

# ニュートリノ崩壊探索実験

金 信弘

日米科学技術協力事業ヒアリング  
(2014年2月27日)

- はじめに  
動機  
スケジュール
- 赤外線光子検出器(超伝導トンネル接合素子STJ)の開発  
2013年度の成果  
今後の予定

# 共同研究者

## 日本側:

金 信弘, 武内勇司, 武政健一, 木内健司, 笠原宏太, 奥平琢也,  
市村龍哉, 金丸昌弘, 先崎蓮, 森内航也(筑波大学),  
池田博一, 松浦周二, 和田武彦 (JAXA/ISAS),  
石野宏和, 樹林敦子 (岡山大学),  
美馬 寛 (理化学研究所),  
吉田拓生, 折笠桂輔, 廣瀬龍太, 小川祐生 (福井大学),  
加藤幸弘 (近畿大学),  
羽澄昌史, 新井康夫(KEK)

## 米国側:

Erik Ramberg , Jeonghee Yoo, Mark Kozlovsky, Paul Rubinov,  
Dmitri Sergatskov (Fermilab)

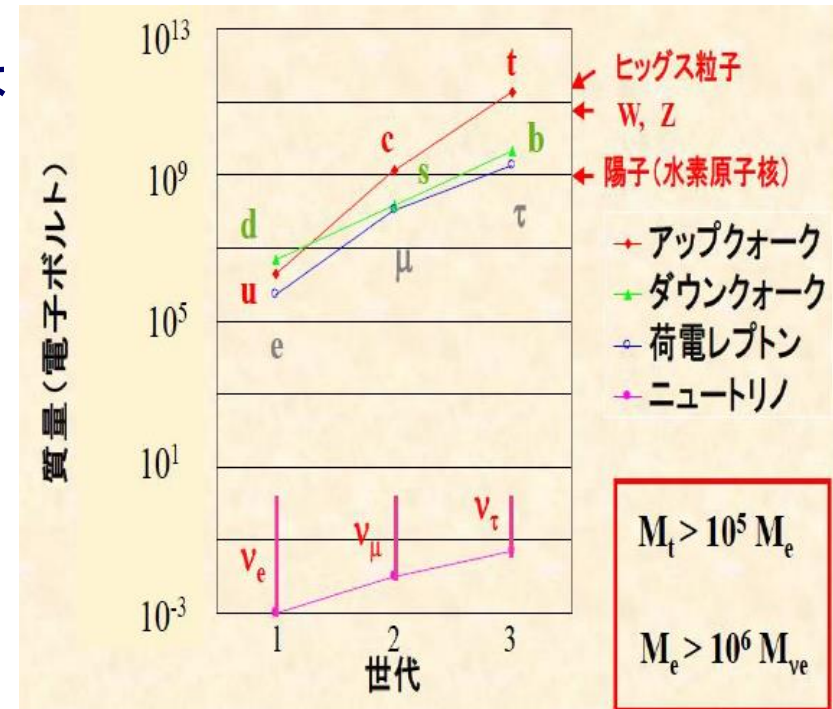
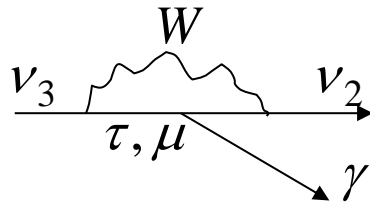
## 韓国:

Soo-Bong Kim (Seoul National University)

# 宇宙背景ニュートリノの崩壊探索の動機

ニュートリノ振動実験によって質量二乗差 $\Delta m^2_{ij}$ は高精度で測定された。しかし、**ニュートリノの質量自体は未測定**。

**ニュートリノ崩壊測定**によってニュートリノ振動とは独立な量が測定できるので、これと合わせて質量が求められる。



●ニュートリノの寿命は非常に長く、その崩壊を観測するには宇宙背景ニュートリノを用いる必要がある。逆に、これを観測すると宇宙論で予測されている**宇宙背景ニュートリノの発見**になる。

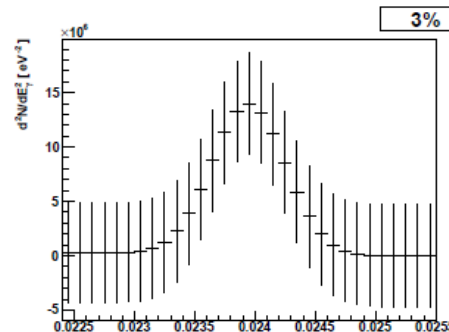
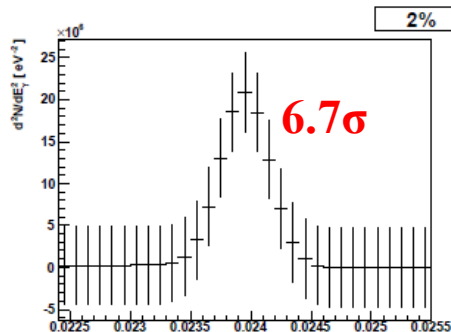
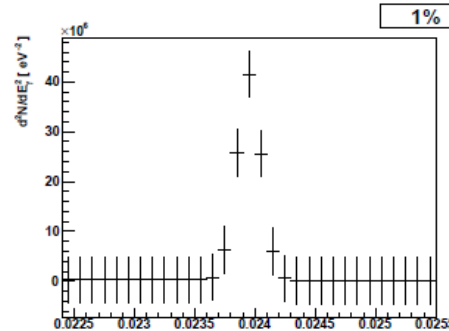
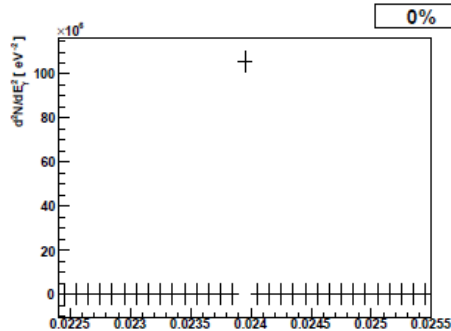
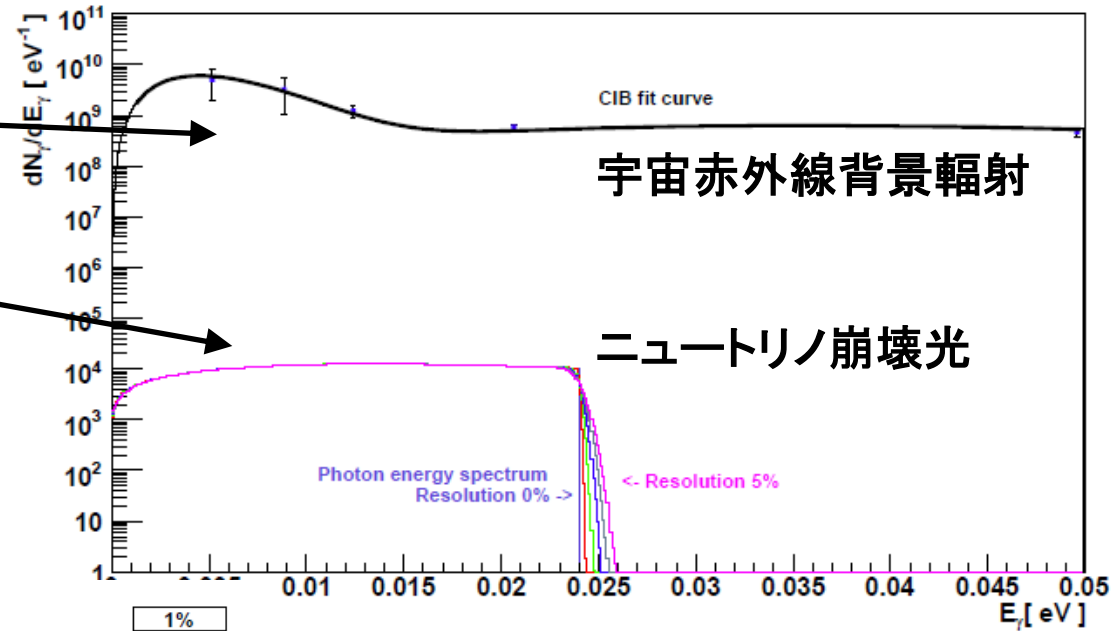
Left - Right Symmetric Model  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)$  模型では、  
質量下限  $M(W_R) > 715 \text{ GeV}/c^2$ , 混合角上限  $\zeta < 0.013$ ,  
 $m_3 = 50 \text{ meV}$  を用いて計算すると

$$\tau(\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma) = 1.5 \times 10^{17} \text{ year} \quad (\text{標準模型では } 2 \times 10^{43} \text{ year})$$

# 信号検出の可能性

宇宙赤外線背景輻射 +  
ニュートリノ崩壊からくる光子の  
エネルギー分布 ( $E_0 = 25\text{meV}$ ,  
 $\tau = 1.5 \times 10^{17}\text{年}$ )

直径20cm、視野0.1度の望遠鏡  
10時間の測定、検出効率100%  
(衛星実験)



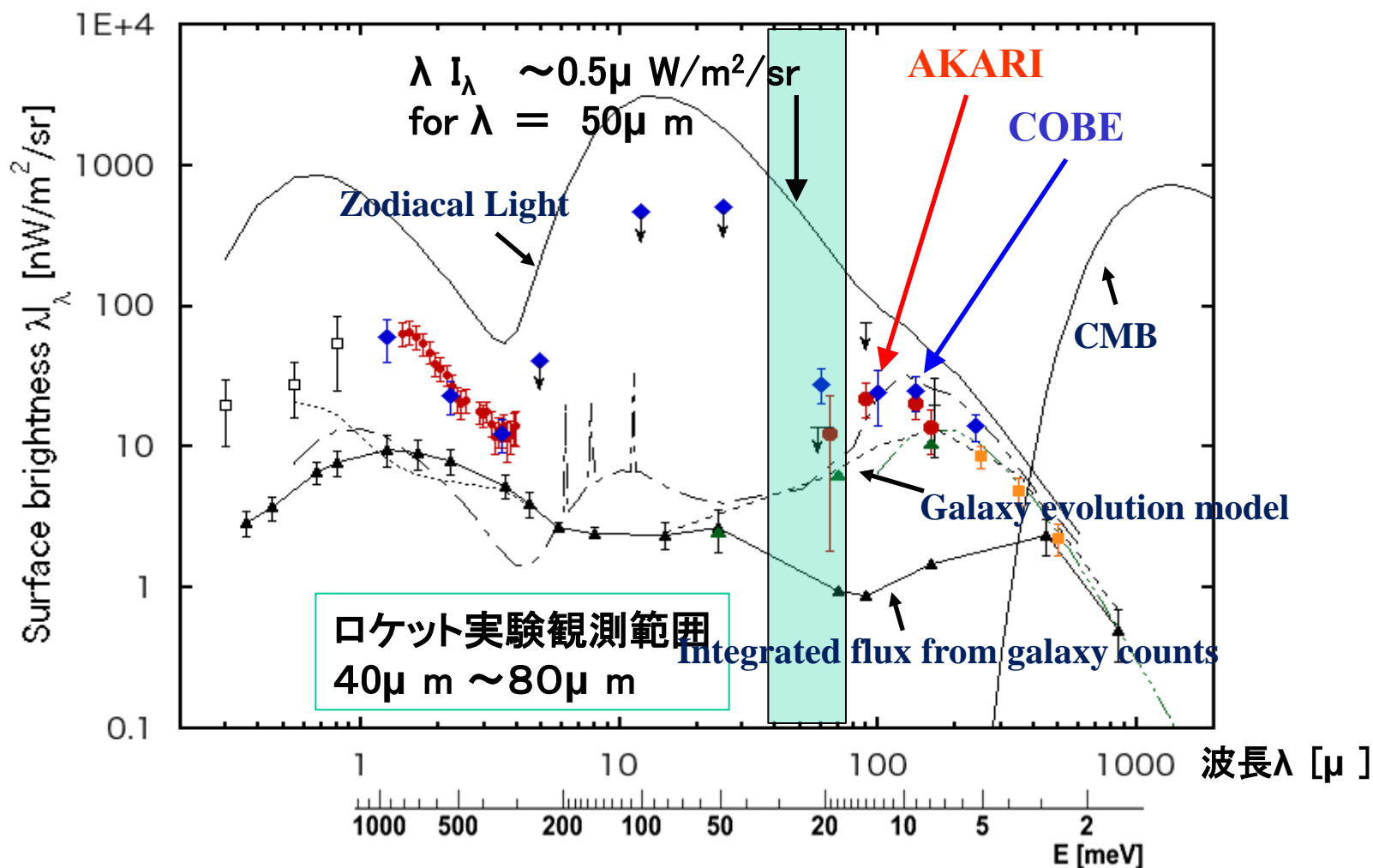
$dN/dE_\gamma$

$d^2N_\gamma/dE_\gamma^2$

- 2%以下のエネルギー分解能が必要。
- 質量50meV, 寿命 $1.5 \times 10^{17}\text{年}$ の $\nu_3$ の崩壊は $6.7\sigma$ で観測可能。
- 現在の寿命下限 (AKARI)  $3 \times 10^{12}\text{年}$

# Cosmic Infrared Background measured by COBE and AKARI

衛星実験に先立ち、予備実験としてロケット実験を行う。



COBE: M. G. Hauser *et al.* ApJ. 508 (1998) 25. D. P. Finkbeiner *et al.* ApJ. 544 (2000) 81.

AKARI: S. Matsuura *et al.* ApJ. 737 (2011) 2.

# 予定

	2014JFY	2015	2016	2017	2018
実験設計 (金、松浦)	人工衛星による実験				
	遠赤外線観測 ロケット実験				
STJ検出器 (武内)	Nb/Al-STJ 設計・開発	製作			
	Hf-STJ設計・開発			(衛星実験に向けて)	
極低温4Kエレクトロニクス(池田、武内、FNAL)	設計・開発	製作			
分光素子・光学系(武内、松浦)	設計・開発	製作			
クライオスタット (武内、松浦、KEK)	設計・開発	製作			
測定＋解析 (全員)			解析プログラム作成		
	シミュレーション			解析	

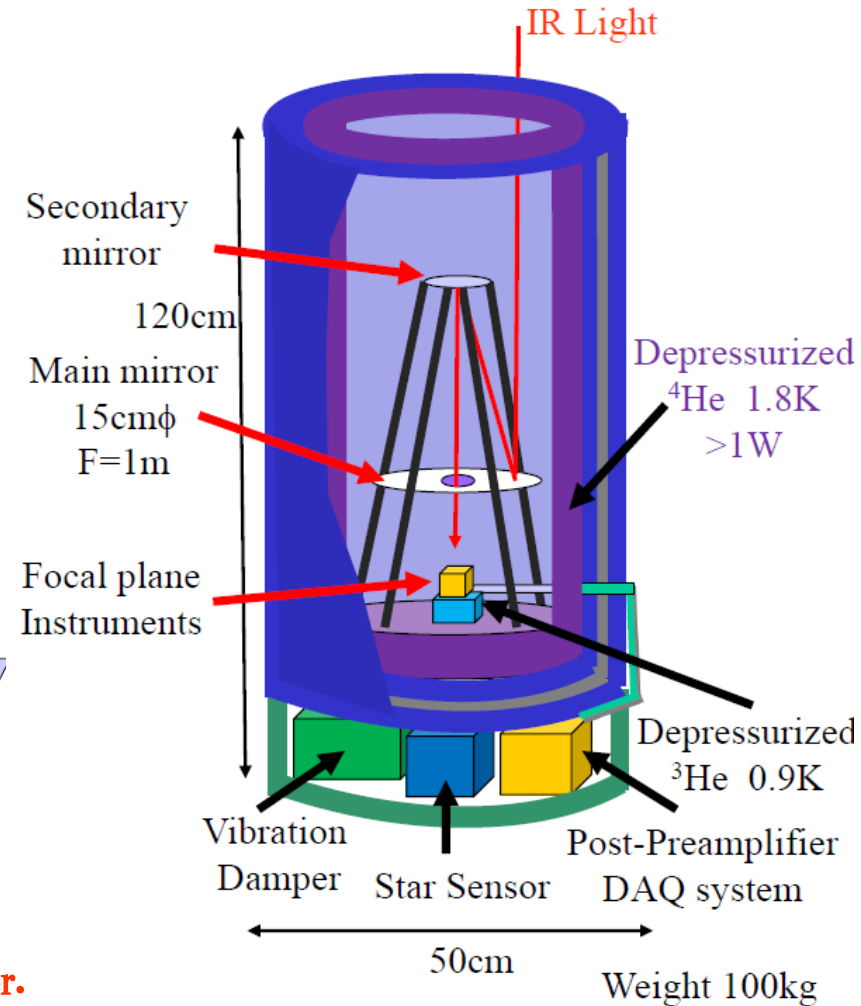
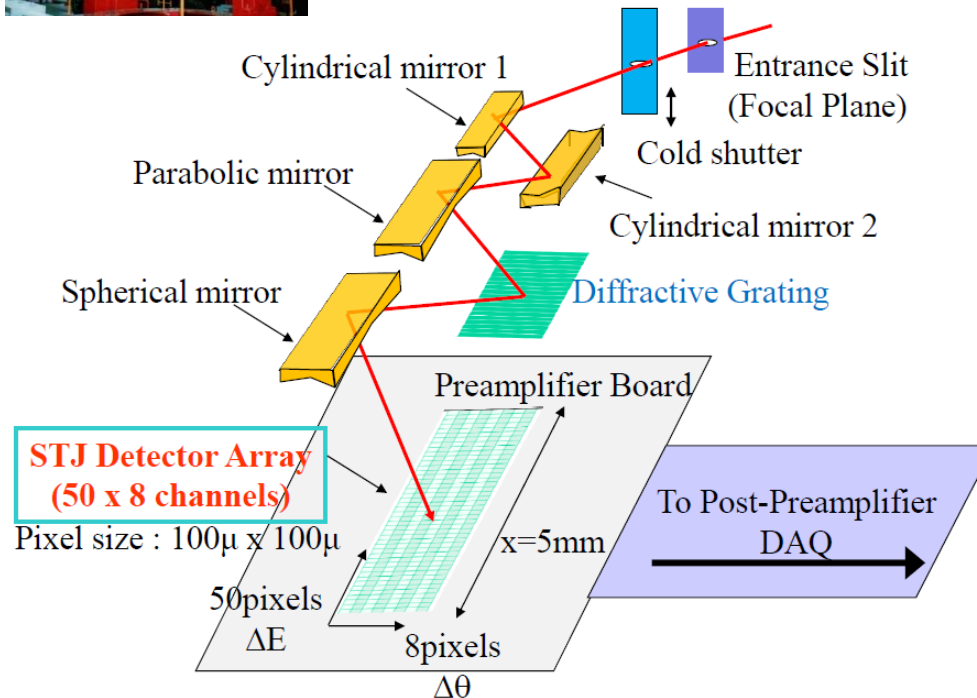
# ニュートリノ崩壊探索のためのロケット実験赤外線観測装置

2016年度末 実験予定 200kmの高度で5分間のデータ収集.  
ニュートリノ寿命下限を2ケタあげる ( $\sim 10^{14}$ 年).

JAXA Rocket CIB Experiment  
(Feb 2, 1992)



Focal plane Instruments



Rate/50pixel-spectrometer = 15 kHz (300Hz/pixel)

Measurements for 200 s  $\rightarrow$  3M events /50pixel-spectrometer.

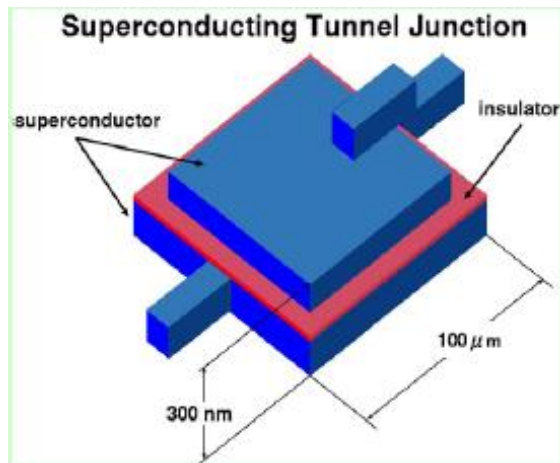
Using 8 x 50pixel-spectrometer,  $\sigma/N=0.04\%$

$2\sigma = 0.08\% \times 0.5 \mu\text{W}/\text{m}^2/\text{sr} = 0.4\text{nW}/\text{m}^2/\text{sr}$  (0.8% times present limit  $50\text{nW}/\text{m}^2/\text{sr}$ )

# 超伝導トンネル接合素子検出器

## STJ (Superconducting Tunnel Junction) Detector

- Superconductor / Insulator / Superconductor Josephson Junction

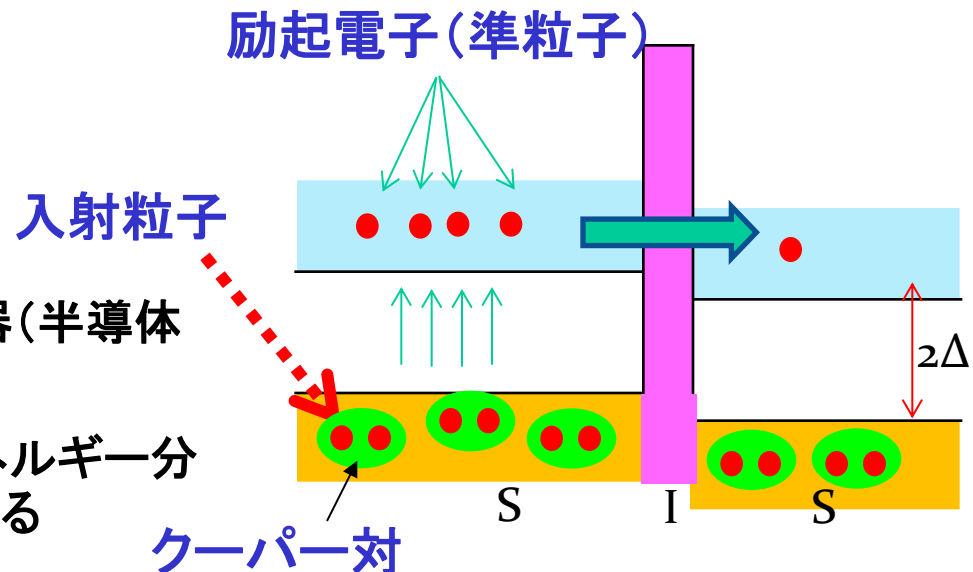


2つの超伝導膜の間に1~2 nm  
の絶縁体のトンネル障壁。

入射粒子によって、超伝導体のエネルギーギャップの上に励起された電子(準粒子)はトンネル効果でトンネル障壁を通過。そのトンネル電流を測定することによって、個々の入射粒子のエネルギーを測定。

エネルギーギャップが、通常の検出器(半導体検出器等)に比べて桁違いに小さい

→ 低エネルギー放射線を高エネルギー分解能で一光子ごとに測定できる





# STJ検出器 エネルギー分解能

## STJ 検出器エネルギー分解能

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

ハフニウムHfを超伝導体として用いると,

$$\sigma_E / E = 1.7\% \quad \text{at } E = 25\text{meV}$$

$\Delta$ : バンドギャップエネルギー  
 $F$ : Fano factor (= 0.2)  
 $E$ : 入射粒子エネルギー

Material	$T_c(K)$	$\Delta(\text{meV})$
Niobium	9.20	1.550
Aluminum	1.14	0.172
Hafnium	0.13	0.021

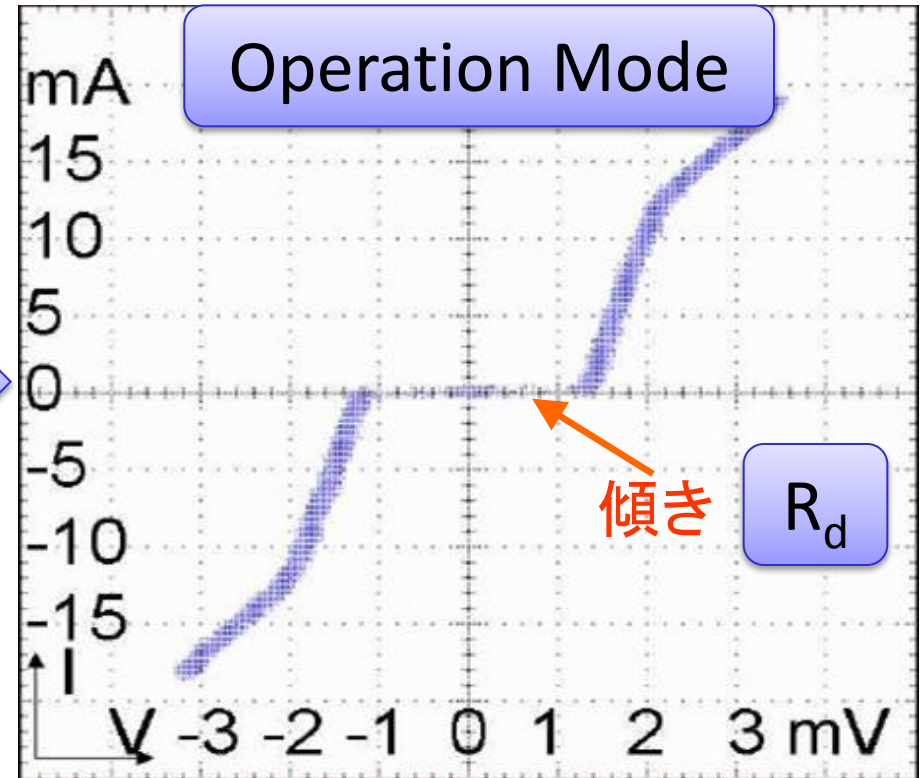
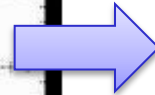
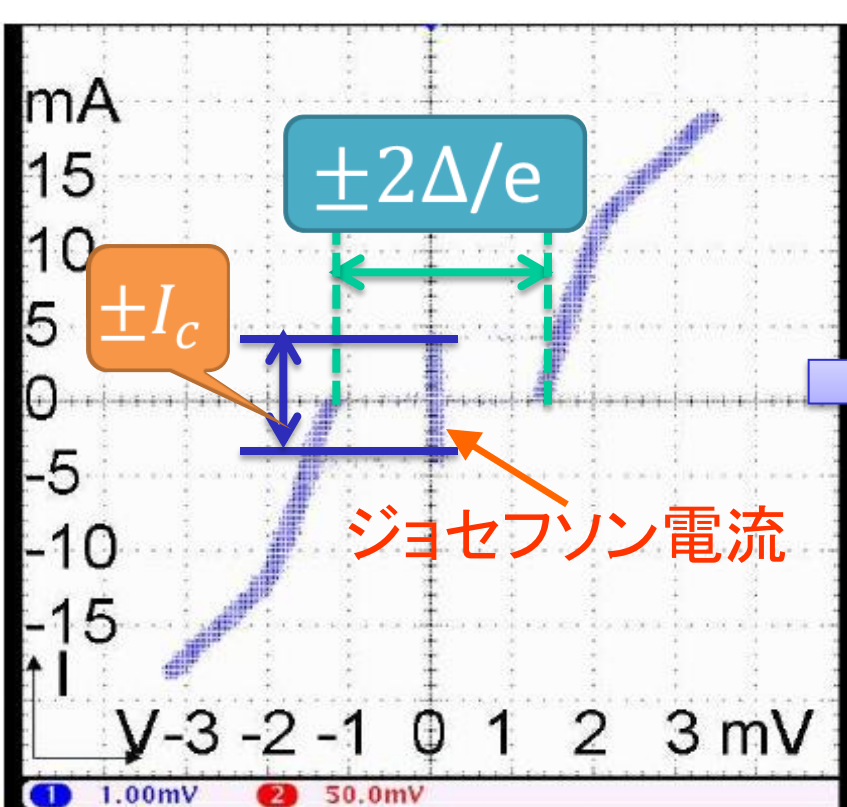
$T_c$ : 転移温度  
 $T_c$ の1/10程度の温度で運転

我々がHf-STJ のSIS構造を  
世界で初めて観測(TIPP2011で報告)

# STJ 検出器の基礎特性

## Nb-STJ 電流電圧 (I-V) 曲線

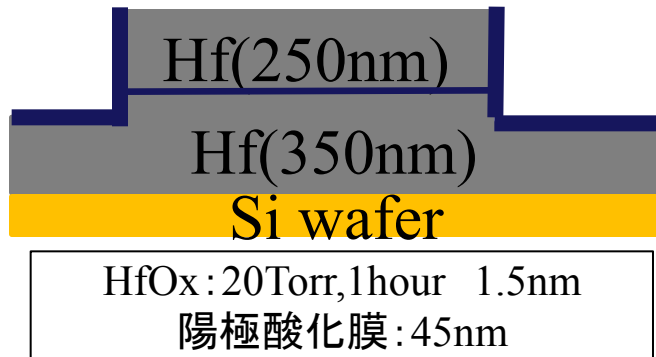
- ・ リーク電流 ( $|V| < 2\Delta / e$  における動的抵抗  $R_d$ )
- ・ エネルギーギャップ  $\Delta$
- ・ 転移電流  $I_c$



ジョセフソン電流は絶縁対面に平行方向の磁場によって消失する。

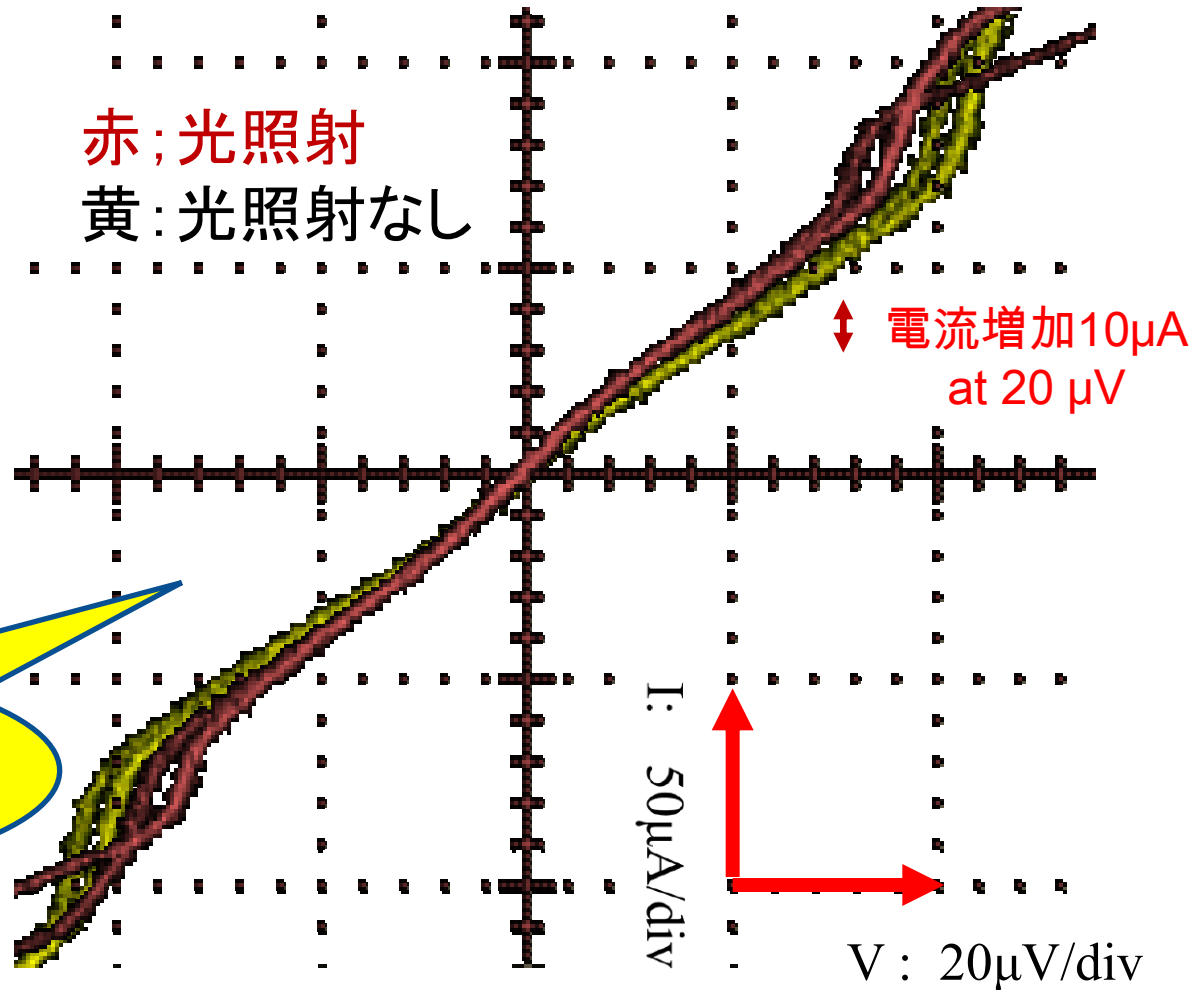
# Hf-STJ 開発成果 (H25年度)

光応答 (可視光レーザー 456nm 100kHz)



100×100μm<sup>2</sup>  
T=39~53mK  
R<sub>d</sub>=0.6Ω

Hf-STJの光応答信号を  
世界で初めて観測



実用化には、リーク電流の減少が大きな課題。STJサイズを小さくして試験中。

# 遠赤外光分光

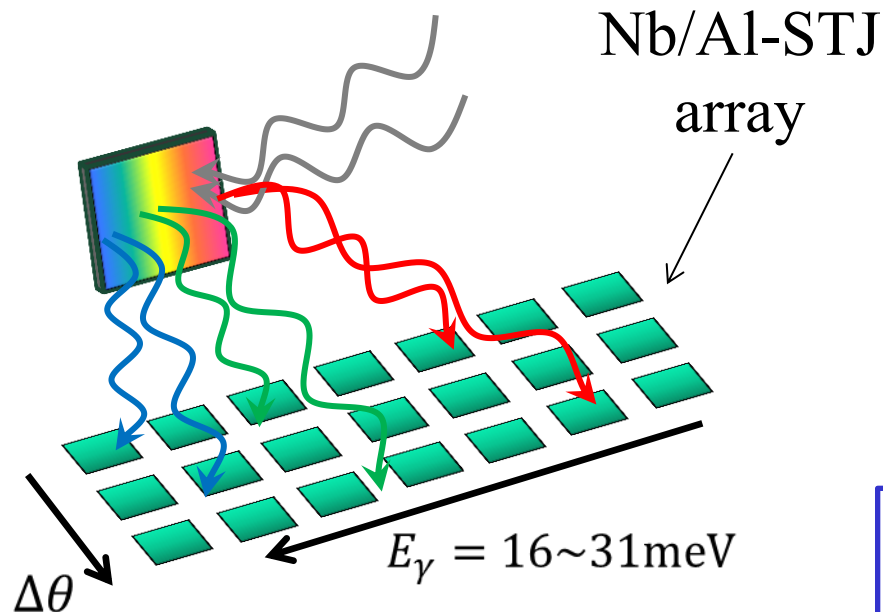
## 回折格子 + Nb/Al-STJアレイ

- 回折格子  $\lambda = 40 \sim 80 \mu\text{m}$  ( $E = 16 \sim 31 \text{meV}$ ) をカバー。2% エネルギー分光。
- Nb/Al-STJ マルチピクセル検出器

Nb/Al-STJ: 一光子カウンター。準粒子数 ( $E = 25 \text{meV}$ )  $\sim 100$

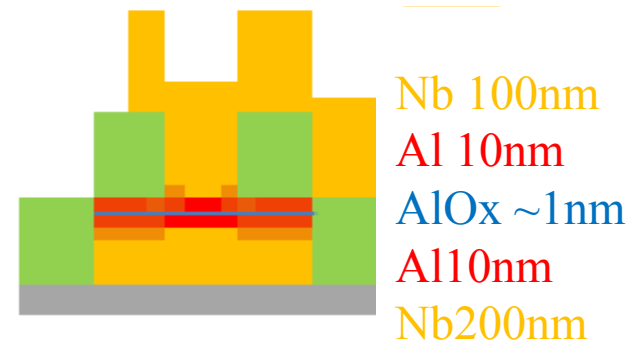
- 極低温プリアンプ開発

Fermilab, JAXA/ISAS, KEK, Tsukuba が共同研究



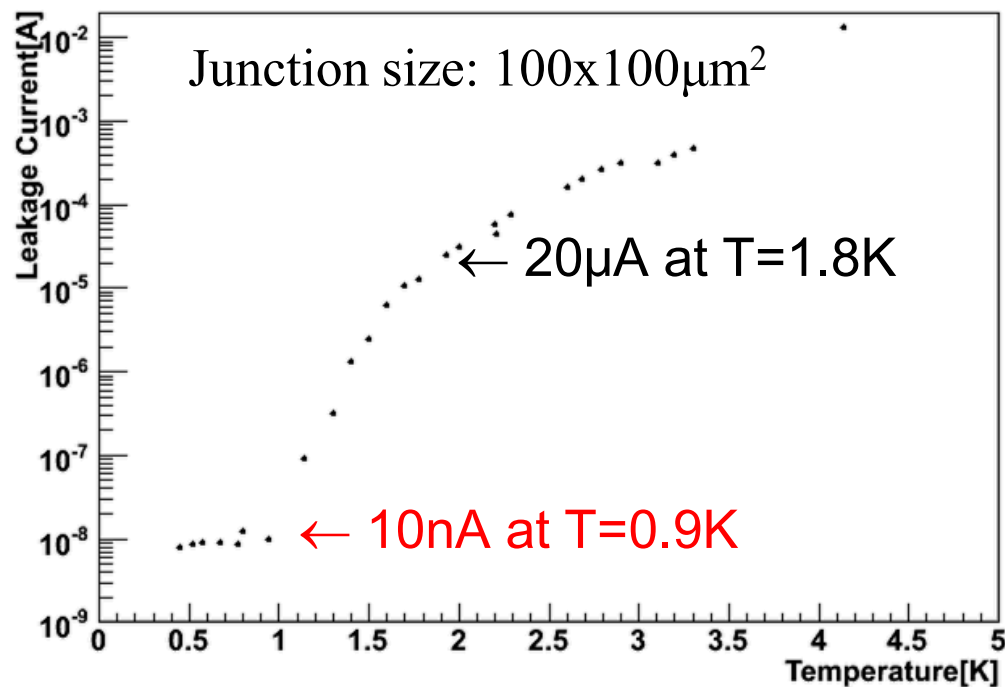
### Nb/Al-STJの構造

pixel size  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$



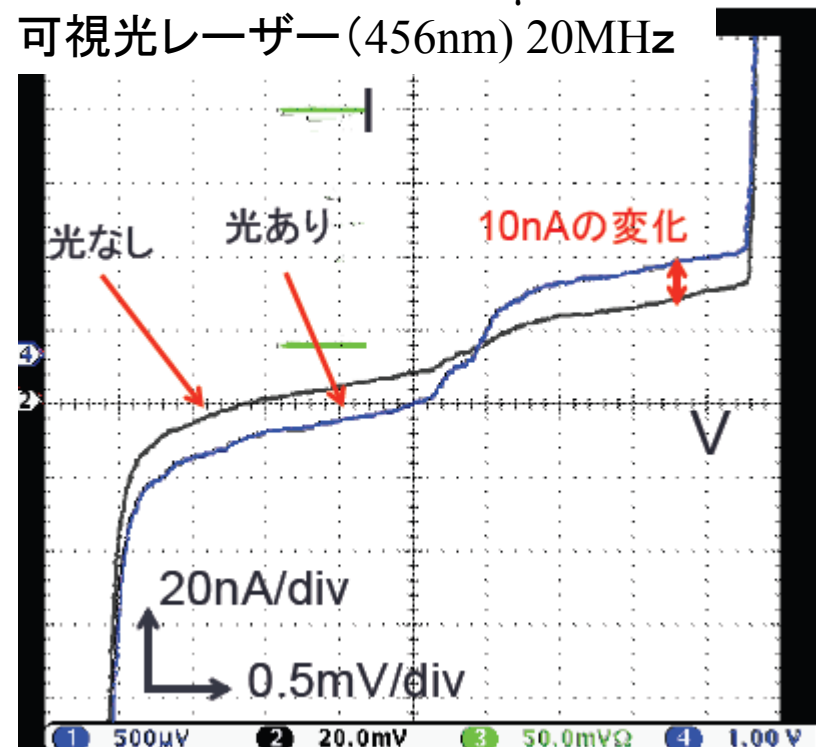
STJ信号応答速度が  $1 \mu\text{s}$  ならば、STJ のリーク電流への要求は  **$< 0.1 \text{nA}$**

# Nb/Al-STJ リーク電流の温度とサイズへの依存性



- $T < 0.9\text{K}$  でのSTJ運転が必要  
→ 実験では  $^3\text{He}$  吸収型冷凍機。  
○ H25年度大学予算で購入。  
○ ロケット搭載用  $^3\text{He}$  吸収型冷凍機の開発設計を開始した。

$T=1.8\text{K}$  Junction size:  $4 \mu\text{m}^2$   
可視光レーザー (456nm) 20MHz



リーク電流は  $10\text{nA}$  @  $0.5\text{mV}$  なので  
 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  の  $20 \mu\text{A}$  の  $1/2000$ 。ほ  
ぼ面積に比例。

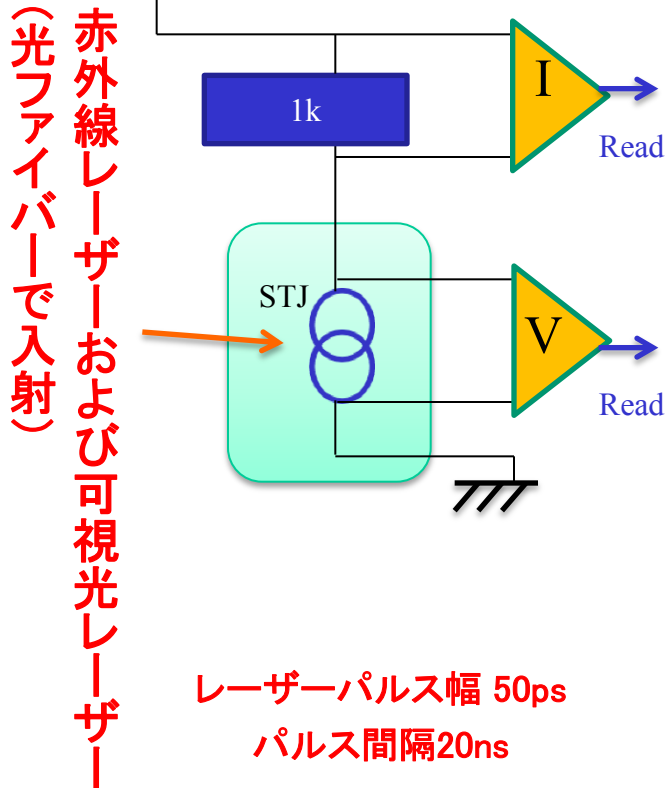
リーク電流がSTJサイズに比例する  
なら  $\sim 100 \mu\text{m}^2$  のSTJを用いて目標  
の  $0.1\text{nA}$  を達成できる

# Nb/Al-STJ光応答信号

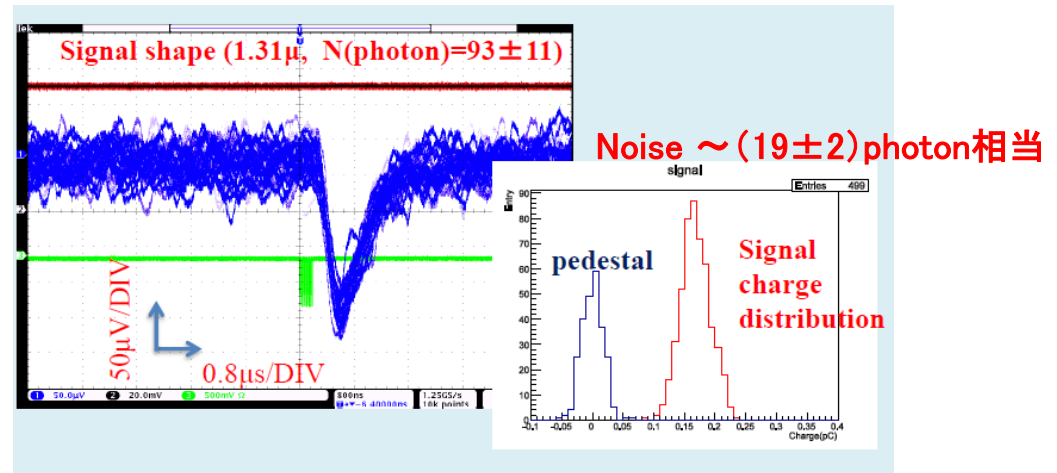
赤外線レーザー( $\lambda=1.31\mu\text{m}$ ),可視光レーザー( $\lambda=456\text{nm}$ )に対する応答信号

STJ size  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  Infrared light( $1.32\mu\text{m}$ ) 10pulses

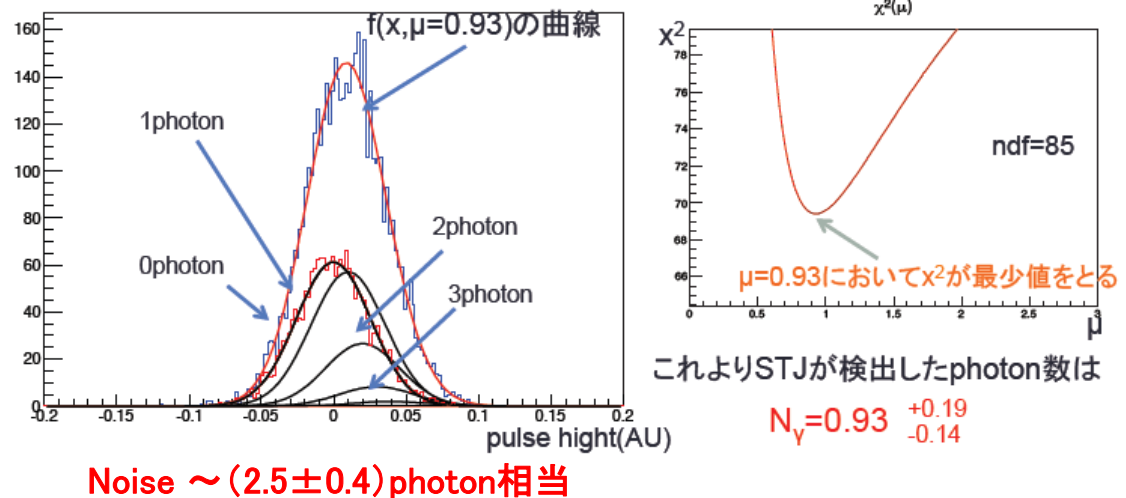
$T=1.8\text{K}$  (He減圧冷凍機)



現在のノイズの大きさはプリアンプのノイズで決まっている。



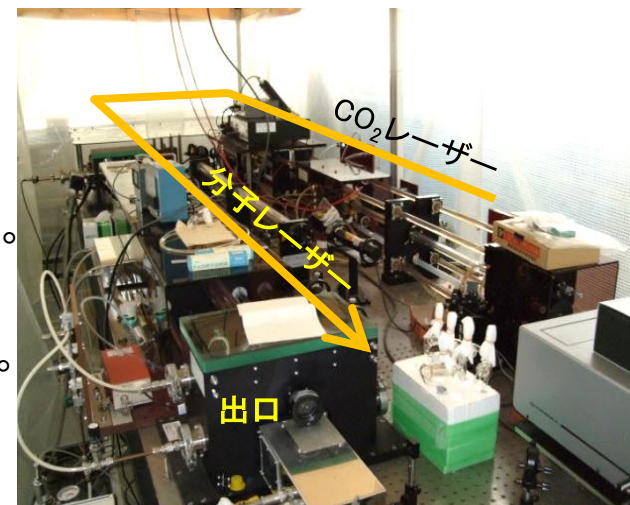
STJ size  $4 \mu\text{m}^2$  Visible light (456nm) 2pulses





# 遠赤外分子レーザー装置 (福井大学/中部大学 岡島研)

- CO<sub>2</sub>レーザーを1次電磁波源として、様々な種類の気体分子 (CH<sub>3</sub>OH, CD<sub>3</sub>OH, CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, ...) を励起させ、レーザー発振させる。
- 発振波長: 40μm ~ 500μmの間 ( $E_v$ : 31meV ~ 2.5meV) の約70本の単色発振線から任意の一つを選択できるように設計されている。  
(気体分子の種類、共振器の長さやCO<sub>2</sub>レーザーの波長の調節によって)
- 連続波発振、出力: 発振波長によって 0.1mW ~ 数百mW



これまでに確認した発振波長 ( $\nu_3$  の崩壊で予測される波長 50 ~ 100μm の領域を含めて)

43.7 μm (28 meV), 52.9 μm (23 meV), 86.4 μm (14 meV), 118.8 μm (10 meV), 453.4 μm (2.7 meV)

回転ミラーを用いた連続波のパルス化 (STJのテストの際、トリガー信号を作るため)

先にHe-Neレーザーでテスト、  
分子レーザーでもテスト開始  
連続波レーザー

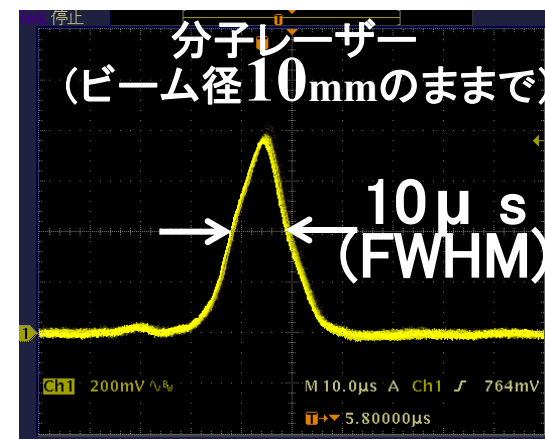
検出器上ではパルスになる  
検出器

He-Neレーザー: APD (1mmφ) で検出  
分子レーザー: 1.3mm長 Whisker アンテナで拾い  
GaAs ショットキーバリアダイオードで検波

回転ミラー



ミラーが3600rpmで回転



He-Neレーザー (ビーム径 ~ 0.7mm) によるテストでは、パルス幅 0.8 μs (FWHM) 達成。  
今後の課題: 分子レーザー (ビーム径 ~ 10mm) では、スリットや凹面鏡等で「ビーム径」や「広がり角」を絞る必要あり。ミラーから検出器までの距離 (今は80cm) も伸ばす。  
→ 目標: 1μs以下

# 観測データの収集・転送

近畿大学、筑波大学

## 観測データのサイズ

STJセンサー: 50 pixel X 8 row = 400 pixel  
Event rate: 300 Hz/pixel X 400 pixel = 120 kHz  
Data size: ADC 7 bit, 時間 10bit, pixel address 9bit

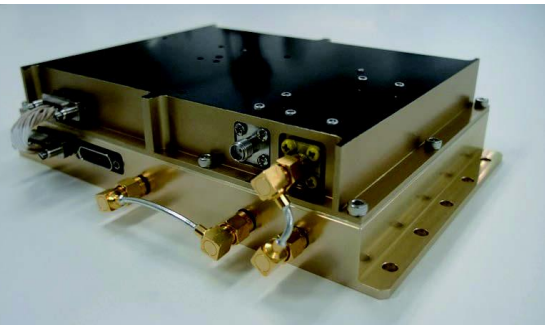


観測データを3.12 Mbps  
の転送速度で地上に送  
る必要がある。

観測ロケットの送信機の転送速度は100 kbps  
⇒ 要求される転送速度を満足する送信機が必要である。

## アクセルスペース社製送信機 AxelLink XT-2

- 小型人工衛星用X-band送信機として開発  
(サイズ: 180 x 120 x 43 mm、電力: 25W)
- X-band (8.025 – 8.35 GHz)、10 Mbpsのデータ通信が可能
- ロケット実験での利用可能性の検討の必要あり  
(地上局の条件、ロケットの振動条件、観測中の装置の  
姿勢安定性等)



X band 送信機 AxelLink XT-2

実験開始までに、地上において疑似局との間  
での送受信実験を行う必要がある。



# Fermilabにおける共同開発

## フェルミ研究所におけるNb/Al-STJ+HEMTプリアンプ性能試験

2013年8月1～14日, 8月26日～9月15日( 日本グループ5名、米国グループ5名)

### 2KでのSTJの性能試験

2014年2月13日～3月6日( 日本グループ7名、米国グループ6名):

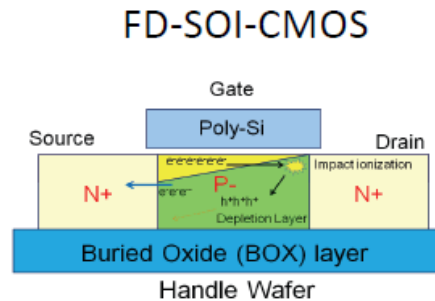
MilliKelvin Facilityの断熱消磁冷凍機

(ADR) を用いて、0.9KでNb/Al-STJ と  
HEMTプリアンプを組み合わせてI-V曲線  
と光応答を測定。

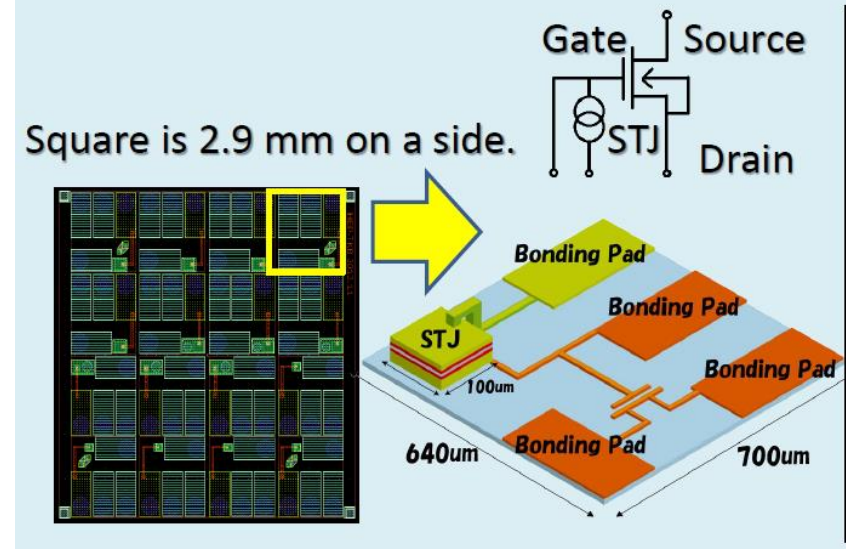


# SOI-STJ一体型検出器の試作・試験

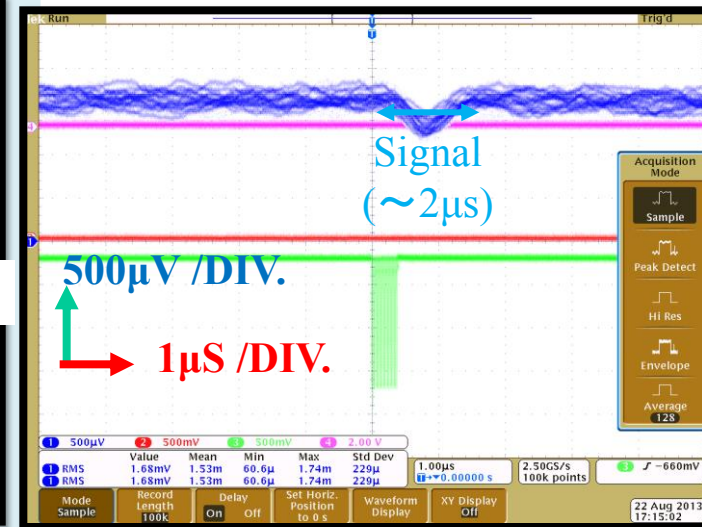
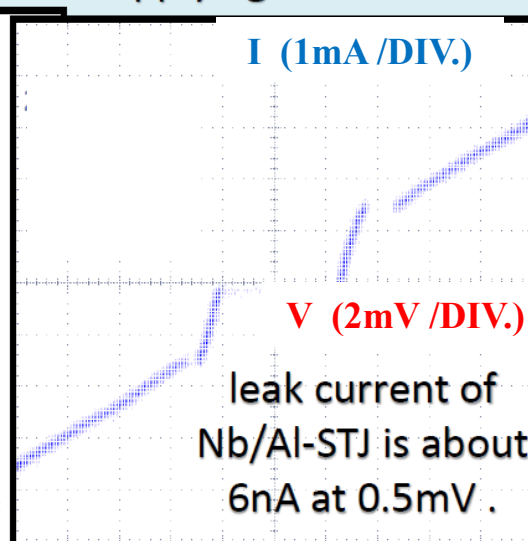
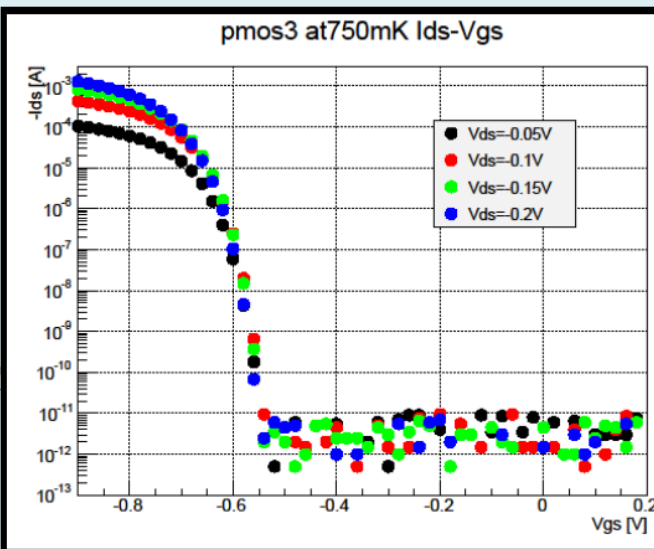
SOI (Silicon-On-Insulator)前置増幅器：  
極低温(0.9K)で作動する  
低ノイズ前置増幅器。  
Tsukuba-KEK-Lapis  
が共同開発。



SOIトランジスタ基板上に Nb/Al-STJ を作成  
してSOI-STJ一体型検出器1号試作機を製作。  
極低温(0.75K)でNb/Al-STJ検出器と  
SOI MOSFETが共に正常に動作した。



50 $\mu$ m角のSTJに可視光レーザー  
After applying 150 Gauss to STJ (465nm)を照射し、STJの信号確認



# SOI-STJ 2号試作機

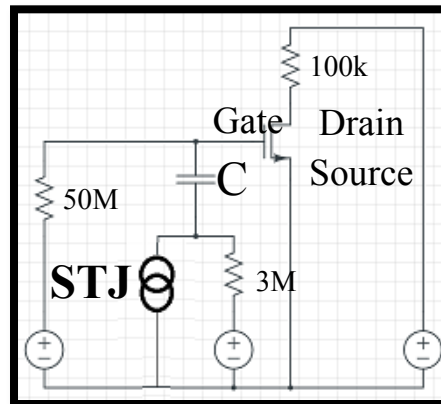
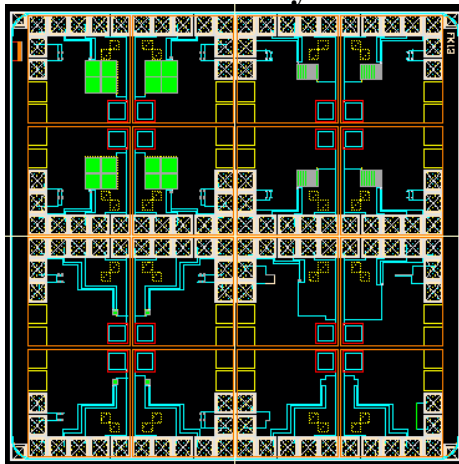
## SOI-STJ 1号試作機の問題点

- ❑ STJのBias電圧及び、Gate電圧の調節が難しい。
- ❑ Gate Capacitance が非常に大きいFETを使用しているため、STJの生成電荷数に対するGate電圧変化が十分に得られない。

波長 $50\mu\text{m}$ の1photonに対して予想される電流変化 $16\text{pA}$ ( $100e$ )に対してのDrain電流のシミュレーション結果

STJの疑似信号

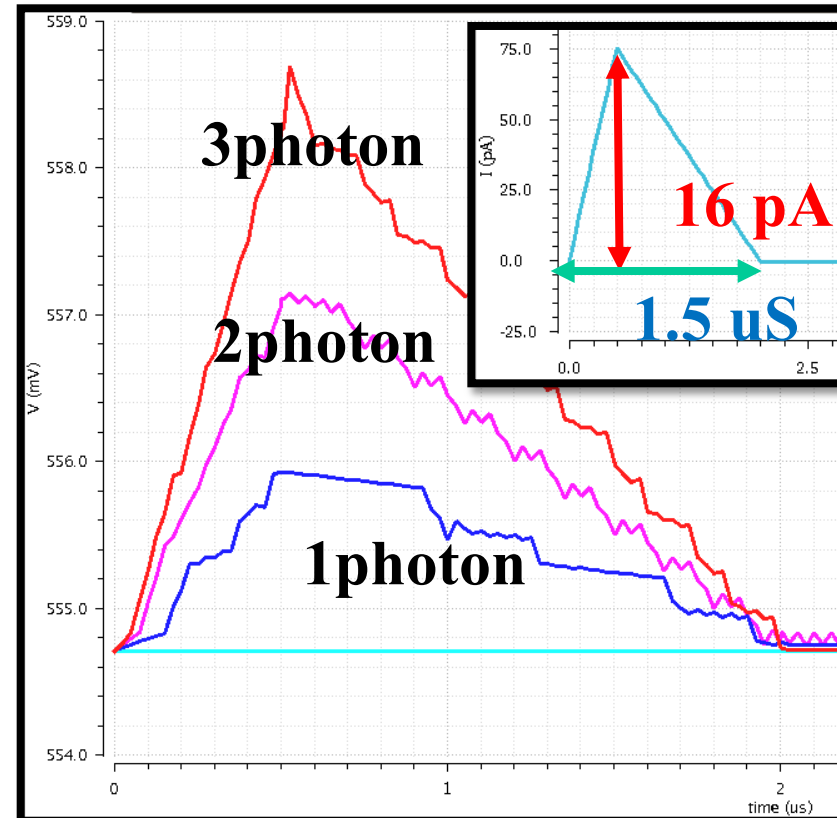
SOI-STJ2 Layout



Simulation回路

SOI-STJの2号試作機も $0.8\text{K}$ でSOIとSTJの基本性能が正常であることを確認。

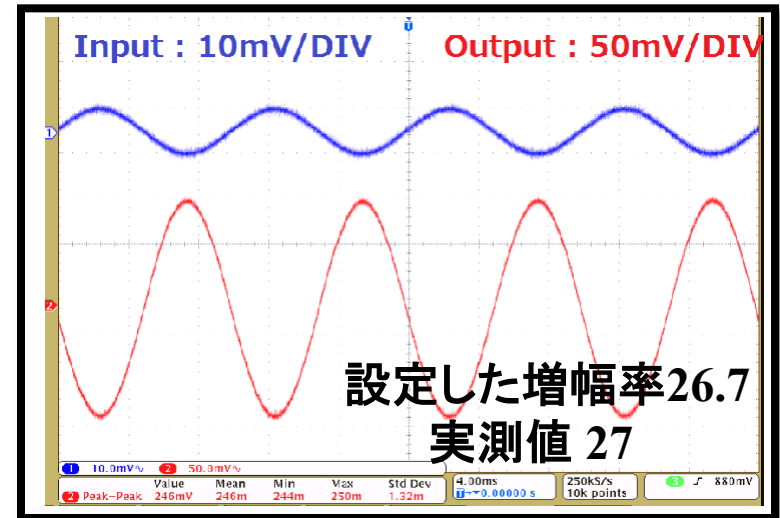
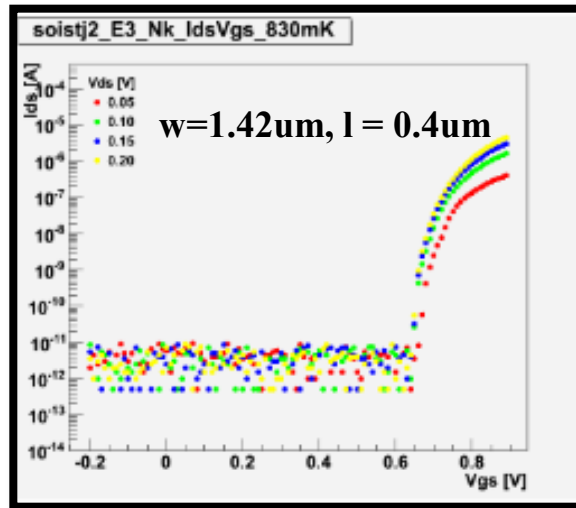
光応答信号をSOI MOSFETで増幅して観測することを目指して試験中。



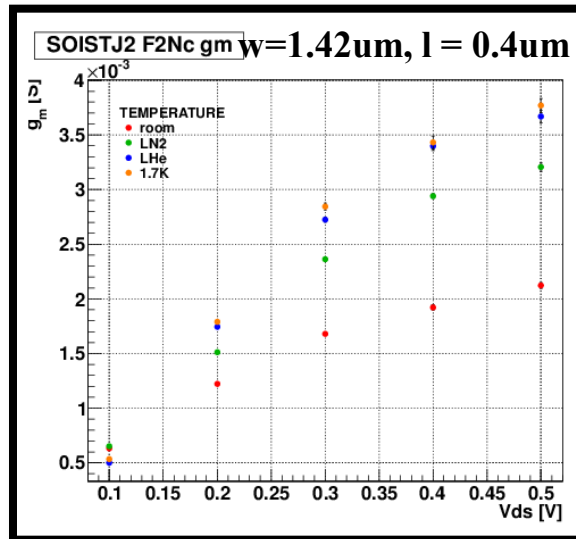


# SOI-STJ 2号試作機SOIFETの性能試験結果

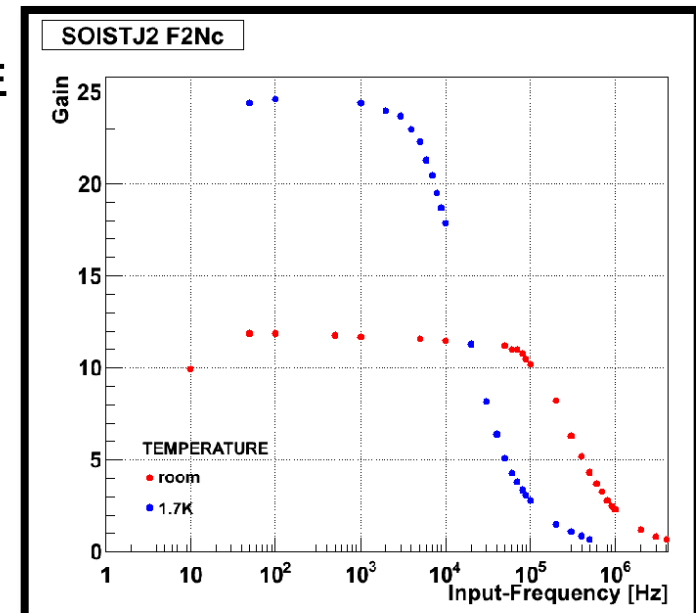
## I-V 曲線の温度依存性



## 相互コンダクタンスの温度依存性



## 増幅率の 周波数依存性



極低温における増幅器として十分使用可能。

# 平成25年度の成果のまとめ

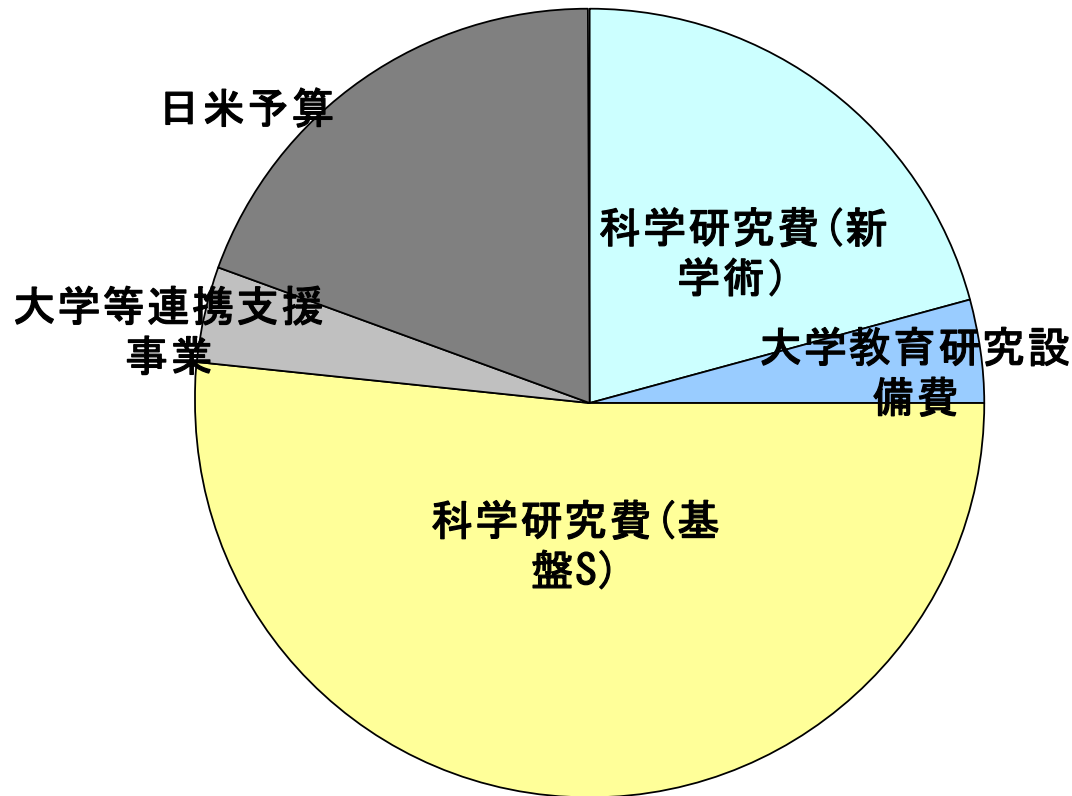
- Hf-STJ( $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ )の光応答信号を観測した。
- Nb/Al-STJ検出器の性能試験において、測定環境の整備とサイズの縮小によりノイズとリーク電流を大幅に下げること成功(S/Nで約30倍)。赤外線一光子信号を見るには1K程度で動作する極低温プリアンプを用いてS/N比を改善する必要あり。
- 遠赤外分子レーザービーム(波長48~450 $\mu$ )の試作で10 $\mu$ sパルスビームを確認。
- 極低温プリアンプ開発の成果として、以下のことがあげられる。
  - ・ SOI-STJ一体型の検出器試作を行い、極低温0.8KまでSOIのトランジスタが正常に動作するとともにSTJも正常に動作し光応答信号を出すことを確認した。

国際会議プロシーディング1篇、国際会議報告5編、修士論文1編、研究会・学会報告8件

# 平成26年度の開発目標

- Hf-STJのピクセルサイズをより小さくして( $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ や $100\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ )、ノイズとリーク電流の小さいSTJを試作して赤外線一光子信号を検出する。
- 極低温プリアンプを動作させ、Nb/Al-STJ検出器で赤外線一光子信号を検出する。
- マルチピクセルNb/Al-STJ検出器で性能試験を行う。
- 遠赤外線ビーム(波長 $40\mu\sim 200\mu$ )の開発を継続し、そのビームで Nb/Al-STJ検出器の応答をテストする。
- 極低温プリアンプ開発の目標は、以下のとおりである。
  1. SOI-STJ一体型の検出器開発を行い、性能試験を行う。現在SOI-STJ3号試作機を製作中(FET5個でプリアンプ形成)
  2. HEMT型プリアンプとNb/Al-STJをつないで、性能試験を行う。
- プリアンプ以降の読み出しエレクトロニクス(shaper, ADC)およびデータ収集・通信の設計試作を行う。
- 光学素子・光学系(回折格子と反射鏡)を設計試作して分光性能テストを行う。
- ロケット搭載用の0.9Kクライオスタットの設計試作を行う。

# 実験予算 ( H25 - H30)



筑波大学教育研究設備費	無冷媒3He吸収型冷凍機	平成25年度 採択	16,000千円
科学研究費補助金新学術領域「ニュートリノ」計画研究	ニュートリノ崩壊探索実験に用いる超伝導赤外線検出器の開発	平成25－29年度 採択	60,000千円
科学研究費補助金基盤(S)	宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験	平成26-30年度 申請中	198,000千円
KEK大学等連携支援事業	筑波大-KEK連携を核としたつくば教育研究拠点の構築に向けて(内素粒子分)	平成26年度 申請中	15,000千円

## 平成26年度所要経費

金額(千円)		
データ収集システム	1式	1,500
冷凍機改良経費(温度計,ノイズ遮蔽等)		1,500
分光素子・光学系		1,500
超伝導検出器試作(マスク作成,Hfターゲット,Si基板等)		2,500
読み出し系増幅器開発(極低温プリアンプ,シェーパー)		7,800
フェルミ研経費(レンタカー等)		200
総計		15,000



**BACKUP**

# 平成25年度の成果発表(1)

## 国際会議報告

1. "Search for Cosmic Background Neutrino Decay with STJ detectors" Y. Takeuchi, Microwave Kinetic Inductance Detectors and Cosmology @FNAL, Aug. 26-27, 2013
2. "Search for Cosmic Background Neutrino Decay" S. H. Kim, APPC12 @ Makuhari, July 17, 2013
3. "Search for Cosmic Background Neutrino Decay with STJ detectors" S. H. Kim, poster session in SPICA International Conference 2013 @ University of Tokyo, June 18-21, 2013
4. "Search for Cosmic Background Neutrino Decay" Y. Takeuchi, Poster session, CMB2013, International Conference on Cosmic Microwave Background @ Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST) Jun. 10-14, 2013
5. "Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector on SOI Preamplifier Board to Search for Radiative Decays of Cosmic Background Neutrino" K.Kasahara, Poster session CMB2013 @OIST Jun. 10-14, 2013
6. "Development of Nb/Al superconducting tunnel junction detector of a single infrared photon to search for radiative decay of the cosmic background neutrinos" T.Okudaira, Poster session CMB2013 @OIST Jun. 10-14, 2013

## 修士論文

1. 笠原宏太「ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のためのSOI-STJ一体型検出器の開発研究」修士論文(筑波大)2013年2月

# 平成25年度の成果発表(2)

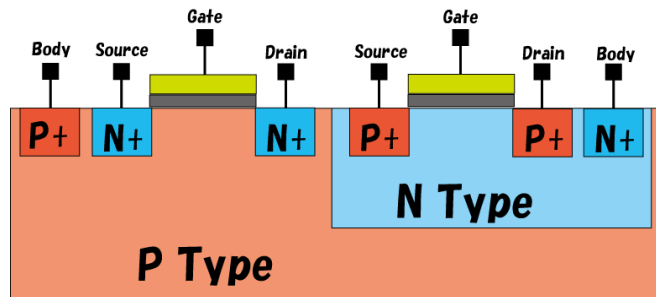
## 国内研究会・学会報告

1. "宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験設計と検出器開発" 武内勇司 「ニュートリノフロンティア」研究会 2013年12月7-8日
2. "SOI-STJ検出器開発" 笠原宏太, 「ニュートリノフロンティア」研究会 2013年12月7-8日
3. "Nb/Al-STJ、Hf-STJ検出器開発" 奥平琢也, 「ニュートリノフロンティア」研究会 2013年12月7-8日
4. "STJ検出器の較正に用いる遠赤外線源の開発" 小村祥太(福井大), 「ニュートリノフロンティア」研究会 2013年12月7-8日
5. "ニュートリノ崩壊からの遠赤外光探索のためのSOI-STJの研究開発" 笠原宏太, 日本物理学会2013年秋季大会
6. "ニュートリノ崩壊光探索のためのNb/Al-STJの研究開発" 奥平琢也, 日本物理学会2013年秋季大会
7. "ニュートリノ崩壊光子探索用STJ検出器の較正に用いる遠赤外分子レーザーの性能評価" 小村祥太(福井大), 日本物理学会2013年秋季大会
8. "宇宙背景ニュートリノ崩壊探索" 金 信弘, 「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2013年4月21日

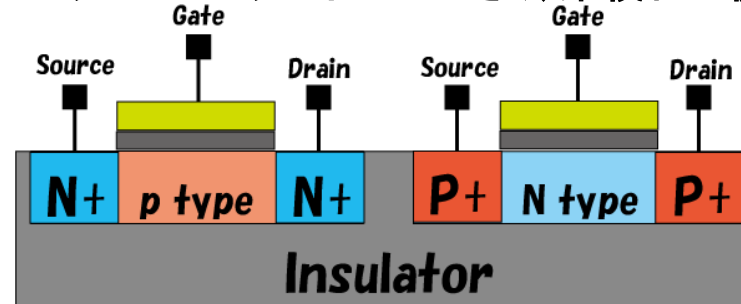
# SOI(Silicon on Insulator)と極低温でのふるまい

**Silicon on Insulator**・・・FET等の素子を絶縁膜上に形成する技術。

- 通常PN接合逆バイアスによる空乏層で素子間を分離するのに対し、絶縁膜により分離されるためクロストークノイズが小さく、集積化に優れている。



Bulk-CMOS

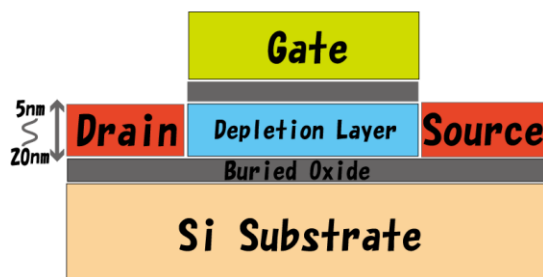


SOI-CMOS

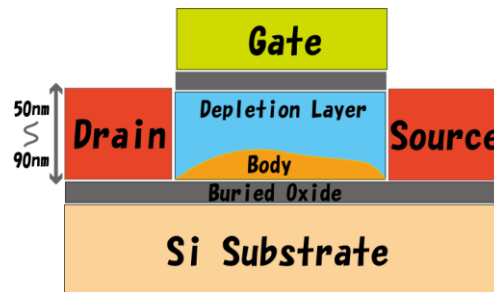
## 極低温での動作

通常、極低温ではFETはキャリアの移動度が上昇する事により、空乏層で電荷が次々と生成されてしまう。・・・過電流や閾電圧の変動といった誤作動の原因

FD-SOI



PD-SOI



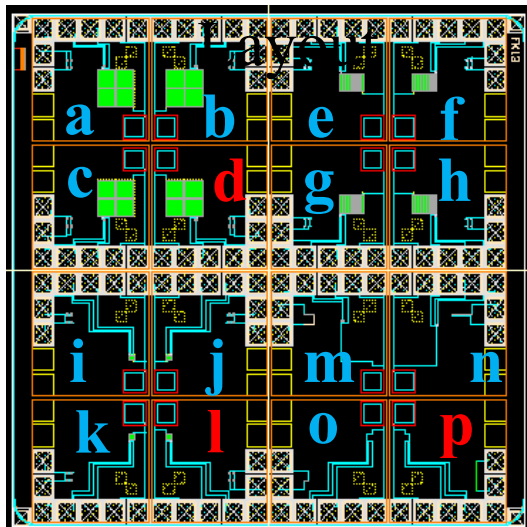
- 空乏層領域の非常に薄いFD-SOIプロセスによって形成されたデバイスでは上記の誤作動が抑えられる。
- また、source-tie typeを用いる事で、空乏層内で発生した電荷がBodyに帯電することをふせぐ。

# SOI-STJ2回路設計

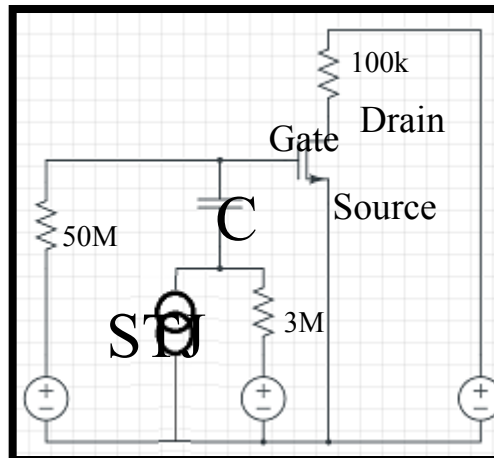
SOI-STJ2の適切なパラメーターはSTJの発生電荷量によって異なる。

CELL名	Capacitance	FETの大きさ	Cgate
a, b, c, d	60 pF	w = 4 x 10 $\mu$ m, l = 1 $\mu$ m	320 fF
e, f, g, h	18 pF	w = 4 x 1 $\mu$ m, l = 1 $\mu$ m	32 fF
i, j, k, l	1.5 pF	w = 1.42 $\mu$ m, l = 0.4 $\mu$ m	4.5 fF
m, n, o, p	なし	w = 1.42 $\mu$ m, l = 0.4 $\mu$ m	4.5 fF

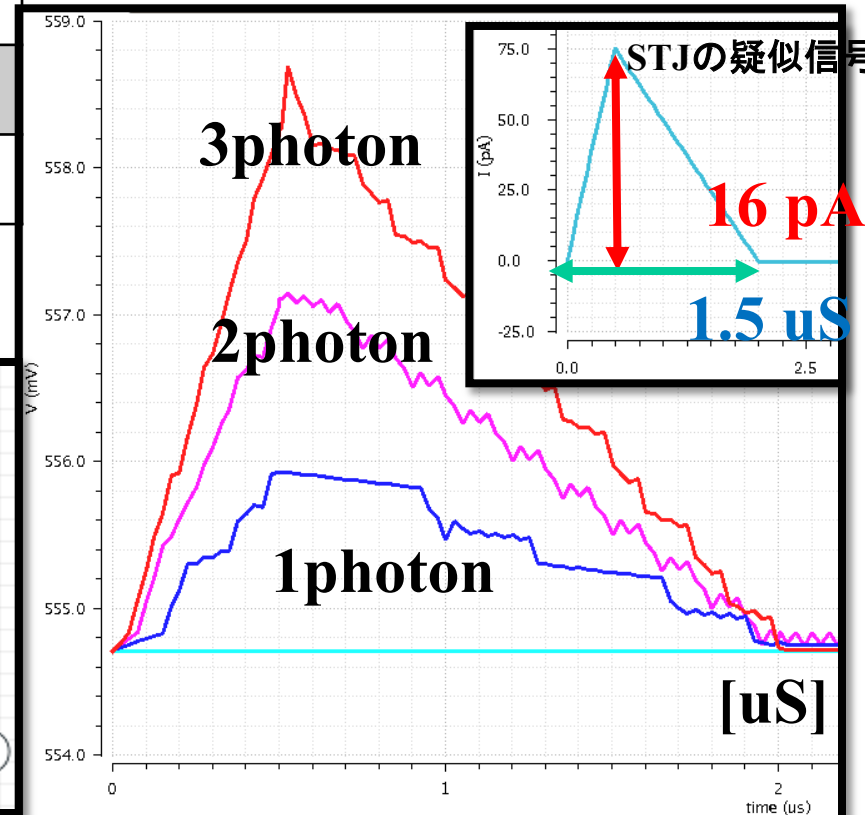
SOI-STJ2



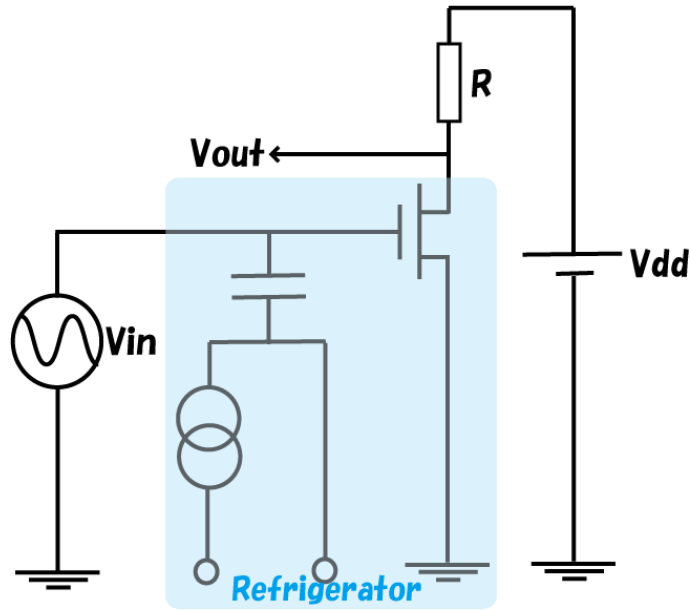
Simulation回路



Gal = 10 とした時の波長50 $\mu$ m 1photonに対して  
予想される電流変化16pA(100e)に対しての  
Drain電流のシミュレーション結果



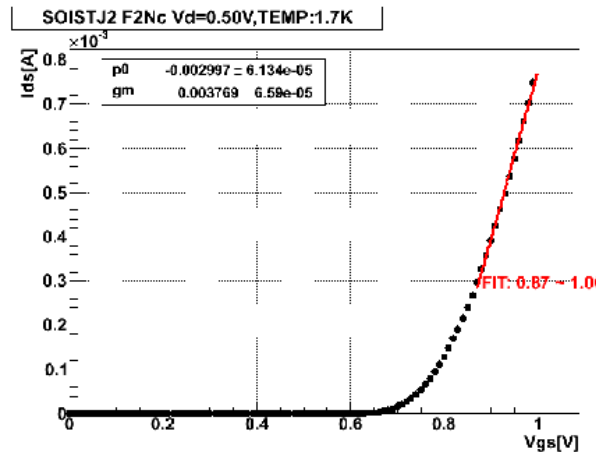
# SOIFETの増幅器としてのふるまい



FET単体で最も単純に増幅作用を得られるソース接地増幅回路としてのふるまいを極低温にて確かめた.

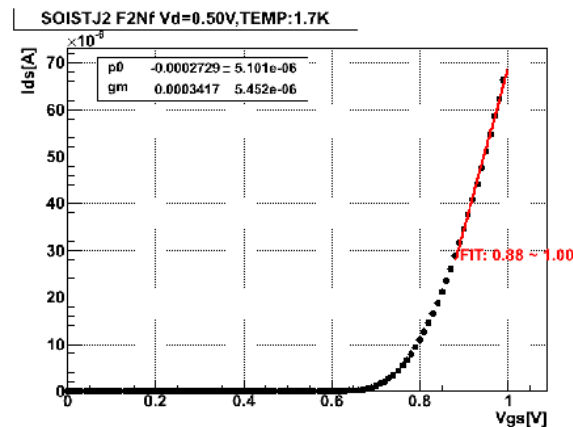
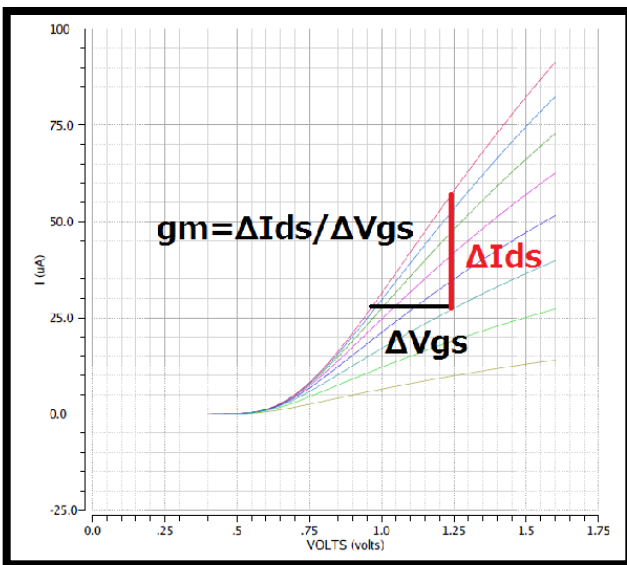
この回路における増幅率は

$$\text{Gain} = g_m * R$$



$$W=10\mu\text{m} * 4, L=1\mu\text{m}$$

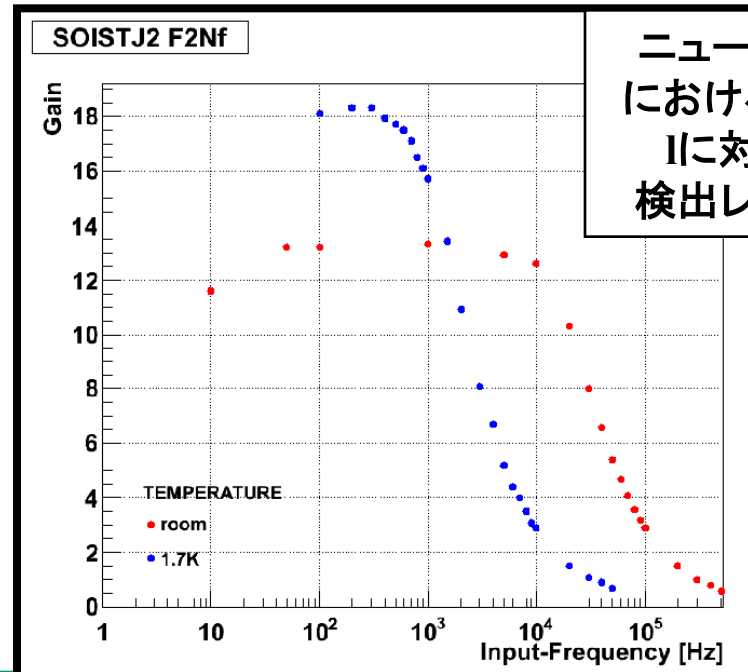
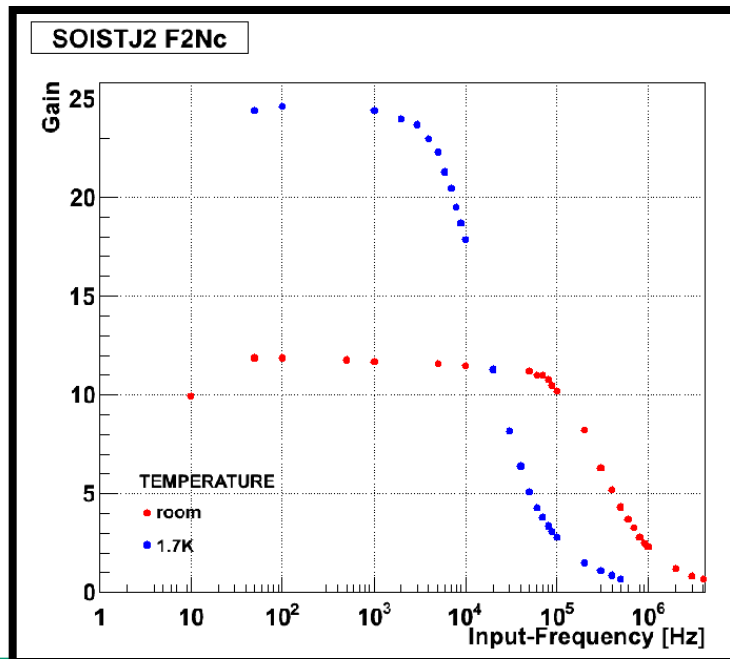
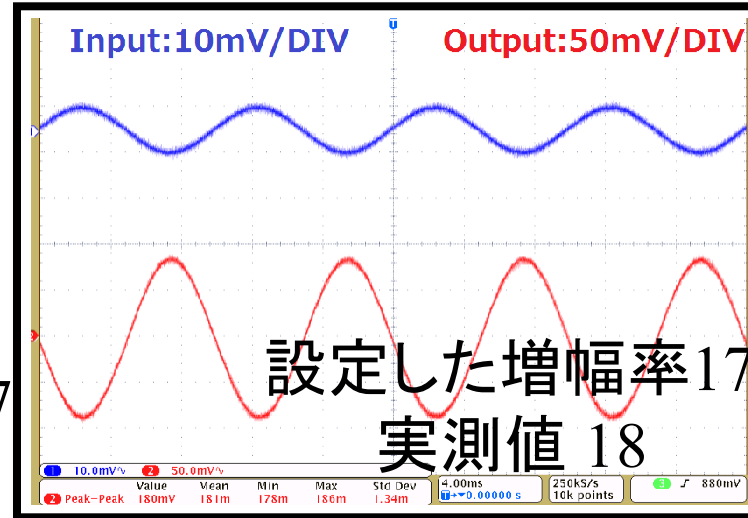
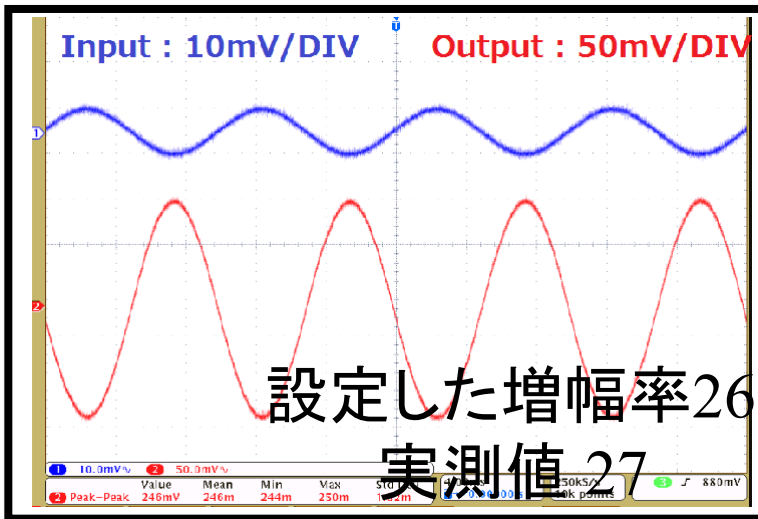
$$G_m=0.003769$$



$$W=1\mu\text{m} * 4, L=1\mu\text{m}$$

$$G_m=0.0003469$$

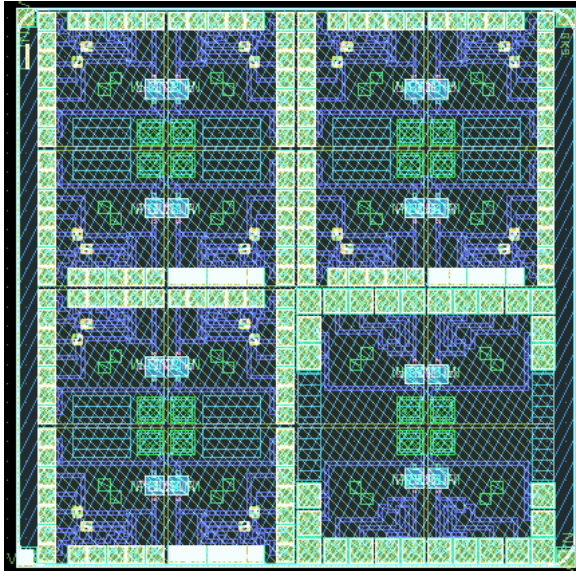
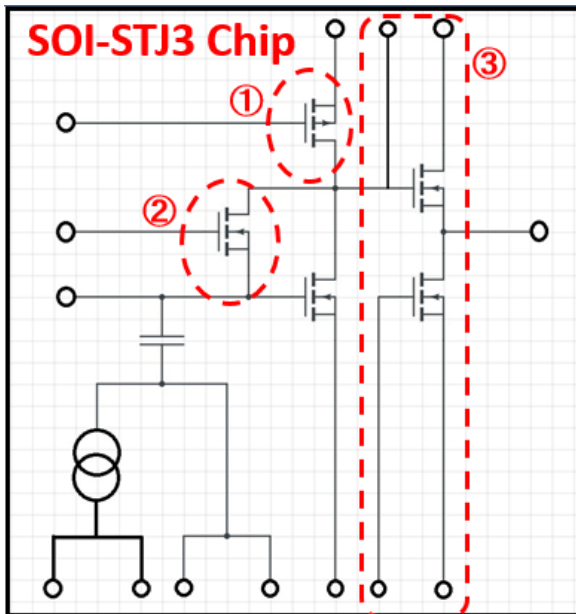
# SOIFETの増幅器としてのふるまい



ニュートリノ崩壊光探索  
におけるNb/Al-STJ1pixe  
lに対して予想される  
検出レートは**200-300Hz**



# SOI-STJ3



SOI-STJ2の性能評価を現在行っているが、これより安定した動作が実際の実験では要求される。



読み出し回路のテストのため、

SOI-STJ3を設計。

(400uW以下になる様にW/Lを選択)

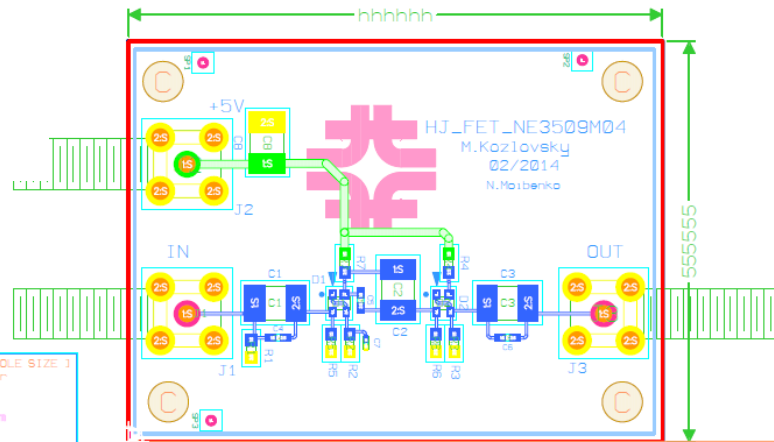
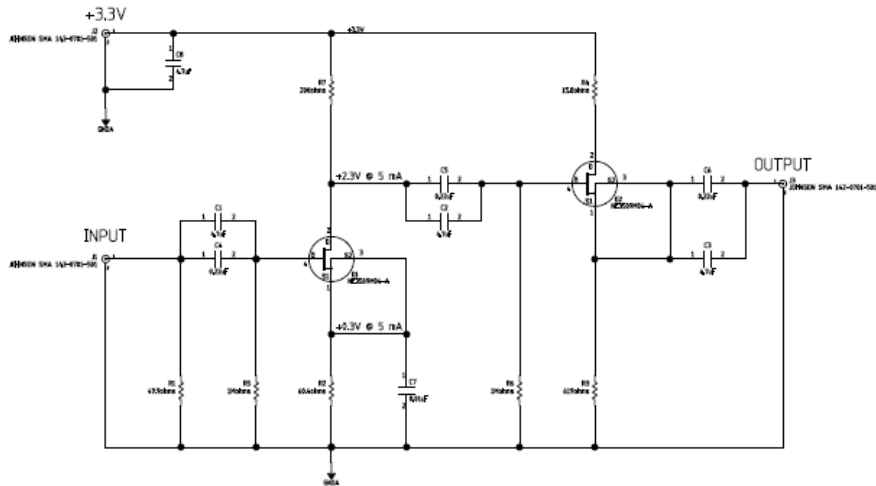
## SOI-STJ2との違い

- ①前回までは負荷抵抗を用いていたが、PMOSに変更。飽和領域で動作させ、 $O(10^7 \sim 8) \text{ Ohm}$
- ②増幅に用いるNMOSのバイアス電圧がかなりふらつく。抵抗のフィードバックを入れる事で適切なバイアス点で落ち着かせる。波形はこの抵抗と増幅のためのNMOSゲートキャパシタンスのRCで決まる。
- ③不可抵抗をPMOSにしてGAINは100程度に設定できたが、出力インピーダンスが非常に高くなってしまっている。出力前にバッファを入れる。

現在Lapis semiconductorにて成膜中、完成後、性能評価をおこなう。



# HEMT preamplifier R&D at Fermilab



- Gain: x 25
- Power Dissipation: 20mW