

# 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)

- はじめに
  - 動機
  - 実験方法
- 実験装置とスケジュール
- 赤外線光子検出器(超伝導トンネル接合素子STJ)の開発

# 共同研究者

## 日本:

金 信弘, 武内勇司, 永田和樹, 笠原宏太, 奥平琢也 (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, 小林祥太, 折笠桂輔 (福井大学),  
加藤幸弘 (近畿大学),  
羽澄昌史, 新井康夫 (KEK)

## 米国:

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

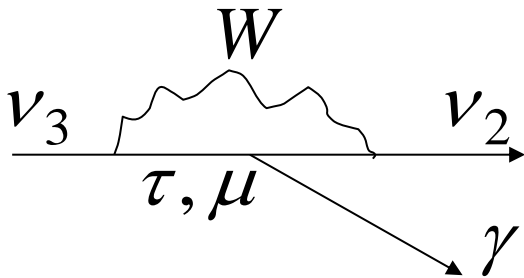
## 韓国:

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。



$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3} = \frac{\Delta m_{23}^2}{2m_3}$$

$$\Delta m_{23}^2 = (2.43 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ より}$$

$$\nu_3 \text{ 静止系で } E_\gamma = 10 \sim 25 \text{ meV}$$

$$(\text{遠赤外線領域: 波長} = 50 \sim 125 \mu)$$

●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**  $\text{SU}(2)_L \otimes \text{SU}(2)_R \otimes \text{U}(1)$  模型では、  
質量下限  $M(W_R) > 715 \text{ GeV}/c^2$ , 混合角上限  $\zeta < 0.013$ ,

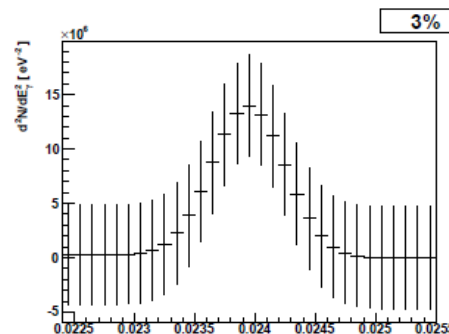
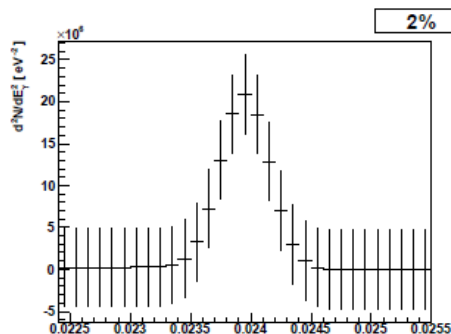
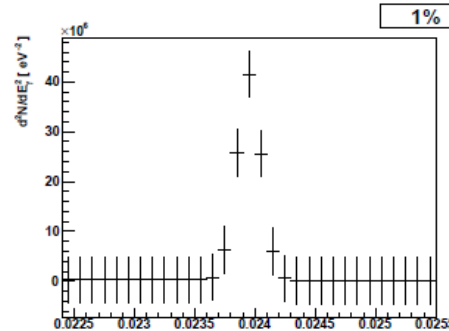
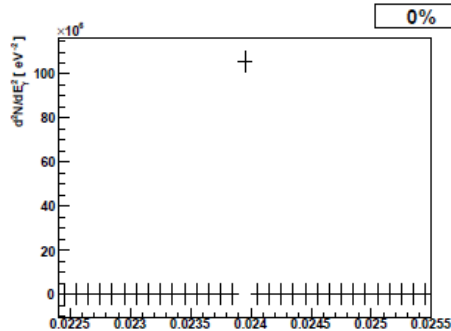
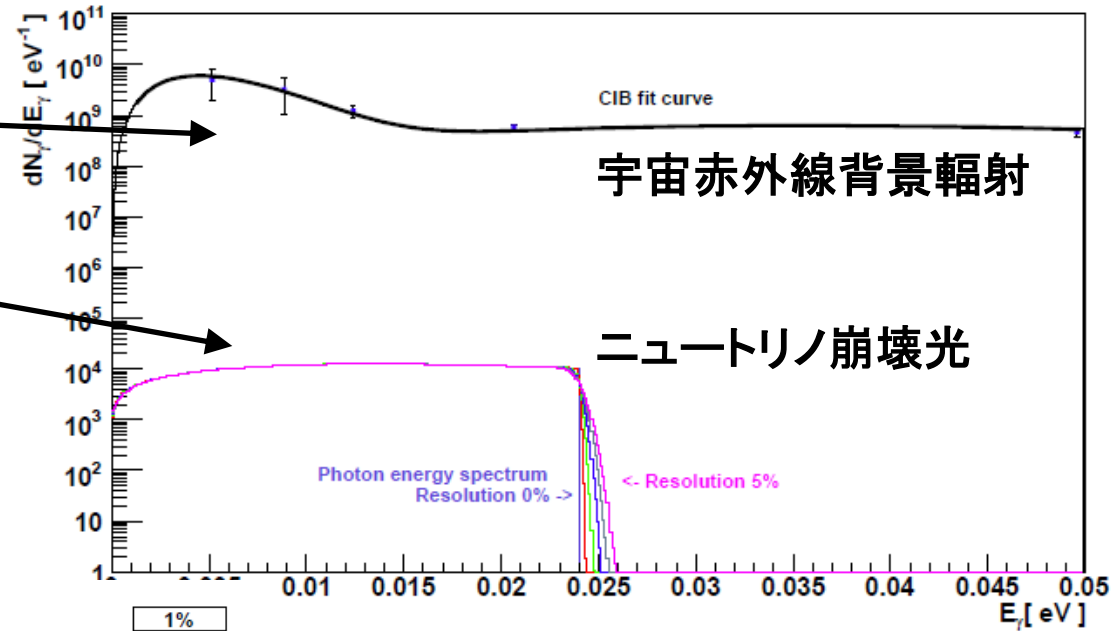
$m_3 = 50 \text{ meV}$  を用いて計算すると

$$\tau(\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma) = 1.5 \times 10^{17} \text{ year} \quad (\text{標準模型では } 2.1 \times 10^{43} \text{ year})$$

# 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%

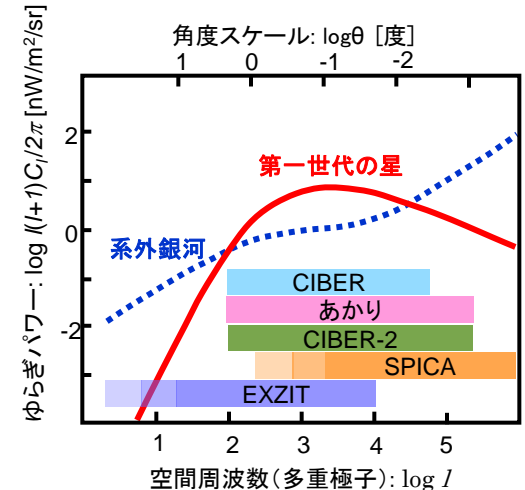
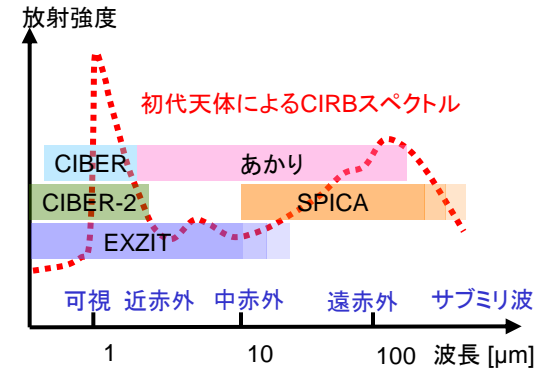
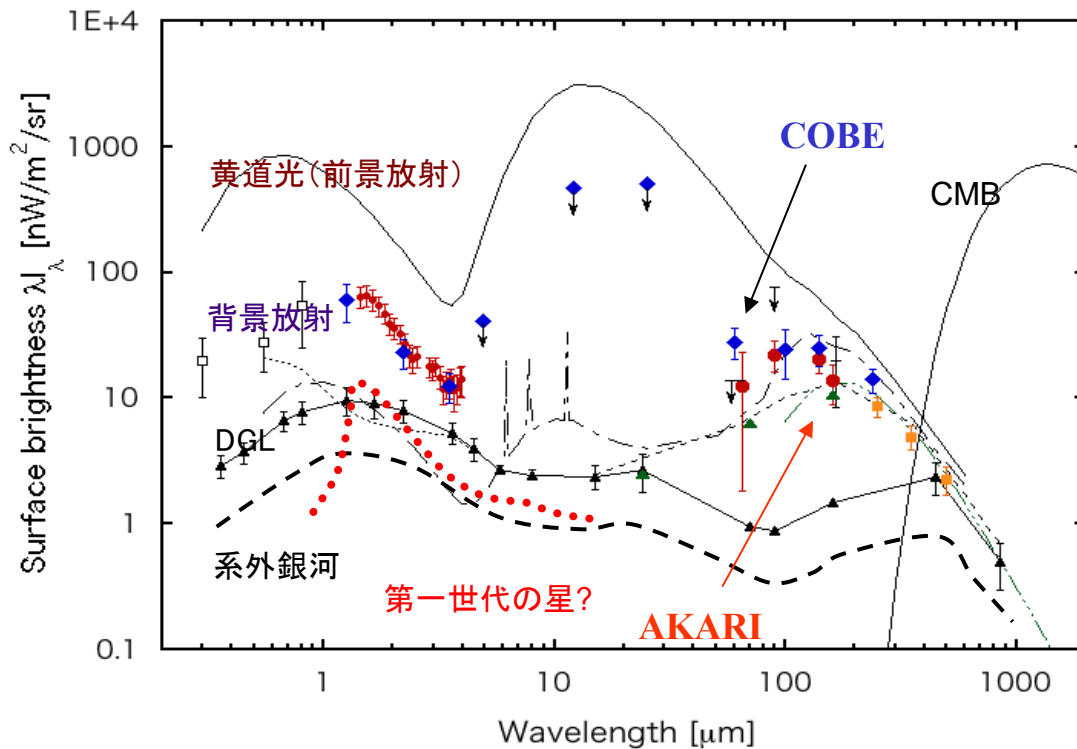
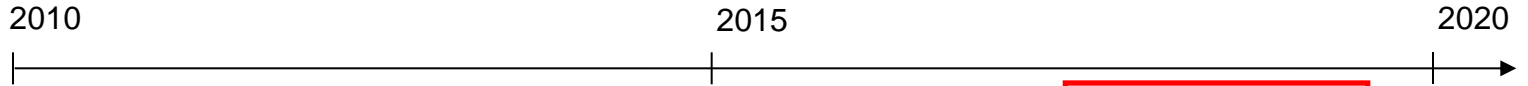


$dN/dE_\gamma$

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

- 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)  $3 \times 10^{12}\text{年}$

# CIB Observation Plan ( by JAXA Dr. Matsuura)



# 予定

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
実験設計 (金、松浦)	SPICA衛星等による実験					
	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2Kエレクトロニクス(池田、武内、FNAL、KEK)	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)	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	

遠赤外線観測ロケット実験

# ニュートリノ崩壊探索のための赤外線観測ロケット実験装置

CIBER Rocket Experiment  
(Feb 25, 2009)

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



Focal plane Instruments

Grating

$d=1\text{mm}$

Tertiary  
mirror

$m=0$

$m=1$

$D=10\text{cm}$

$x=5\text{mm}$

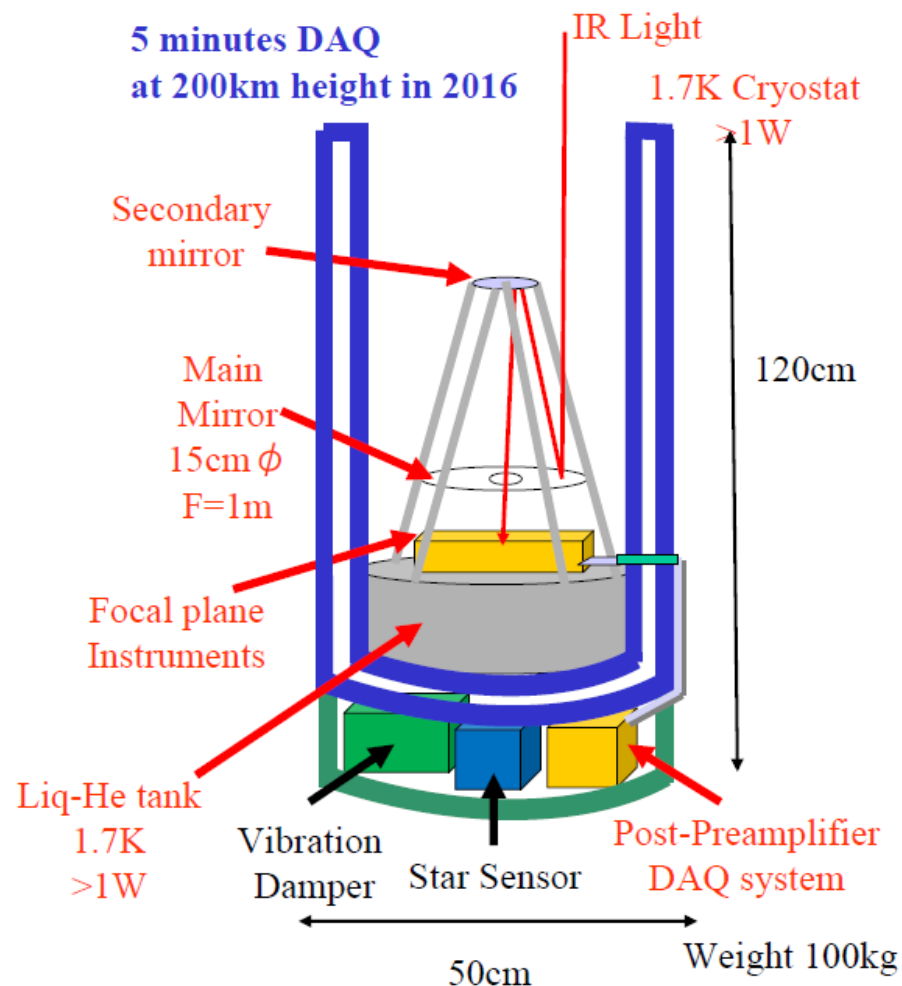
Preamplifier(2K)

STJ Detector  
Array  
(50 x 8 channels)

50pixels

$\Delta x=100\mu$

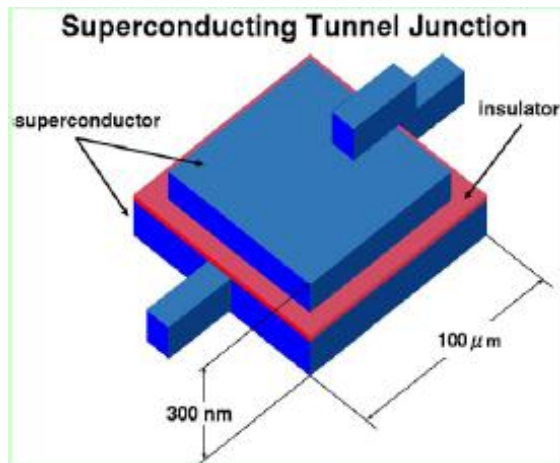
8pixels



# 超伝導トンネル接合素子検出器

## STJ (Superconducting Tunnel Junction) Detector

- Superconductor / Insulator / Superconductor Josephson Junction

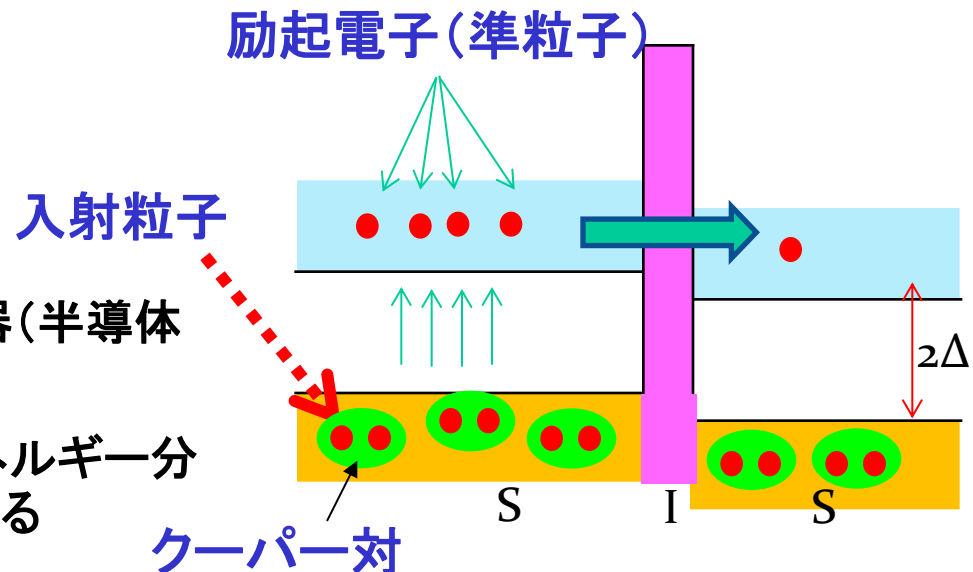


2つの超伝導膜の間に1～2 nm  
の絶縁体のトンネル障壁。

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

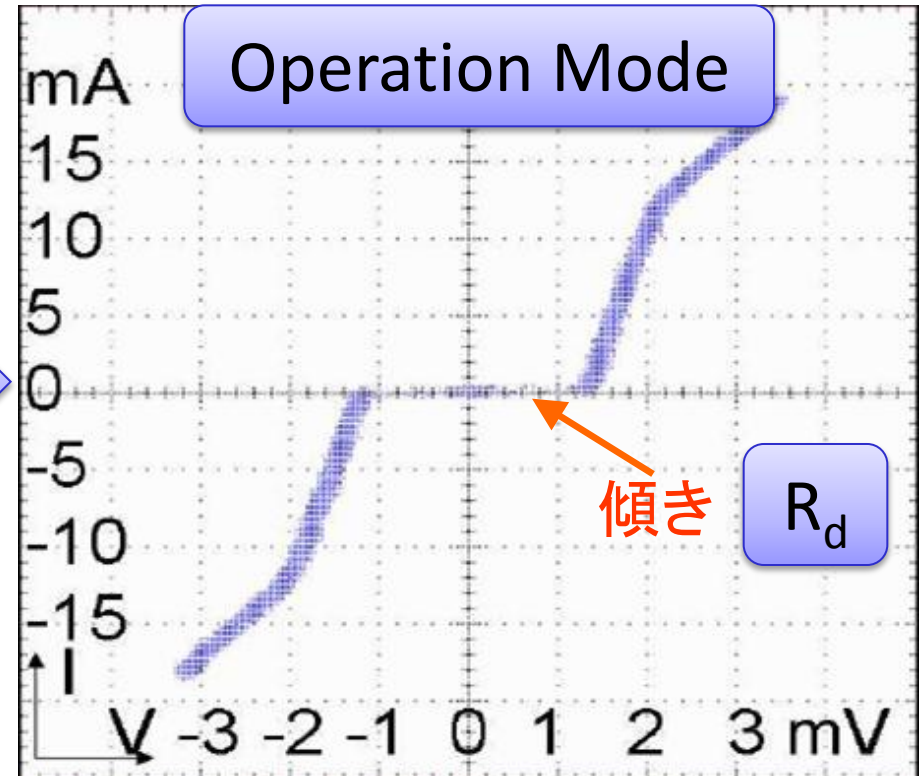
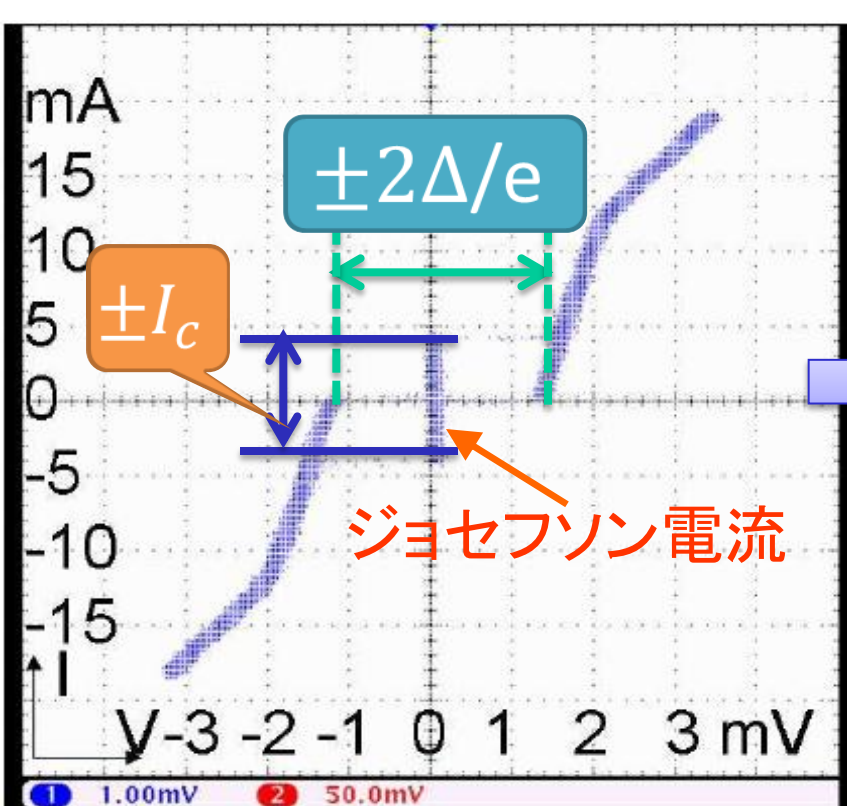
$T_c$ の1/10程度の温度で運転

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

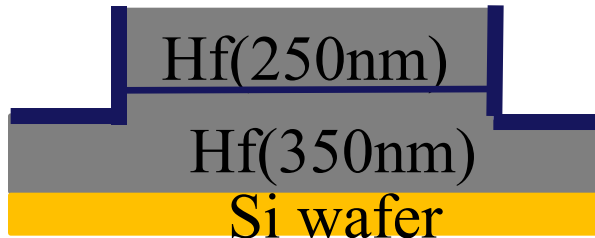
## Nb-STJ 電流電圧 (I-V) 曲線

- ・ 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膜面に平行方向の磁場によって消失する。

# Hf-STJ 開発成果(2012年度)



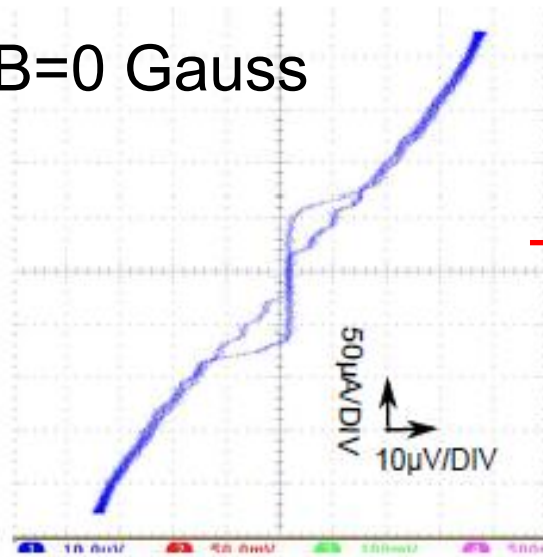
HfO<sub>x</sub>: 20Torr, 1hour  
陽極酸化膜: 45nm

200×200μm<sup>2</sup>

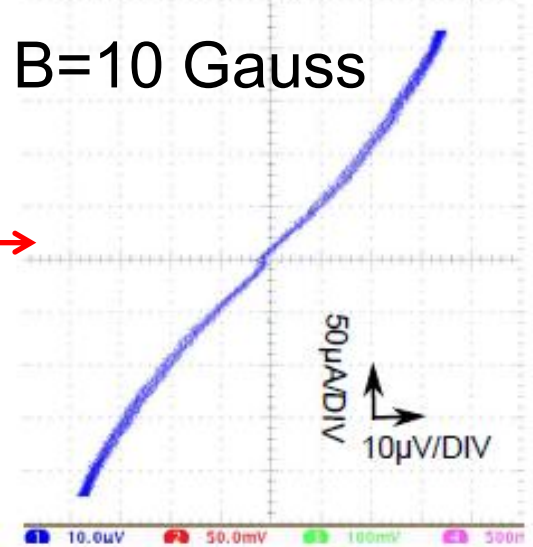
T=80~177mK

I<sub>c</sub>=60μA R<sub>d</sub>=0.2Ω

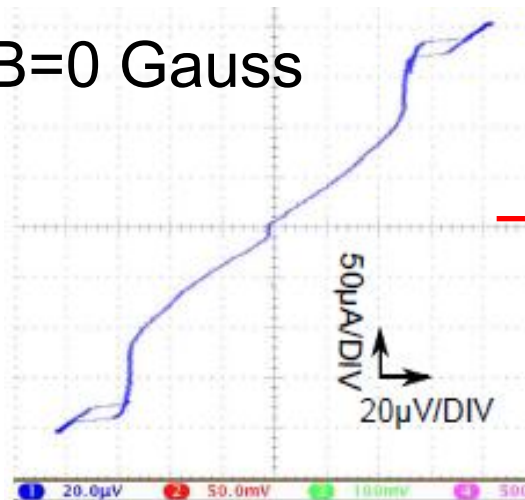
B=0 Gauss



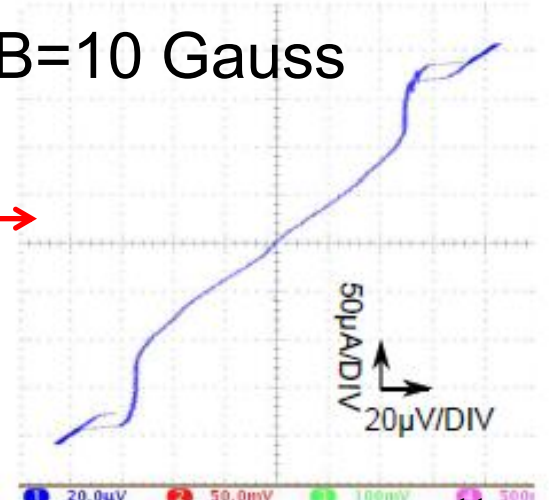
B=10 Gauss



B=0 Gauss



B=10 Gauss



100×100μm<sup>2</sup>

T=39~53mK

I<sub>c</sub>=10μA R<sub>d</sub>=0.6Ω

- STJサイズの減少によって、リーク電流とノイズが30%程度に減少した。

# 遠赤外光分光

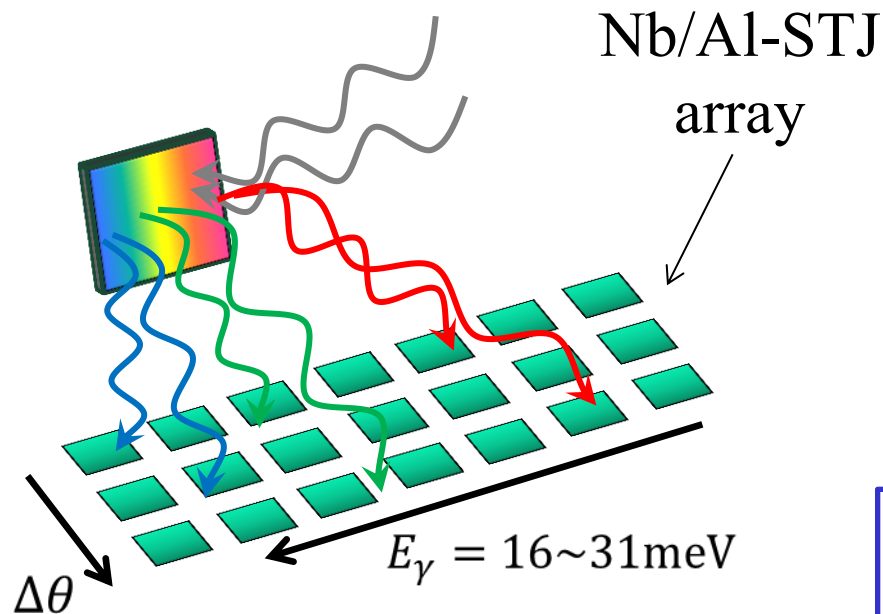
## 回折格子 + Nb/Al-STJアレイ

- 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 ( $E = 25 \text{meV}$ )  $\sim 100$

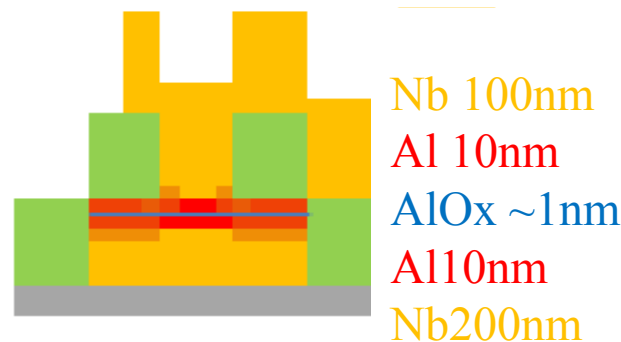
- 極低温プリアンプ開発

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



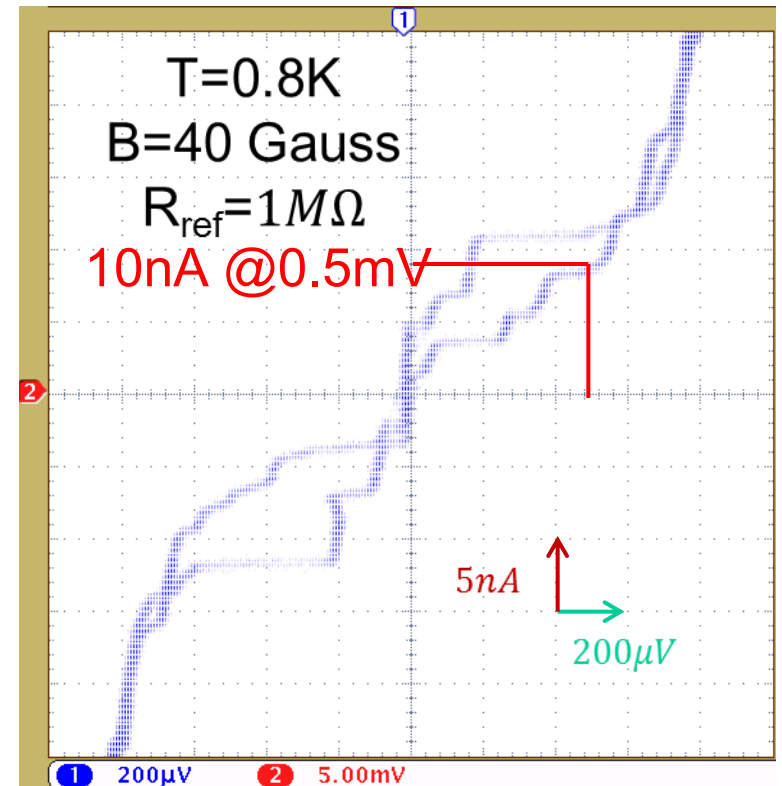
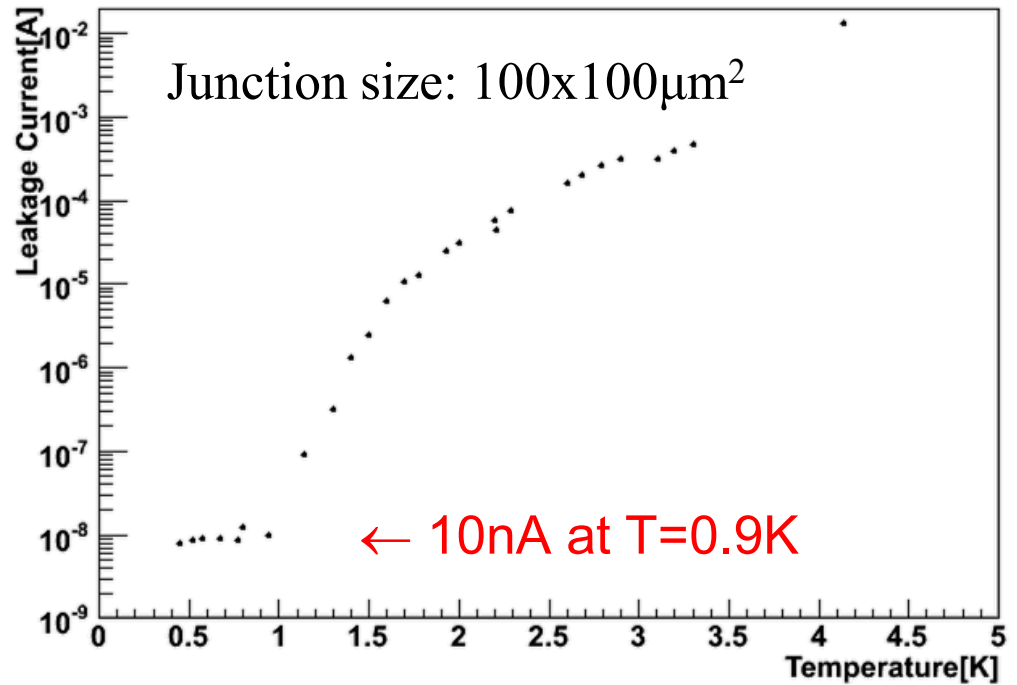
### Nb/Al-STJの構造

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 リーク電流の温度依存性



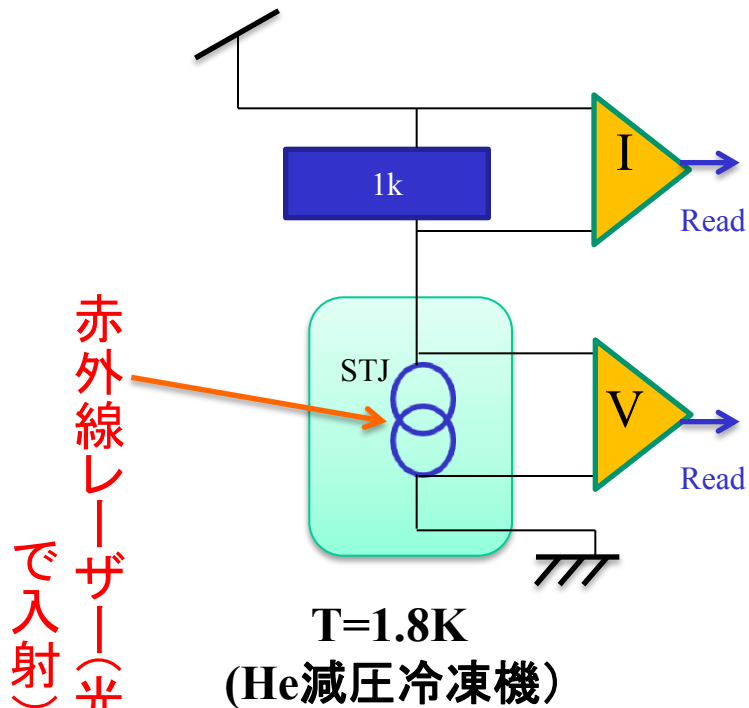
T<0.9K でのSTJ運転が必要  
→実験では  $^3\text{He}$ 吸収型冷凍機が  
ADR 冷凍機が必要

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0.1nAを達成できる

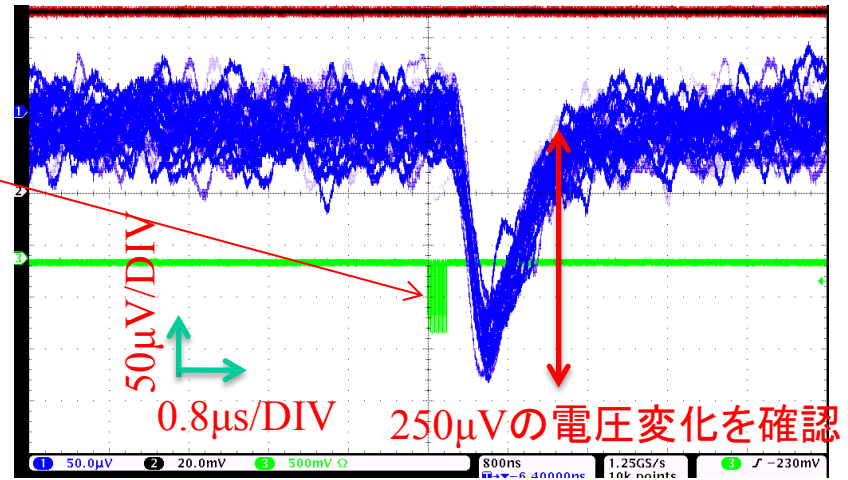
# Nb/Al-STJ赤外光応答信号

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

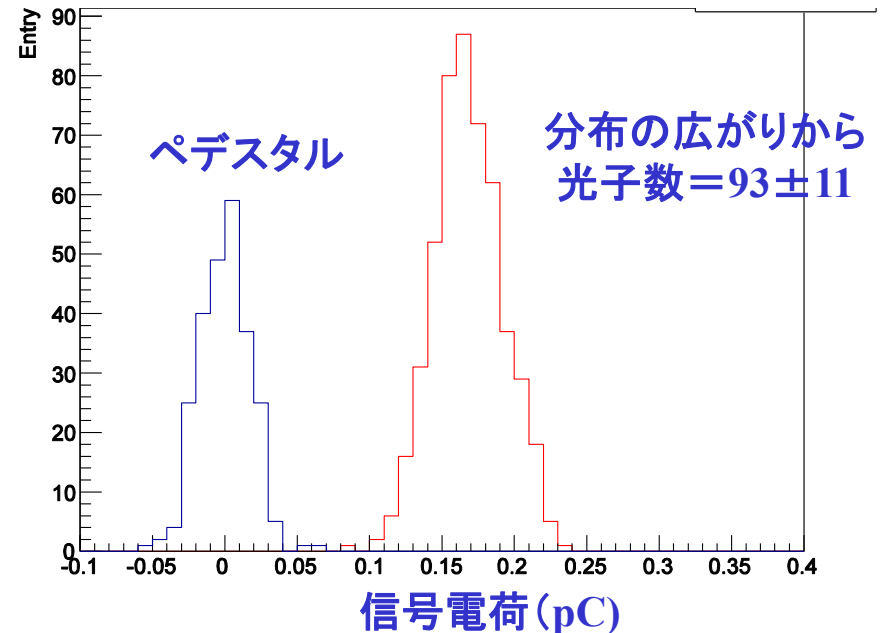
レーザーパルス幅 56ps パルス間隔20ns  
10パルス照射(200ns幅パルス相当)



赤外光応答信号を観測  
応答速度 $\sim 1\mu\text{s}$ (90光子相当)



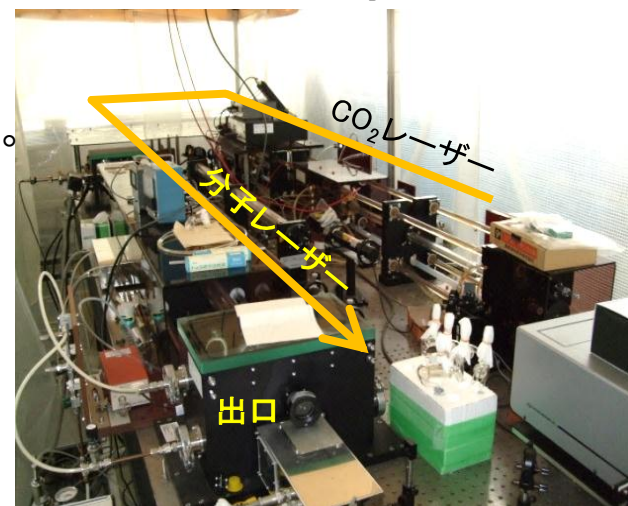
信号電荷分布





# 遠赤外線ビームの開発 (福井大学 遠赤外領域開発研究センター/中部大学 岡島研)

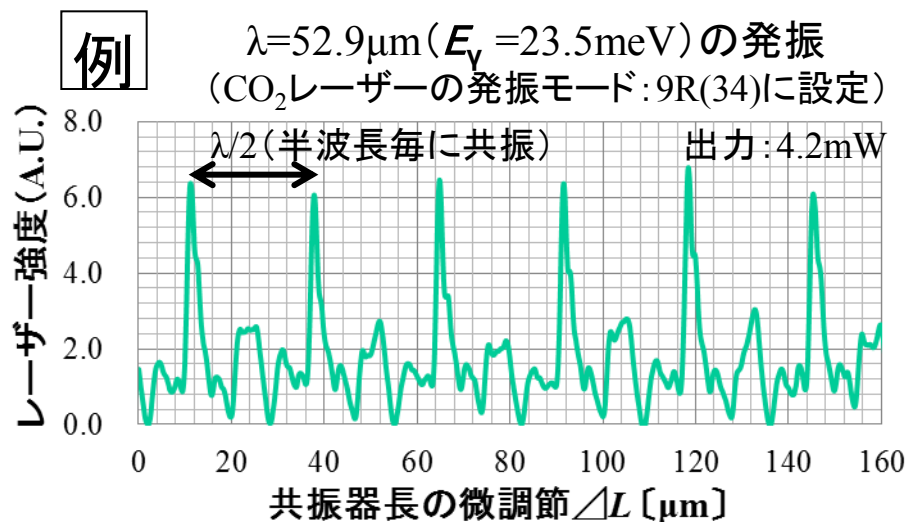
- CO<sub>2</sub>レーザーを1次電磁波源として、様々な種類の気体分子 (CH<sub>3</sub>OH, CD<sub>3</sub>OH, CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, ...) を励起させ、レーザー発振させる。
- 発振波長: 40 $\mu$ m ~ 500 $\mu$ mの間 ( $E_v$ : 31meV ~ 2.5meV) の約70本の単色発振線から任意の一つを選択できる。  
(気体分子の種類、共振器の長さやCO<sub>2</sub>レーザーの波長の調節によって)
- 出力(パワー): 発振させる波長によって 0.1mW ~ 数百mW
- 連続波発振 (パルス化するにはオプティカル・チョッパーを使う。)



## 発振テスト

CD<sub>3</sub>OH気体の種々の発振線を確認

43.7 $\mu$ m, 52.9 $\mu$ m, 86.4 $\mu$ m, 他



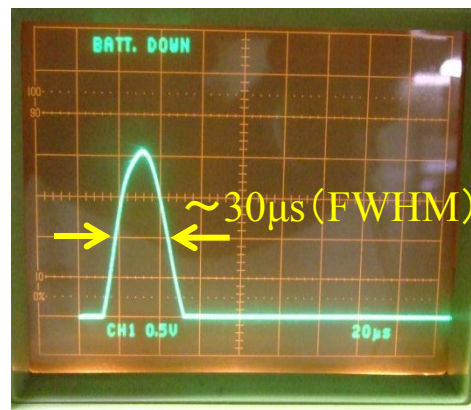
## オプティカル・チョッパーのテスト

羽根の直径100mm、隙間1mm、  
100Hzで回転する汎用チョッパー

He-Neレーザー

受光素子 (フォト・  
トランジスター)

羽根が回転



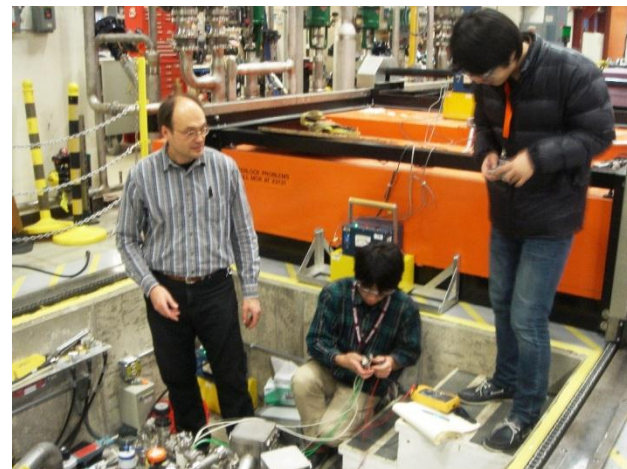
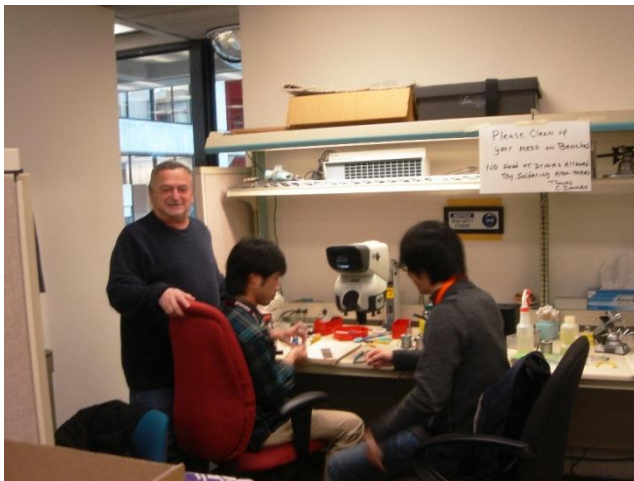
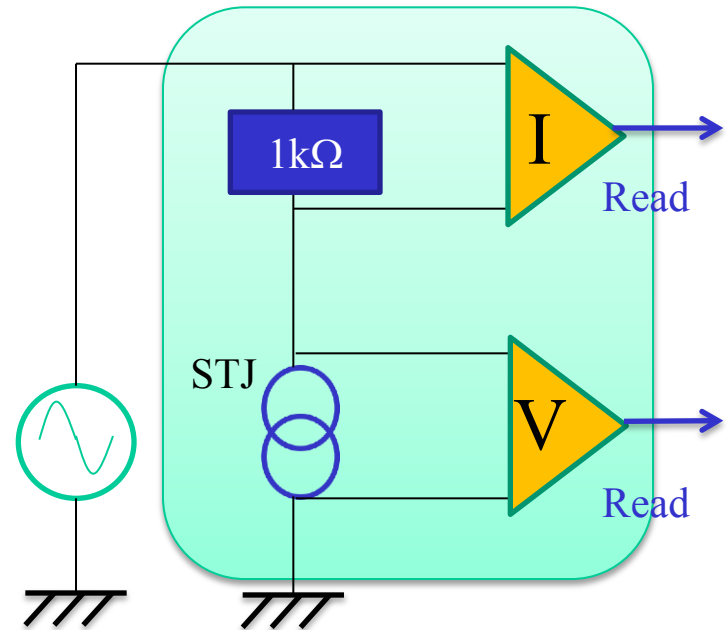
結果: パルス幅30 $\mu$ s

もっと、  
回転数の高いチョッパー、  
隙間の狭い羽根を用いて

目標: 1 $\mu$ s

# Fermilabにおける共同開発

- フェルミ研究所における打ち合わせ  
2012年3月15日( 9名うち米国側5名)  
2012年7月19日( 10名うち米国側6名):  
計画、スケジュール  
2012年12月10日( 10名うち米国側6名):  
12月～3月 開発作業
- 12月 HEMT アンプ(2K)のテストによる選別
- 3月 Nb/Al-STJ(1.5K)とHEMTアンプ(室温)を組み合わせるI-V曲線の測定

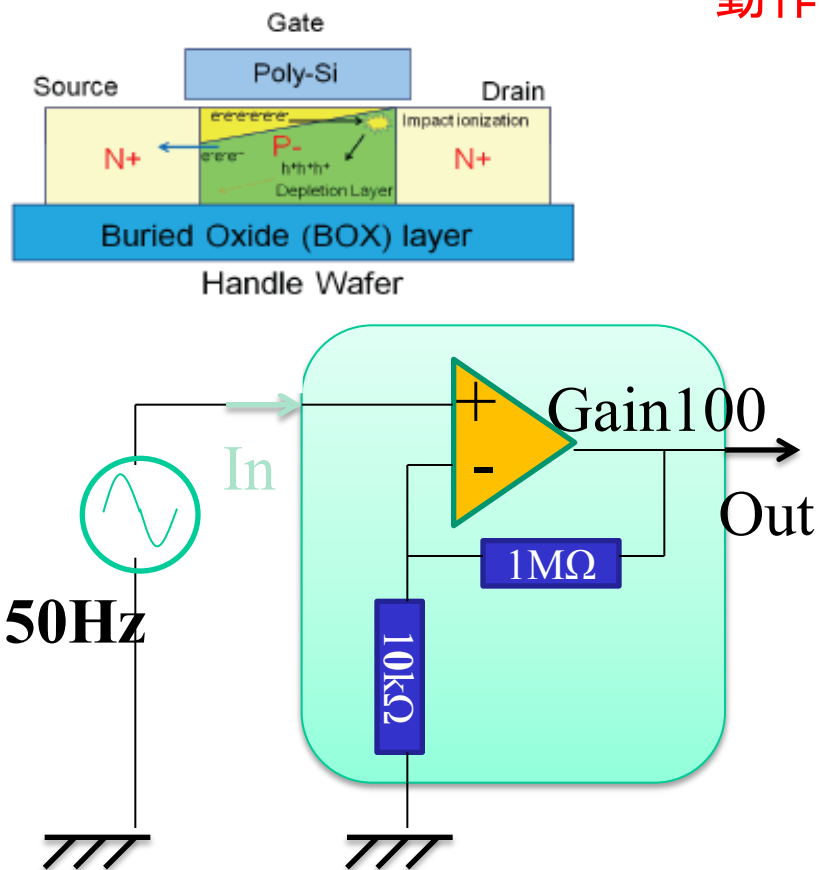




# SOIプリアンプの極低温での動作試験

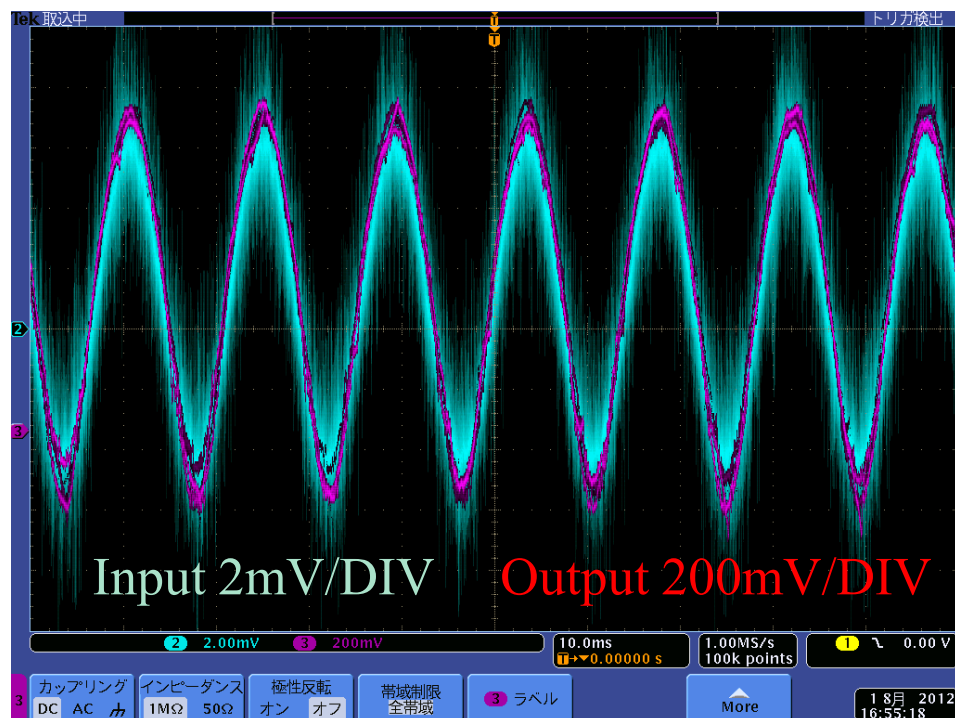
- 通常の Si JFET は作動可能な低温限界が高い(約40K)。
- JAXA/ISASグループ作製のSOIアンプ (FD-SOI-CMOS)の極低温での動作をチェック(これまで 4.2Kで作動することは測定されている)。

FD-SOI-CMOS



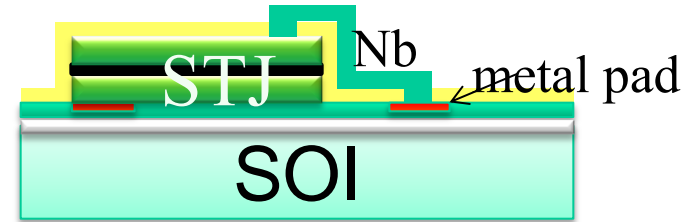
- JAXA/ISASグループ作製のSOIアンプが1.8Kで動作することを確認した

T=1.8K

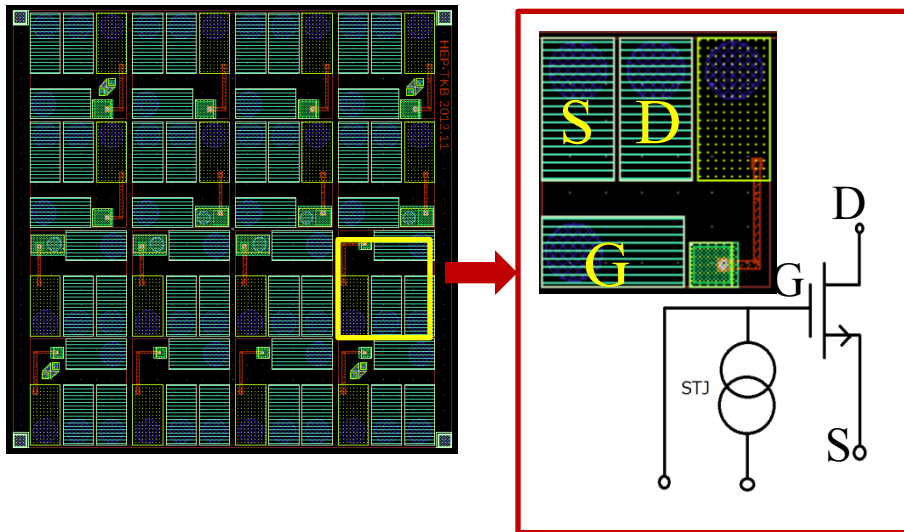


# SOI-STJの試作・試験

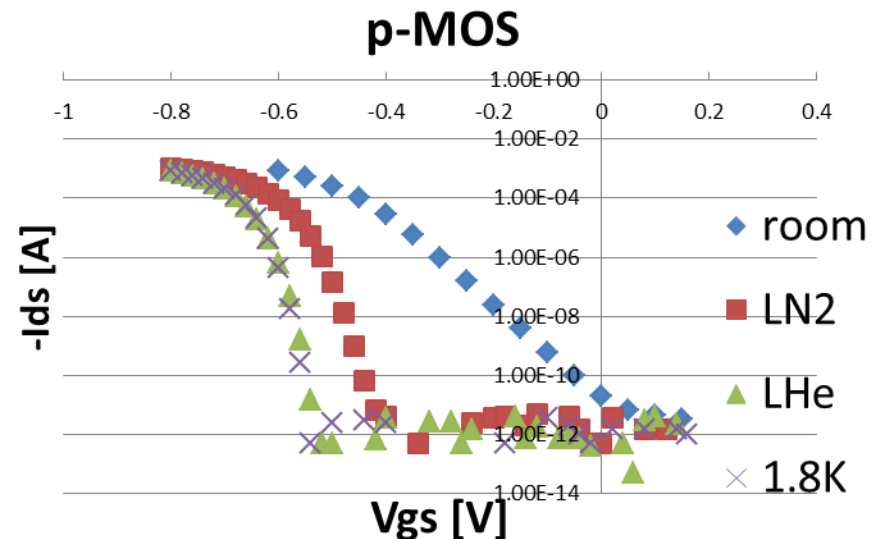
- SOI-STJを試作: KEK新井康夫氏と共同研究.
- SOI基盤上にSTJをプロセスしたのちに,  
SOIの pMOS, nMOS FETの動作試験.  
→ 1.8Kで正常動作  
STJの動作試験. → 1.8Kで正常動作



## SOI-STJ Chip design pattern



## STJ形成後のMOSFETの $I_{ds}-V_{gs}$ 曲線



# 測定器開発の現状のまとめ

- Hf-STJのSIS構造を最確認。さらにピクセルサイズを $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ に小さくすることによってノイズ、リーク電流ともに30%程度に下がった。
- Nb/Al-STJ検出器で測定環境の整備によりノイズとリーク電流を大幅に下げること成功。赤外線(波長 $1.31\mu$ )光信号を検出した。一光子信号を見るにはSTJサイズを小さくし、1K程度で極低温プリアンプを用いてS/N比を改善する必要あり。
- 遠赤外線ビーム(波長 $53\mu$ )の試作で $30\mu\text{s}$ パルスビームを確認。
- 極低温プリアンプ開発の現状
  1. HEMT型プリアンプとNb/Al-STJをつないで性能検査を開始した。
  2. SOIアンプが1.8Kで正常に動作することを確認した。
  3. SOI-STJ一体型の検出器試作を行い、1.8KでSTJが正常に動作し、かつSOIのトランジスタも正常に動作することを確認した。

# 平成25～29年度の研究目標

- マルチピクセルNb/Al-STJ検出器と極低温プリアンプを動作させ、遠赤外線一光子信号を検出。光学素子・光学系(回折格子と反射鏡)と組み合わせて、遠赤外線領域(波長40～80 $\mu$ )で2%エネルギー分解能で一光子分光を実現。
- 2016年に遠赤外観測ロケット実験を行い、遠赤外線領域(波長40～80 $\mu$ )の宇宙背景赤外線連続スペクトルを計測して、ニュートリノの寿命下限を現在の下限 $3 \times 10^{12}$ 年から100倍上げ、 $10^{14}$ 年程度まで探索。
- 2020年頃の遠赤外観測衛星実験に向けて、実験設計・観測装置設計開発を進める。
  1. 基礎設計は上記ロケット実験と同じNb/Al-STJ+分光素子による分光装置。
  2. 代案設計はHf-STJを一光子マイクロカロリメータとして用いる分光装置。
- Hf-STJのピクセルサイズをより小さくして(10 $\mu$ m × 10 $\mu$ m)、ノイズとリーク電流の小さいSTJを作成して、遠赤外線マイクロカロリメータを実現。

BACKUP

# 平成25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(50ピクセル)Nb/Al-STJ検出器で性能検査を行う。
- 光学素子・光学系(回折格子と反射鏡)を用いて分光性能テストを行う。
- ロケット搭載用の0.9～1.0Kのクライオスタットの設計試作を行う。
- 遠赤外線ビーム(波長 $40\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ )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、性能検査を行う。
  2. HEMT型プリアンプとNb/Al-STJをつないで、性能検査を行う。

# 平成24年度の成果発表

## 修士論文・国際会議プロシーディングス

- [1] 金井伸也「遠赤外光探索のためのニオブを用いた超伝導トンネル接合(STJ)検出器の開発研究」修士論文(筑波大)2013年2月
- [2] 永田和樹「ニュートリノ崩壊光探索のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子光検出器の研究開発」修士論文(筑波大)2013年2月
- [3] S.H. Kim et al. “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector using Hafnium” TIPP2011 Physics Procedia 37 (2012) 667-674

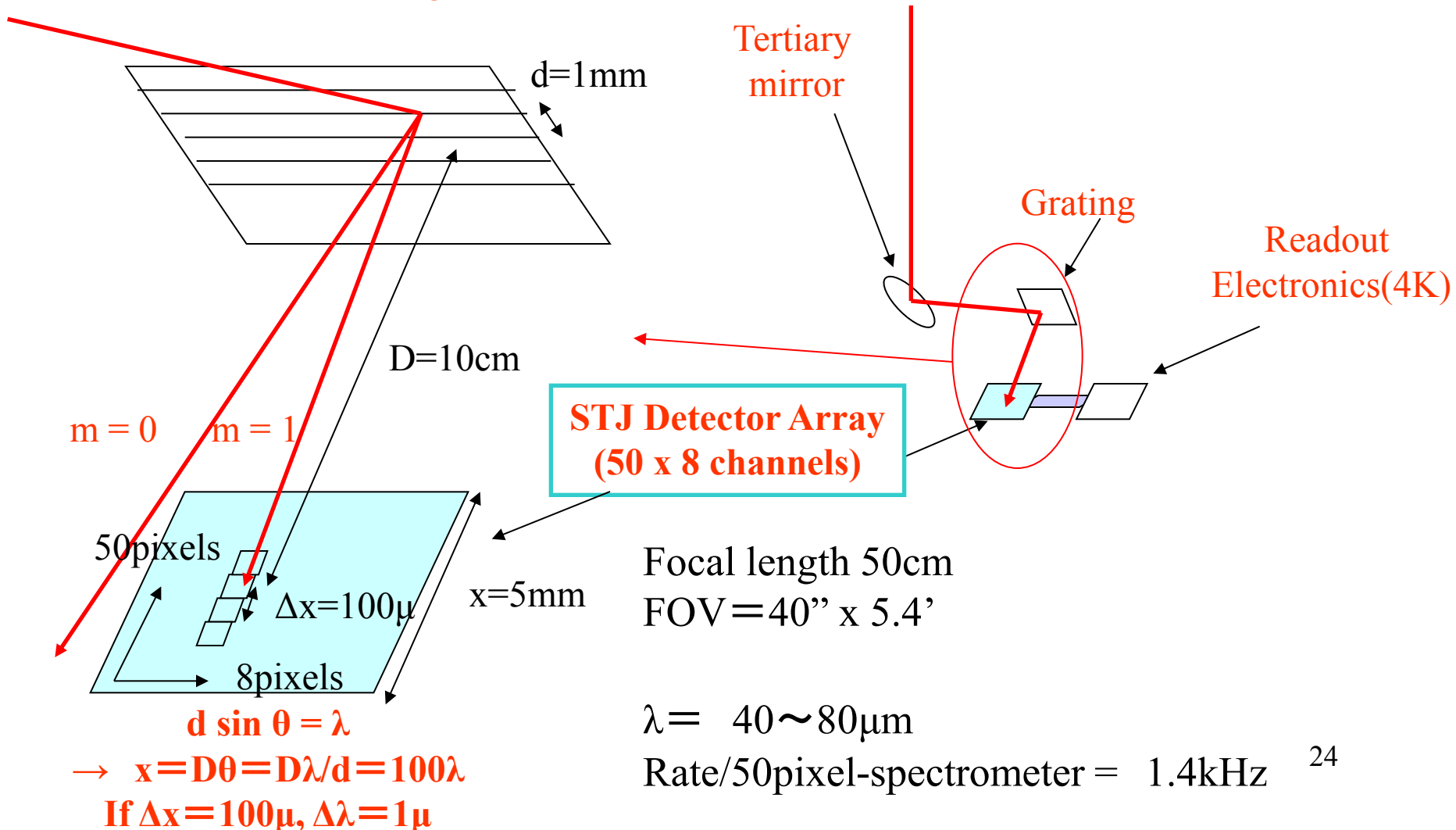
## 研究会・学会報告

- [1] 武内勇司「ニュートリノ崩壊の探索のための検出器開発(Hf-STJ他)」測定器開発室SCD重点レビュー 2012年4月.
- [2] 武内勇司「赤外線観測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」背景放射で拓く宇宙創成の物理シンポジウム2012@KEK 2012年7月
- [3] 金井伸也「遠赤外光分光のためのNbAl-STJの性能評価」日本物理学会2012年9月
- [4] 金信弘「Superconducting Tunnel Junction Detector R&D for Neutrino Decay Search」新学術「ニュートリノ研究」会合 京都大学 2012年9月
- [5] 武内勇司「ニュートリノ崩壊の探索のための検出器開発」測定器開発室SCD重点レビュー 2012年12月
- [6] 金井伸也「ニュートリノ崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発」SATテクノロジーショーケース(つくば市)2013年1月
- [7] 永田和樹「ニュートリノ崩壊光探索のためのHfを用いた超伝導トンネル接合素子検出器の研究開発」2013年3月.
- [8] 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Nb/Al-STJの研究開発」日本物理学会2013年3月

# CIB Experiment for Neutrino Decay Search with JAXA Rocket Focal Plane Instruments

## Focal plane Instruments

Grating





## CIB Experiment for Neutrino Decay Search with JAXA Rocket

### Rate Calculation and Expected Lifetime Limit

前景放射レート  $\lambda I_\lambda \sim 0.5 \mu\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$  for  $\lambda = 50 \mu\text{m}$

Pixelあたり  $\Delta\Omega = 4 \times 10^{-8} \text{ sr}$ ,  $\Delta S = \pi \times 0.075^2 \text{ m}^2$  だから

$\lambda I_\lambda = 3.5 \times 10^{-16} \text{ W} = 2.2 \times 10^3 \text{ eV/s}$  (  $1\text{J} = 6.2 \times 10^{18} \text{ eV}$  より)

$\lambda I_\lambda = E dI/dE$  より  $dI/dE = 2.2 \times 10^3 / (3 \times 10^{-2}) \text{ s}^{-1} = 0.7 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$

$dI/dE = (E/\Delta E) dN/dt$  より、  $dN/dt = 1.4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  (  $E/\Delta E = 50$  を用いて)

Rate/50pixel-spectrometer = 1.4 kHz ( 28Hz/pixel)

Measurements for 200 s

→ 280 k events /50pixel-spectrometer

8列の50pixel-spectrometerを用いるので、

$\sigma/N = 0.066\%$      $5\sigma = 0.33\% \times 0.5 \mu\text{W}/\text{m}^2/\text{sr} = 1.5 \text{ nW}/\text{m}^2/\text{sr}$   
(現在の上限  $50 \text{ nW}/\text{m}^2/\text{sr}$  の3%)

# 星間ガスでの遠赤外線の吸収の評価

## Absorption Probability Calculation

星間物質質量

$$\varepsilon = \text{星間物質/銀河} = 0.1$$

$$\text{バリオン密度} = \rho_b = 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$$

$$(\quad q/\gamma = 6 \times 10^{-10})$$

反応断面積

$$(\text{参考: } \gamma(\lambda \sim 1\mu) \text{ と水蒸気 (H}_2\text{O) との断面積 } \sigma = (5 \pm 2) \times 10^{-21} \text{ cm}^2)$$

$$\lambda \sigma_{\text{ABS+SCAT}} = 10^{-26} \text{ cm}^3 / \text{H原子}$$

$$\text{以上より } \gamma(\lambda \sim 30\mu) \text{ に対して } \sigma = 0.3 \times 10^{-23} \text{ cm}^2 / \text{H原子}$$

$$L = 10 \text{ 億光年} = 3 \times 10^7 \times 10^9 \times 3 \times 10^{10} \text{ cm} \sim 10^{27} \text{ cm}$$

以上を用いると、ニュートリノ崩壊光 ( $\lambda \sim 30\mu$ ) が10億光年飛んでくる間に星間物質で吸収される確率は

$$\varepsilon \rho_b \sigma L = 0.1 \times 2.5 \times 10^{-7} \times 0.3 \times 10^{-23} \times 10^{27} \sim 10^{-4}$$

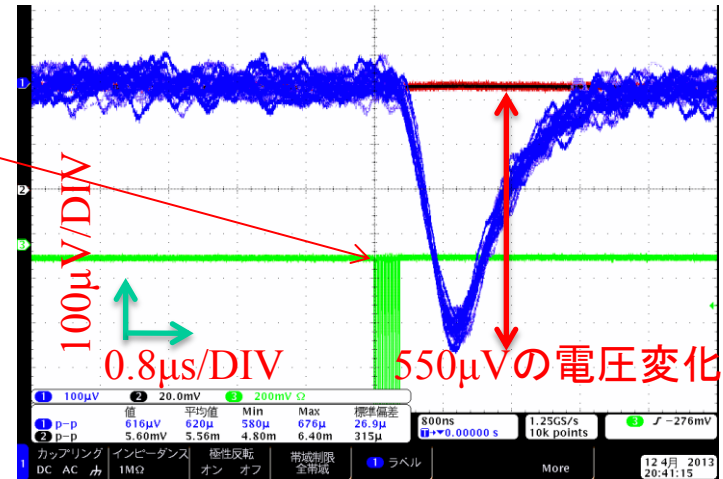
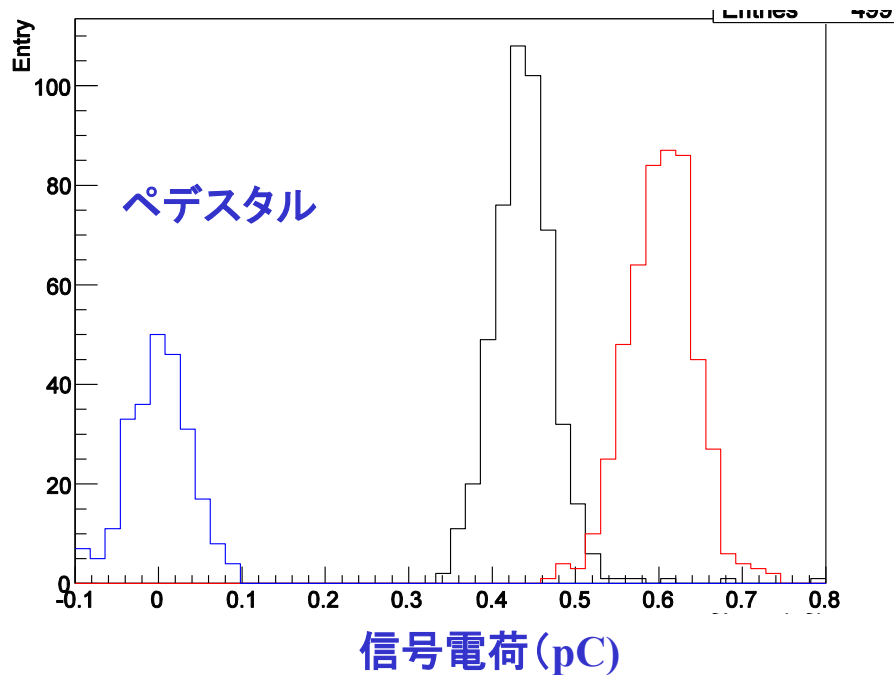
# Nb/Al-STJ可視光応答信号

青色レーザー( $\lambda=465\text{nm}$ )に対する応答信号

レーザーパルス幅 56ps パルス間隔20ns  
16パルス照射(320ns幅パルス相当)

T=1.8K (He減圧冷凍機)

## 信号電荷分布



可視光応答信号を観測  
応答速度 $\sim 1\mu\text{s}$

分布の広がりから

光子数 $=555\pm 55$  ( $604\pm 2\text{fC}$ のピーク)

光子数 $=425\pm 42$  ( $427\pm 2\text{fC}$ のピーク)

1光子あたりの電荷 $=1.1\pm 0.1\text{fC}$  ( $604\text{fC}$ のピーク)

1光子あたりの電荷 $=1.0\pm 0.1\text{fC}$  ( $427\text{fC}$ のピーク)

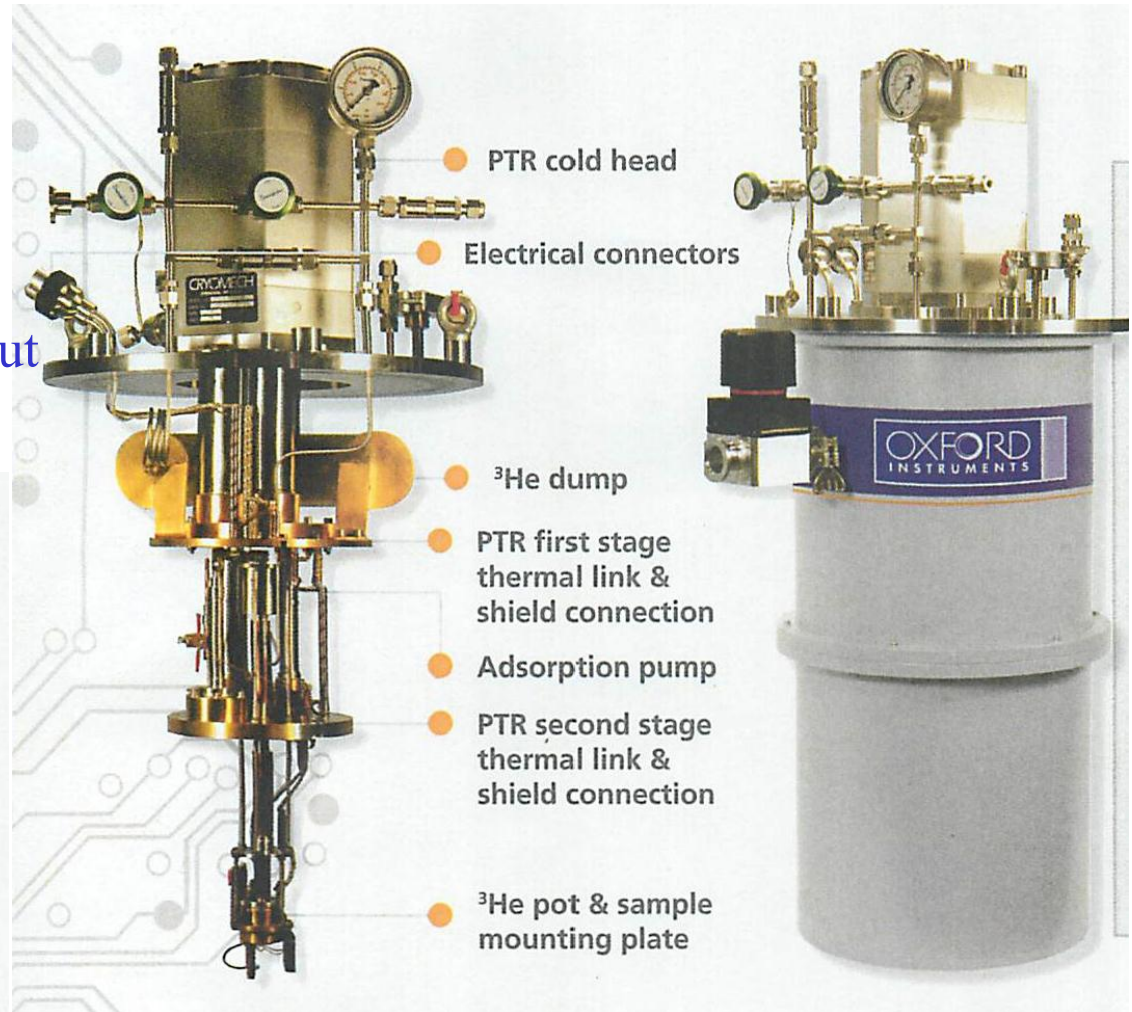
分布の広がりから求めた光子数が信号電荷平均値に比例

# He3 Refrigerator ( HelioxAC-V )

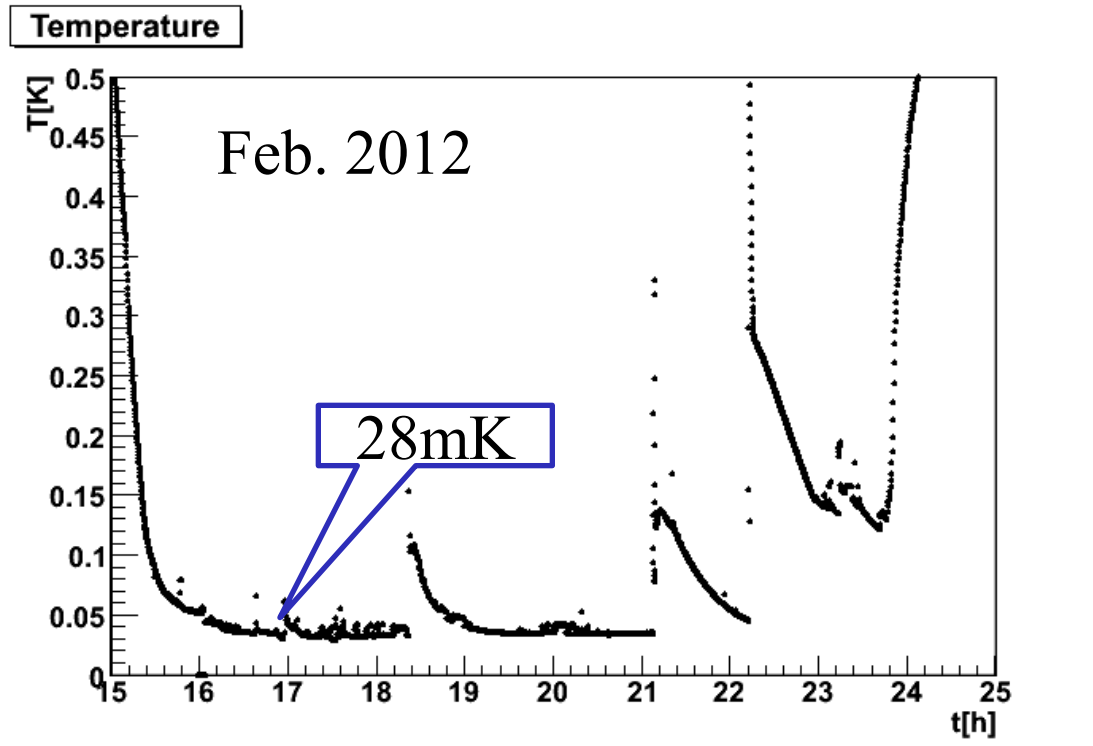
We need a test setup around 1K for efficient measurements of various STJs.

Stable operation below 1K without the need for liquid helium

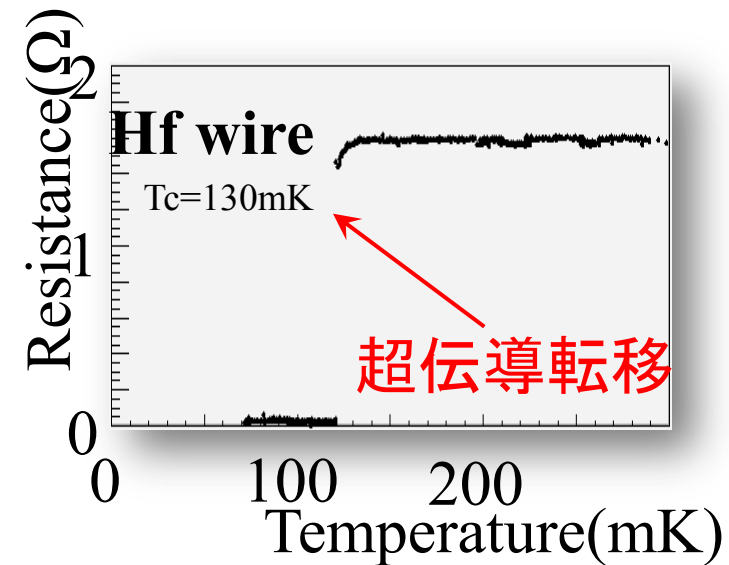
- Achieves 300 mK without the need for liquid helium!  
Enables operation in laboratory which would not normally support cryogenic equipment
- Hold time of more than 50 hours enabled by patented adiabatic multi-expansion  $^3\text{He}$  refrigeration technology  
(US patent 6782712, European patent application 1387133 and Japanese patent application 2004163089)
- High temperature stability ( $\pm 3$  mK at  $< 2$  K) provides an extremely stable temperature environment
- Small footprint enables use in virtually any laboratory environment. (0.4 m diameter by 0.85 m height)



# 希釈冷凍機運転



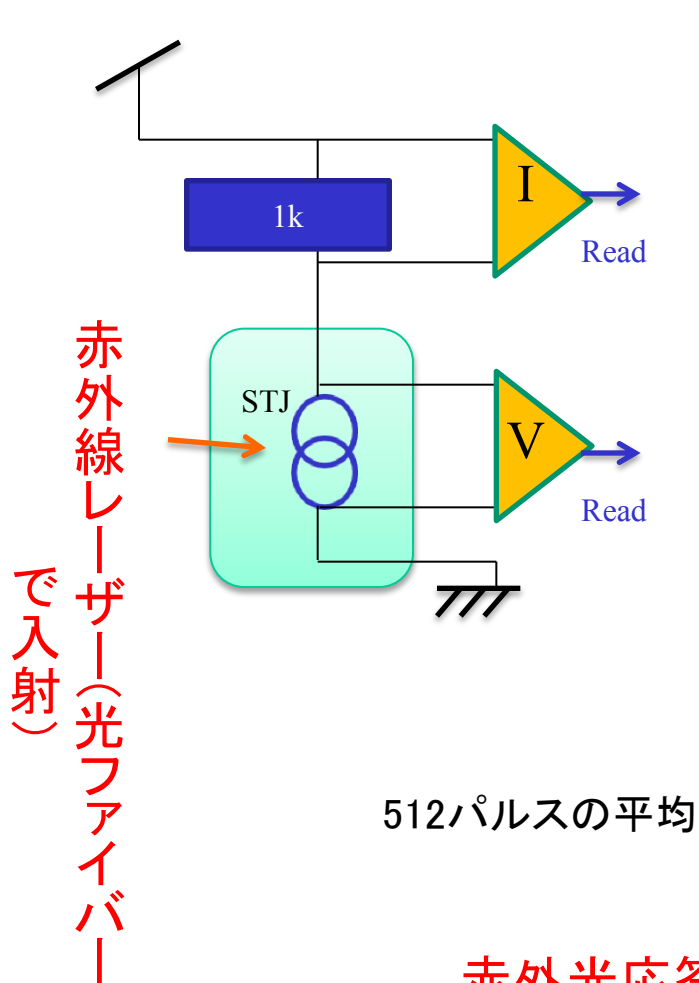
希釈冷凍機は筑波大物性  
実験グループから借用



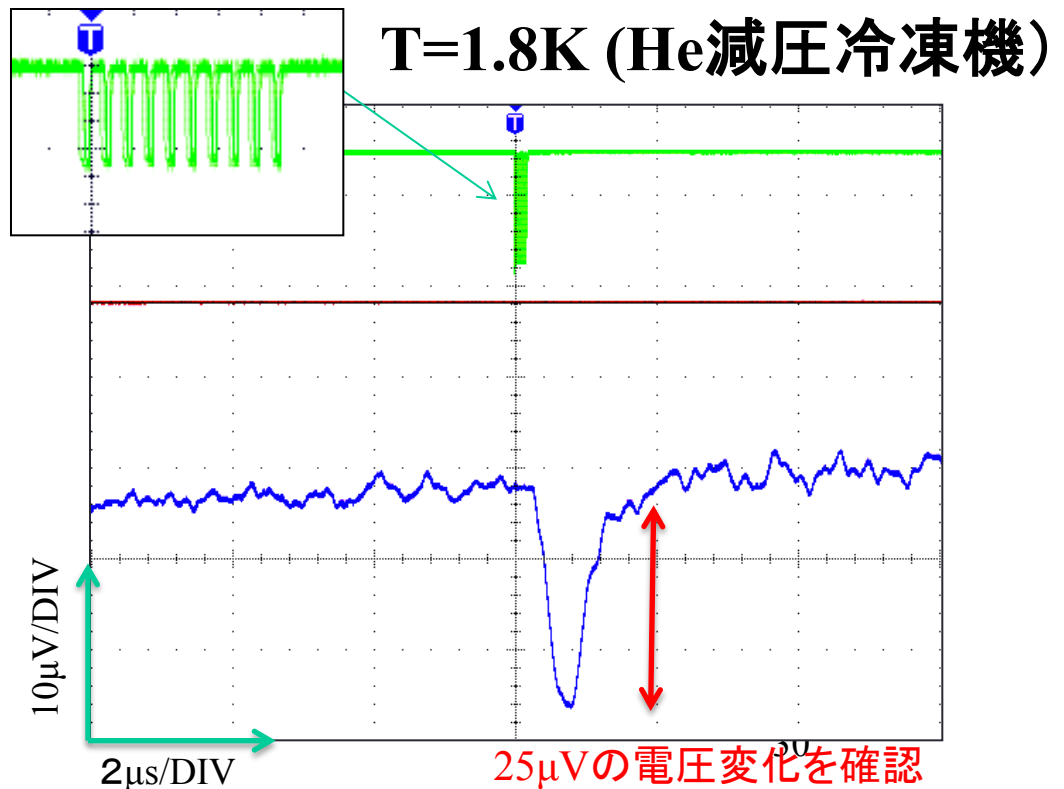
- 達成最低温度: 28mK
  - 4 チップ, 1 光学ファイバー, RuOx 温度計
  - RuOx は Hf 転移温度  $T_c$  (130mK) で校正
  - ⇔ Hf-STJ 運転の目標温度: 20mK

# Nb/Al-STJ赤外光応答信号

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



レーザーパルス幅 56ps パルス間隔20ns  
10パルス照射(200ns幅パルス相当)



赤外光応答信号を観測。応答速度 $\sim 1\mu\text{s}$ (約45光子相当)。