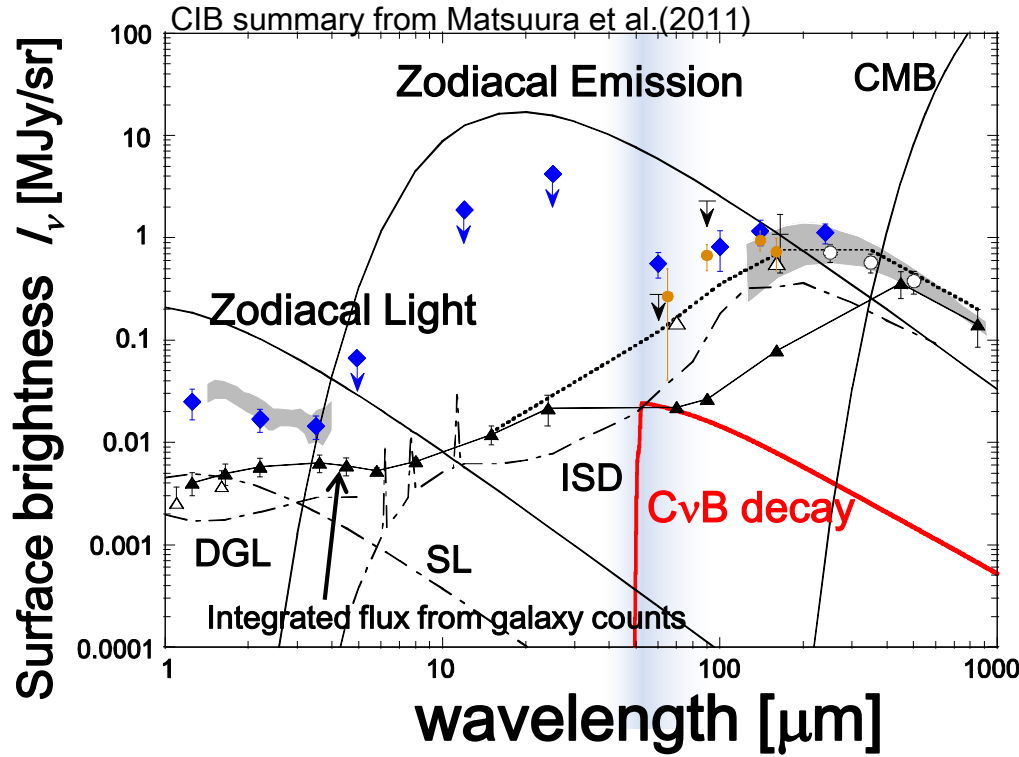


ニュートリノ寿命測定感度 10^{14} 年を目指したロケット実験

- 高度200~300kmにて200秒の測定
 - 主鏡直径15cm, 焦点距離1mの望遠鏡
 - 光学系は全て1.8K程度に冷却
- 焦点位置に $\lambda=40-80\mu\text{m}$ (16-31meV) をカバーする回折格子と 50(波長方向) x 8(空間方向) ピクセル配列の遠赤外光検出器(Nb/Al-STJ)
 - 各々のNb/Al-STJピクセルで波長ごと($\Delta\lambda = 0.8\mu\text{m}$)の光子計数
 - 1ピクセル当たりの受光面積は $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ (視野角 $100\mu\text{rad} \times 100\mu\text{rad}$)



CνBニュートリノ崩壊光探索ロケット実験における検出器要求



Telescope parameters

- Main mirror
 - $D=15\text{cm}$, $F=1\text{m}$
- detector
 - 波長 $0.8\mu\text{m}$ あたり
 - $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 8$ pixels
 - 視野角 : 8×10^{-8} sr

$$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$$

- ニュートリノ崩壊($m_3 = 50 \text{ meV}$, $\tau_\nu = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$): $I_\nu=25\text{kJy/sr}$
 - $3.3 \times 10^{-20} \text{ W} / 8\text{pixels}$ @ $\lambda=50\mu\text{m}$
- 黄道光 8MJy/sr のもと200sec の測定でこれを検出
 - ➔ 検出器性能として1pixel当り $\text{NEP} < 4 \times 10^{-19} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$ が必要 (量子効率100%として)

CνBニュートリノ崩壊光検出に要求される検出器NEP

検出器視野角

- 望遠鏡主鏡: $D=15\text{cm}$, $F=1\text{m}$

- 波長 $0.8\mu\text{m}$ ($\Delta\nu=c/50\mu\text{m}-c/50.8\mu\text{m}=94\text{GHz}$)あたり

$100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 8 \text{ pixels} \rightarrow$ 視野角 : $8 \times 10^{-8} \text{ sr}$

以下量子効率を100%として

- ニュートリノ崩壊光 ($m_3 = 50 \text{ meV}$, $\tau_\nu = 10^{14} \text{ yrs}$): $I_\nu=25\text{kJy/sr}$ @ $\lambda=50\mu\text{m}$
 $F_{ND} = 25 \text{ kJy/sr} \times 8 \times 10^{-8} \text{ sr} \times \pi(15\text{cm}/2)^2 \times 94\text{GHz} = 3.3 \times 10^{-20} \text{ W}/8\text{pix}$

- 黄道光: $I_\nu=8\text{MJy/sr}$ @ $\lambda=50\mu\text{m}$

$$F_{ZE} = 1.1 \times 10^{-17} \text{ W}/8\text{pix}$$

- Δt 時間で F_{ZE} を積分した際の揺らぎ

$$\text{エネルギー}\epsilon_\gamma\text{のフォトン数揺らぎ起因} : \epsilon_\gamma \sqrt{F_{ZE} \Delta t / \epsilon_\gamma} = \sqrt{\epsilon_\gamma F_{ZE} \Delta t}$$

- 測定時間 Δt , 検出器NEP要件を決める不等式

$$NEP \times \sqrt{2\Delta t} < \sqrt{\epsilon_\gamma F_{ZE} \Delta t} < F_{ND} \Delta t$$

➔ $\Delta t > 40\text{sec}$ (1σ), $\Delta t > 200\text{sec}$ (2.2σ per $\Delta\lambda=0.8\mu\text{m}$)

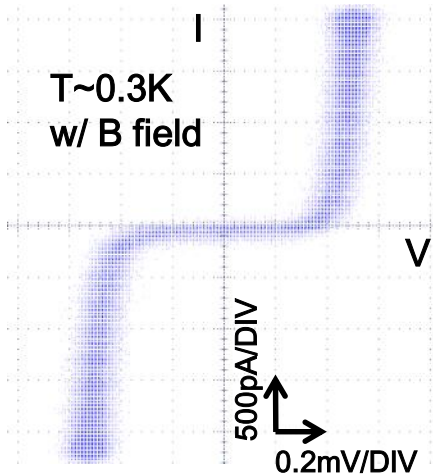
➔ $NEP < 1.5 \times 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ for $\Delta t=200\text{sec}$ with 8 pix

➔ $NEP < 4.2 \times 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ per 1pix

産総研 CRAVITY 製 Nb/Al-STJ

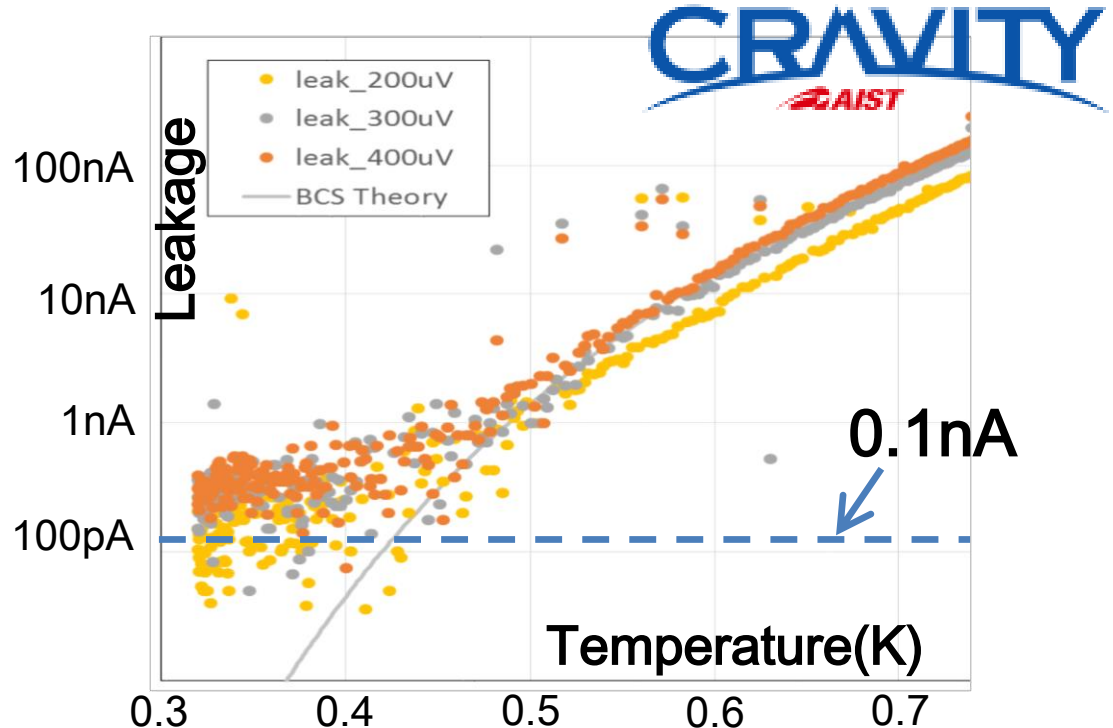
M. Ukibe et al., Jpn. J. Appl. Phys. 51, 010115 (2012)

M. Ohkubo et al., IEEE Trans. Appl. Super., 24, 2400208 (2014)



50 μm \times 50 μm Nb/Al-STJ
fabricated in CRAVITY at AIST

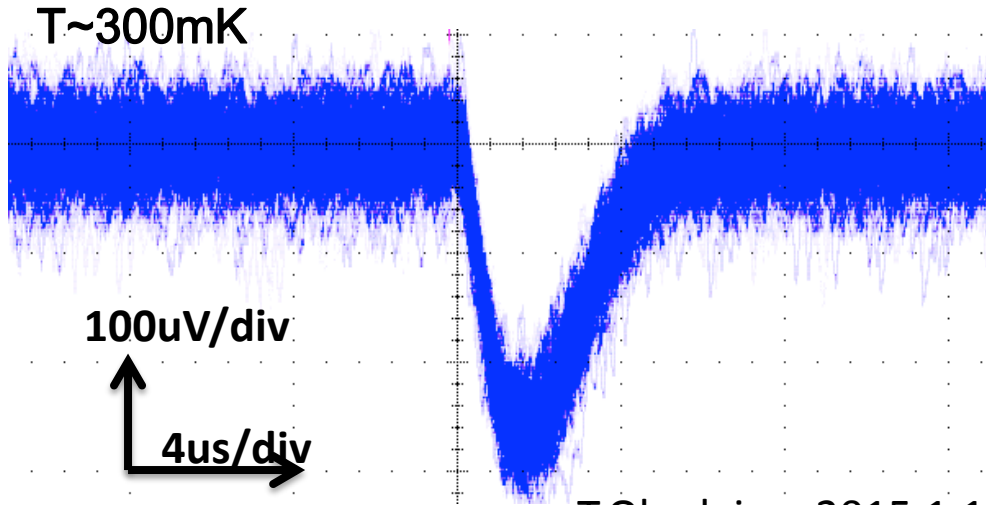
- $I_{\text{leak}} \sim 0.2 \text{ nA}$ を達成
- 更に小さな junction size のものでテスト中



- リーク電流のショットノイズ由来のNEPは, リーク電流 $i_L = 50 \text{ pA}$, 超伝導ギャップエネルギー $\Delta = 0.6 \text{ meV}$, トラッピングゲイン $G = 10$ とすると (量子効率100%, 読出し系のノイズを考えなければ)

$$\text{NEP} = \frac{1.7\Delta}{G} \sqrt{\frac{2i_L}{e}} \sim 4 \times 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$$

STJパルス光応答特性

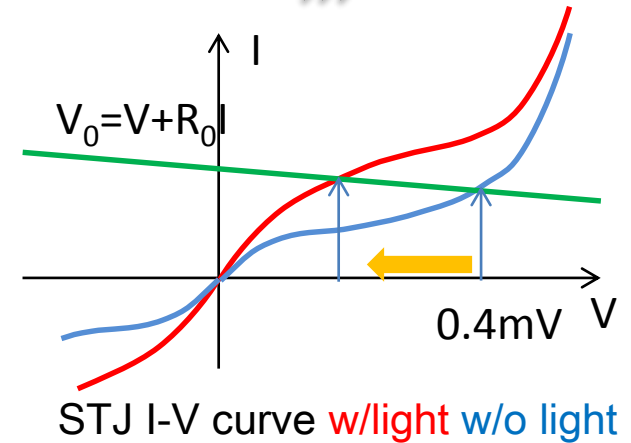
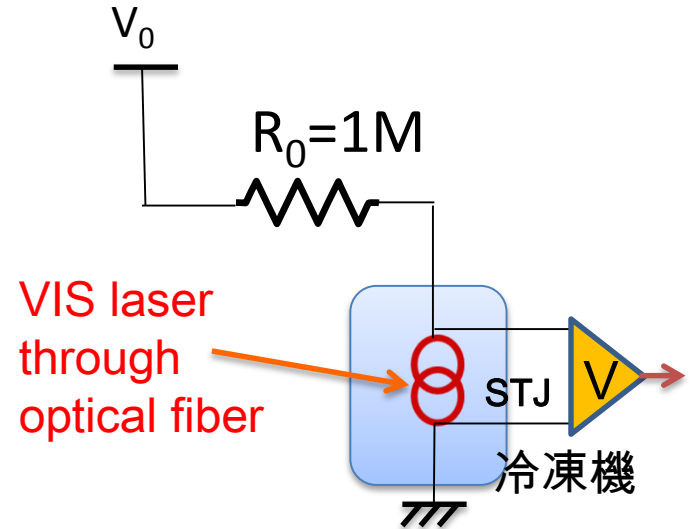


T.Okudaira, 2015.1.16

可視光(465nm)レーザーパルス応答性(AIST製 Nb/Al-STJ 100um角)

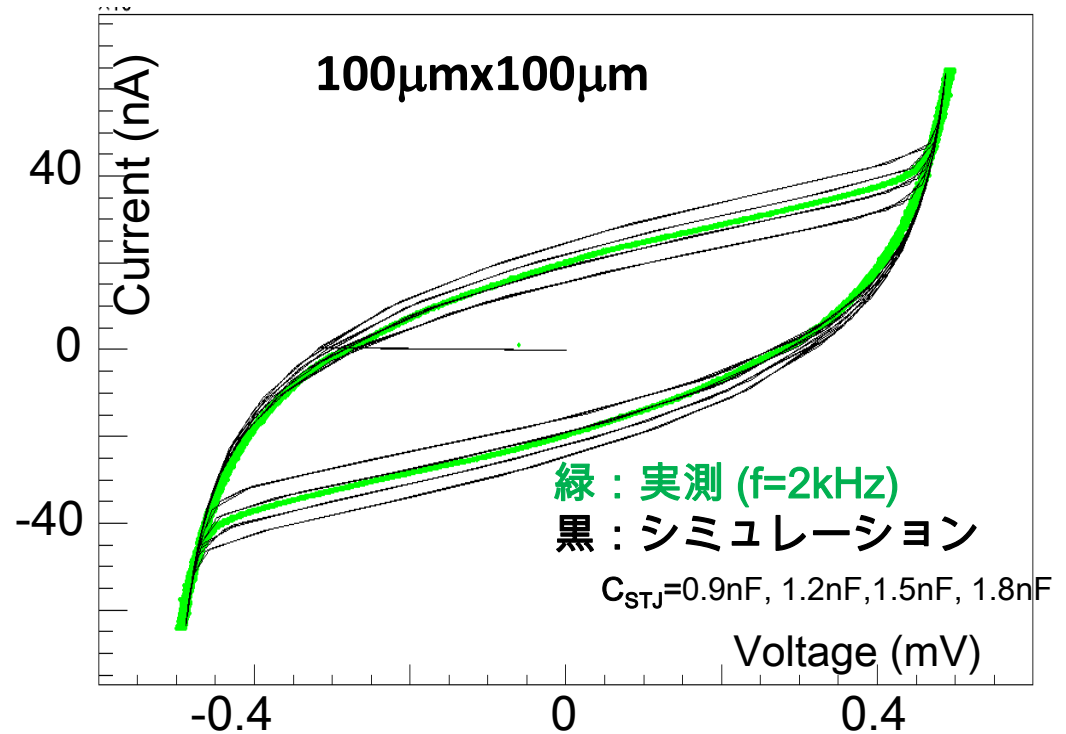
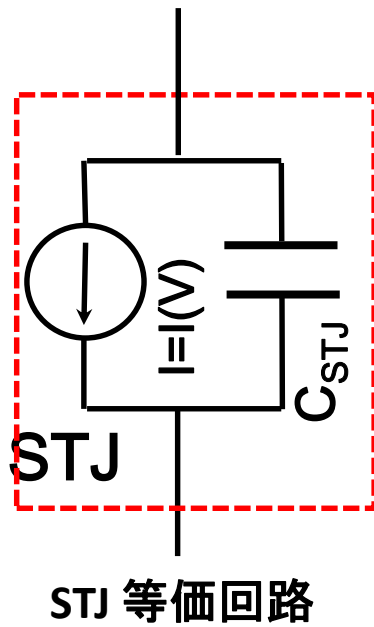
STJ 応答信号時定数: 立下り ~1 μ s, 立上り ~2 μ s
(もしくは, これより早い)

定電流モードの回路(右上)で測定



- Nb/Al-STJは, ~1 μ s という比較的早い応答速度
- ➔ 光子計数を行えば, 実効的なNEPは劇的に改善可能
 - 但し読出し系の帯域は>1MHzを確保する必要あり

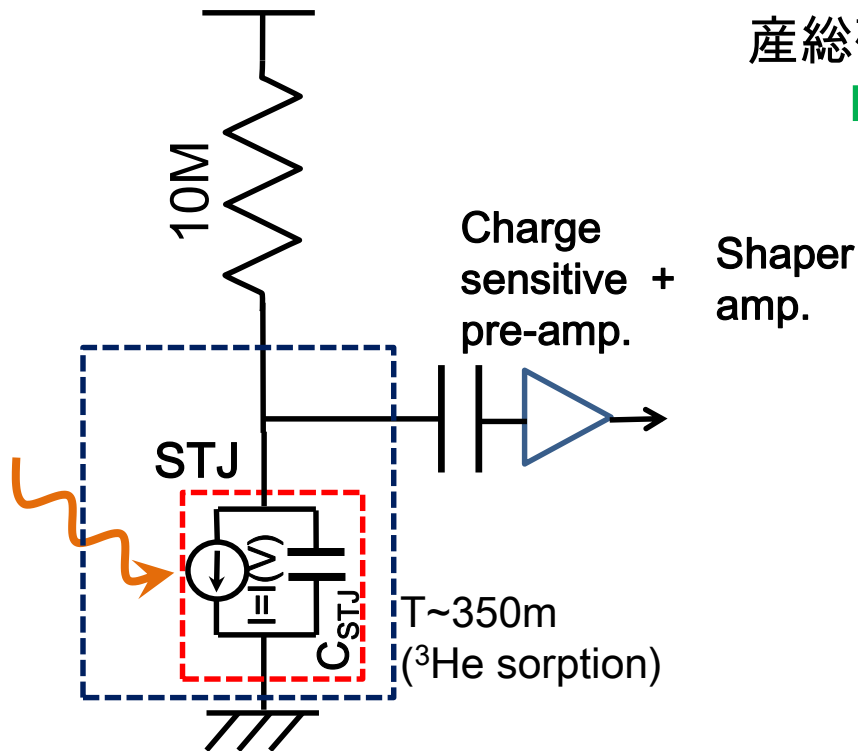
STJ キャパシタンス測定



STJ は , junction size に比例したキャパシタンス

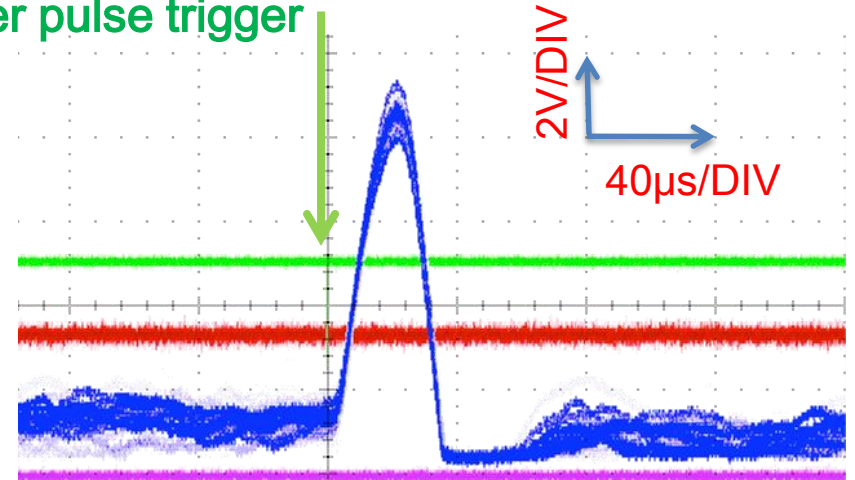
- STJのI-V測定からSTJのキャパシタンスを測定
- SIS接合面の面積に比例する成分 : $\sim 34\text{fF}/\mu\text{m}^2$
- 100 μm 角のSTJで 0.4nF~0.6nF
- 20 μm 角のSTJでも 0.03nF~0.05nF
- 低入カインピーダンスの電荷積分型アンプでの読出しが必要

電荷積分アンプ読出しによる 可視光(465nm)パルスに対するNb/Al-STJ 応答



産総研CRAVITY製 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ Nb/Al-STJ

Laser pulse trigger



出力電荷からおよそ10光子検出であると評価された

Nb/Al-STJ の低入カインピーダンス電荷積分アンプ読出

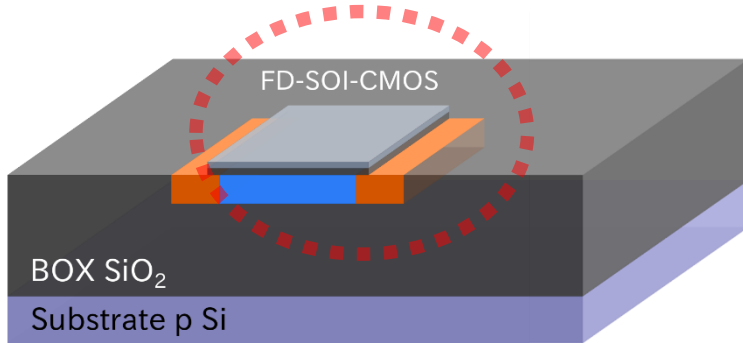
- STJ自体およびSTJ配線は比較的大きな静電容量(pF~nF)を持つ
→ 低入カインピーダンスの電荷積分型アンプでの読出しが必要
- 室温に置かれた電荷積分型のアンプでの読出: ノイズ大
- 一光子検出には、読み出し系のS/N改善が必須

→ STJの直近に置ける極低温電荷積分型アンプの開発

FD-SOI-MOS

極低温でも動作可能なトランジスタ

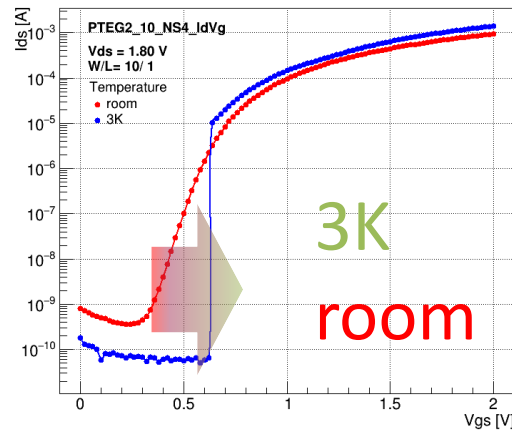
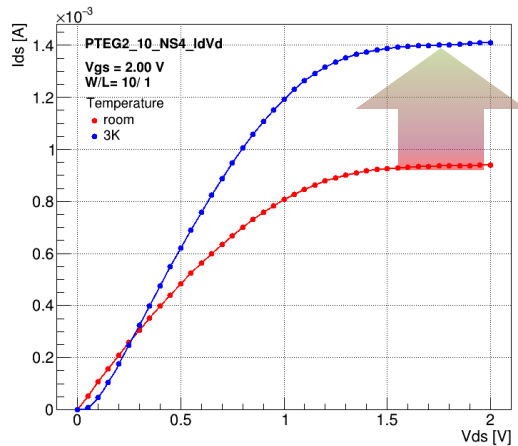
: Fully Depleted - Silicon On Insulator MOSFET



- SiO₂絶縁膜上にMOSFETを形成
→ 寄生容量が小さく、低消費電力
- 4K以下でも動作

Development of cryogenic readout electronics using fully-depleted-silicon-on-insulator CMOS process for future space borne far-infrared image sensors

Hirohisa Nagata*, Takehiko Wada*, Hirokazu Ikeda*, Yasuo Arai† and Morifumi Ohno**



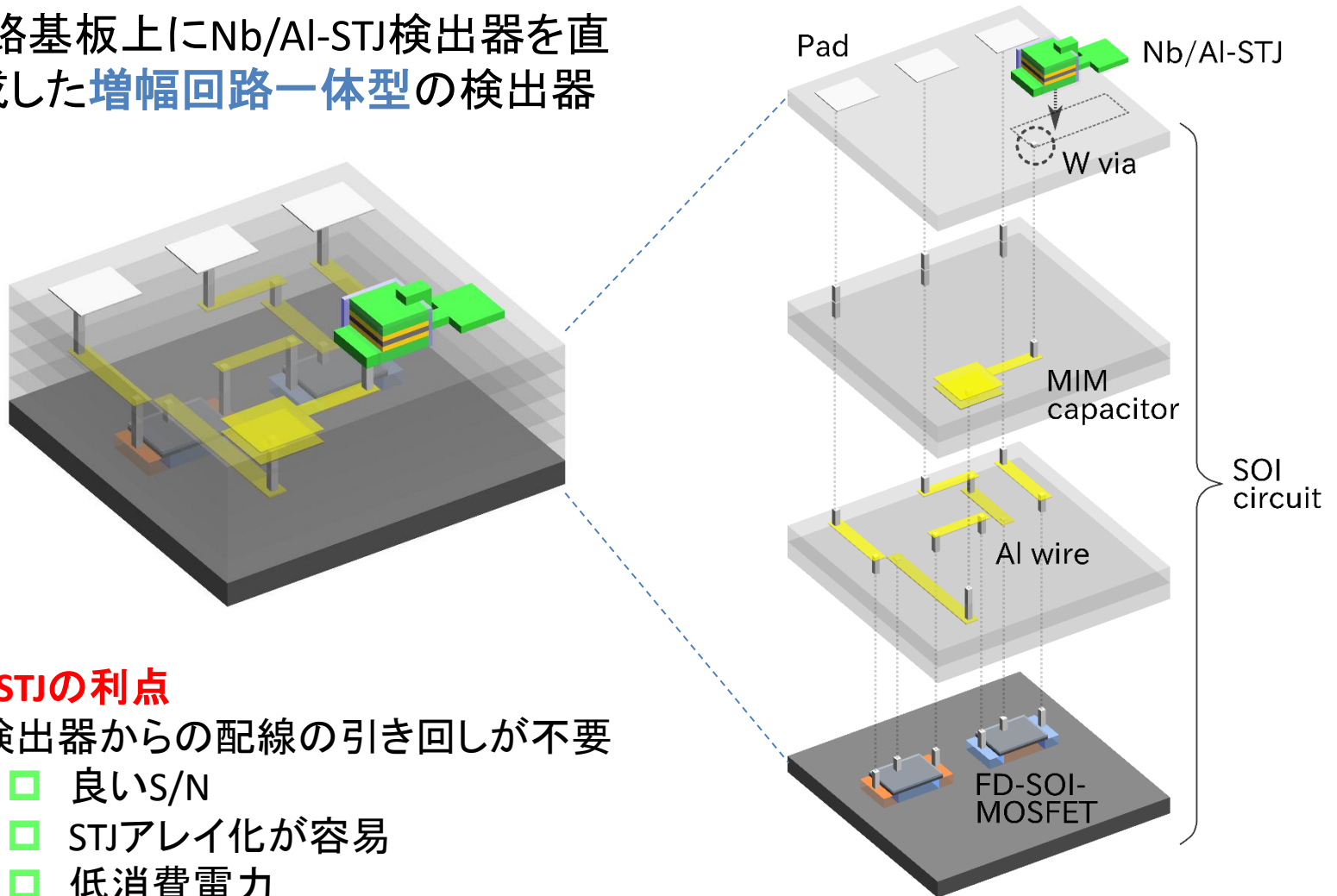
低温特性

- 電流値の増加
- 閾値電圧の上昇

→ 性能の劣化はなく、特性変化を考慮すれば極低温でも十分使用できる

SOI増幅回路一体型STJ検出器(SOI-STJ)

SOI回路基板の上にNb/Al-STJ検出器を直接形成した増幅回路一体型の検出器

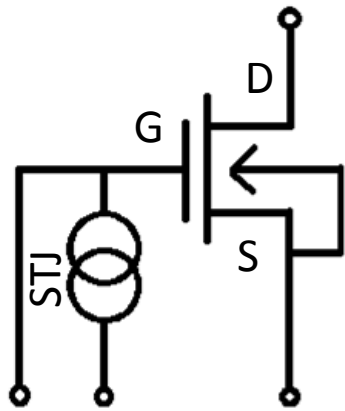


SOI-STJの利点

STJ検出器からの配線の引き回しが不要

- 良いS/N
- STJアレイ化が容易
- 低消費電力

History of Development of SOI-STJ



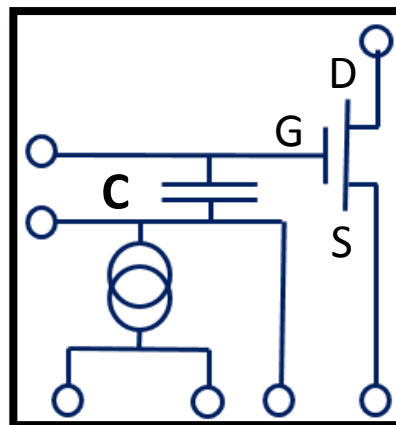
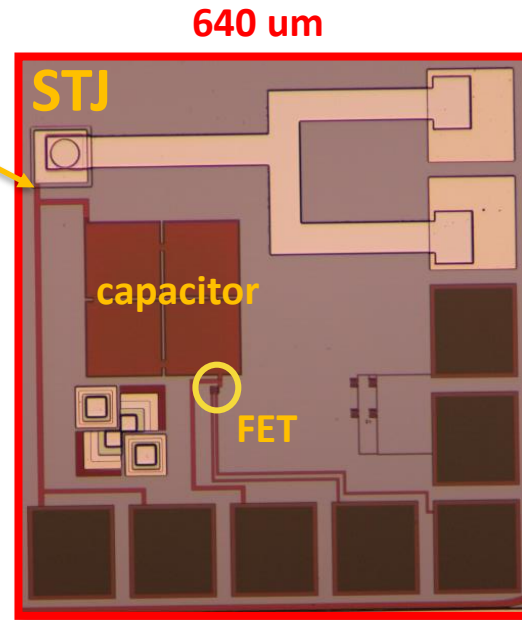
SOI-STJ1号回路図

SOI-STJ1

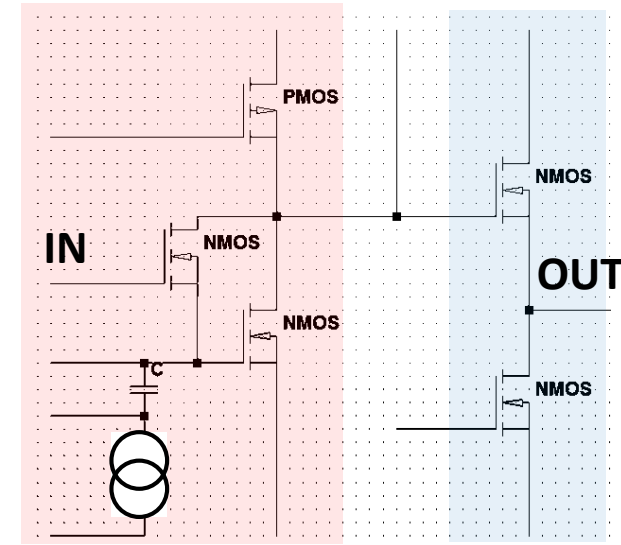
- p-MOS, n-MOSのみのSOI
- STJ/FETの極低温動作確認
- STJとSOI電極との接続確認

SOI-STJ2

- STJとFETのDC offsetをキャパシタンスで分離



SOI-STJ2号回路図



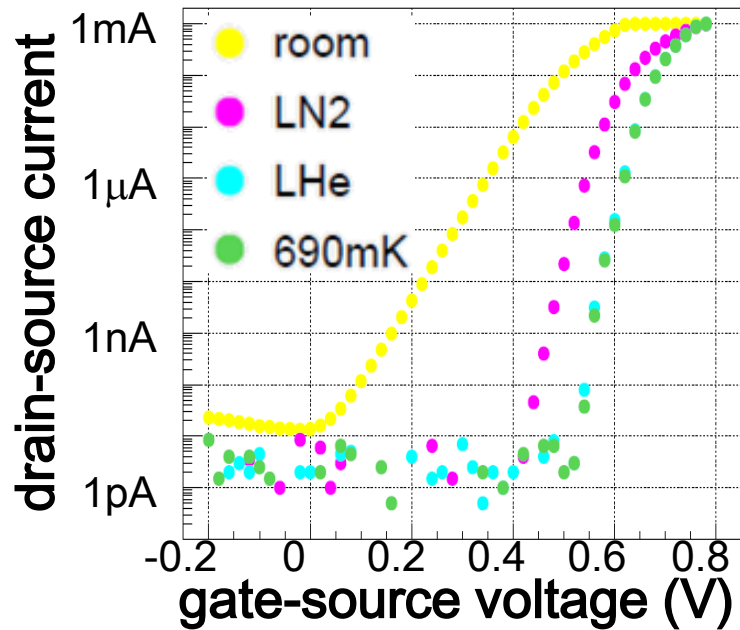
増幅段

バッファ段

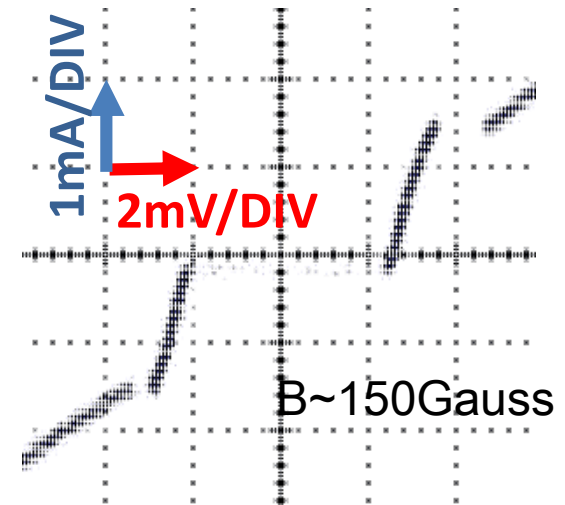
SOI-STJ3

- バッファ一段の追加

SOI上にSTJを形成後の特性



nMOS-FET in FD-SOI wafer on which a STJ is fabricated at KEK

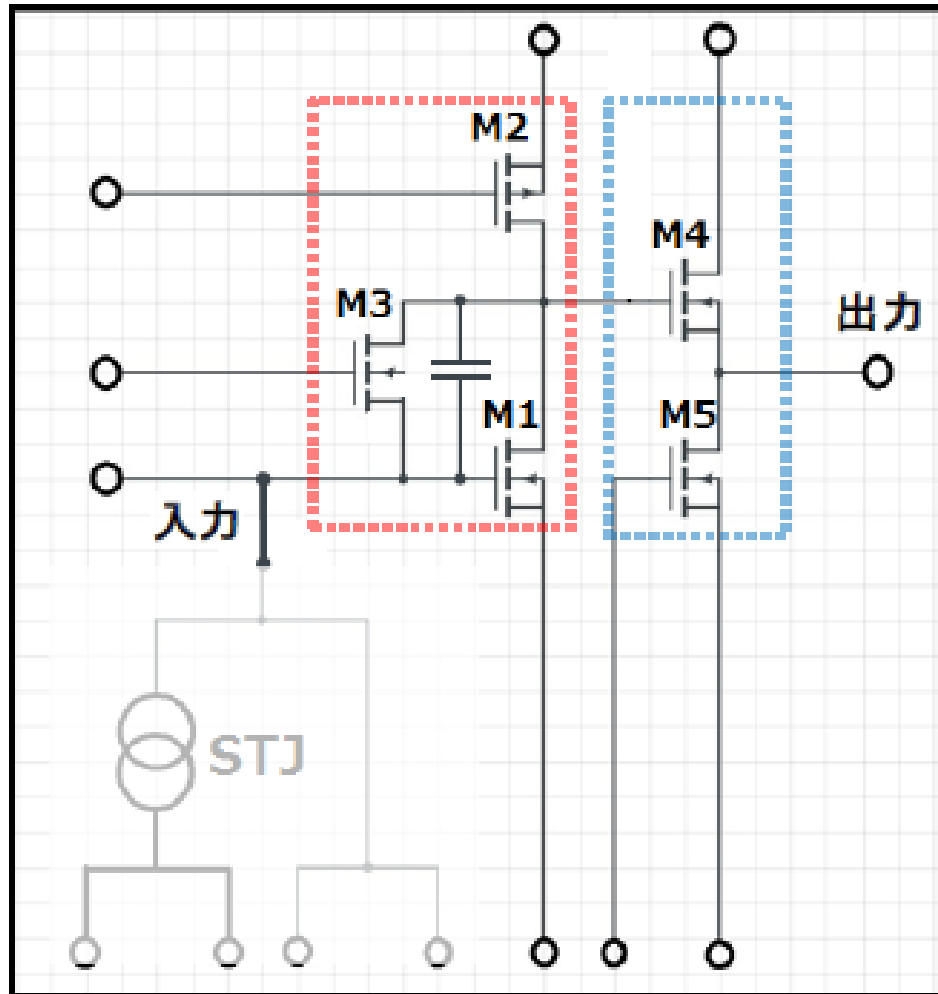


I-V curve of a STJ fabricated at KEK on a FD-SOI wafer

- Both nMOS and pMOS-FET in FD-SOI wafer on which a STJ is fabricated work fine at temperature down below 1K
 - 極低温では，スレッショルド電圧のシフト，サブスレッショルド領域のドレイン電流抑制，飽和領域でのドレイン電流の上昇など，特性が変動
- Nb/Al-STJ fabricated at KEK on FD-SOI works fine
- We are also developing SOI-STJ where STJ is fabricated at CRAVITY

SOI-STJ 増幅回路の設計

SOI-STJ4



これまでの回路のデザイン

- ❑ 増幅段: ソース接地増幅段
 - 入力インピーダンスが検出器のインピーダンスに比べ高く、信号が増幅回路へ伝わらない
- ❑ バッファ段: ソースフォロワ
 - 出力インピーダンスを下げる
 - 高い出力容量負荷(冷凍機配線)でも信号を伝送



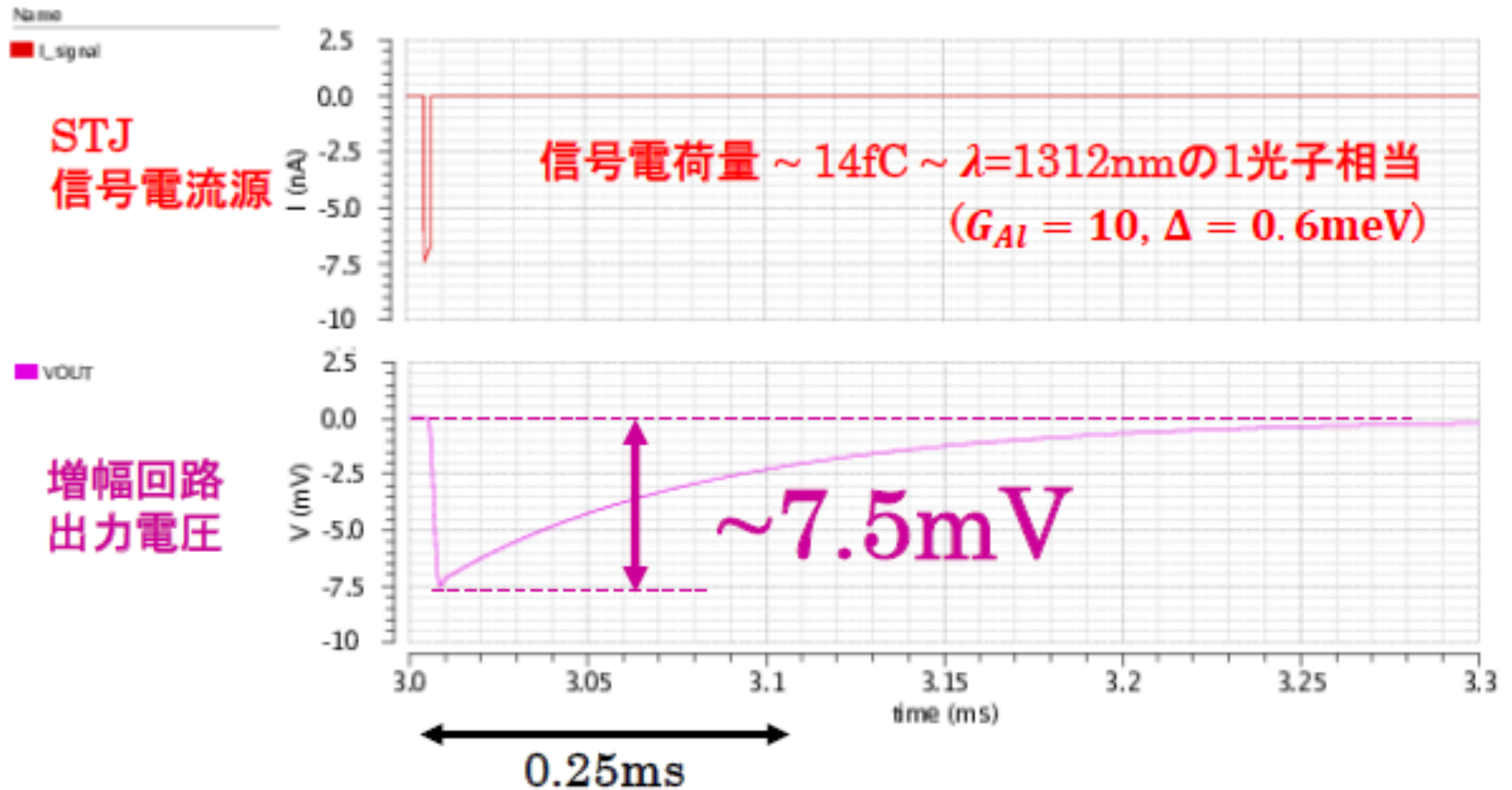
新しい回路のデザイン

- ❑ 増幅段: 電荷積分アンプ
 - 入力インピーダンスを低くした
- ❑ バッファ段: ソースフォロワ

SOI-STJ4

光応答シミュレーション 結果

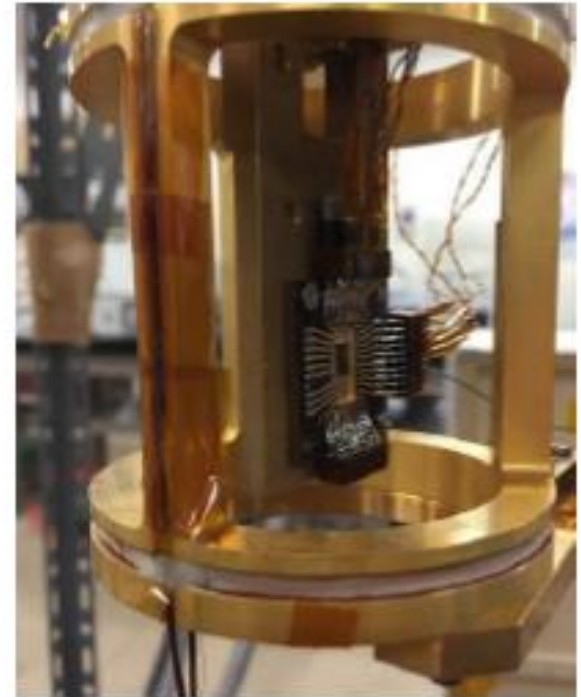
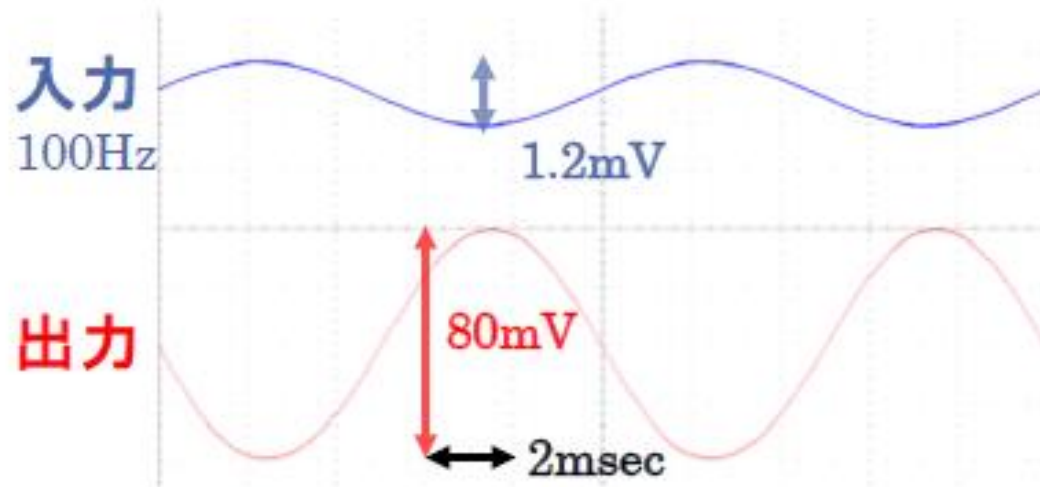
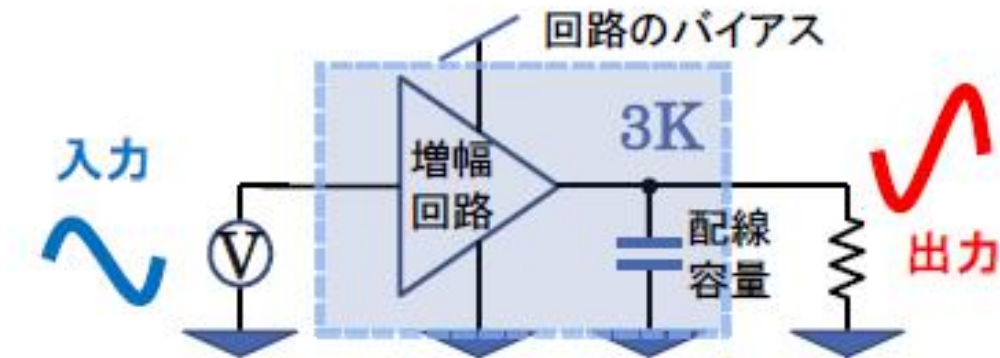
- シミュレーション条件
- リーク電流: 500pA @0.5mV
 - STJ検出器容量: 250pF
 - STJ両端電圧: 0.49mV



SOI-STJ4

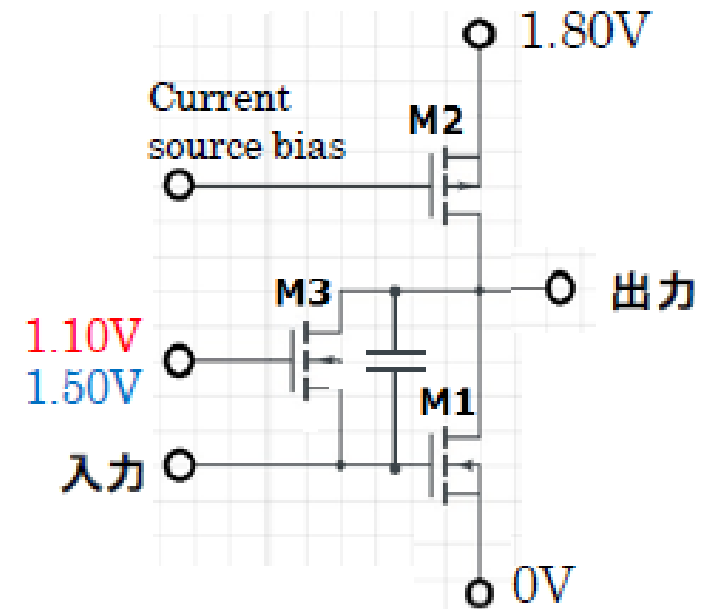
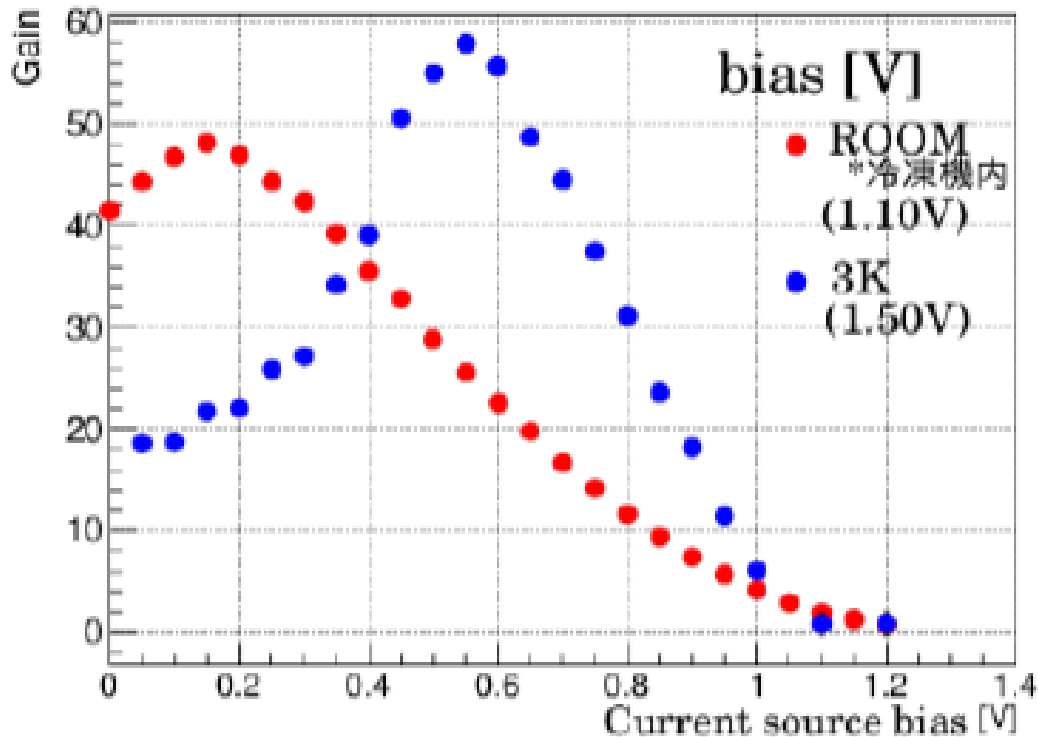
極低温での性能試験

- 低温下でも回路が動作するか、性能の測定・評価を行った



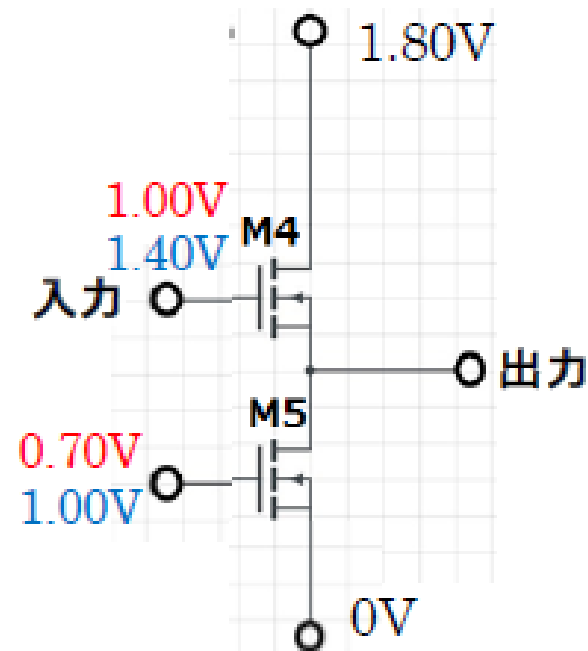
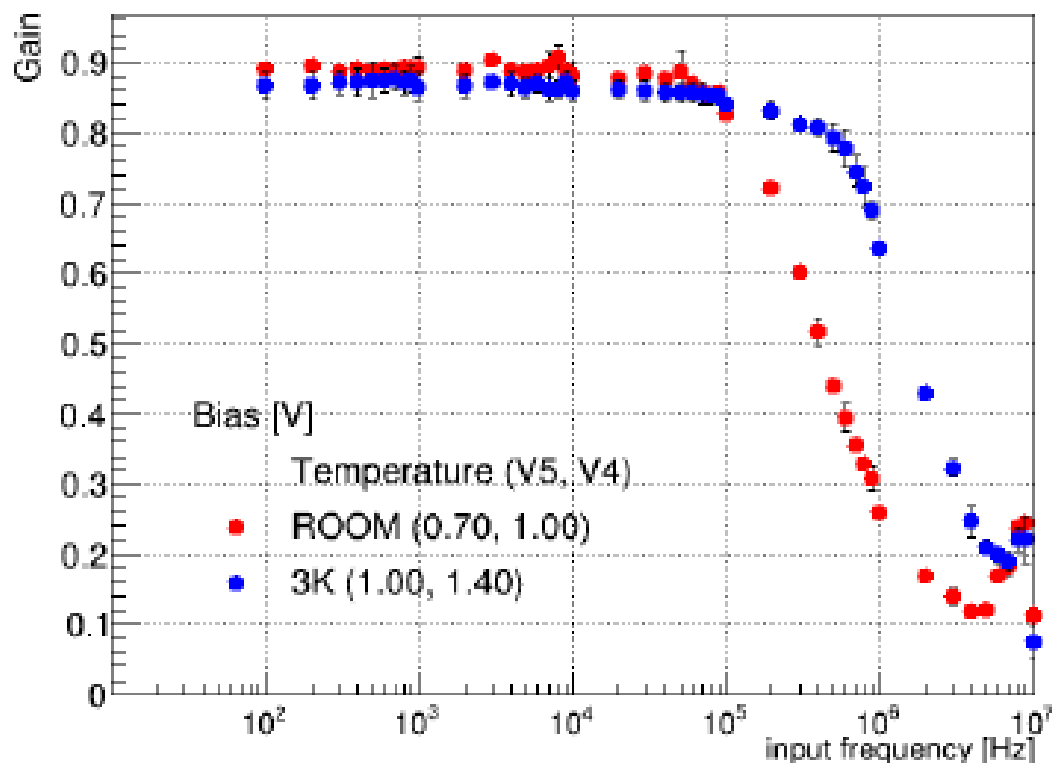
SOI-STJ4

増幅段 利得



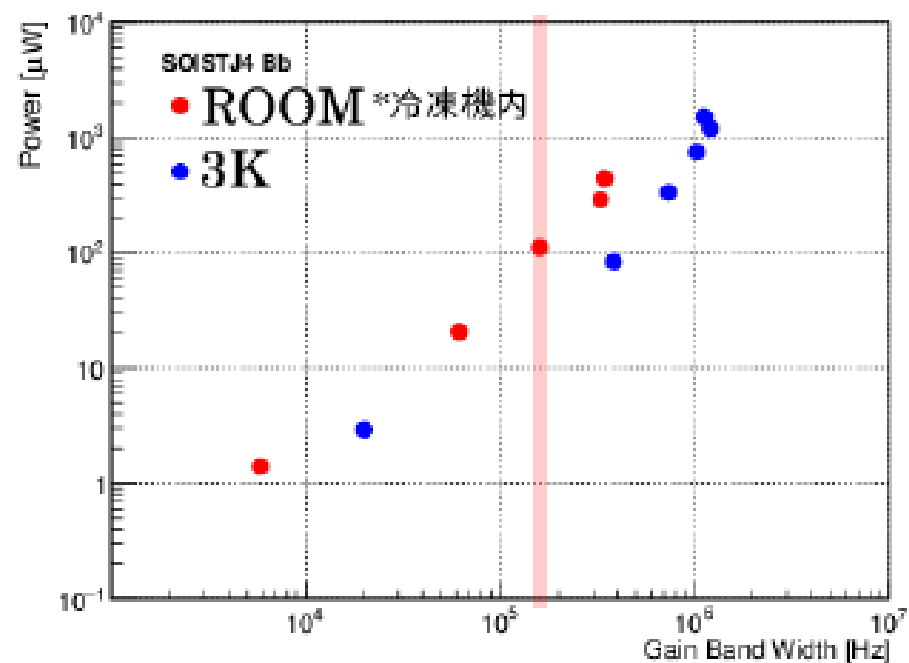
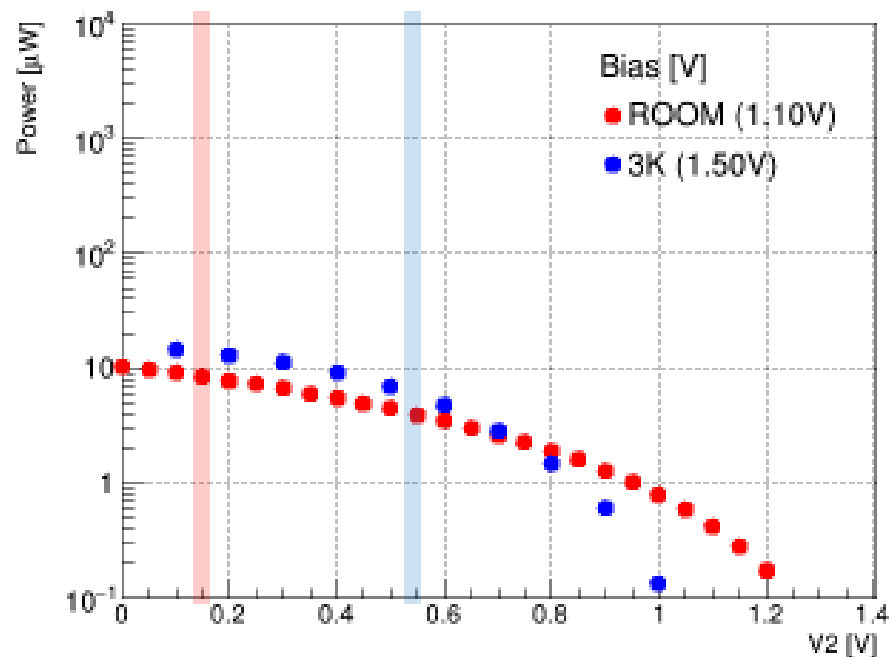
- シミュレーション上、光応答増幅に必要な利得: ~50倍(室温)
- バイアス電圧を調節すれば、低温時~60倍: 室温時とほぼ同じ性能が得られる

バッファ段 周波数特性



- シミュレーション上、光応答増幅に必要な周波数応答: **~200kHz**(室温)
- バイアス電圧を調節すれば、低温時最大**~500kHz**: 室温時とほぼ同じ性能

消費電力



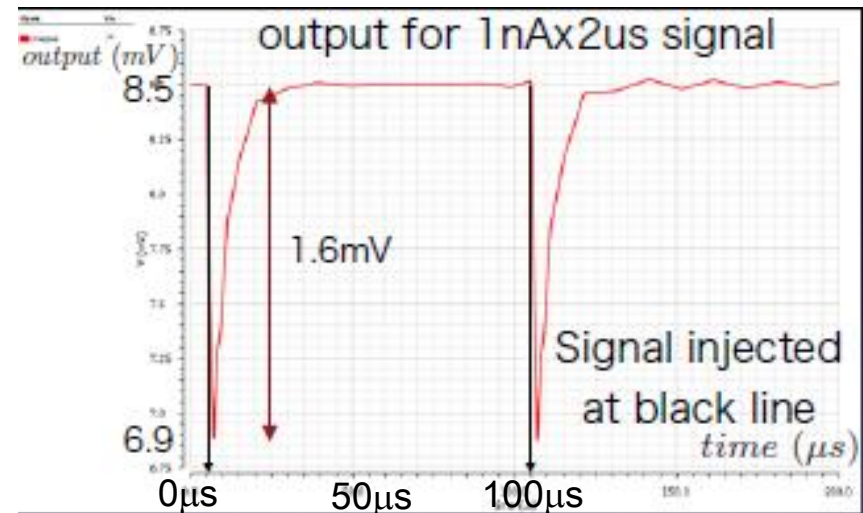
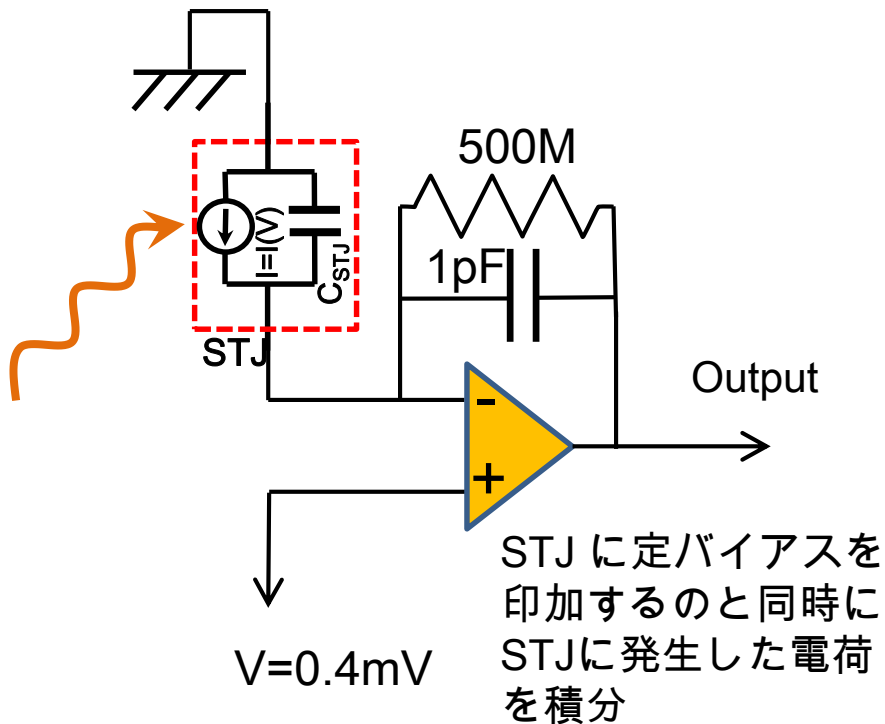
室温シミュレーション時の性能を冷凍機内でも実現できるか？

- 増幅段: 利得 ~60倍 (3K)の時、 $\leq 10\mu\text{W}$
- バッファ段: 周波数応答 ~200kHz (3K)の時、数十 μW

→ 1素子ならば350mK下(冷却能力100 μW)で、シミュレーション時と同性能で駆動可能

SOI-STJ5 Pre-amplifier development

- 近赤外一光子検出に最適化した低入カインピーダンス電荷積分型アンプをVDEC* が提供するSPICE simulation で設計中
- 極低温での SOI MOSFET の振る舞いをシミュレーションに組み込むため KEK や JAXA と共同研究で SPICE用MOSFETパラメータを構築中
 - 様々なL(チャンネル長 : $L=0.4\sim 5\mu\text{m}$)やW(チャンネル幅: $W=1\sim 10\mu\text{m}$)を持ったFETの3Kにおける特性の測定



室温でのFETパラメータを仮定したSPICE simulation
入力電荷:2fC
1.3eV(波長 $1\mu\text{m}$)の一光子入射相当

* VLSI Design and Education Center(VDEC), the U. Tokyo in collaboration with Synopsys, Inc., Cadence Design Systems, Inc., and Mentor Graphics, Inc.

まとめ

- 遠赤外(50 μm)の一光子検出が可能な検出器を STJ + SOI の技術を用いて開発中
 - 光子計数により，実効的にNEP で $\leq 10^{-20} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ を目指す
- Nb/Al-STJ は，産総研CRAVITY で世界最高水準の低リーク電流のものが得られている(<200pA @ 50 μm 角)
 - 20 μm 角，10 μm 角のものもテスト中
 - 来週に福井大の遠赤外領域開発研究センターにて，波長50 μm レーザーのNb/Al-STJへの照射実験を予定
- SOIに技術を用いた極低温アンプによる読出し回路を開発中
 - SOI アンプー体型STJの可能性
 - SOI-STJ4のアンプ単体の極低温テスト結果は，室温シミュレーションと同等の性能を示した．STJの実際の信号読み出しテスト，ノイズ評価は，これから
 - 光子計数の利点を最大限に生かす低インプットインピーダンス高速アンプ(帯域>1MHz)設計中
- 中~遠赤外域の光子計数(現状大面積化は難しい)，極低温SOI回路のアイデア，他応用分野があれば，ぜひご教授ください．

Backup

Neutrino

- Neutrino has 3 mass generations (ν_1, ν_2, ν_3)
- Neutrino flavor states (ν_e, ν_μ, ν_τ) are not mass eigenstates

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

→ Neutrino flavor oscillates during the flight, and squared mass differences ($\Delta m_{12}^2, |\Delta m_{23}^2|$) have been measured, **but their absolute masses are not measured yet!**

□ **Heavier neutrinos (ν_2, ν_3) are not stable**

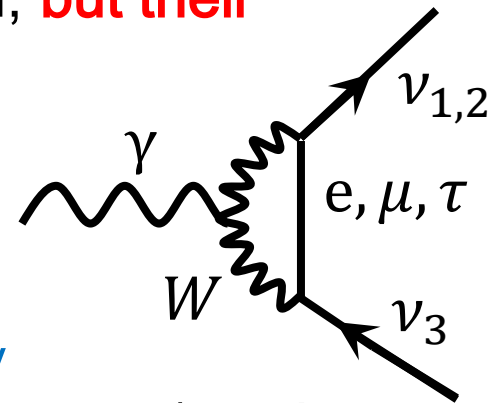
– Neutrino can decay through the loop diagrams

– $\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$

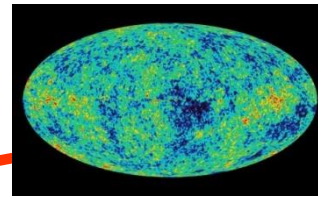
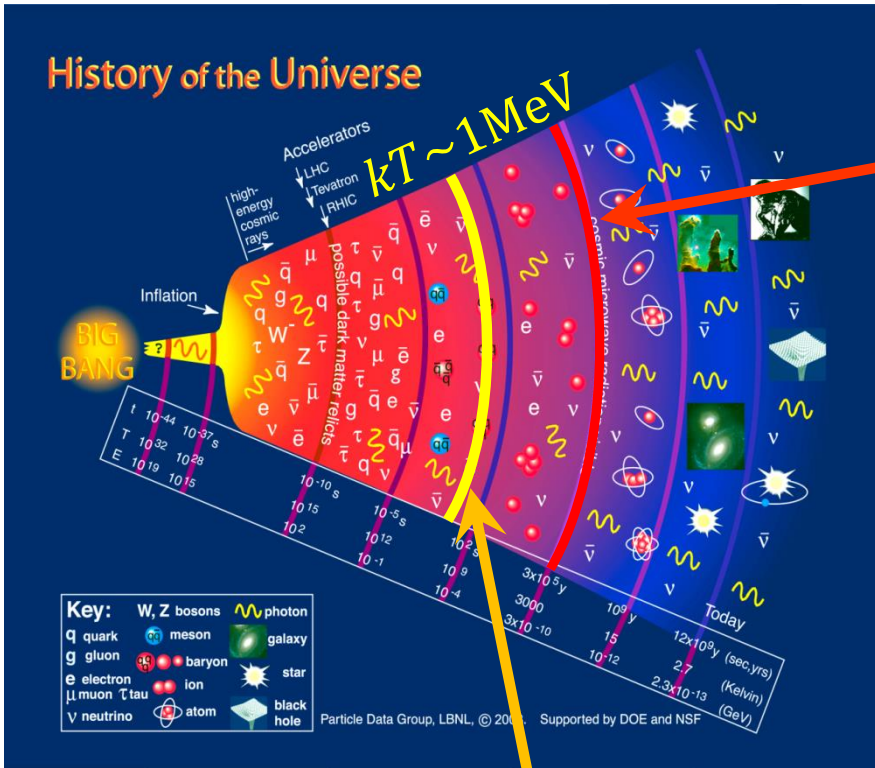
– Neutrino mass can be determined from the decay

✓ However, neutrino lifetime is expected to be very long (much longer than the age of universe)

→ **We adopt Cosmic neutrino background (CvB) as the neutrino source for neutrino decay search**



Cosmic neutrino background (CνB)

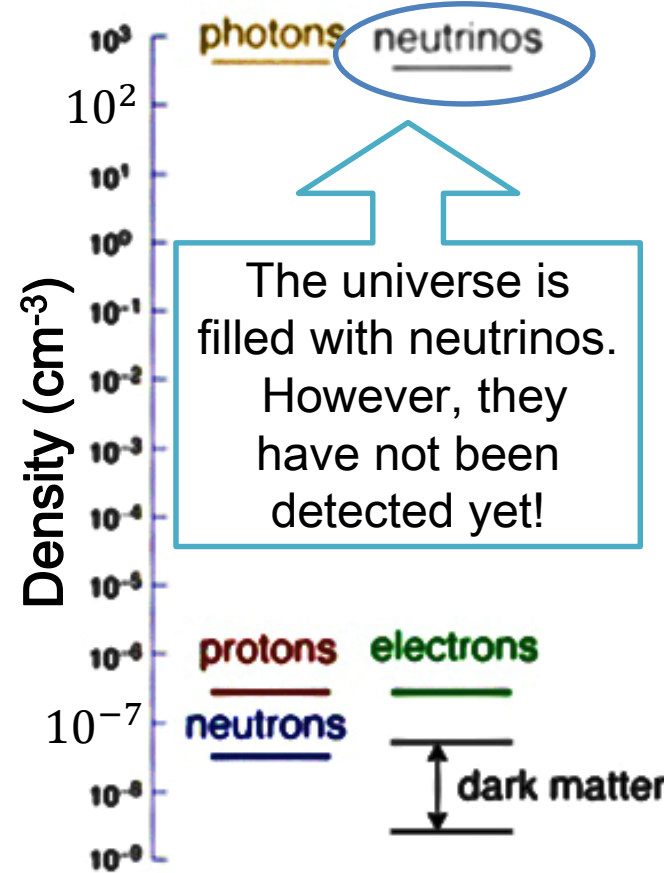


CMB

$$n_\gamma = 411/\text{cm}^3$$

$$T_\gamma = 2.73 \text{ K}$$

The Particle Universe



CνB (=neutrino decoupling)
 ~1s after the big bang

$$T_\nu = \left(\frac{4}{11}\right)^{\frac{1}{3}} T_\gamma = 1.95\text{K}$$

$$n_\nu + n_{\bar{\nu}} = \frac{3}{4} \left(\frac{T_\nu}{T_\gamma}\right)^3 n_\gamma = 110/\text{cm}^3$$

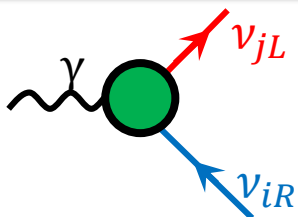
$$\langle p_\nu \rangle = 0.5\text{meV}/c$$

Motivation of ν -decay search in C ν B

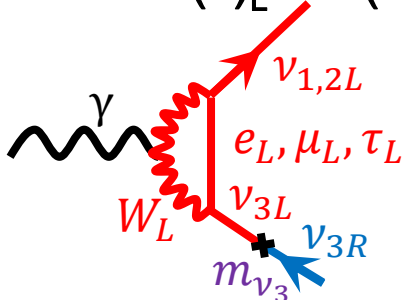
- Search for $\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$ in cosmic neutrino background (C ν B)
 - Search for anomalous magnetic moment of neutrino
 - Direct detection of C ν B
 - Determination of neutrino mass: $m_3 = (m_3^2 - m_{1,2}^2)/2E_\gamma$
- Aiming at a sensitivity to ν lifetime for $\tau(\nu_3) = O(10^{17} \text{ yrs})$
 - Standard Model expectation: $\tau = O(10^{43} \text{ yrs})$
 - Experimental lower limit: $\tau > O(10^{12} \text{ yrs})$
 - L-R symmetric model (for Dirac neutrino) predicts down to $\tau = O(10^{17} \text{ yrs})$ for W_L - W_R mixing angle $\zeta < 0.02$

Magnetic moment term
(need L-R coupling)

$$\bar{\nu}_{jL} i \sigma_{\mu\nu} q^\nu \nu_{iR}$$



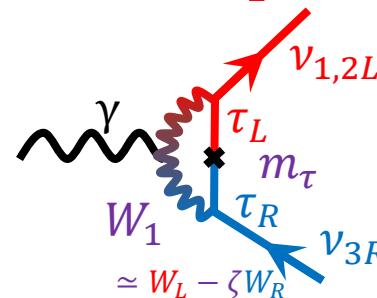
SM: $SU(2)_L \times U(1)_Y$



$$\Gamma \sim (10^{43} \text{ yr})^{-1}$$

Suppressed by m_ν and GIM

LRS: $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$



$$\Gamma \sim (10^{17} \text{ yr})^{-1}$$

Only suppressed by L-R mixing (ζ)

PRL 38,(1977)1252, PRD 17(1978)1395

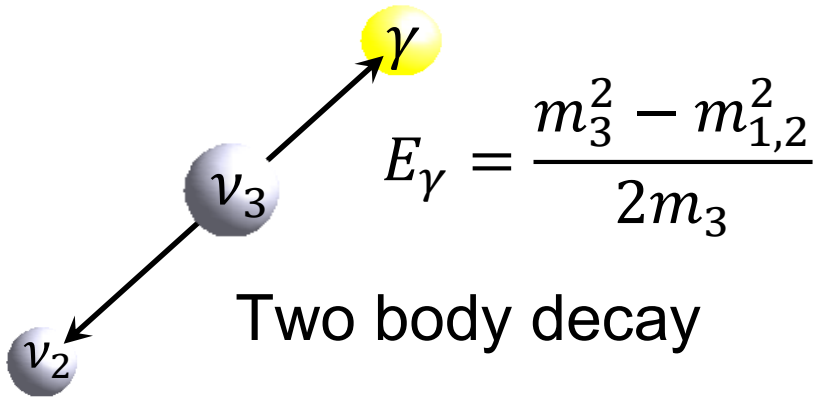
$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\zeta & -\sin\zeta \\ \sin\zeta & \cos\zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_L \\ W_R \end{pmatrix}$$

**10^{26}
enhancement to
SM**

Photon Energy (Wavelength) in Neutrino Decay

$$\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$$

in the ν_3 rest frame



Two body decay

$m_3 = 50 \text{ meV}$

$E_\gamma = 24.8 \text{ meV}$
($\lambda = 50 \mu\text{m}$)

$E_\gamma = 24 \text{ meV}$
($\lambda = 51 \mu\text{m}$)

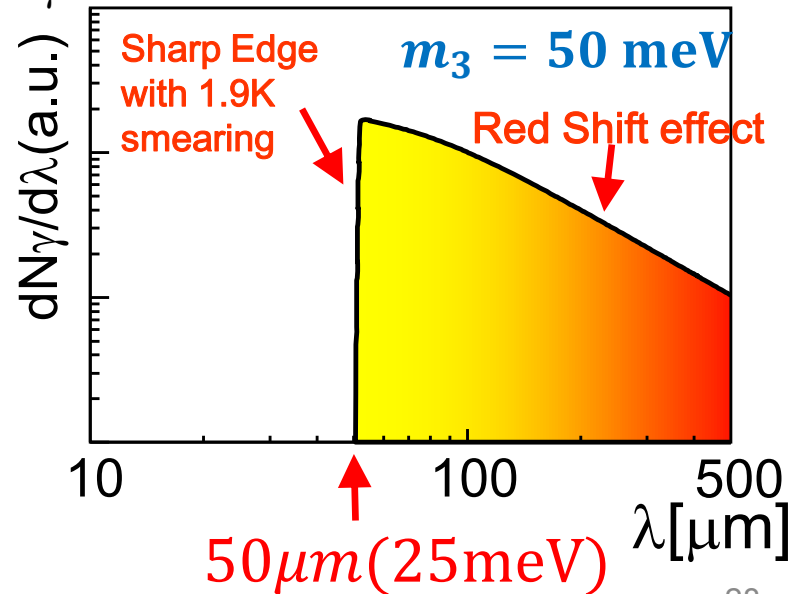
$m_2 = 8.7 \text{ meV}$

$m_1 = 1 \text{ meV}$

$E_\gamma = 4.4 \text{ meV}$
($282 \mu\text{m}$)

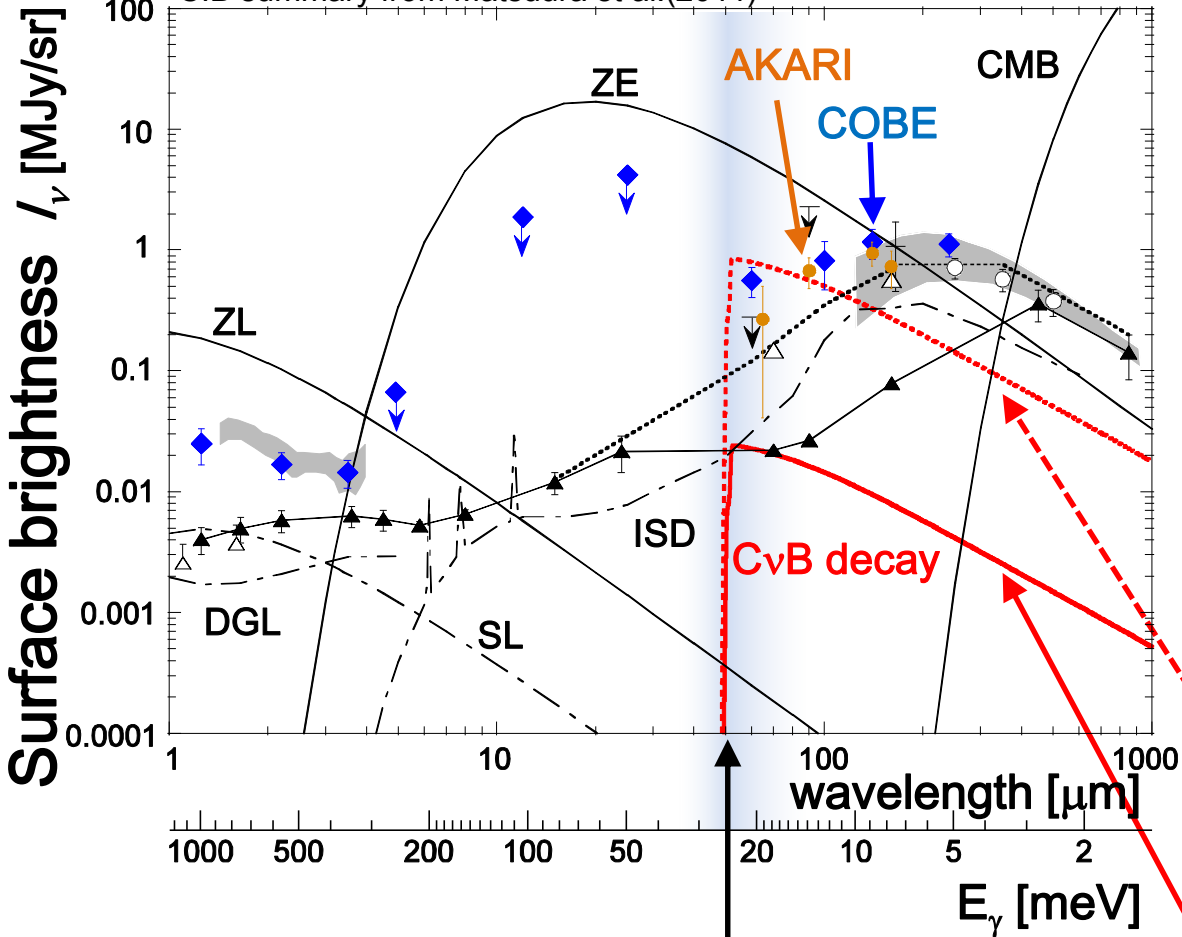
- From neutrino oscillation
 - $|\Delta m_{23}^2| = |m_3^2 - m_2^2| \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 - $\Delta m_{12}^2 \sim 7.65 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
 - From Planck+WP+highL+BAO
 - $\sum m_i < 0.23 \text{ eV}$
- $\rightarrow 50 \text{ meV} < m_3 < 87 \text{ meV}$
- $E_\gamma^{\text{rest}} = 14 \sim 24 \text{ meV}$ ($\lambda_\gamma = 51 \sim 89 \mu\text{m}$)

λ_γ distribution in $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$



CνB decay signal and Backgrounds

CIB summary from Matsuura et al.(2011)



at $\lambda = 50\mu\text{m}$

Zodiacal Emission(ZE)
 $I_\nu \sim 8 \text{ MJy/sr}$

CIB
 $\lambda I_\lambda \sim 0.1\text{-}0.5 \text{ MJy/sr}$

CνB decay
 Expected E_γ spectrum
 $m_3 = 50\text{meV}$

$\tau = 3 \times 10^{12} \text{ yrs}$
 $I_\nu \sim 0.8 \text{ MJy/sr}$
 Excluded by S.H.Kim et. al 2012

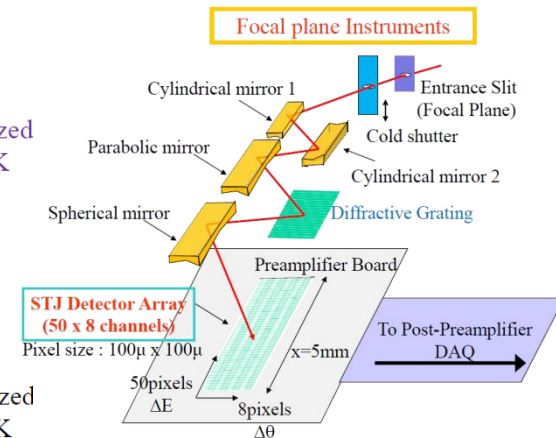
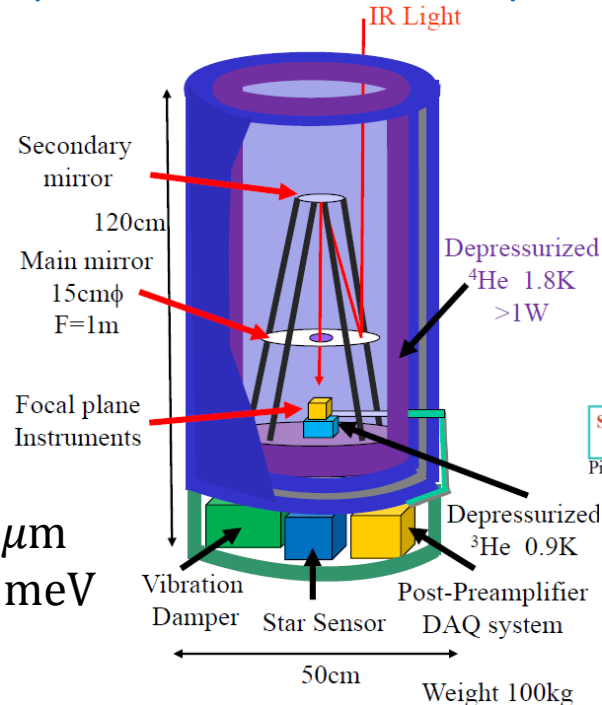
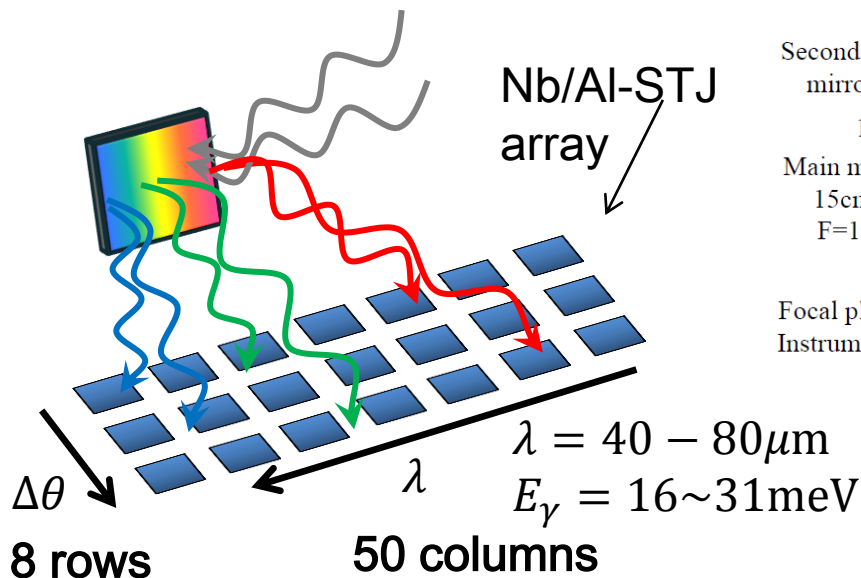
$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$
 $I_\nu \sim 25 \text{ kJy/sr}$

$\lambda = 50 \mu\text{m}$
 $E_\gamma = 25 \text{ meV}$

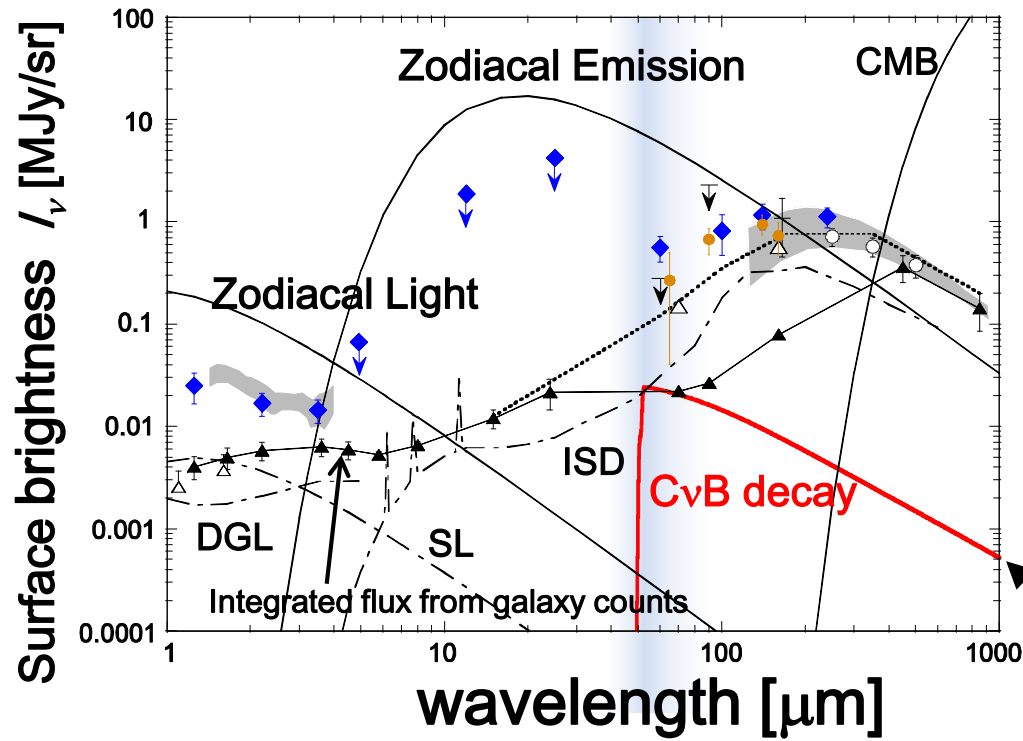
Proposed rocket experiment

with a diffraction grating and Nb/Al-STJ array combination

- 200-sec measurement at altitude of 200~300km
 - Telescope with **diameter of 15cm** and **focal length of 1m**
 - All optics (mirrors, filters, shutters and grating) will be cooled at $\sim 1.8\text{K}$
- At the focal point, diffraction grating covering $\lambda=40\text{-}80\mu\text{m}$ ($16\text{-}31\text{meV}$) and array of Nb/Al-STJ pixels of **50(in wavelength distribution) x 8(in spatial distribution)** are placed
 - Each Nb/Al-STJ pixel is used as **a single-photon counting detector** for FIR photon in $\lambda=40\text{-}80\mu\text{m}$ ($\Delta\lambda = 0.8\mu\text{m}$)
 - Sensitive area of **$100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$** for each pixel (**$100\mu\text{rad} \times 100\mu\text{rad}$** in viewing angle)



Expected precision in the spectrum measurement



Telescope parameters

- Main mirror
 - $D=15\text{cm}$, $F=1\text{m}$
- detector
 - sensitive area $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ / pixel
 - 50×8 array

$$\Delta\lambda = \frac{80\mu\text{m} - 40\mu\text{m}}{50} = 0.8\mu\text{m}$$

$$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$$

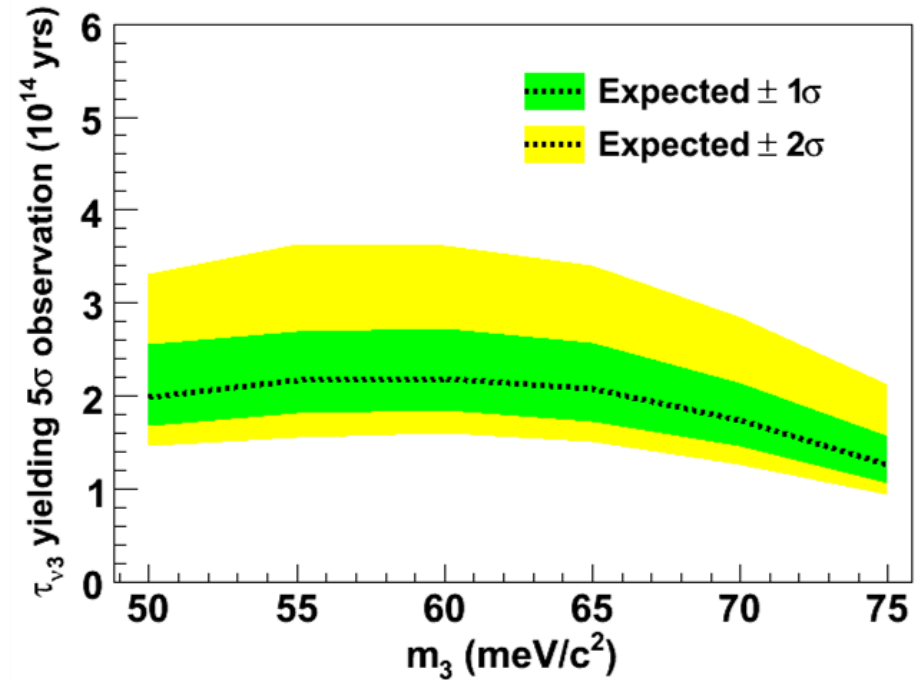
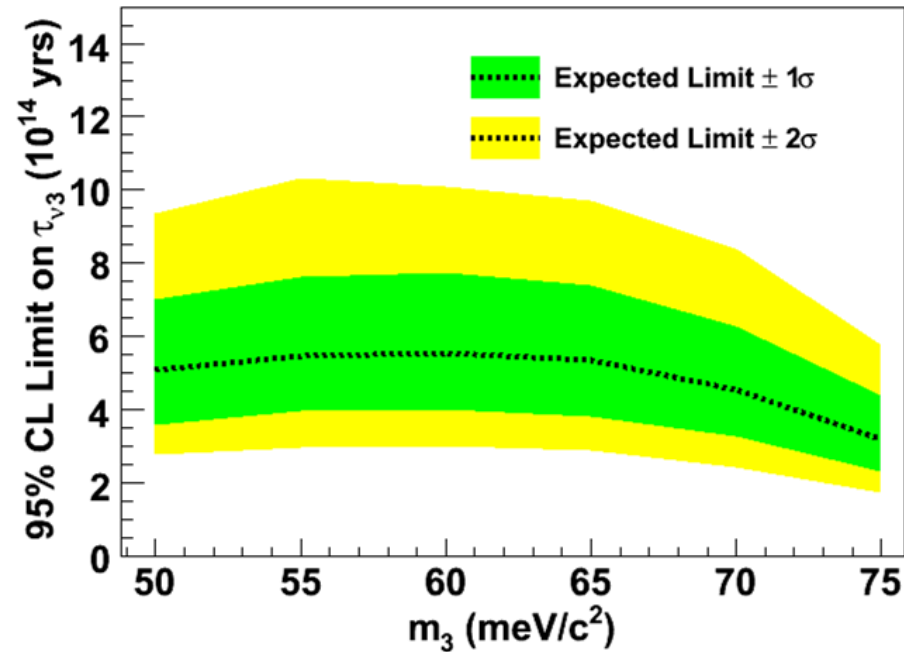
- Zodiacal emission \Rightarrow **343Hz / pixel**
 - 200sec measurement: 0.55M events / 8 pixels (at $\lambda = 50\mu\text{m}$)
 - **0.13%** accuracy measurement for each wavelength: $\delta(I_\nu) = 11\text{kJy/sr}$
- Neutrino decay ($m_3 = 50 \text{ meV}$, $\tau_\nu = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$): $I_\nu = 25\text{kJy/sr}$
 - **2.3 σ** away from statistical fluctuation in ZE measurement

ν decay with $\tau_\nu = 10^{14} \text{ yrs}$ is possible to detect, or set lower limit!

Sensitivity to neutrino decay

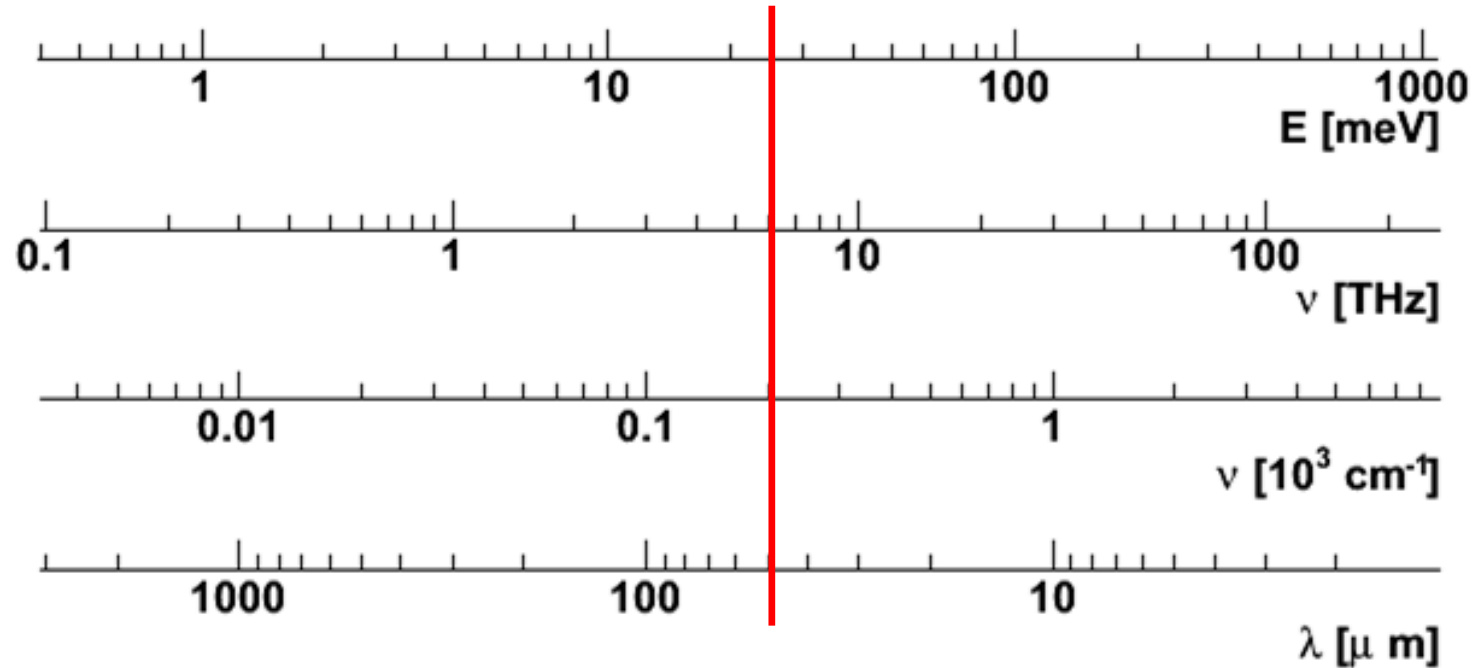
Parameters in the rocket experiment simulation

- telescope dia.: 15cm
- 50-column (λ : 40 μm – 80 μm) \times 8-row array
- Viewing angle per single pixel: 100 μrad \times 100 μrad
- Measurement time: 200 sec.
- Photon detection efficiency: 100%



- Can set lower limit on ν_3 lifetime at $4\text{--}6 \times 10^{14}$ yrs if no neutrino decay observed
- If ν_3 lifetime were 2×10^{14} yrs, the signal significance is at 5 σ level

Energy/Wavelength/Frequency



$$E_\gamma = 25 \text{ meV}$$

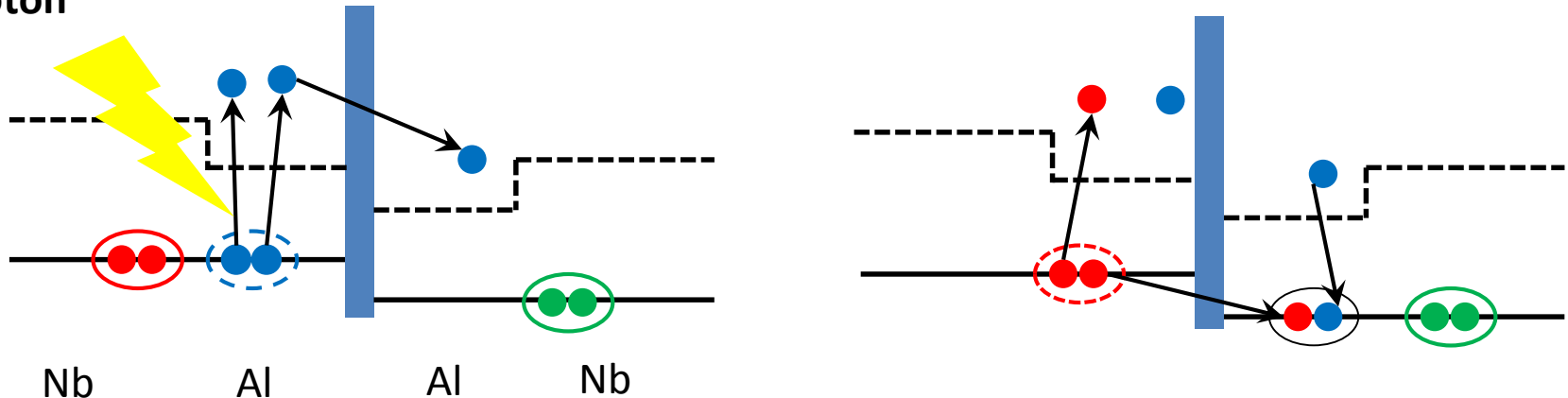
$$\nu = 6 \text{ THz}$$

$$\lambda = 50 \mu\text{m}$$

STJ back-tunneling effect

- Quasi-particles near the barrier can mediate Cooper pairs, resulting in true signal gain
 - Bi-layer fabricated with superconductors of different gaps $\Delta_{\text{Nb}} > \Delta_{\text{Al}}$ to enhance quasi-particle density near the barrier
 - Nb/Al-STJ Nb(200nm)/Al(10nm)/AlOx/Al(10nm)/Nb(100nm)
- Gain: 2 ~ 200

Photon



STJ energy resolution

Statistical fluctuation in number of quasi-particles → energy resolution

→ Smaller superconducting gap energy Δ yields better energy resolution

$$\sigma_E = \sqrt{(1.7\Delta)FE}$$

Δ : Superconducting gap energy
 F: fano factor
 E: Photon energy

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

T_c: SC critical temperature
 Need ~1/10T_c for practical operation

Nb

Well-established as Nb/Al-STJ
 (back-tunneling gain from Al-layers)

$$N_{q.p.} = 25\text{meV}/1.7\Delta = 9.5$$

Poor energy resolution, but a single-photon detection is possible

Hf

Hf-STJ is not established as a practical photon detector yet

$$N_{q.p.} = 25\text{meV}/1.7\Delta = 735$$

2% energy resolution is achievable if Fano factor <0.3 for a single-photon