

ニュートリノ崩壊探索概要

2016年1月19日 / 第二回CiRfSE ワークショップ
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

ニュートリノ崩壊

- 質量固有状態(ν_1, ν_2, ν_3), フレーバー固有状態 (ν_e, ν_μ, ν_τ): **混合**

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

→ ニュートリノフレーバーは飛行中に振動

✓ 質量二乗差($\Delta m_{12}^2, |\Delta m_{23}^2|$)の測定が可能

✓ **質量の絶対値そのものは, 未測定!**

□ **重たいニュートリノ(ν_2, ν_3)は安定ではない**

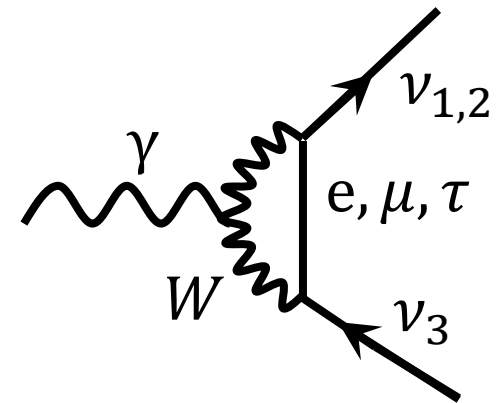
– ニュートリノ混合によりループを経て崩壊可能

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

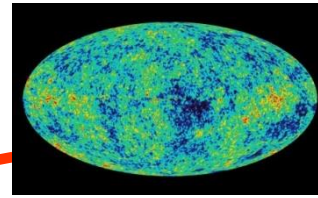
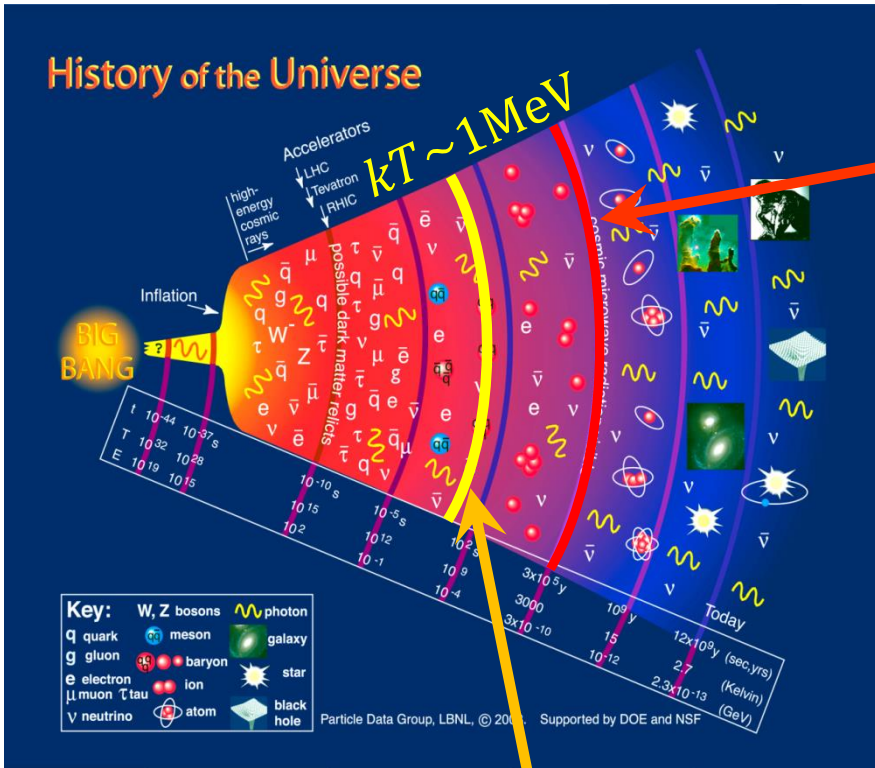
– ニュートリノ崩壊によって質量が決定可能

✓ しかし, 寿命は宇宙年齢よりも遥かに長い

→ 「宇宙背景ニュートリノ(CvB)」をニュートリノ源として,
ニュートリノ崩壊を探索



宇宙背景ニュートリノ (CνB)

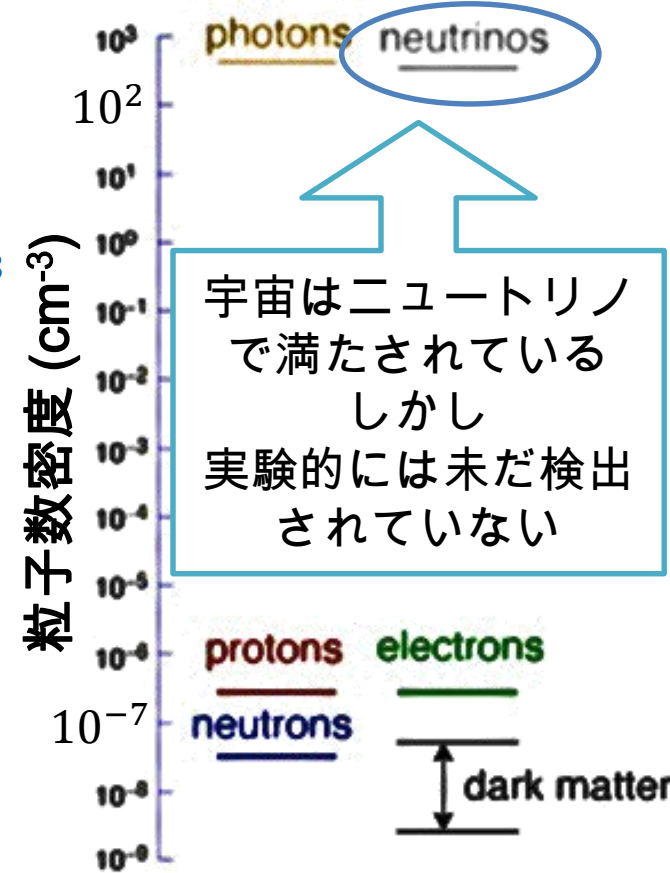


CMB

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

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

The Particle Universe



CνB (=熱平衡からニュートリノが分離)
ビッグバンから約1秒後

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

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

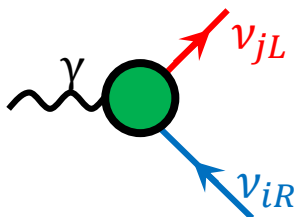
$$\langle p_\nu \rangle = 0.5 \text{ meV}/c$$

CνBを使ったニュートリノ崩壊探索の意義

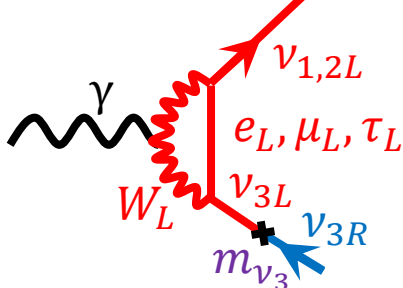
- 宇宙背景ニュートリノ(CνB)における輻射崩壊 $\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$
 - 標準模型を超えるニュートリノの異常磁気能率の探索
 - 宇宙背景ニュートリノの直接観測
 - ニュートリノ質量の絶対値の決定: $m_3 = (m_3^2 - m_{1,2}^2)/2E_\gamma$
- ニュートリノ寿命に対する感度の目標: $\tau(\nu_3) = O(10^{17} \text{ yrs})$
 - 標準模型による予言値: $\tau = O(10^{43} \text{ yrs})$
 - 測定による下限値: $\tau > O(10^{12} \text{ yrs})$
 - 標準模型を超える物理(例えば左右対称模型)による予言値:
LR混合角 $\zeta = 0.02$ の場合で最短値 $\tau = O(10^{17} \text{ yrs})$ まであり得る

磁気能率項(LRカイラリティの結合)

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



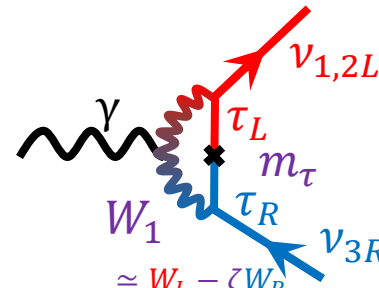
SM: $SU(2)_L \times U(1)_Y$



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

ν 質量, GIM機構で抑制

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



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

LR混合角の抑制のみ

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

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

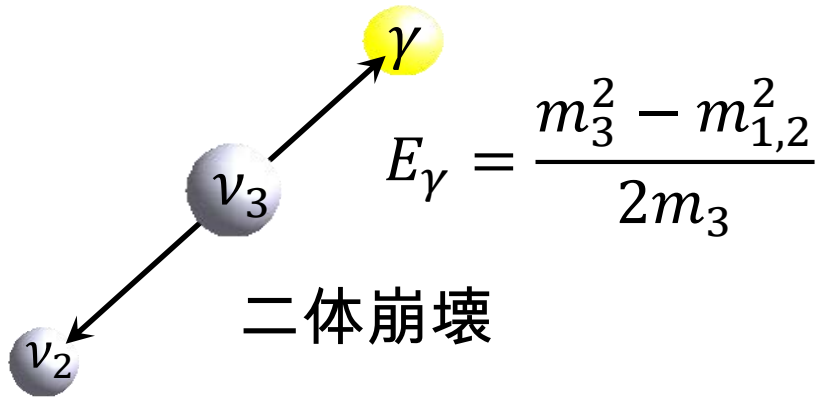
標準模型に対して

26乗の増幅

CνBニュートリノ崩壊での光子のエネルギー(波長)

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

ν_3 静止系



二体崩壊

- ニュートリノ振動実験から
 - $|\Delta m_{23}^2| = |m_3^2 - m_2^2| \sim 2.4 \times 10^{-3} eV^2$
 - $\Delta m_{12}^2 \sim 7.65 \times 10^{-5} eV^2$
 - Planck+WP+highL+BAO実験
 - $\sum m_i < 0.23 eV$
- $50meV < m_3 < 87meV$

$$E_\gamma^{rest} = 14 \sim 24 meV \quad (\lambda_\gamma = 51 \sim 89 \mu m)$$

$m_3 = 50 meV$

$$E_\gamma = 24.8 meV \quad (\lambda = 50 \mu m)$$

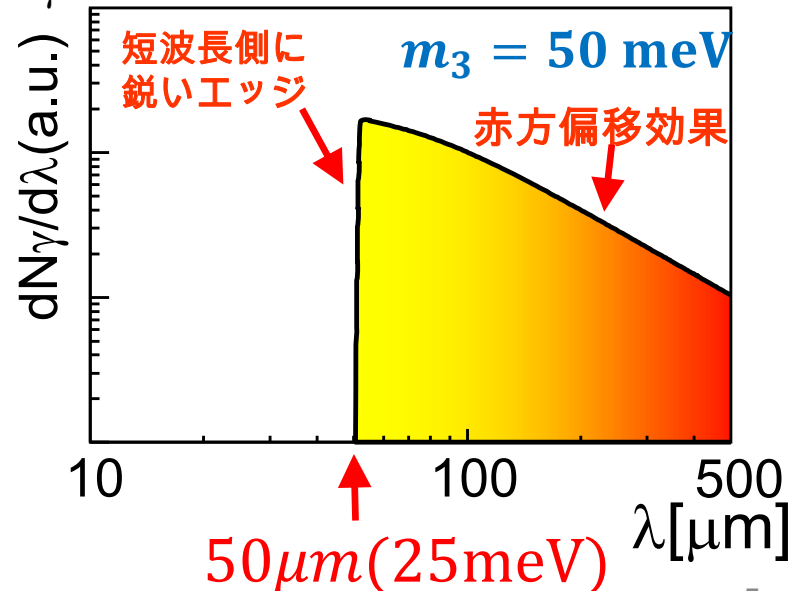
$$E_\gamma = 24 meV \quad (\lambda = 51 \mu m)$$

$m_2 = 8.7 meV$

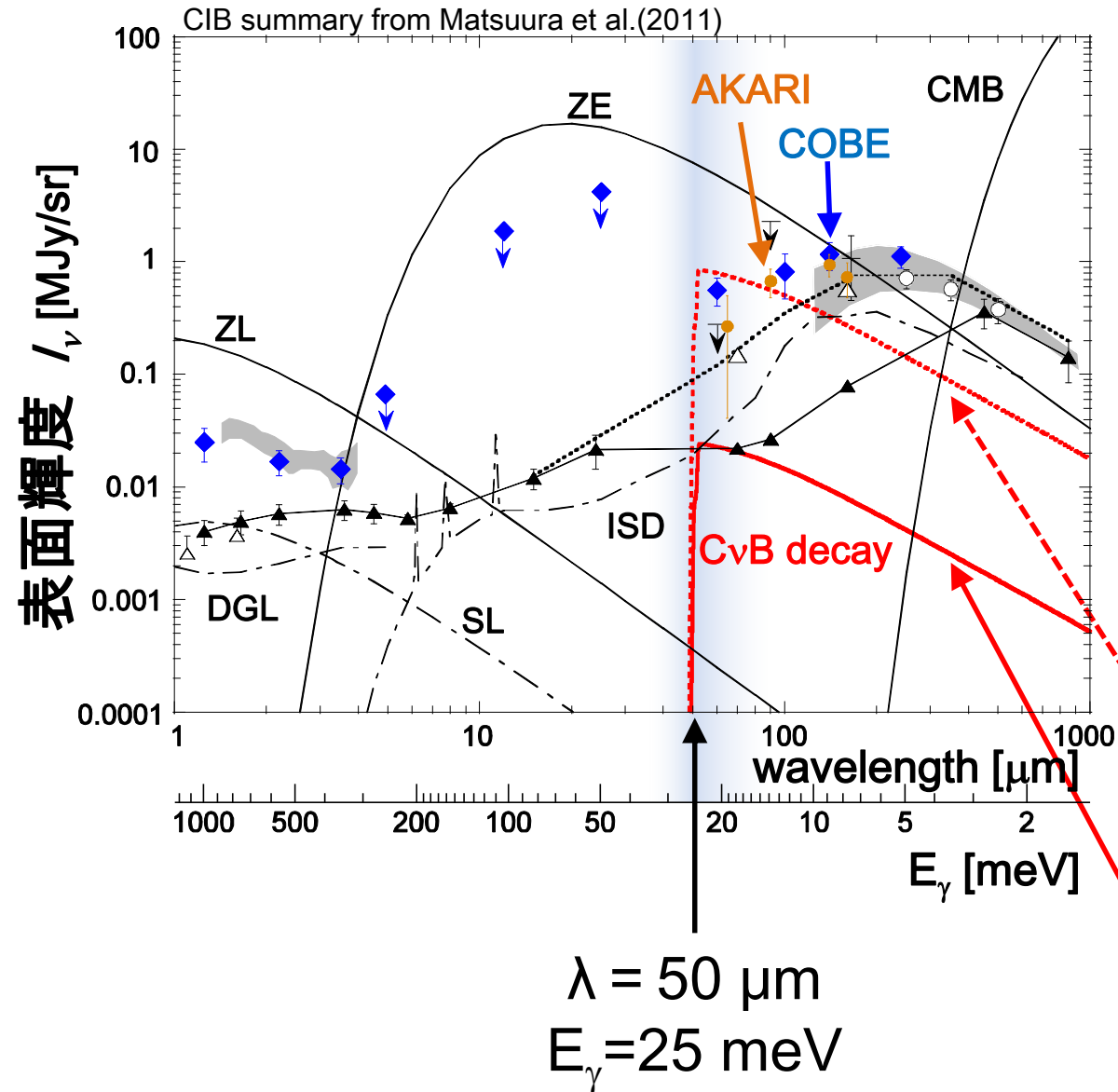
$m_1 = 1 meV$

$$E_\gamma = 4.4 meV \quad (282 \mu m)$$

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



遠赤外域の前景・背景放射およびCνBニュートリノ崩壊光の寄与



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

黄道光(惑星間ダストの熱放射)

$$I_\nu \sim 8 \text{ MJy/sr}$$

遠赤外線宇宙背景放射

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

CνB ニュートリノ崩壊

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

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

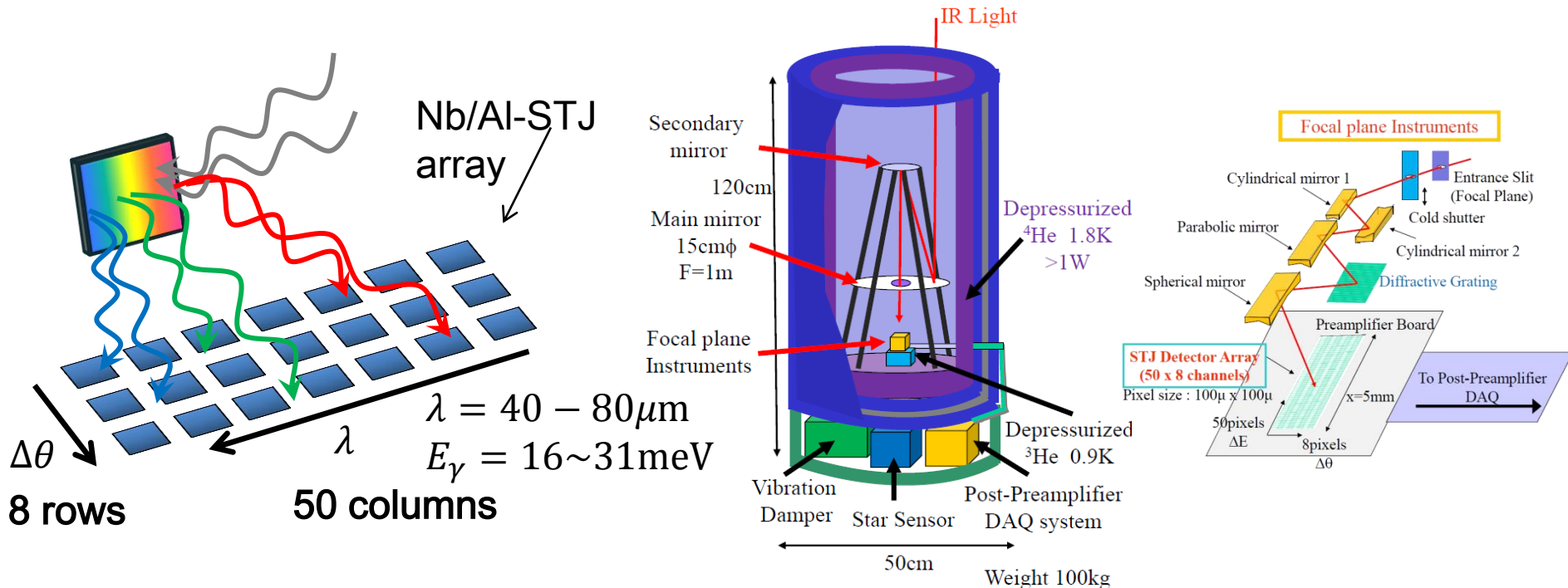
$$I_\nu \sim 25 \text{ kJy/sr}$$

CνBニュートリノ崩壊光探索のための光検出器

- $\lambda=50\mu\text{m}$ 付近の高精度な波長分布
 - $\lambda=50\mu\text{m}$ ($E_\gamma = 25\text{meV}$)の光子を2%より良い精度で**一光子分光**
 - 一光子検出により検出器自体が作るノイズを低減
 - エッジ構造を持つCνBニュートリノ崩壊光の波長分布を同定
 - ロケット，または衛星実験
 - 地上実験は不可能
- **超伝導トンネル接合素子(STJ)**
 - 回折格子($\lambda = 40 - 80\mu\text{m}$)と50ピクセル配列のNb/Al-STJ の組み合わせを用いたロケット実験
 - **200秒の測定で寿命測定感度 10^{14} 年を目指す**
 - **→現在の ν_3 寿命下限を2桁改善**
 - ハフニウムを用いた STJ (Hf-STJ) による衛星実験
 - ハフニウムの超伝導ギャップエネルギー： $\Delta = 20\mu\text{eV}$
 - 25meVの光子に対して $\Delta E/E < 2\%$ が達成可能

寿命感度 10^{14} 年を目指したロケット実験

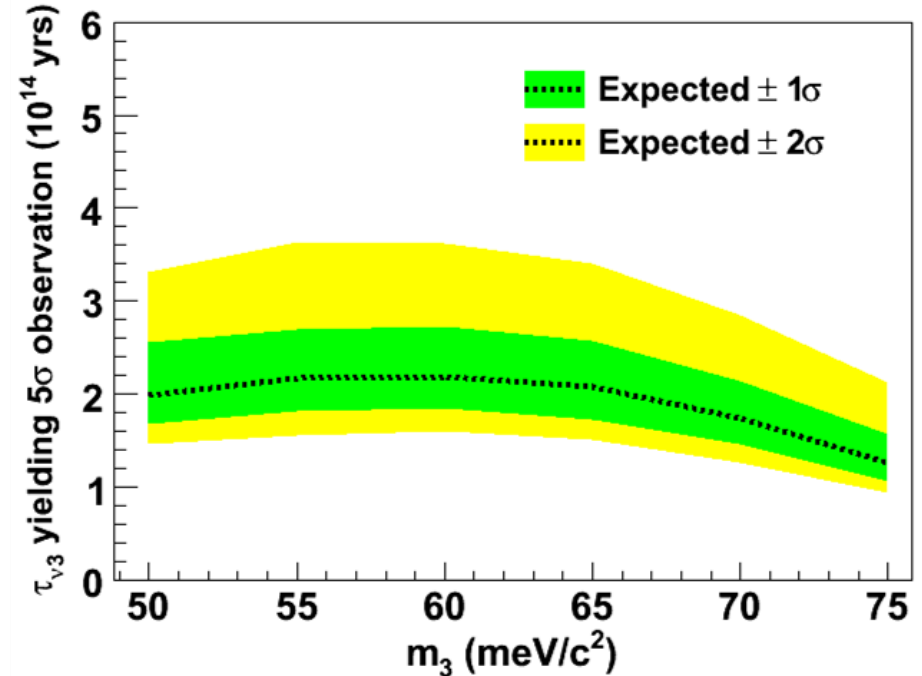
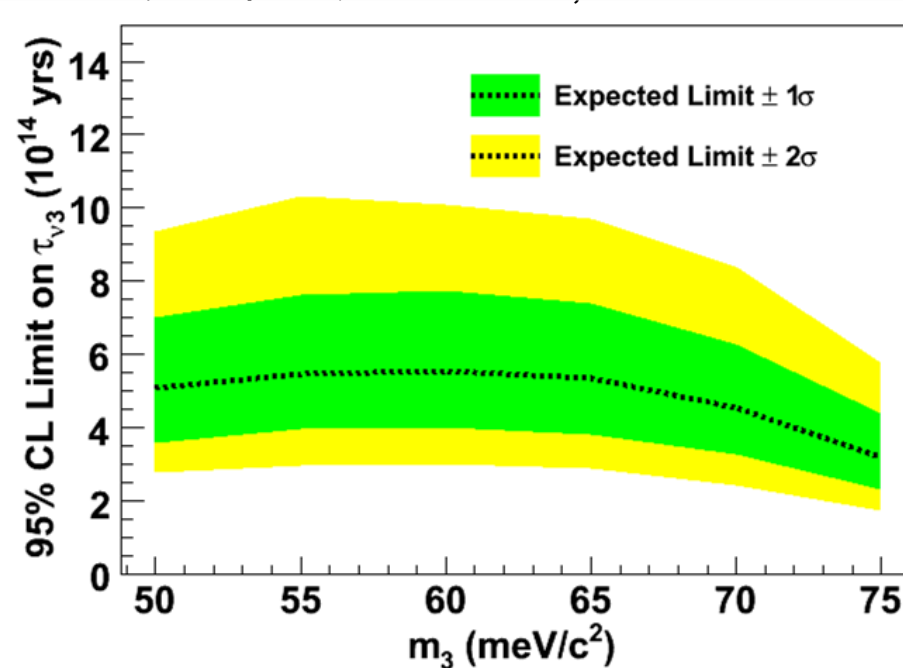
- 高度200~300kmにて200秒の測定
 - 主鏡直径15cm, 焦点距離1mの望遠鏡
 - 光学系は全て1.8K程度に冷却
- 焦点位置に $\lambda=40-80\mu\text{m}$ (16-31meV) をカバーする回折格子と 50(波長方向) x 8(空間方向) ピクセル配列の遠赤外光検出器(Nb/Al-STJ)
 - 各々のNb/Al-STJピクセルで波長ごと($\Delta\lambda = 0.8\mu\text{m}$)の光子計数
 - 1ピクセル当たりの受光面積は $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ (視野角 $100\mu\text{rad}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



寿命測定感度

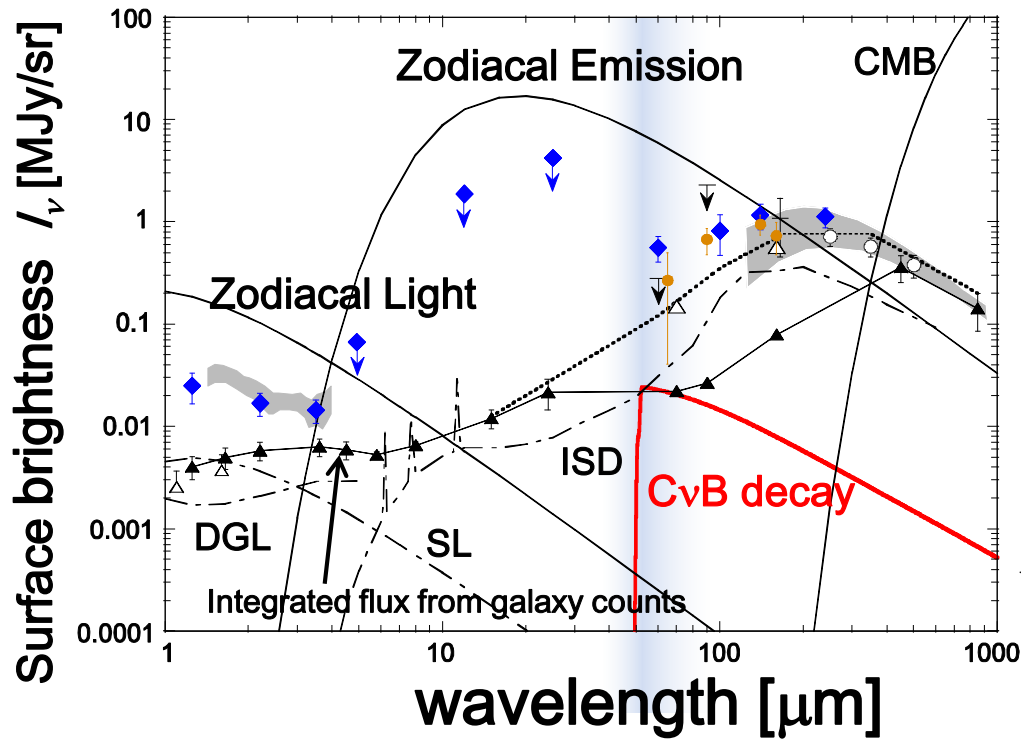
ロケット実験シミュレーションの諸元

- 望遠鏡主鏡直径: 15cm
- 50-column (λ : 40 μ m – 80 μ m) \times 8-row ピクセル配列
- 一素子あたりの視野角: 100 μ rad \times 100 μ rad
- 測定時間: 200 sec.
- 光子検出効率100% , ダークカウントなし



- ニュートリノ崩壊が見えない場合 $4-6 \times 10^{14}$ 年の下限設定可能
- ニュートリノの寿命が 2×10^{14} 年だった場合, 5 σ の有意度で観測可能

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

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

- ニュートリノ崩壊($m_3 = 50$ meV, $\tau_\nu = 1 \times 10^{14}$ yrs): $I_\nu=25\text{kJy/sr}$
 - 3.3×10^{-20} W / 8pixels @ $\lambda=50\mu\text{m}$
- 黄道光 8MJy/sr のもと200secの測定でこれを検出
 - ➔ STJの性能として $\text{NEP} < 4.2 \times 10^{-19} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ が必要

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 : $8 \times 10^{-8} \text{ sr}$

- 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

$$\text{エネルギー}\epsilon_\gamma\text{の光子数揺らぎ起因} : \epsilon_\gamma \sqrt{F_{ZE} \Delta t / \epsilon_\gamma} = \sqrt{\epsilon_\gamma F_{ZE} \Delta t}$$

- 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 $\Delta\lambda=0.8\mu\text{m}$)

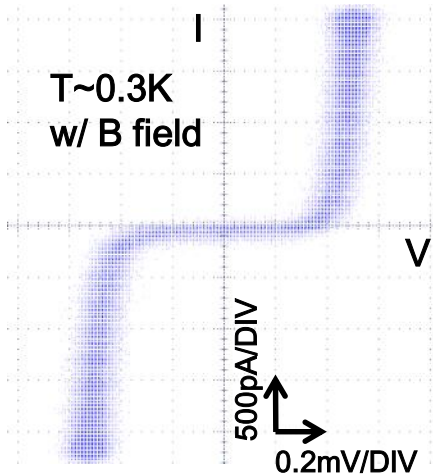
➔ $NEP < 1.5 \times 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ for $\Delta t=200\text{sec}$ with 8 pix

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

産総研 CRAVITY 製 Nb/Al-STJ

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

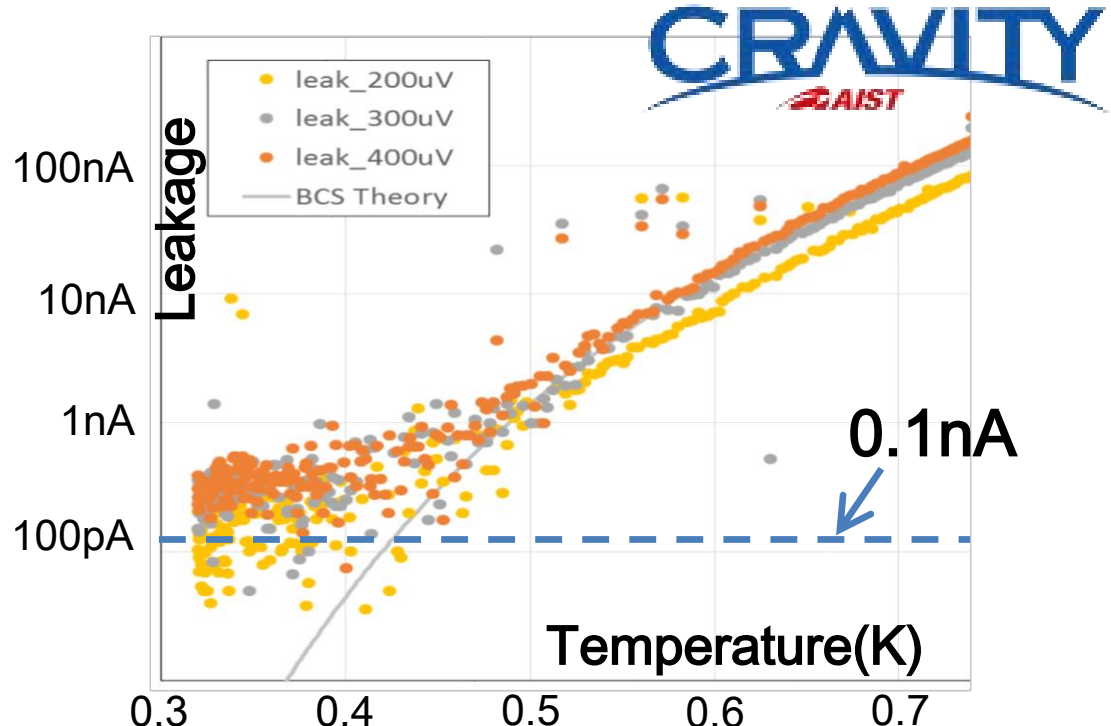
M. Ohkubo et al., IEEE Trans. Appl. Super., 24, 2400208 (2014)



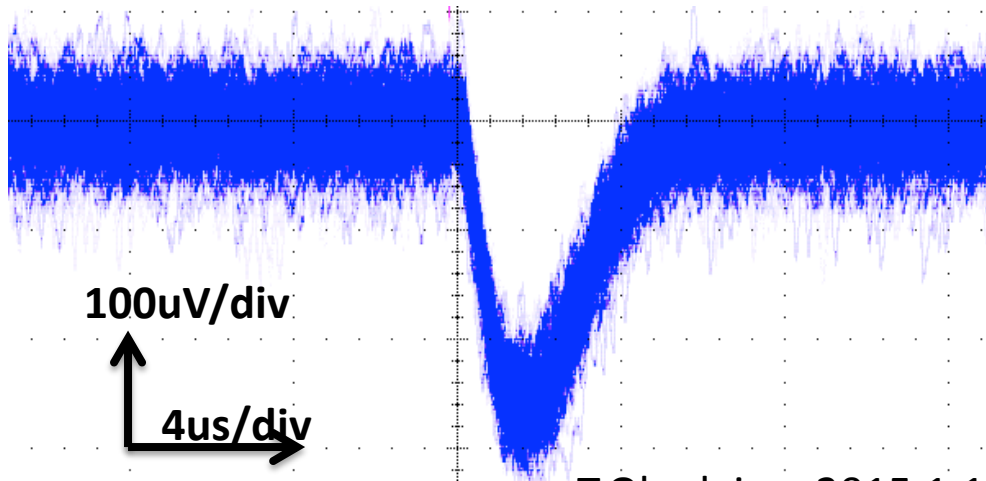
50 μ m \times 50 μ m Nb/Al-STJ
fabricated in CRAVITY at AIST

- $I_{leak} \sim 0.2$ 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 $i_L = 50$ pA, 超伝導ギャップエネルギー $\Delta = 0.6$ meV, トラッピングゲイン $G = 10$ とすると(読出し系由来のノイズを考えなければ)

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



STJパルス光応答特性

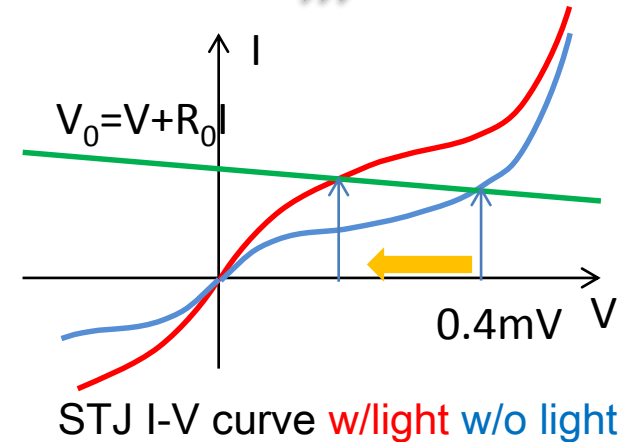
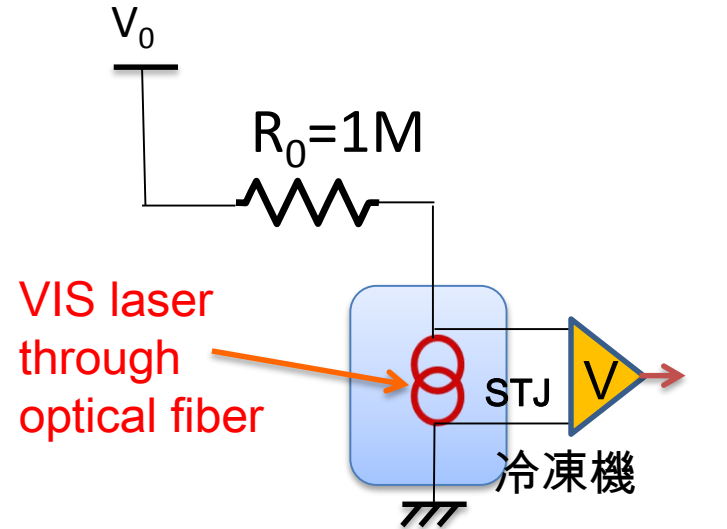


T.Okudaira, 2015.1.16

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

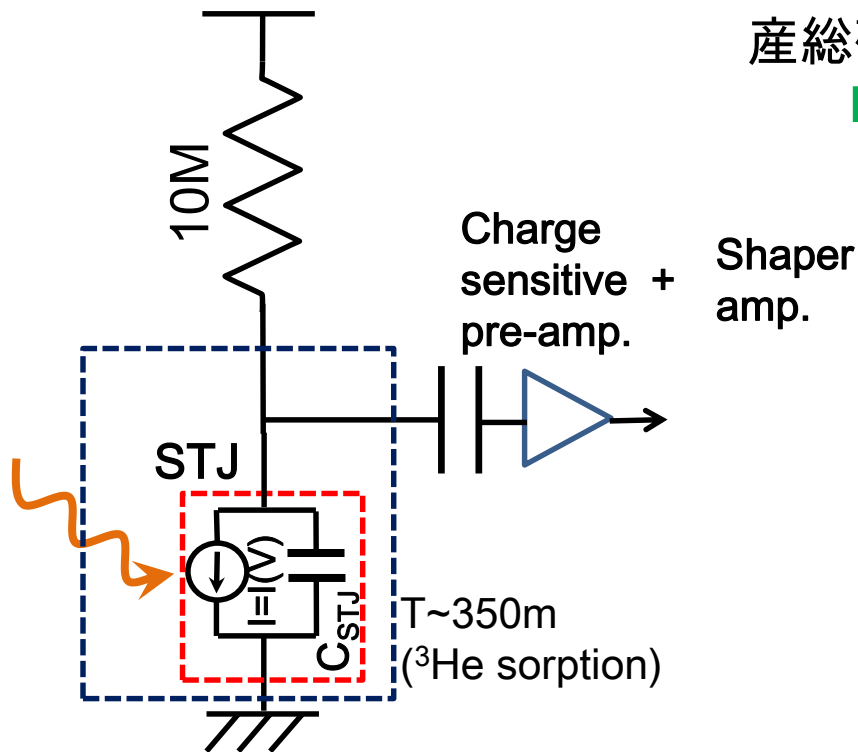
STJ 応答信号時定数: 立下り $\sim 1\mu\text{s}$, 立上り $\sim 2\mu\text{s}$
(もしくは, これより早い)

定電流モードの回路(右上)で測定



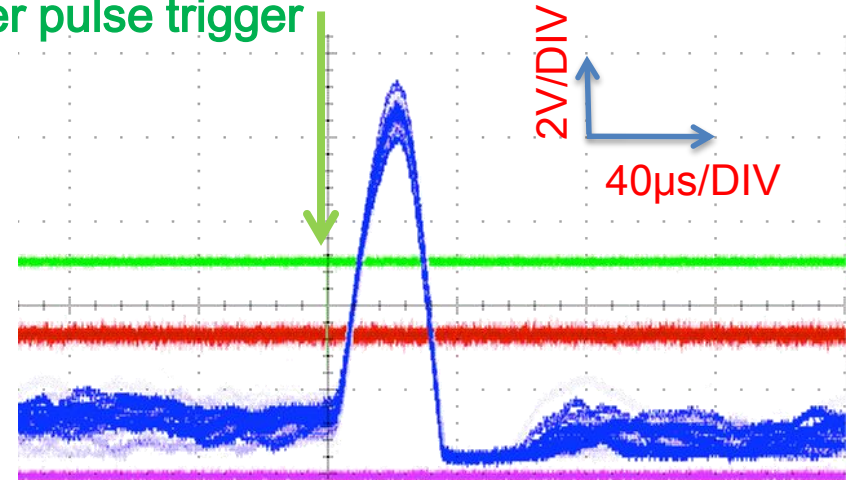
- Nb/Al-STJは, $\sim 1\mu\text{s}$ という比較的早い応答速度
→ 光子計数を行えば, 実効的なNEPは劇的に改善可能
- 但し読出し系の帯域は $> 1\text{MHz}$ を確保する必要あり

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

ニュートリノ崩壊探索実験 Collaboration Members

金信弘, 武内勇司, 武政健一, 木内健司, 永田和樹, 笠原宏太, 森内航也,
先崎蓮, 八木俊輔, *大塚洋一 (筑波大学), *Hf-STJ開発

松浦周二 (関西学院大学),

池田博一, 和田武彦, 長勢晃一 (JAXA/ISAS),

吉田拓生, 廣瀬龍太, 加藤圭騎, 浅野千紗, 中村昂弘 (福井大学),

石野宏和, 樹林敦子 (岡山大学),

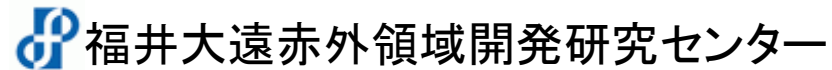
美馬覚 (理化学研究所),

加藤幸弘 (近畿大学),

羽澄昌史, 新井康夫, 倉知郁生 (高エネルギー加速器研究機構),

志岐成友, 浮辺雅宏, 藤井剛, 大久保雅隆 (産業技術総合研究所),

川人祥二 (静岡大学)



Erik Ramberg, Mark Kozlovsky, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov,

Jonghee Yoo (Fermilab),

Soo-Bong Kim (Seoul National University)

まとめ

- 宇宙背景ニュートリノのニュートリノ崩壊探索実験を準備中
 - ロケット実験：200秒の測定で 10^{14} 年の寿命測定感度
 - 衛星実験：100時間の測定で 10^{17} 年の寿命測定感度
- 検出器として STJ (Nb/Al-STJ + 回折格子, Hf-STJ)を開発中
 - 遠赤外($50\mu\text{m}$)の一光子検出・分光
- Nb/Al-STJ 検出器での遠赤外一光子検出
 - 光子計数により，実効的なNEP で $< 10^{-20} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ を目指す
 - STJのすぐ近くに配置した電荷積分型アンプによる読出しが必要
 - SOI技術を用いた極低温アンプの開発

Hf-STJ 開発 → 武政(筑波大)

SOI極低温アンプ設計 → 木内(筑波大)

STJ較正用遠赤外光源開発 → 浅野(福井大)

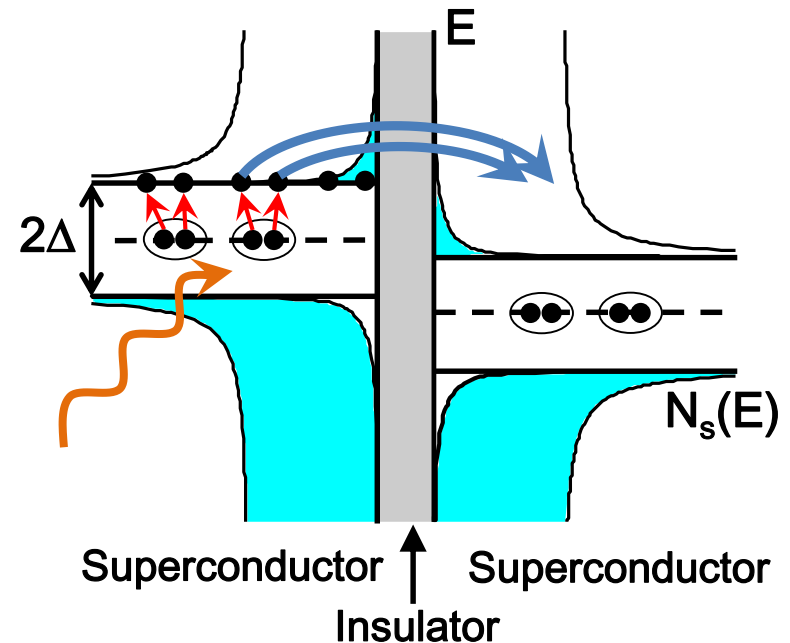
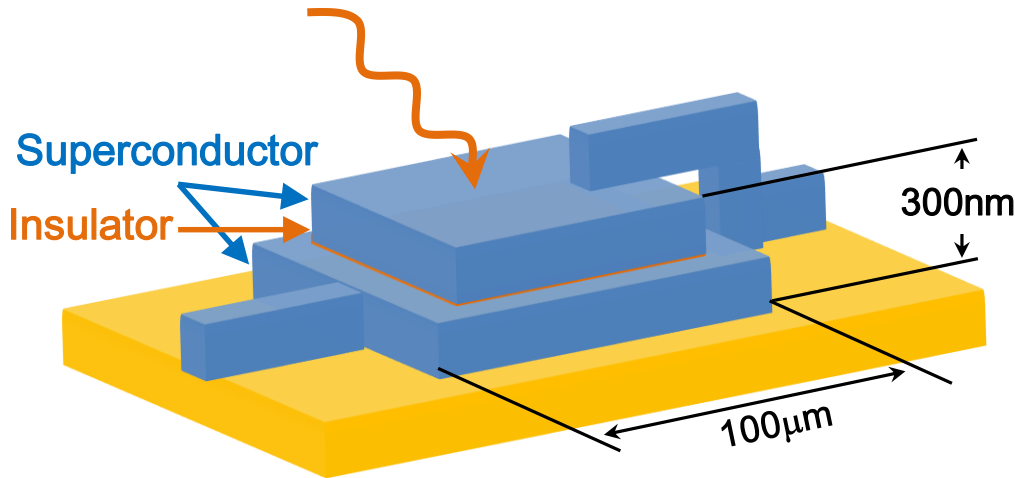
SOI-STJ4評価 → 先崎(筑波大)

CRAVITY製Nb/Al-STJ評価 → 森内(筑波大)

Backup

Superconducting Tunnel Junction (STJ)

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



Δ : Superconducting gap energy

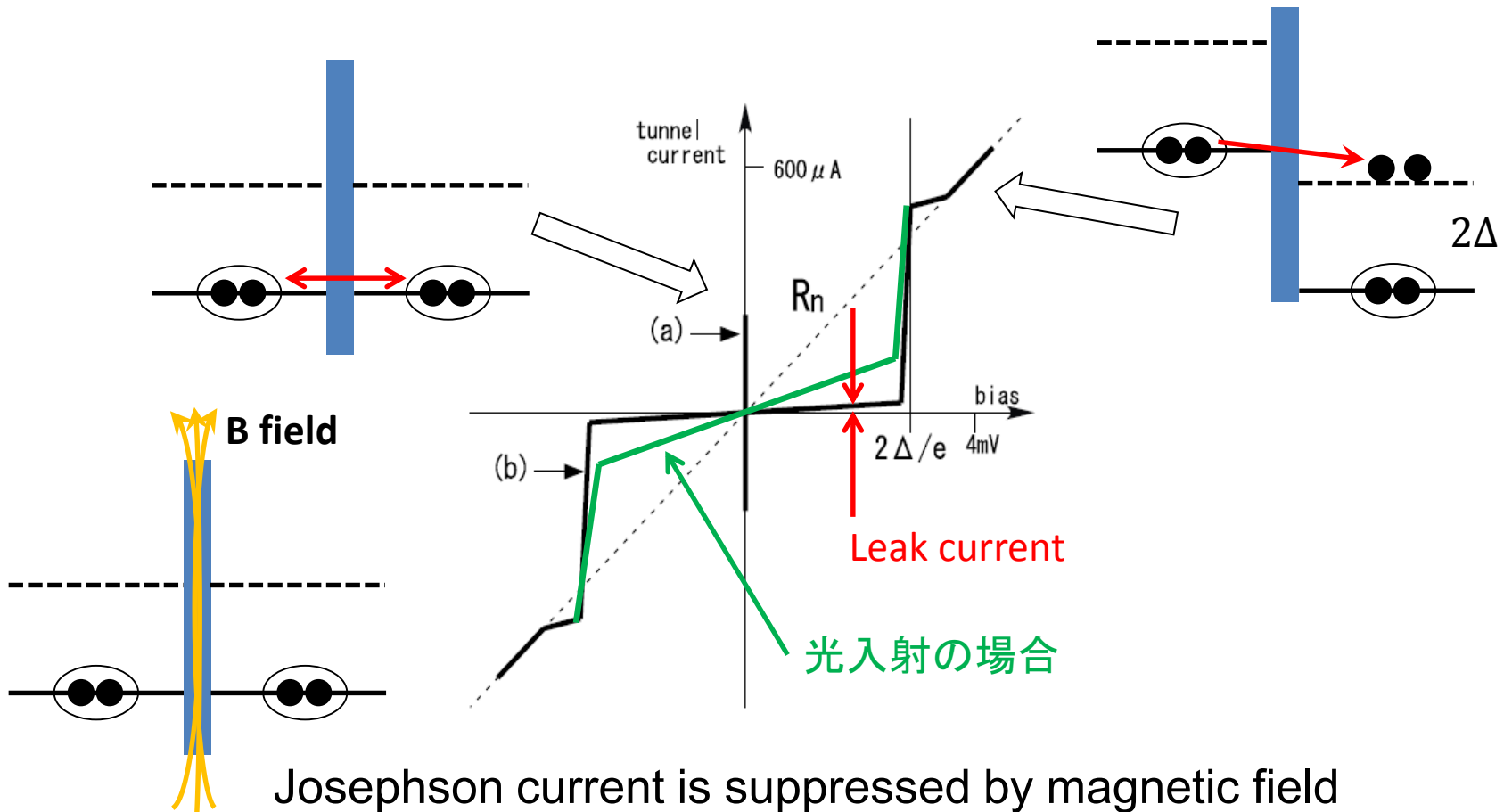
接合面を挟んで電位差 ($|V| < 2\Delta$) を印加.

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

- Sketch of a current-voltage (I-V) curve for STJ
- ➔ The Cooper pair tunneling current (DC Josephson current) is seen at $V = 0$, and the quasi-particle tunneling current is seen for $|V| > 2\Delta$

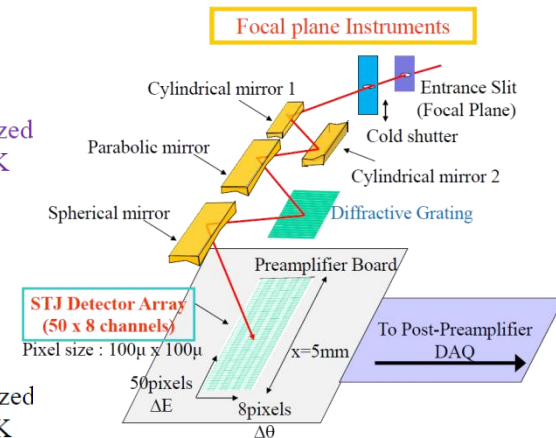
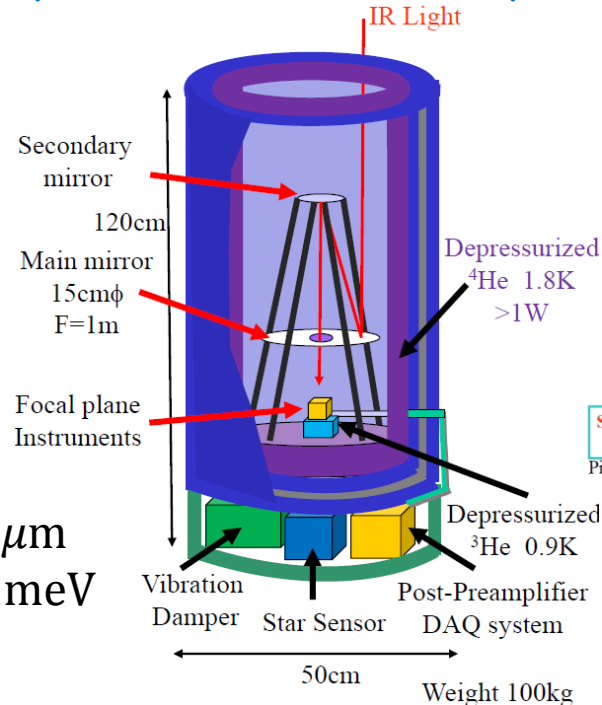
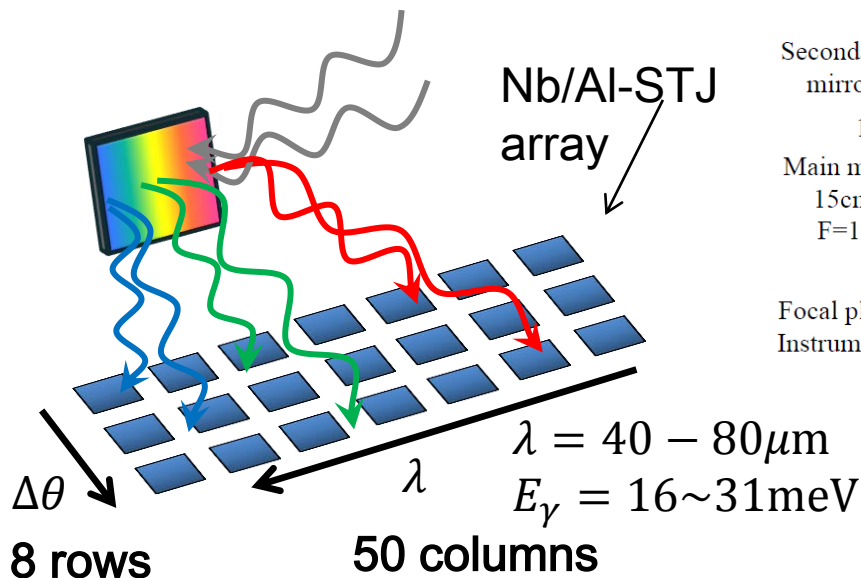


Josephson current is suppressed by magnetic field

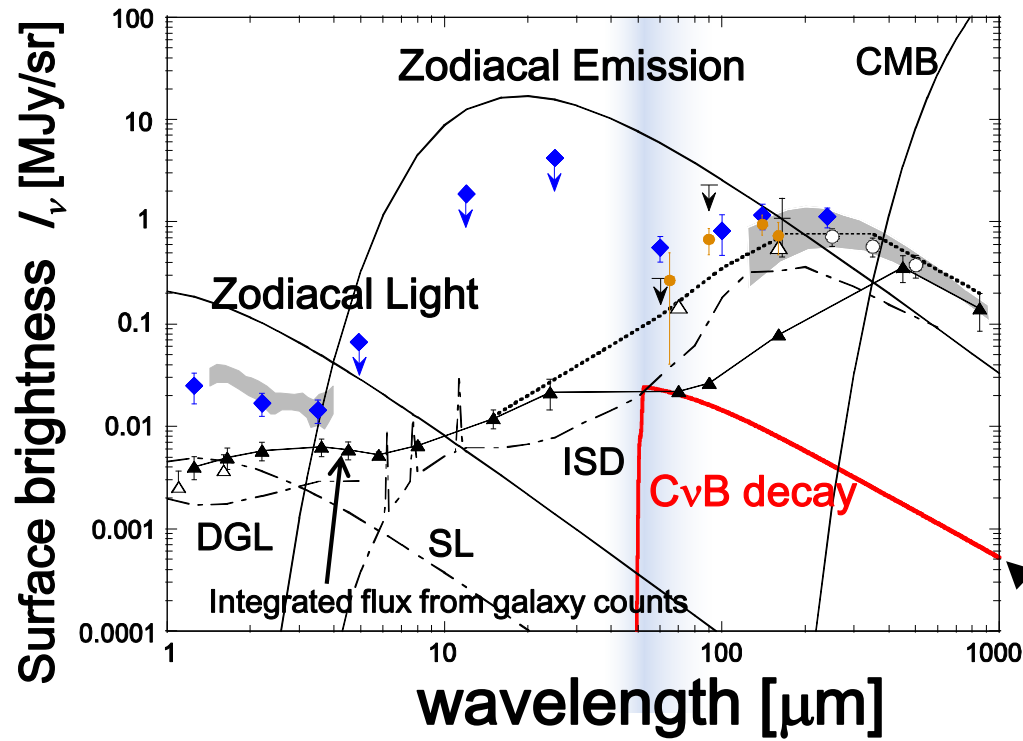
Proposed rocket experiment

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 μm x100 μm** for each pixel (**100 μrad x 100 μrad** 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

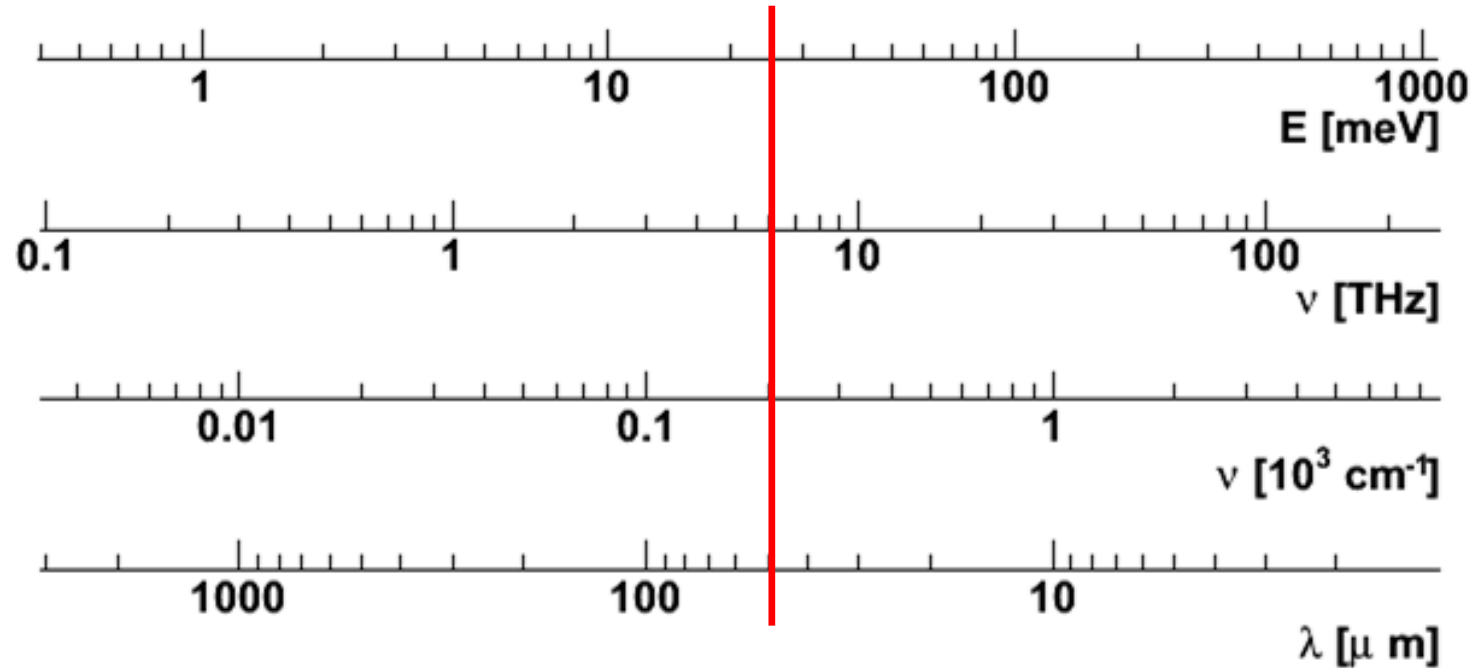
$$\Delta\lambda = \frac{80\mu\text{m} - 40\mu\text{m}}{50} = 0.8\mu\text{m}$$

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

- 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!

Energy/Wavelength/Frequency



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

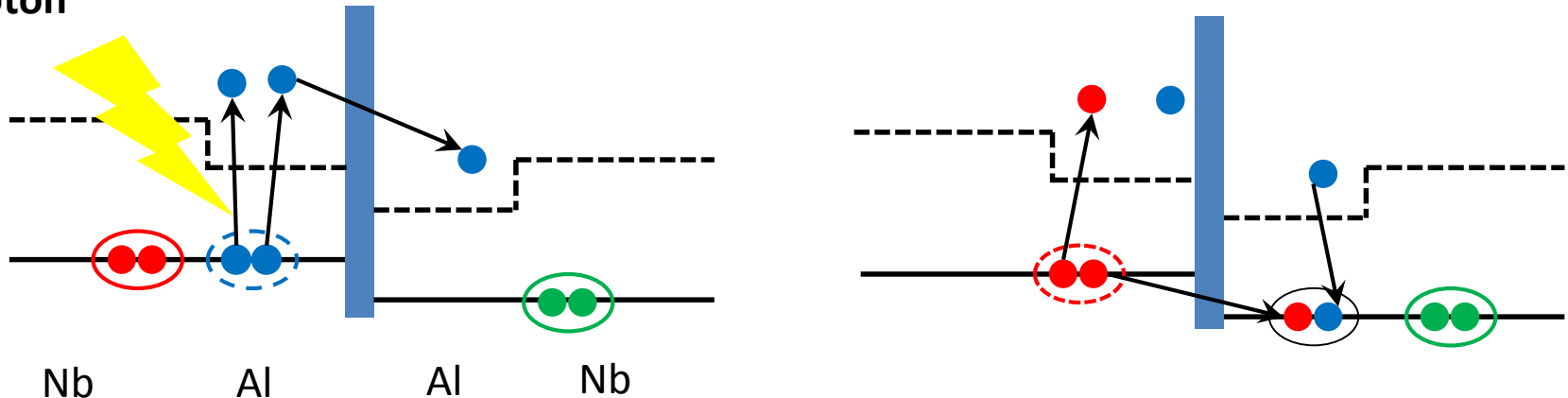
$$\nu = 6 \text{ THz}$$

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

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: $2 \sim 200$

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

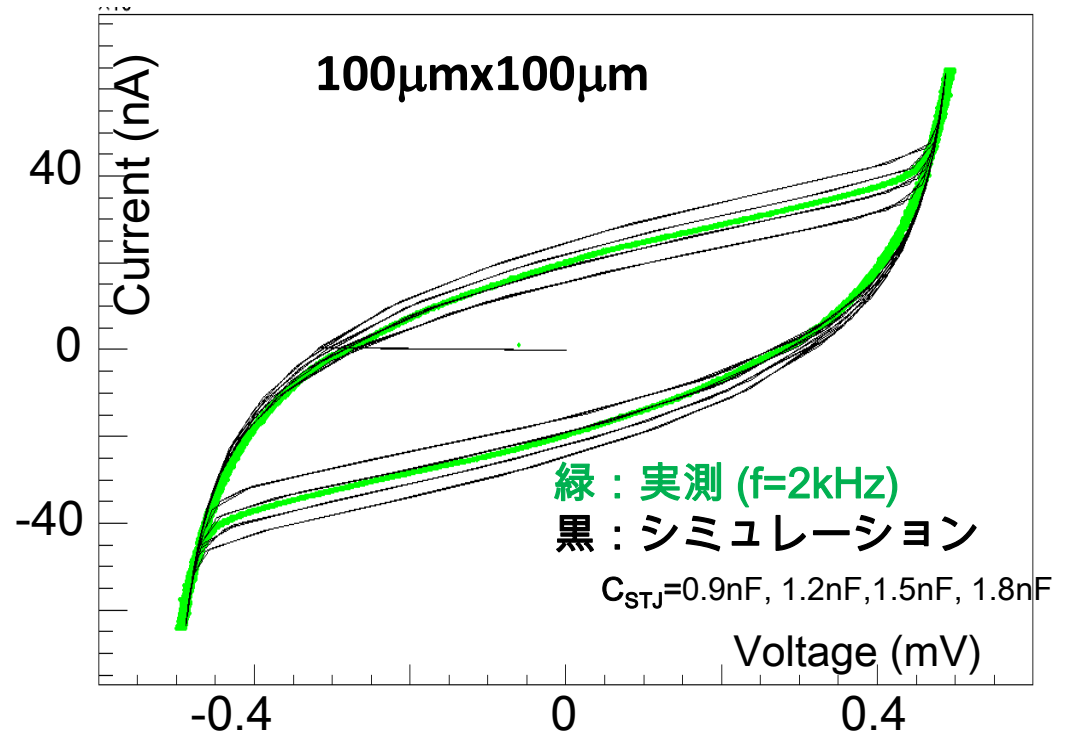
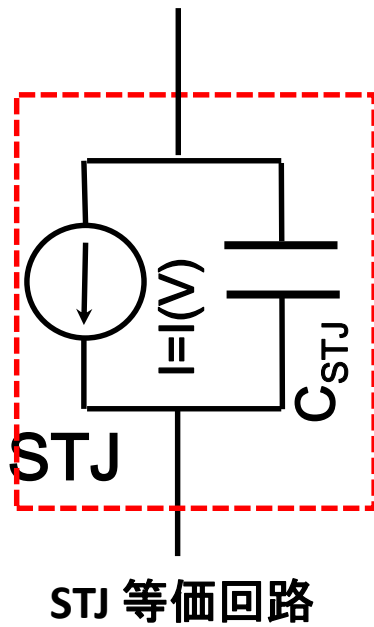
Hf

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

STJ キャパシタンス測定

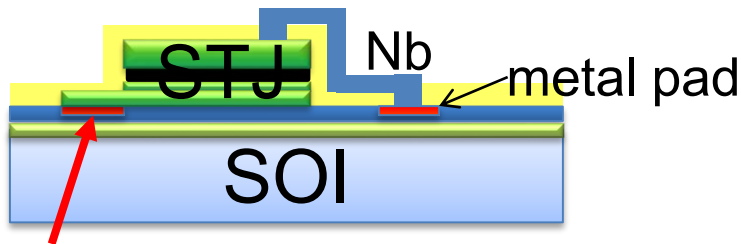


STJ は , junction size に比例したキャパシタンス

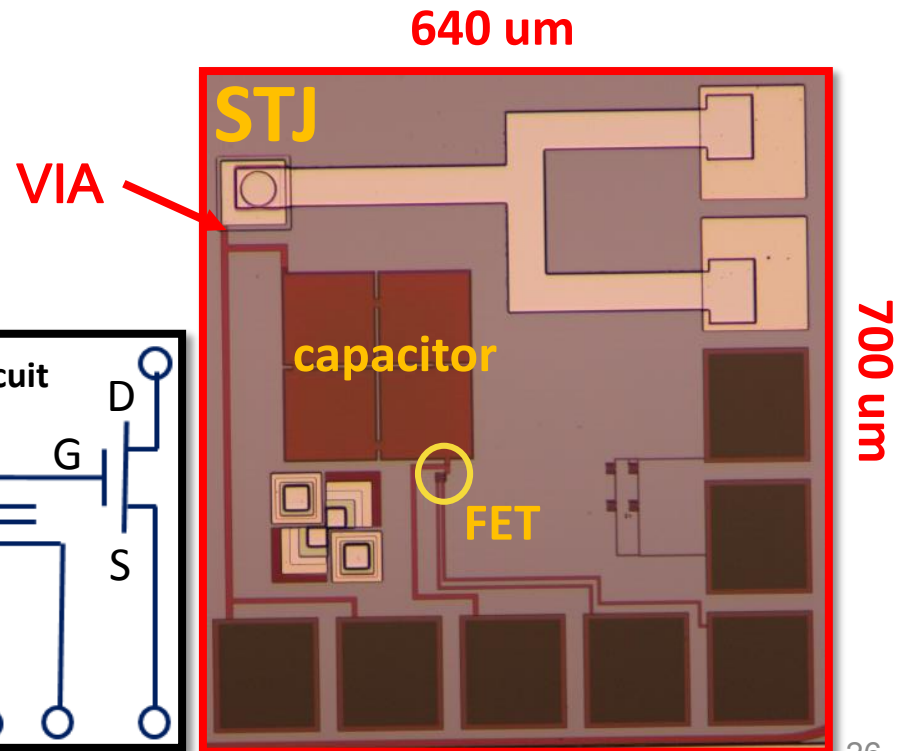
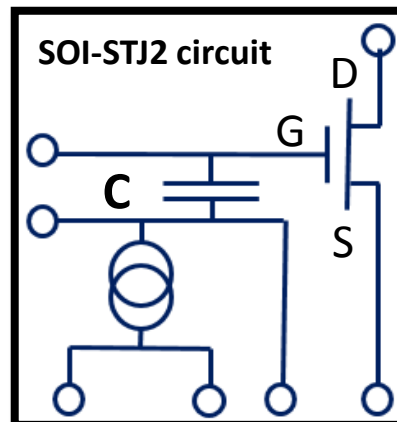
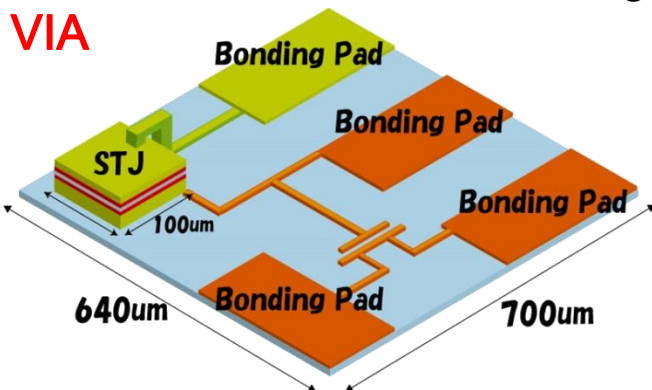
- STJのI-V測定からSTJのキャパシタンスを測定
- SIS接合面の面積に比例する成分 : $\sim 34\text{fF}/\mu\text{m}^2$
- 20 μ m角のSTJでも 14pF
- 低入力インピーダンスの電荷積分型アンプでの読出しが必要

Development of SOI-STJ

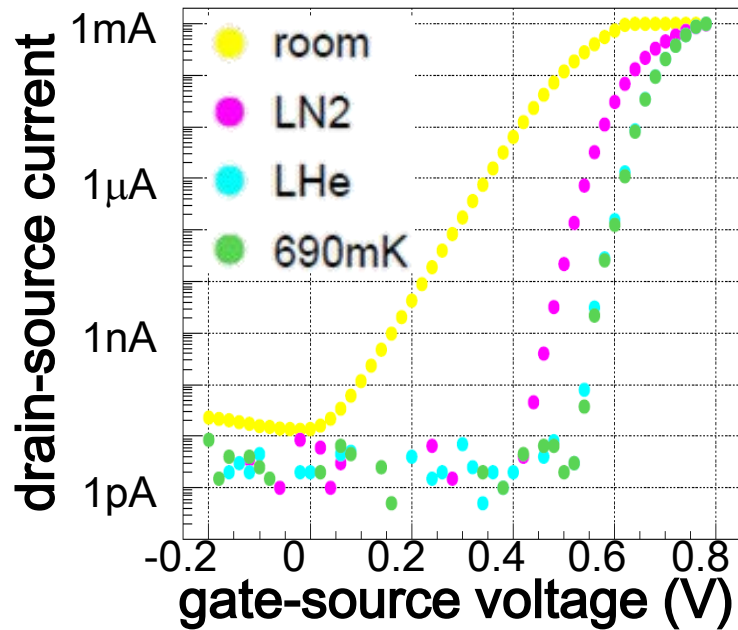
- SOI: Silicon-on-insulator
 - CMOS in FD-SOI is reported to work at 4K by T. Wada (JAXA), et al.
J Low Temp Phys 167, 602 (2012)
- SOI と STJ の融合 (SOI回路一体型 STJ の基礎研究)
 - STJ layers are fabricated **directly on** a SOI pre-amplifier board and cooled down together with the STJ
- Started test with Nb/Al-STJ on SOI with p-MOS and n-MOS FET



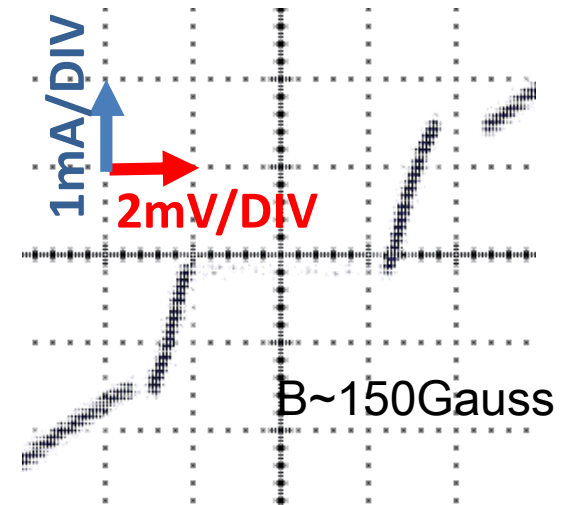
STJ lower layer has electrical contact with SOI circuit through **VIA**



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，スレッシュヨルド電圧のシフト，サブスレッシュヨ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