

# ニュートリノ崩壊光探索のための **STJ**及び**SOI-STJ**の 開発の状況

ニュートリノ研究会 **2014年12月23日**

筑波大学 奥平琢也

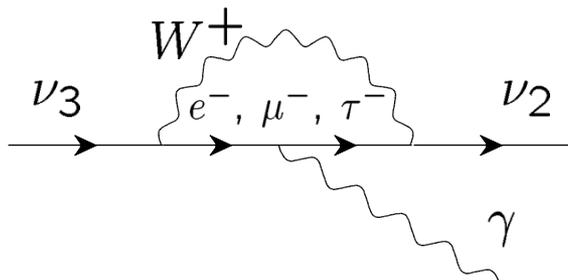
筑波大数理, 理研<sup>A</sup>, **KEK**<sup>B</sup>, 岡山大<sup>C</sup>, 福井大学<sup>D</sup>, 近畿大学<sup>E</sup>, **JAXA**<sup>F</sup>, 産総研<sup>G</sup>

奥平琢也, 金信弘, 武内勇司, 武政健一、木内健司、笠原宏太、先崎蓮、森内航也、金丸 昌弘、市村龍哉, 八木俊輔, 美馬覚<sup>A</sup>, 新井康夫<sup>B</sup>, 倉知郁生<sup>B</sup>, 羽澄昌史<sup>B</sup>, 石野宏和<sup>C</sup>, 吉田拓生<sup>D</sup>, 広瀬龍太<sup>D</sup>, 加藤幸弘<sup>E</sup>, 松浦周二<sup>F</sup>, 池田博一<sup>F</sup>, 和田武彦<sup>F</sup>, 長勢晃一<sup>F</sup>, 志岐成友<sup>G</sup>, 浮辺雅宏<sup>G</sup>, 藤井剛<sup>G</sup>, 大久保雅隆<sup>G</sup>

# ニュートリノ崩壊光探索

ニュートリノ質量は素粒子の中で唯一質量測定できていない

ニュートリノ崩壊:  $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$



ニュートリノは重い質量固有状態から軽い質量固有状態へと光を出して崩壊

ニュートリノ崩壊光のエネルギー

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

$m_3^2 - m_2^2$  は測定済みなので  $E_\gamma$  がわかれば  $m_3$  が決定  
 $m_3 = 50\text{meV}$   $m_2 = 10\text{meV}$  とすると

$$E_\gamma = 25\text{meV} \quad \text{遠赤外光!}$$

標準模型でのニュートリノの寿命は  $10^{43}\text{year}$

L-R対称模型を仮定した場合のニュートリノ  
寿命は  $10^{17}\text{year}$  まで短くなりうる

(現在の寿命の下限は  $3 \times 10^{12}\text{year}$ )

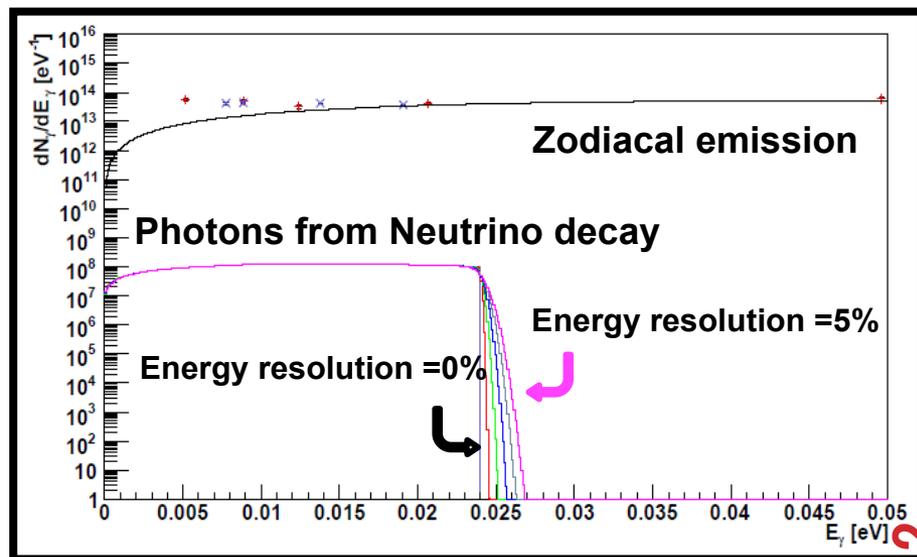
大量のニュートリノ源が必要!

宇宙背景ニュートリノの崩壊光を観測する

しかし..遠赤外領域は半導体検出器では検出不可能

エネルギー分解能が高い  
超伝導検出器

宇宙空間にて1時間測定した際のエネルギースペクトル



# 超伝導トンネル接合素子光検出器(STJ)

ニュートリノ崩壊光測定のための超伝導検出器

## STJ(Superconducting Tunneling Junction)光検出器

超伝導膜/絶縁膜/超伝導体の三層構造を持つ検出器

### 動作原理

上部超伝導膜と下部超伝導膜に電圧を印加  
酸化膜に並行に磁場を印加

1. 上部超伝導膜に光子が侵入
2. 光子がクーパ対を解離、準粒子を生成
3. 準粒子が酸化膜をトンネルし、下部で電流として観測

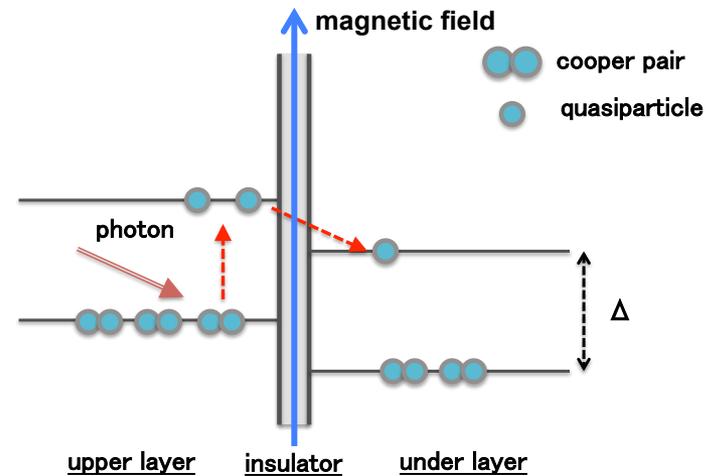
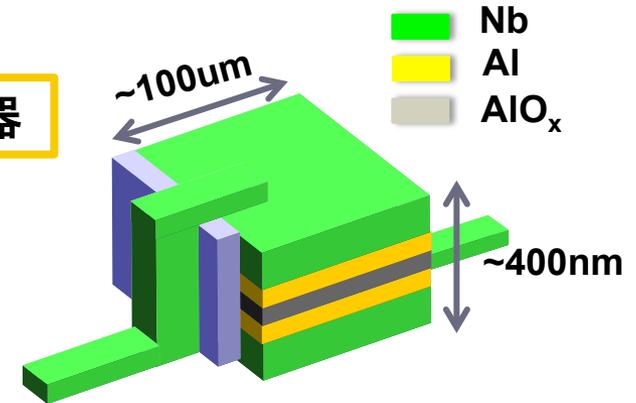
$$q = G_{Al} \frac{\epsilon_p}{1.7\Delta}$$

$G_{Al}$  trapping gain of Al (~10)  
 $\epsilon_p$  光子のエネルギー (eV)  
 $\Delta$  エネルギーギャップ(eV)

$\Delta$ が小さいほどたくさんの電荷が発生

発生電荷量が多いためエネルギー分解能に優れる

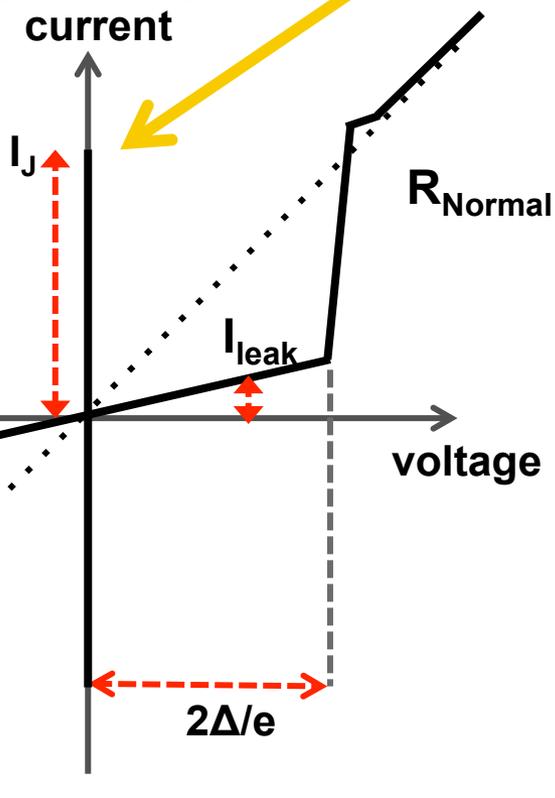
	Si	Nb	Ta	Al	Hf
Tc [K]		9.23	4.39	1.20	0.165
$\Delta$ [meV]	1100	1.550	0.6733	0.172	0.020



磁場を印可することでジョセフソン電流を抑制  
(クーパ対はトンネルできない)

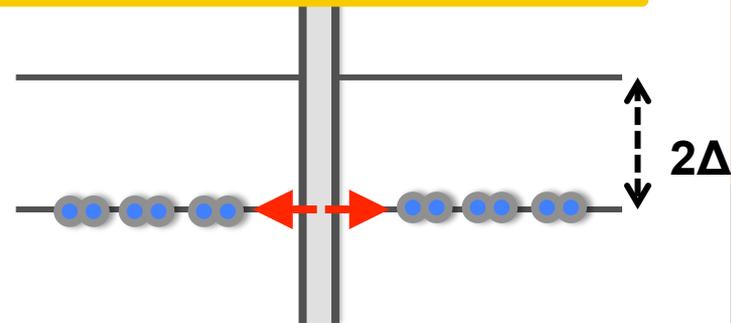
# STJの動作原理

## STJのIVカーブ(磁場なし)



ジョセフソン電流(磁場なし)

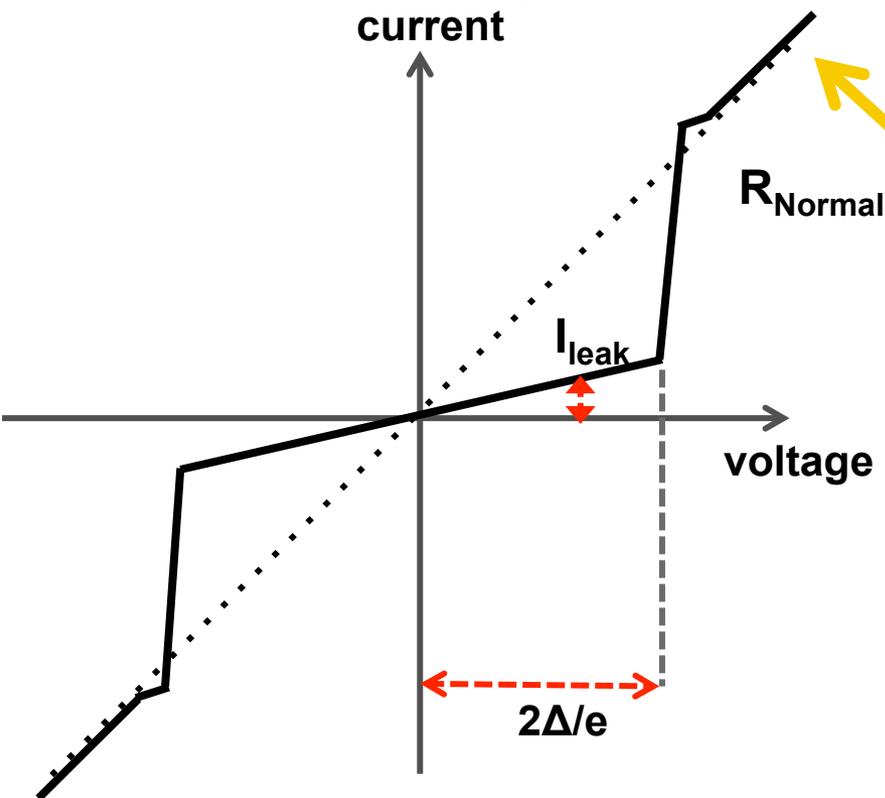
$V=0V$



クーパ対のトンネル電流が流れる  
0Vでも~mAの電流が流れてしまうため、  
この領域では検出器としては動作しない  
磁場の印加によって抑制できる

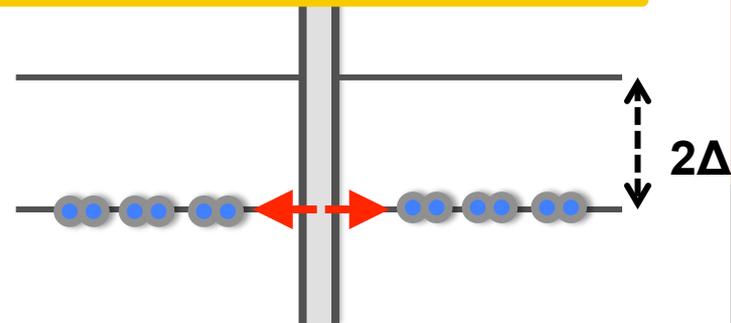
# STJの動作原理

## STJのIVカーブ(磁場あり)



ジョセフソン電流(磁場なし)

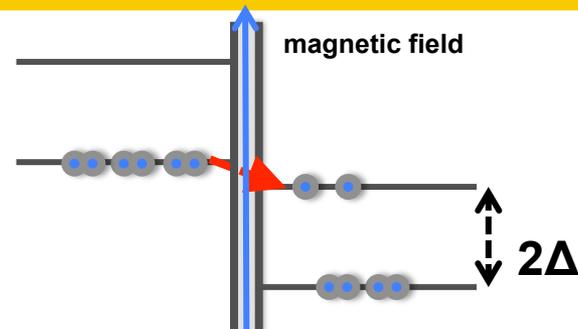
$V=0V$



クーパー対のトンネル電流が流れる

Normal Resistance 領域

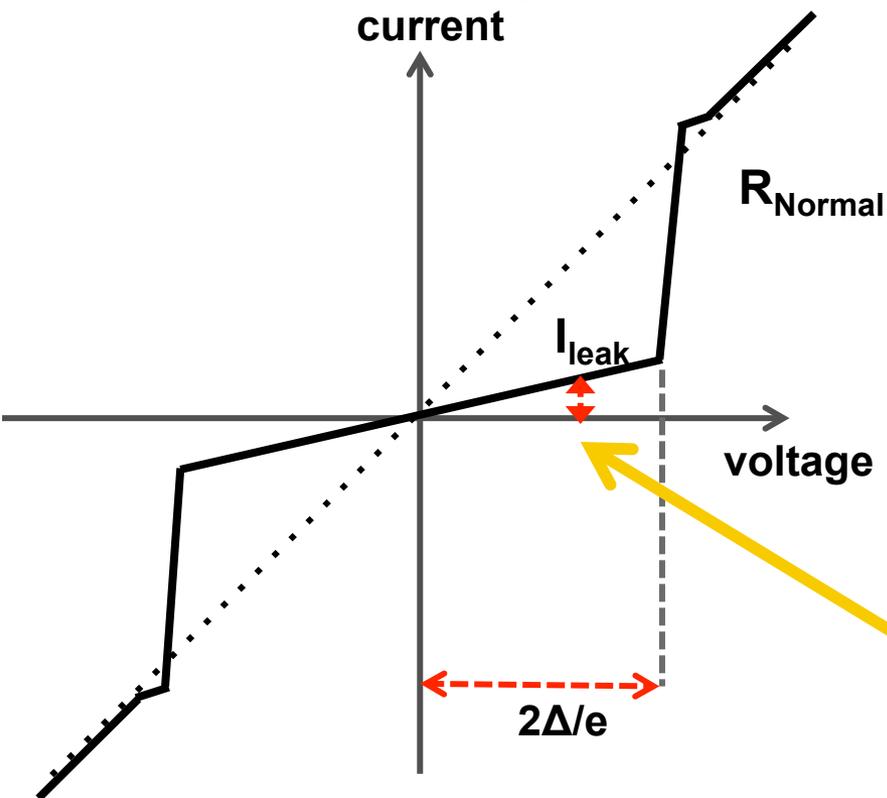
$V < 2\Delta/e$



クーパー対が準粒子となり電流が流れる  
常に~mAの電流が流れているため、  
この領域は検出器としては適さない

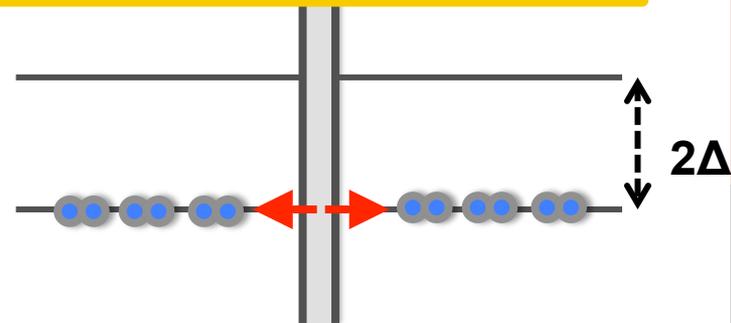
# STJの動作原理

## STJのIVカーブ(磁場あり)



ジョセフソン電流(磁場なし)

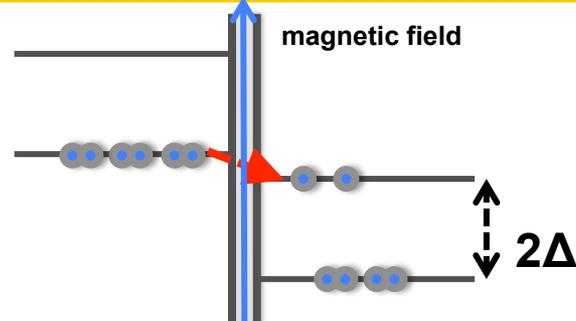
$V=0V$



クーパ対のトンネル電流が流れる

Normal Resistance 領域

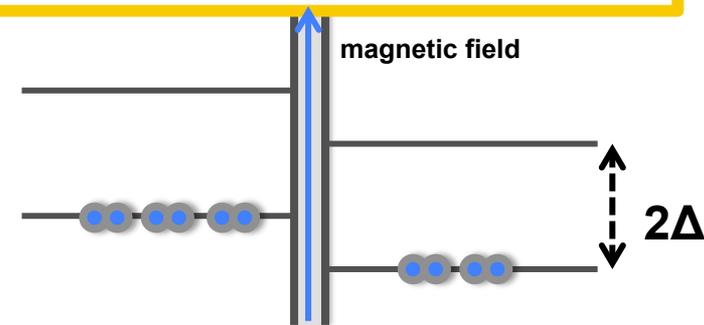
$V < 2\Delta/e$



クーパ対が準粒子となり電流が流れる

Dynamic resistance領域

$0 \leq V \leq 2\Delta/e$



リーク電流以外の電流は流れない

光が入ると電流が流れるようにしたい

→ **Dynamic Resistance領域**に電圧をあわせる

→ 信号検出の為にリーク電流をできるだけ小さくしたい

# ニュートリノ崩壊光探索ロケット実験

ニュートリノ崩壊光探索実験の予備実験として、ニュートリノ寿命の下限を更新するための実験を考える

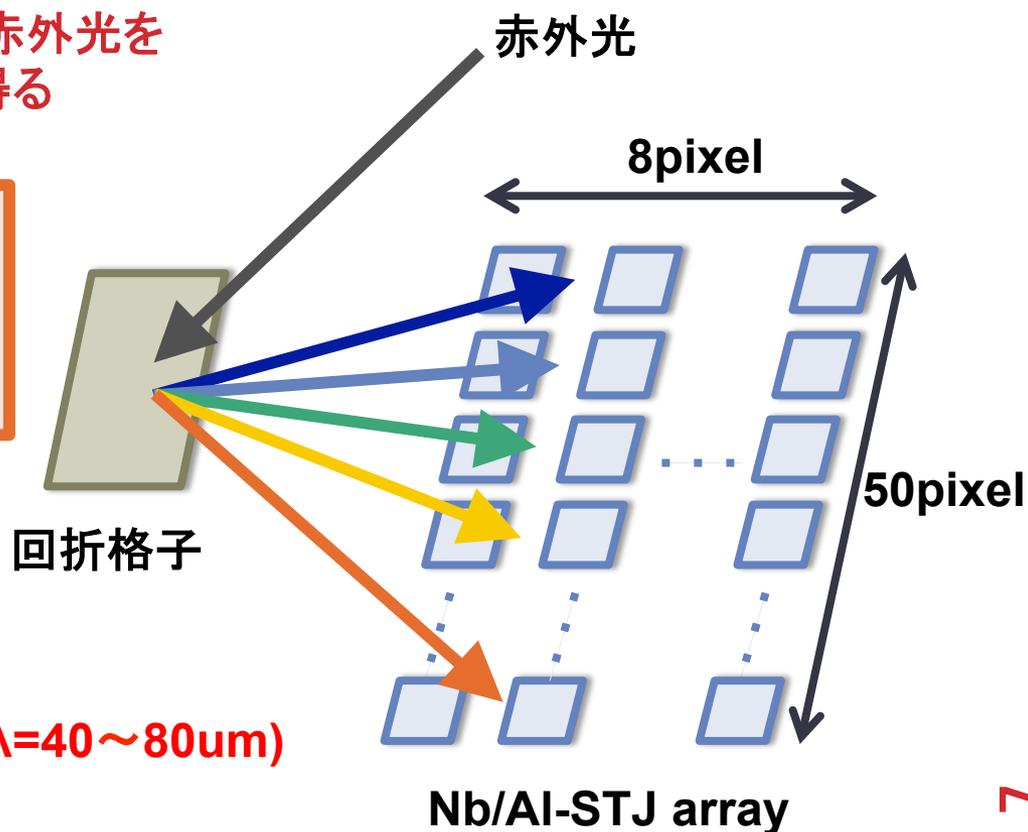
ロケットで検出器を地上200km上空に飛ばし、約5分間の測定を行う

Nb/Al-STJをarray化し、入射してくる赤外光を回折格子によって分光、スペクトルを得る

検出レート  
400Hz/pixel  
測定領域  
E=16~31meV

この実験によりニュートリノ寿命の下限が $10^{14}$ year程度まで更新する

この方法ではSTJがE=16~31meV( $\lambda=40\sim 80\mu\text{m}$ )の光子を1photonずつ検出する

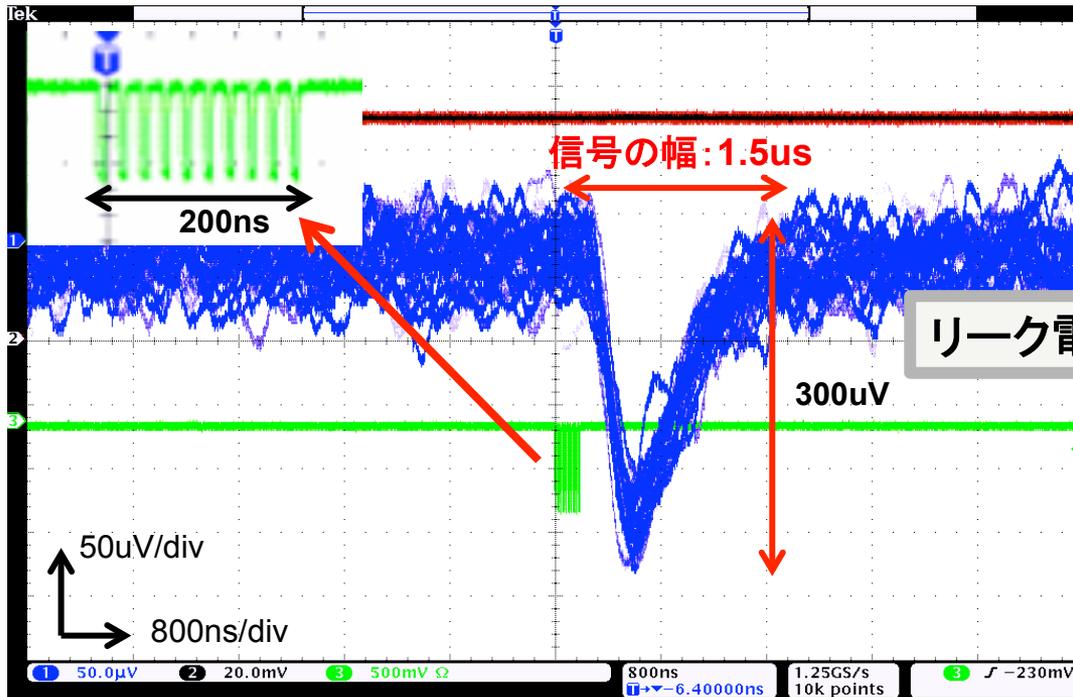


# STJの信号とリーク電流への要求

KEKで作製した100um×100umのSTJに近赤外光( $\lambda=1320\text{nm}$ )レーザーを照射し、  
電圧変化を観測

入射光として50psのパルス光を1回～複数回をまとめて照射

近赤外光10パルスをまとめて照射した時の電圧の変化



信号の幅  $\sim 1.5\mu\text{s}$   
たち下がり時間  $\sim 0.3\mu\text{s}$   
立ち上がり時間  $\sim 1.2\mu\text{s}$

リーク電流の揺らぎがsignalよりも大きいダメ

single 25meV photonにより  
発生する電荷は100e程度

信号の幅を1.5us程度とすると100e  
の信号を3 $\sigma$ で観測するためには  
 $(I_{\text{leak}} \times 1\mu\text{s})^{1/2} \leq 100e \times 3$

リーク電流の要求は100pA以下

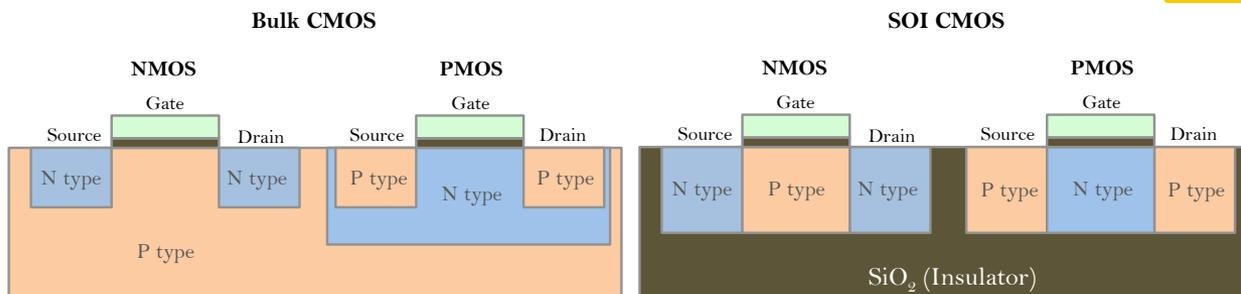
→STJを小さくする、クオリティの高いSTJを作る

# SOI-STJの導入

遠赤外光1光子観測のためにはリーク電流以外にも電磁的ノイズとの分離も必須!!

- ❑ 冷凍機内部から非常に長い配線(5m強)の引き回しを経て信号を増幅せざるを得ないため、Noiseとの分離が難しい。
  - ❑ 低温(4K以下)で動作するアンプがあれば、冷凍機内部に設置し、STJの信号がNoiseに埋もれる前に増幅し、冷凍機外部で読み出せる。
- ❑ JAXAにより、FD(Fully depleted)-SOIプロセスで作成されたSOIFETが4Kで動作するとの報告。

## SOI(Silicon On Insulator)-FET

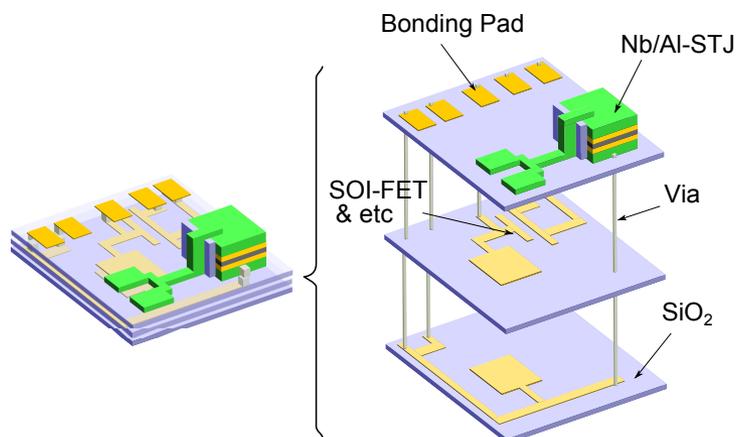


- ✓ 寄生容量低
- ✓ 低消費電力
- ✓ 高速動作可能
- ✓ 低温動作可能



**SOIFETとSTJ検出器を組み合わせたSOI-STJ検出器の導入。**

# SOI-STJ



SOI上に作製されたSTJ  
普通のSTJはシリコンウエハー上に作製される

SOIのLSI化の技術

SOIにより極低温で読み出し構築可能

エネルギー分解能の高いSTJ検出器

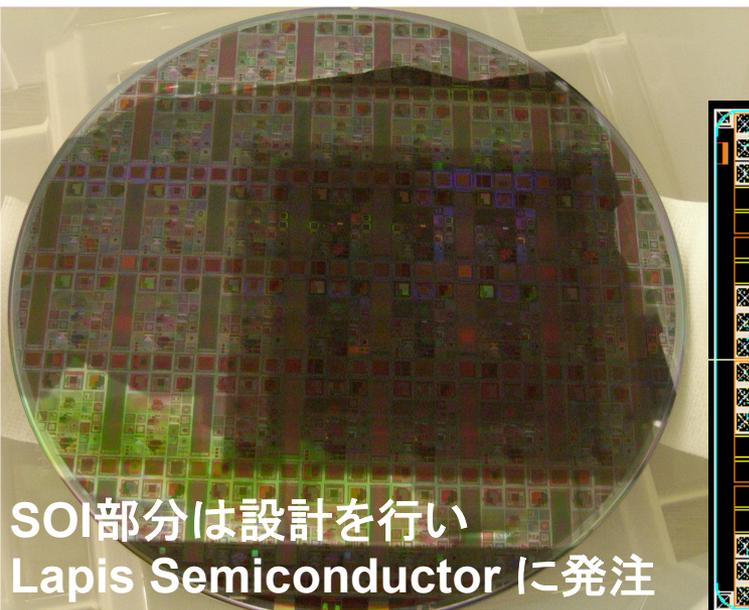
SOI-STJとは...

アンプが形成されたSOIの回路層  
に直接STJを形成した検出器

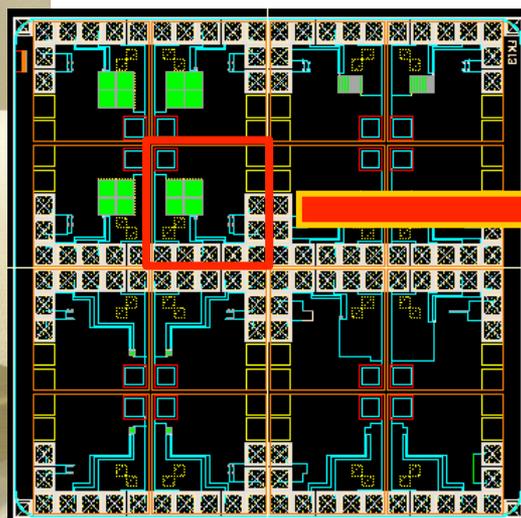
## SOI-STJの利点

STJ検出器から配線の引き回しが不要。

- 良いS/N比
- STJのマルチチャンネル化に対応可能。

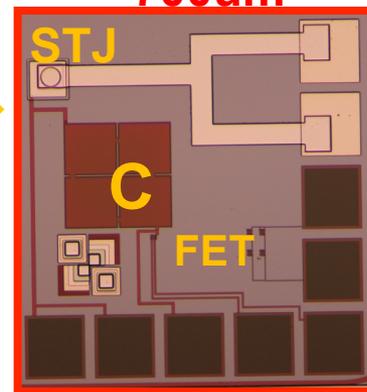


SOI部分は設計を行い  
Lapis Semiconductor に発注



SOISTJ2(STJ形成後)

700um



640um

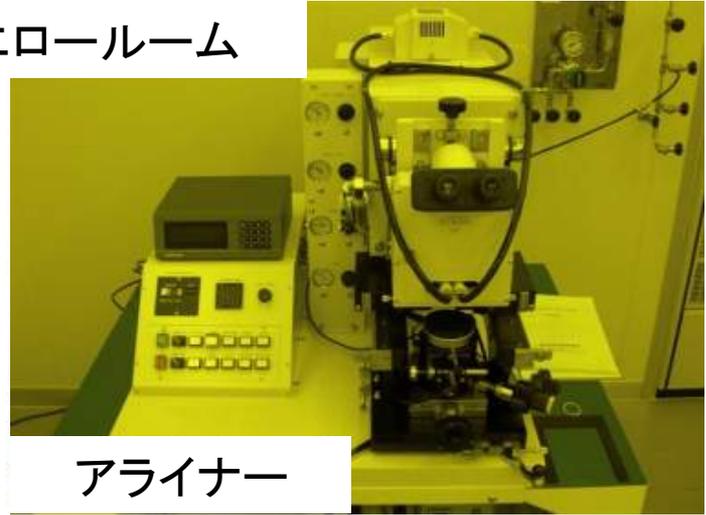
STJ部分はKEKで作製

# KEK 超伝導検出器開発システム

SOIwafer側の読み出し回路は設計後Lapis Semiconductorに発注、Wafer受け取り後KEKクリーンルームでSTJの形成。

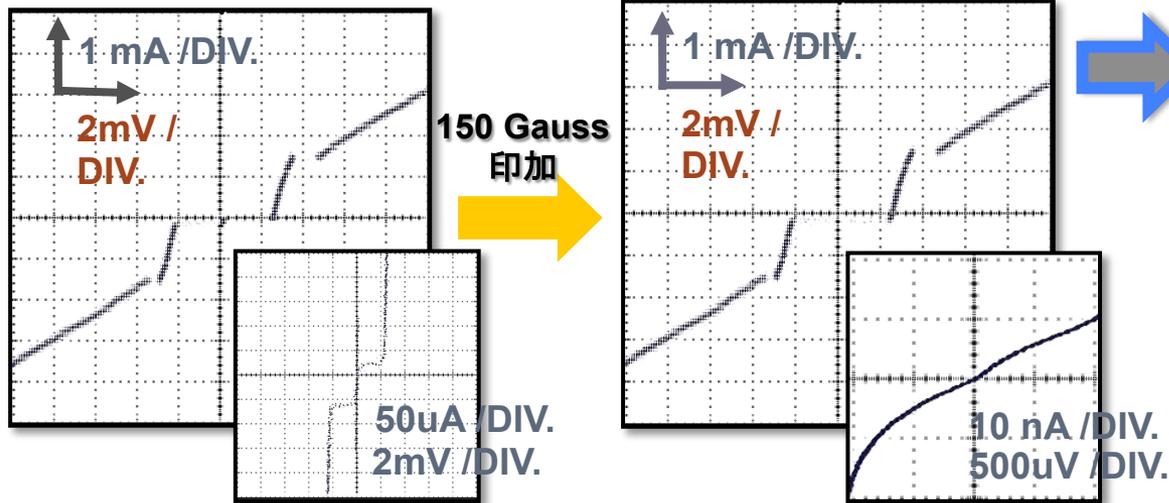


イエロールーム



# SOI上に形成したSTJの特性評価

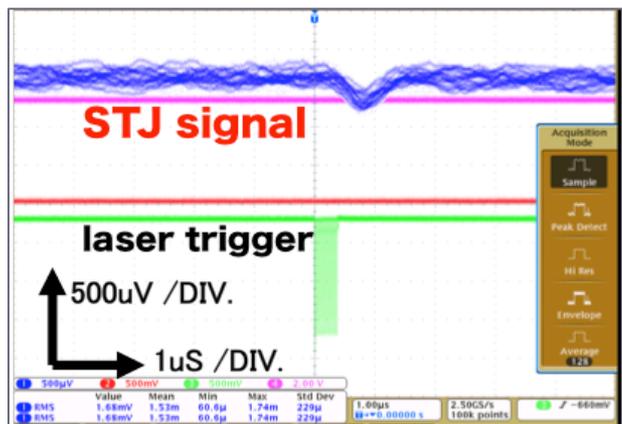
SOI上に形成したSTJの特性評価を行った



SOI上に形成したSTJのIVカーブ

## STJ特有のIVカーブ!!

- SOI上にSTJを正常に形成することができた  
Leakage Current : 6nA
- SOI上のViaとSTJの接続ができています



SOI上に作製したSTJの可視光に対する信号

## STJの光信号!!

- SOI上に形成されたSTJで光に対する応答を確認した

SOI上に作製したSTJには問題なし

SOI-FETに関しては...次に先崎が発表

# 産総研との共同研究&<sup>3</sup>He減圧冷凍機の導入

- **2014年5月から産業総合研究機構(AIST)と共同研究を開始**
  - 産総研はSTJの専門家がそろっており、Nb/Al-STJの自動作製をすることができるため、より品質がよいSTJが効率的に作製可能  
→**AISTで作製するためのSTJ、SOI-STJの設計**
- **2014年度から新たに<sup>3</sup>He減圧冷凍機が導入**
  - 今までの希釈冷凍機(マニュアル運転)から全自動<sup>3</sup>He減圧冷却機を導入  
→**新たな測定系の構築**

# $^3\text{He}$ 減圧冷凍機の導入

$^3\text{He}$ 減圧冷却器を用いて300mK程度まで冷却して測定

$^3\text{He}$ は最も沸点が小さい物質→低温でも蒸発熱を奪い続ける

60K→3K→300mKと熱勾配をつけて冷却

## 読み出し配線

コンスタンタン線(熱伝導率が小さい)×24本

## 超伝導コイル

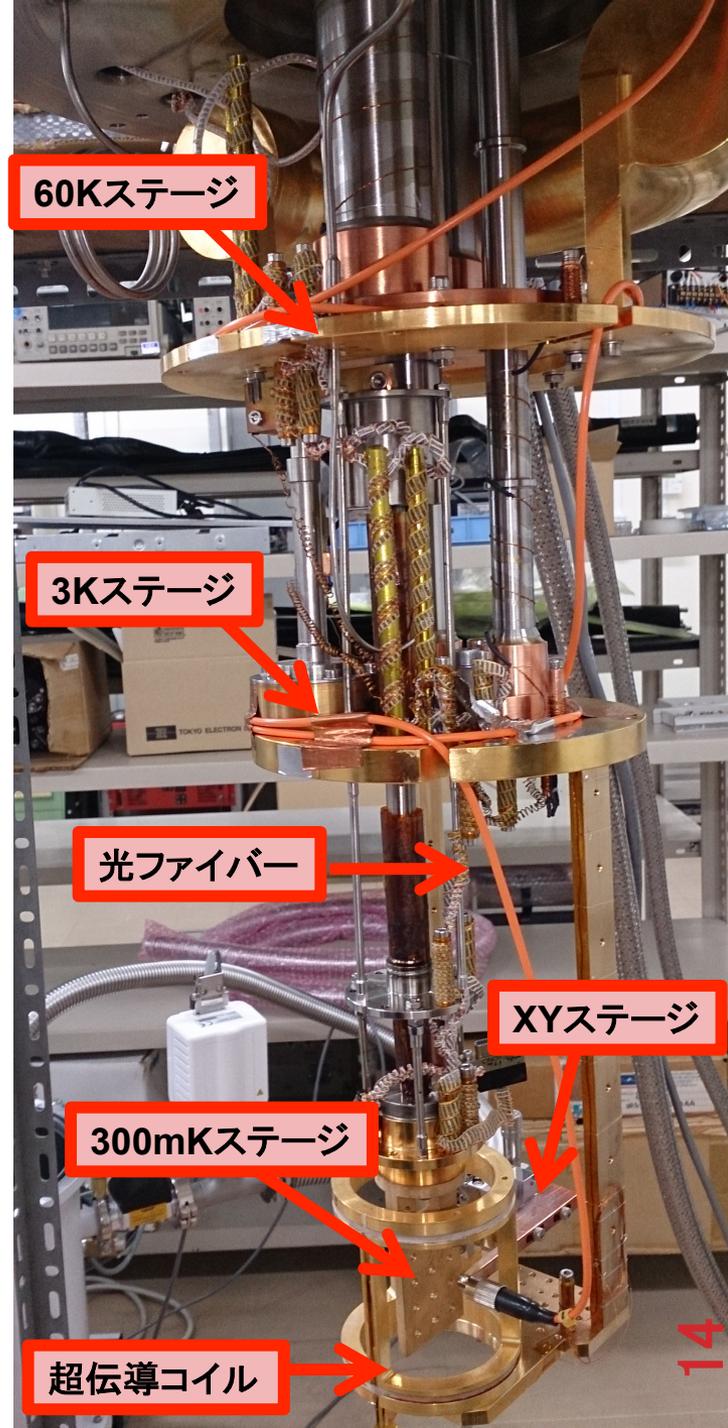
超伝導物質に電流を流し、発熱なく磁場を印加(100Gauss)

## 光ファイバー

室温から光ファイバーを通してSTJに光を照射

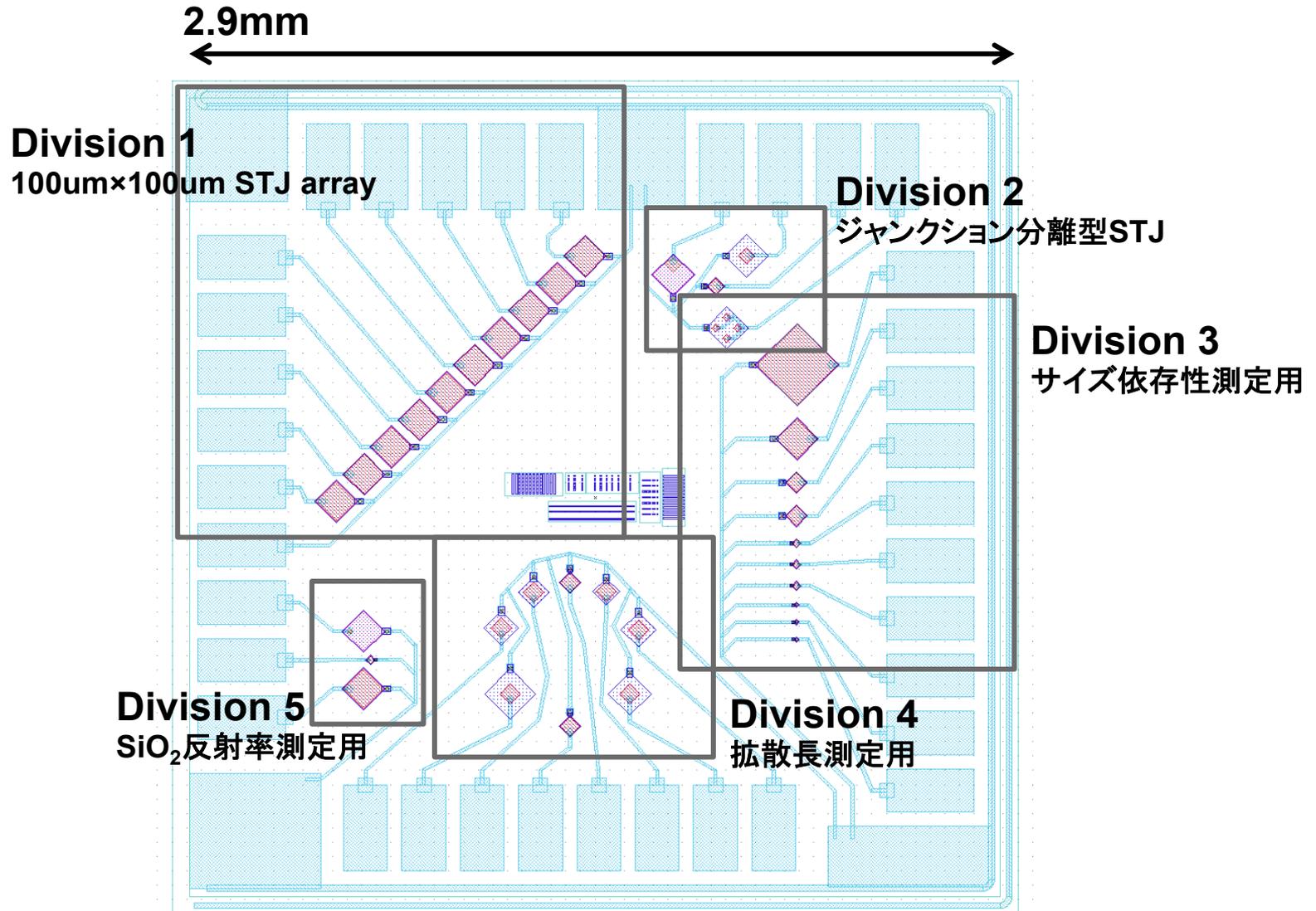
## XYステージ

STJへ光を照射する位置を正確に決定

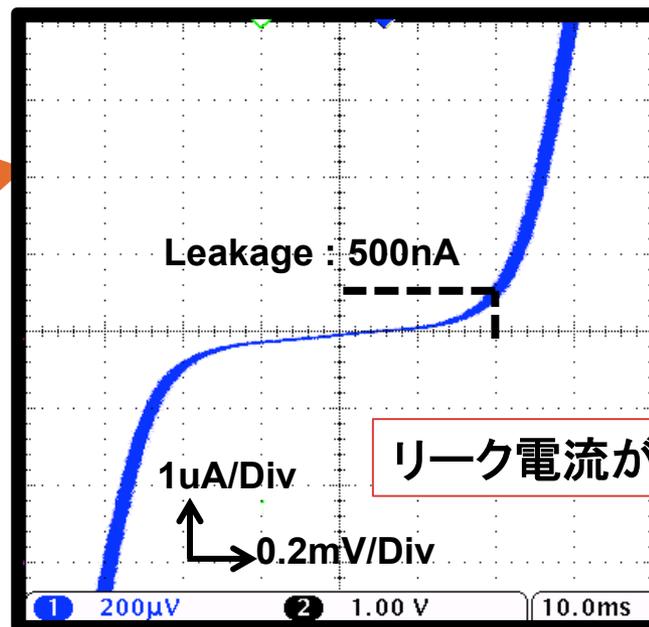
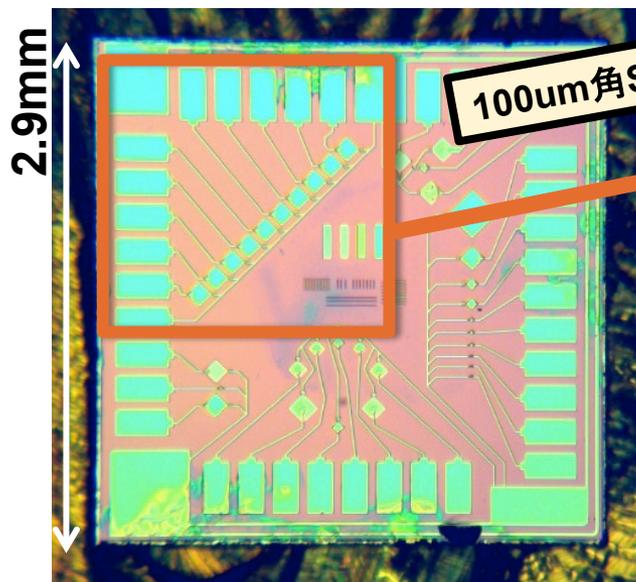


# 産総研でのSTJのデザイン

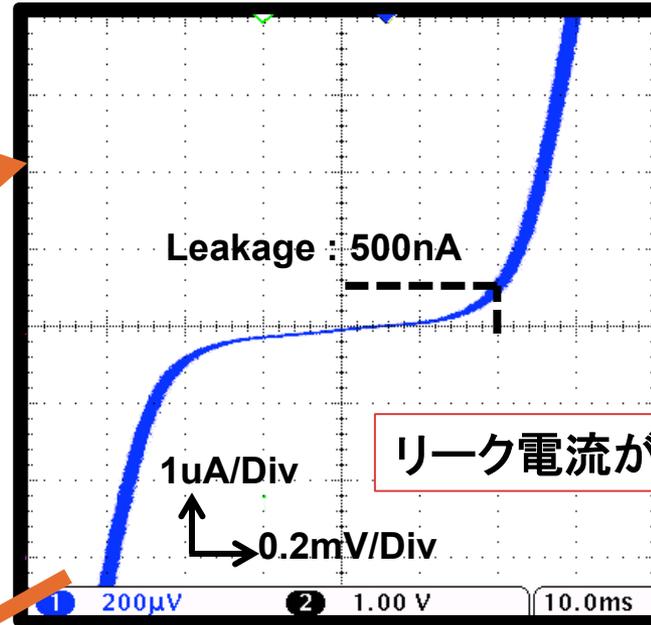
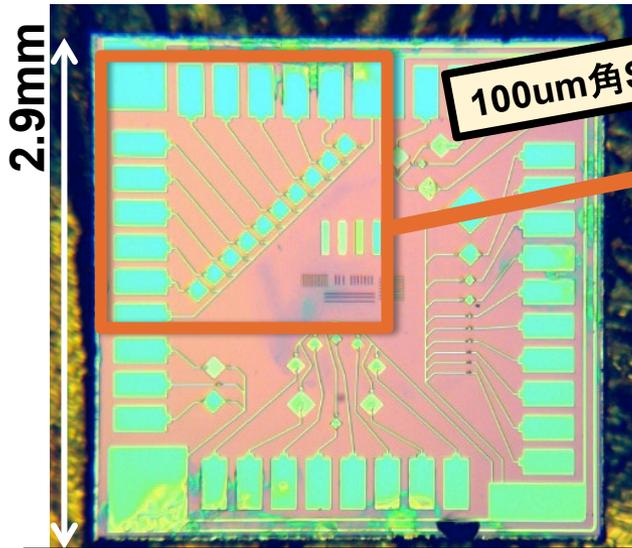
## Nb/AI-STJ用のフォトマスクをデザイン



# 産総研で作製したSTJの測定



# 産総研で作製したSTJの測定

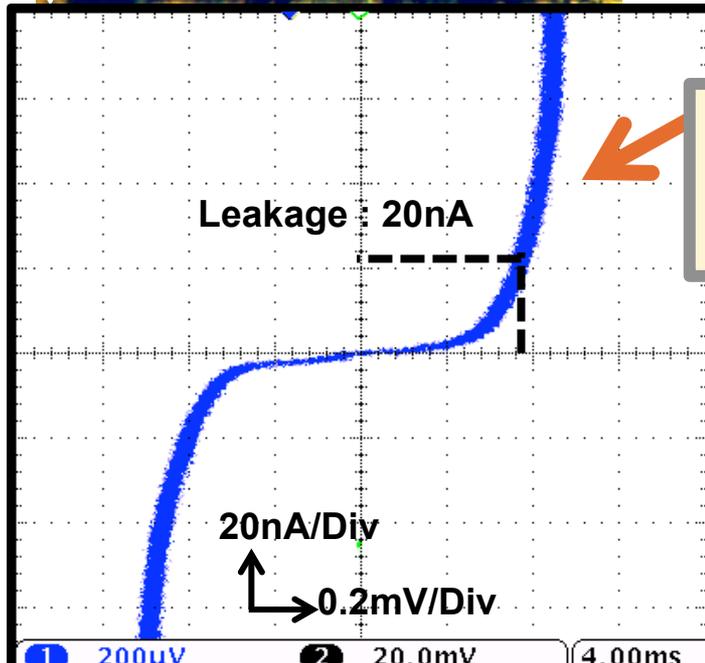


リーク電流が異常に大きい!

- 冷凍機内の磁性体を除去
- 磁気シールドにより地磁気を除去
- グラウンドループを解消

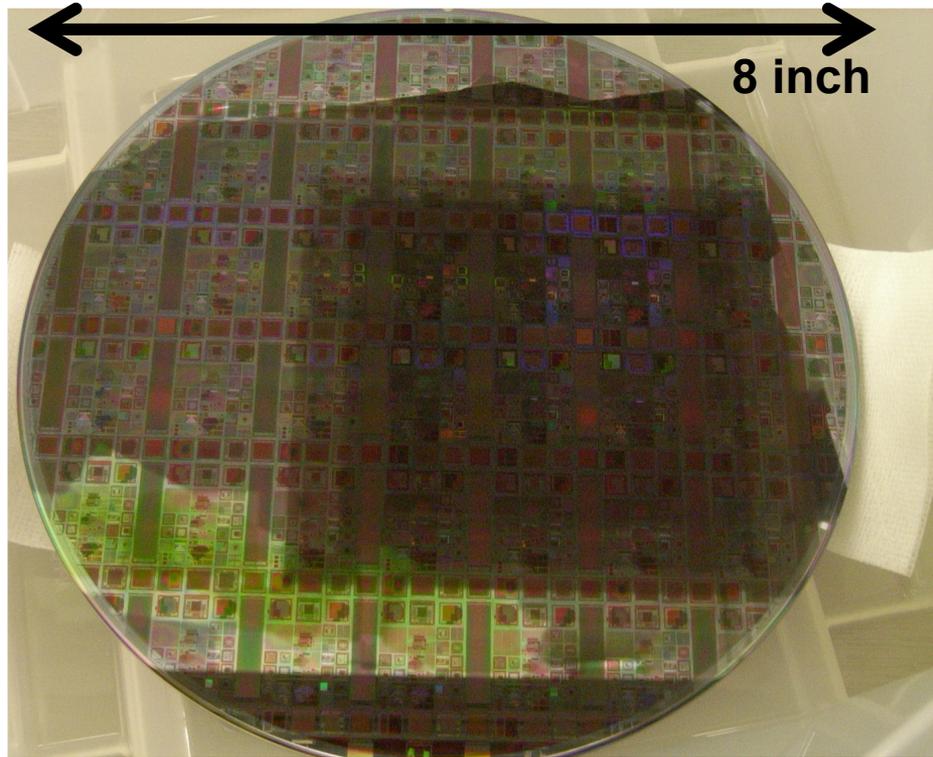
測定系を改善したことにより  
リーク電流が500nA→20nAまで減少

産総研の測定系では1nA程度のリーク電流  
50um角では200pAのリーク電流



# 産総研でのSOI-STJ design

新たな回路を設計し、回路部にあわせてSTJのフォトマスクをデザイン

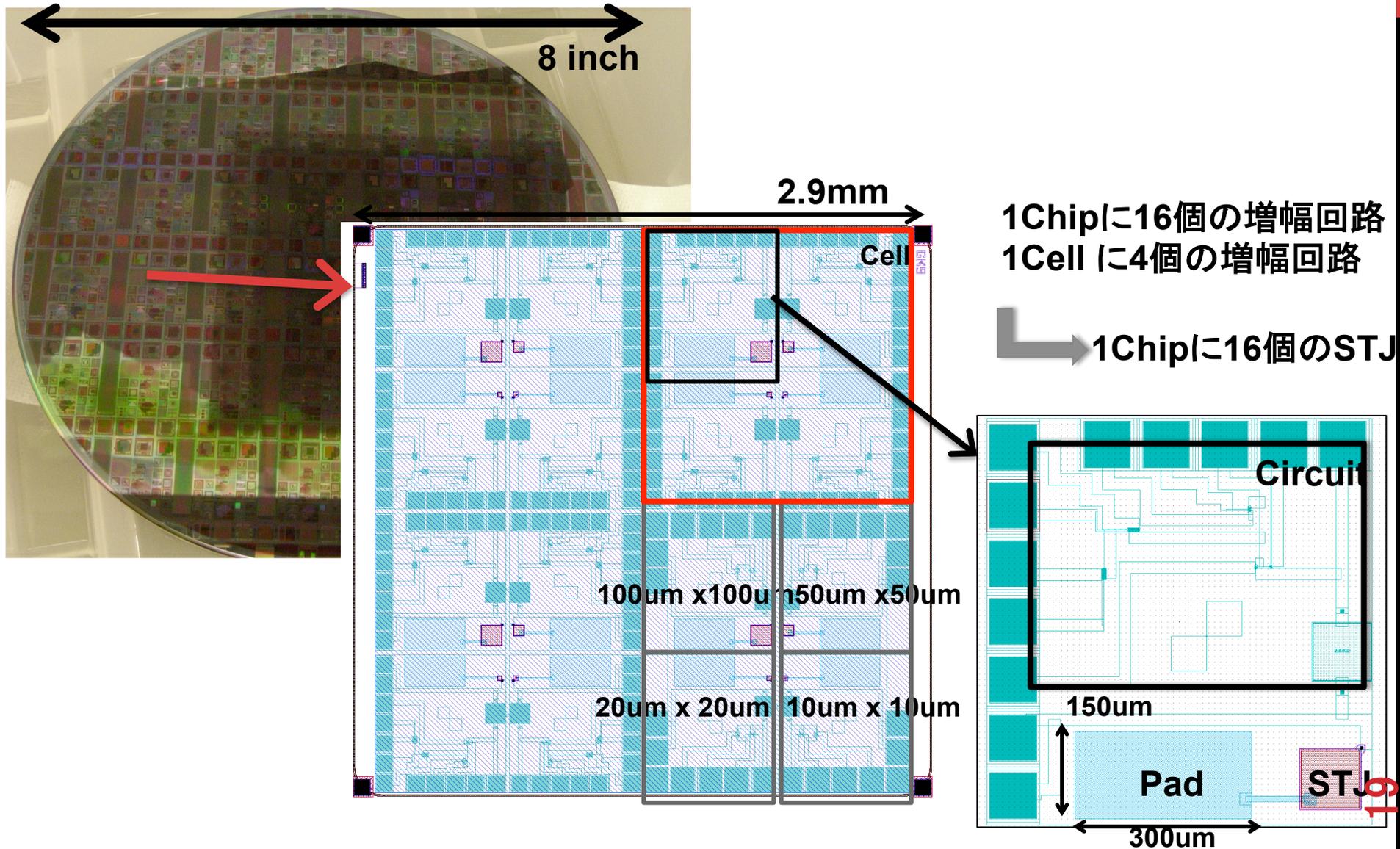


SOIウエハー

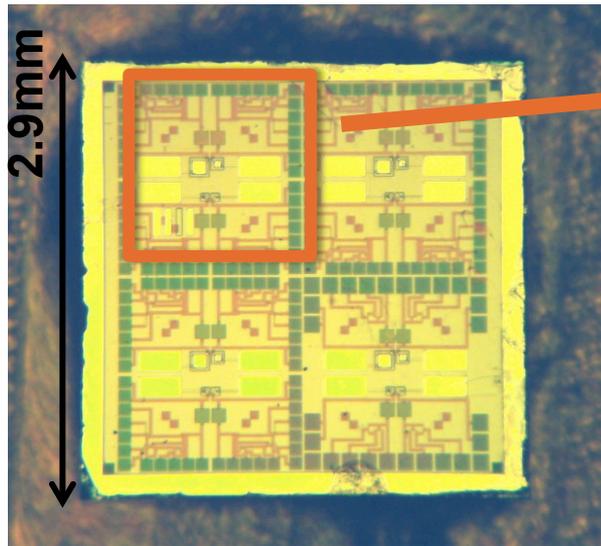
設計したSOI回路をLapis Semiconductor に発注

# 産総研でのSOI-STJ design

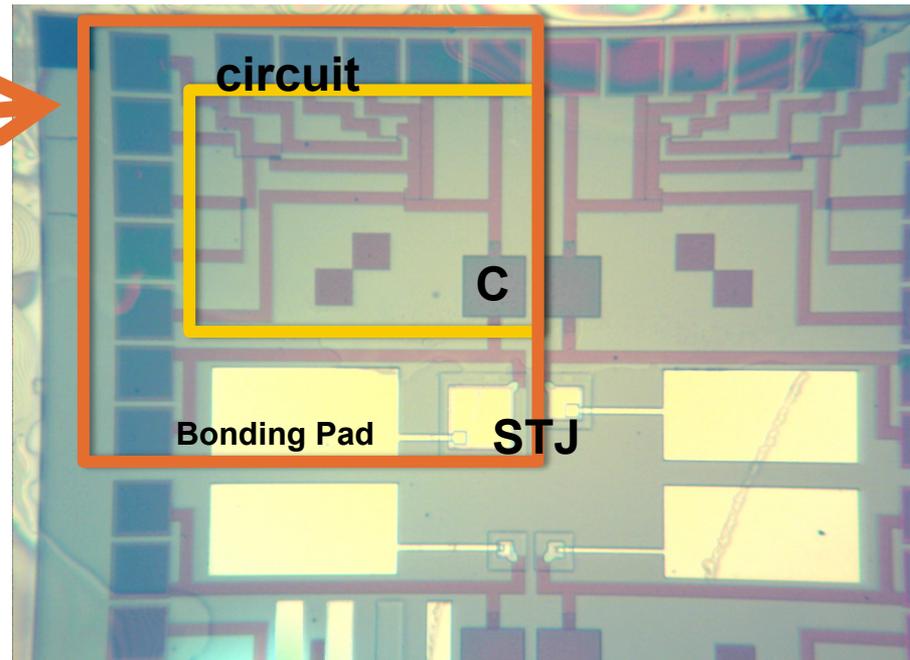
新たな回路を設計し、回路部にあわせてSTJのフォトマスクをデザイン



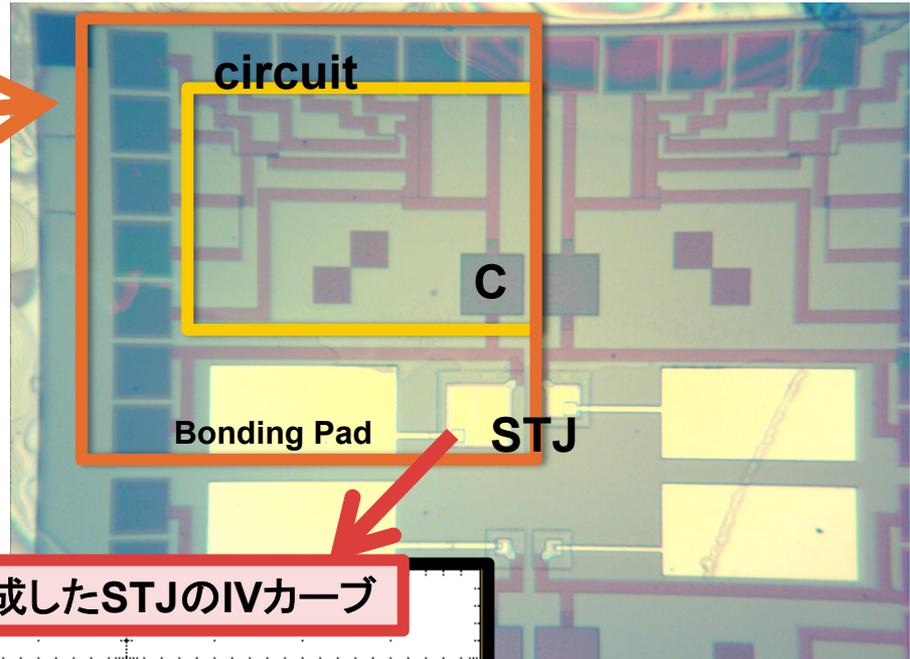
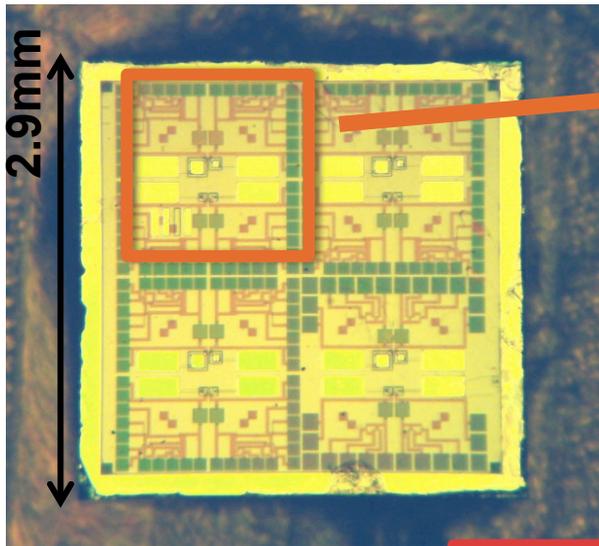
# 産総研で作製したSOI-STJ



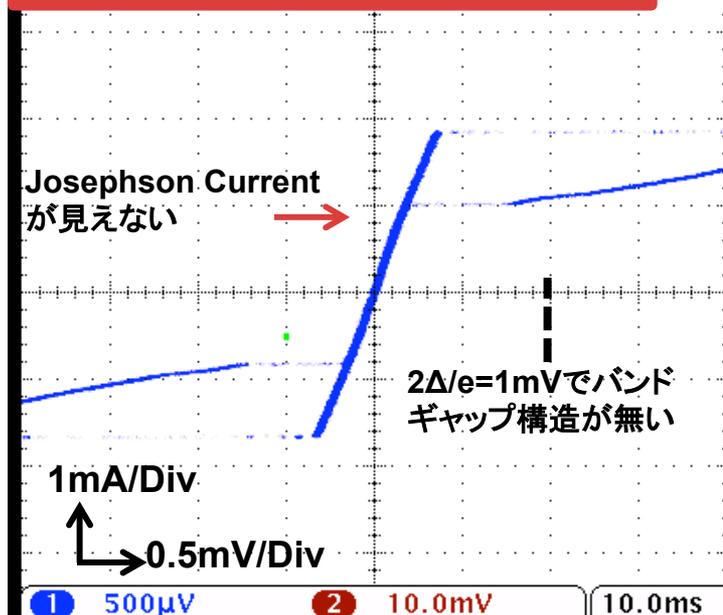
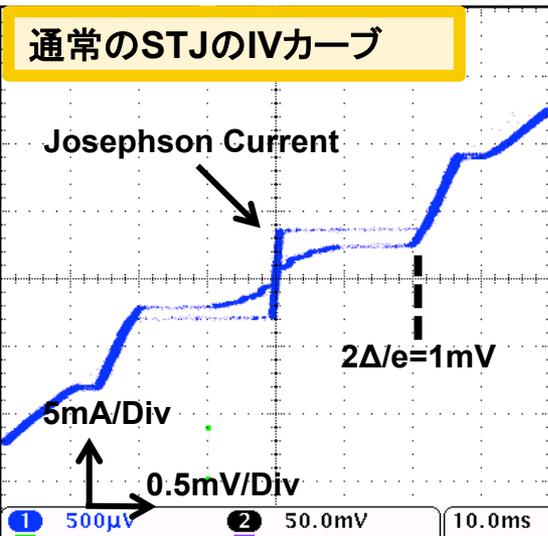
STJを形成したSOI



# 産総研で作製したSOI-STJ



SOI上に形成したSTJのIVカーブ



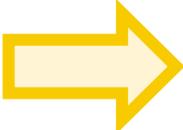
STJ特有のIVではない  
→STJが形成できていない

原因と考えられるもの

- 回路中に含まれる磁性体?
- SOIの表面状態が悪い?
- プロセス、デザインのミス?

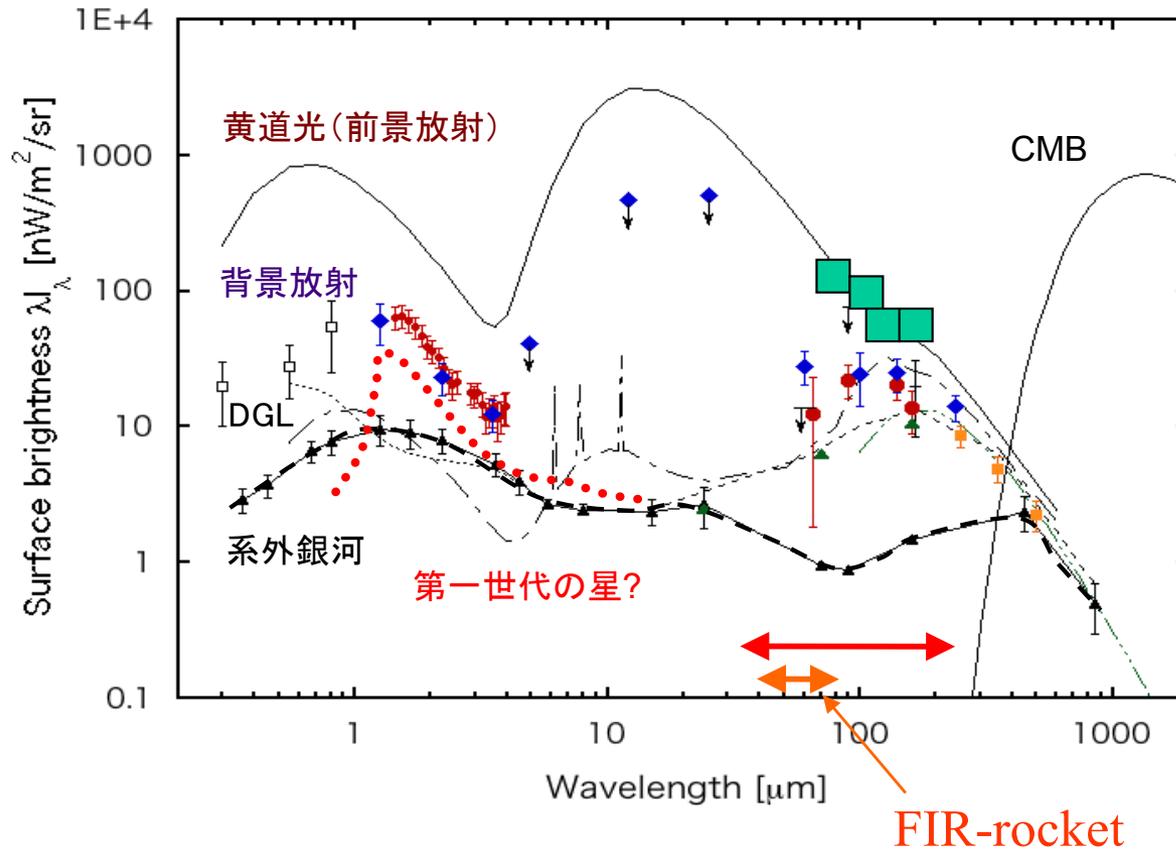
# まとめ

- **KEKでSOI上にSTJを作製**
  - STJとしての動作を確認!!
- **産総研でSTJ,SOI-STJを作製**
  - STJに関しては**産総研の測定系でリーク電流200pAを達成**  
(我々の目標値は100pA以下)
  - SOI上に作製したSTJはうまく形成されていない
    - 現在問題を探索中
- **$^3\text{He}$ 減圧冷却系を導入**
  - 磁気シールドなどを設置することにより測定系を改善
    - もう少し改善が必要

 産総研で作製したSTJはリーク電流の要求をほぼ達成  
産総研でSOI-STJを完成させ、遠赤外光一光子検出を目指す

**BUCK UP**

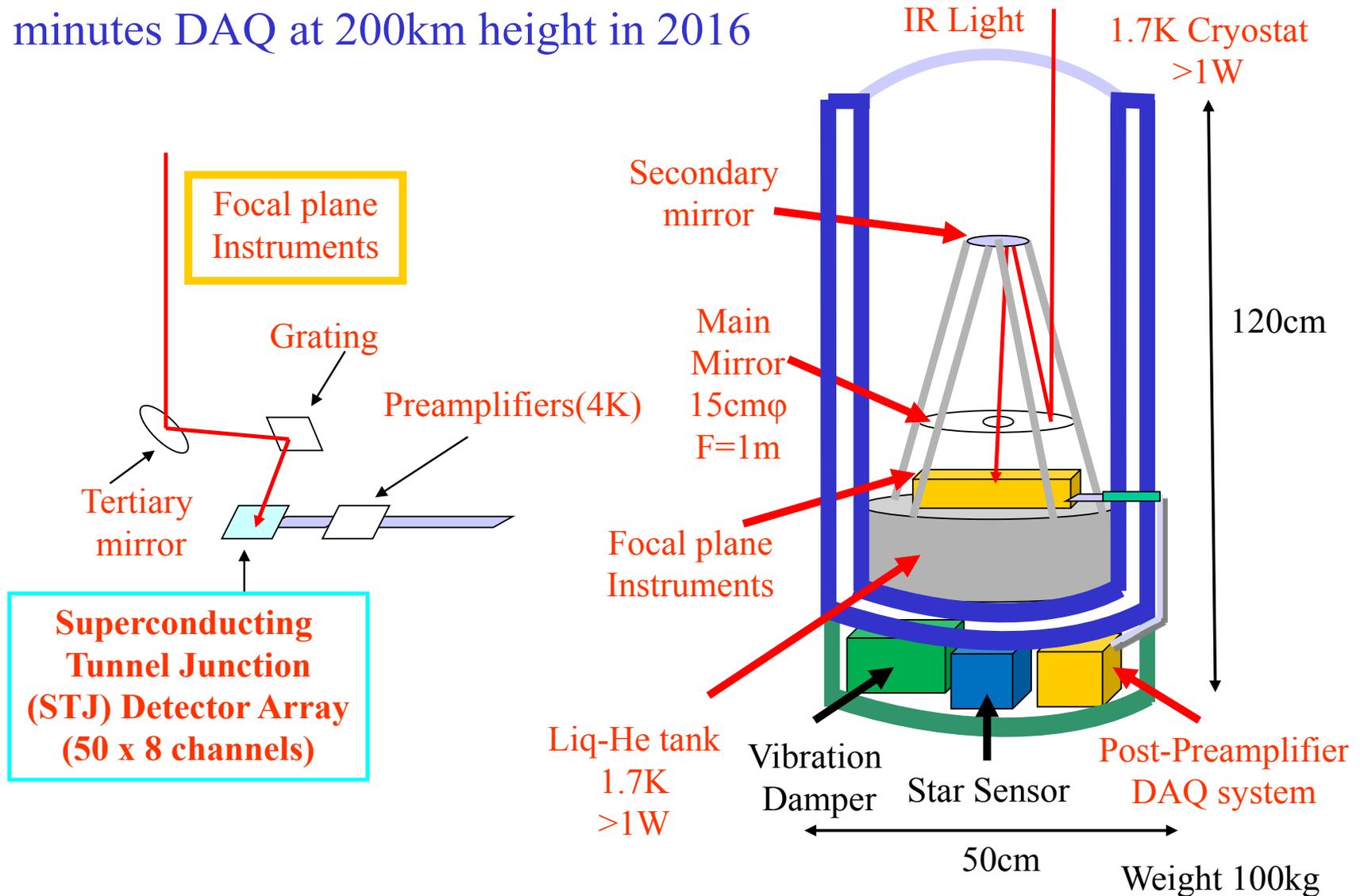
# 宇宙背景赤外輻射



■ JAXA CIB observatory rocket experiment FIR results (1994)

# ロケット実験のための装置

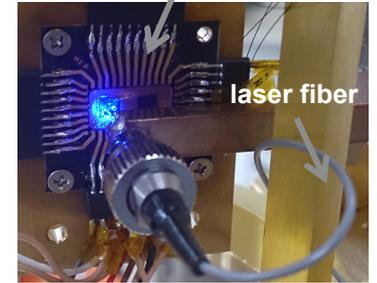
5 minutes DAQ at 200km height in 2016



# STJ ARRAY PROTOTYPE FOR NEUTRINO DECAY SEARCH

We processed STJ at AIST and KEK, and measured distribution of infrared(1310nm) laser with STJ array

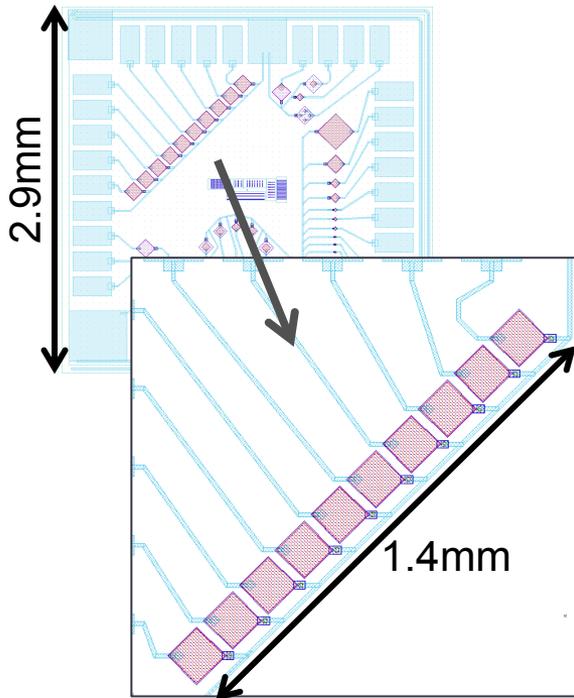
STJ chip carrier



laser fiber

STJ illuminated with blue laser

The distribution of laser from fiber is expected to be Gaussian

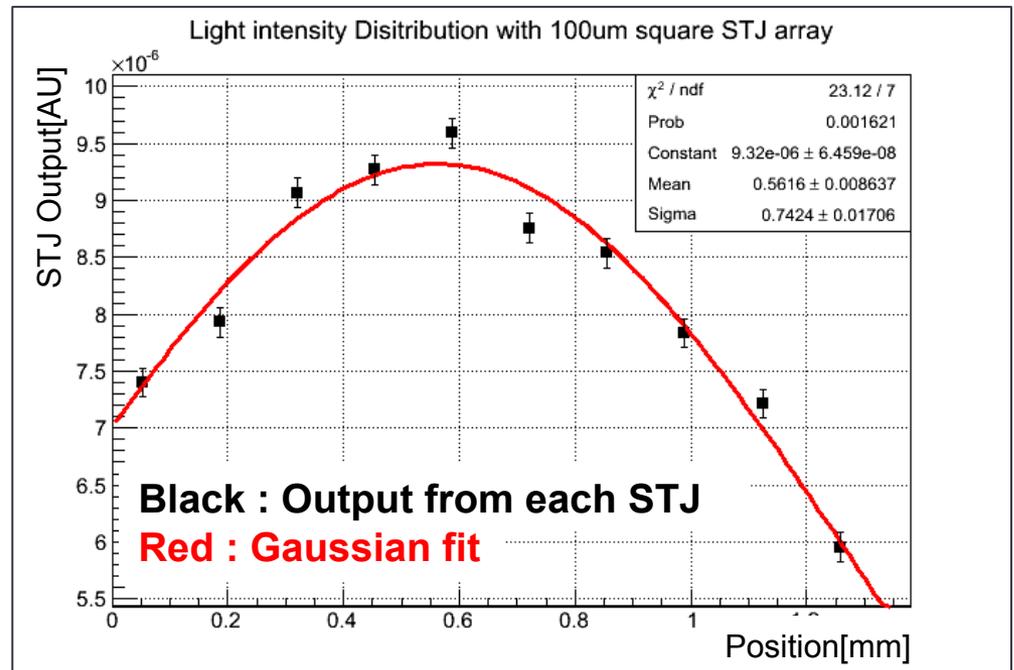


## STJ array on the chip

The number of STJs : 10

The size of each STJ : 100um x100um

## The distribution of infrared light with STJ array



# 以前の測定系

磁場があるとSTJのリーク電流が増えるらしい  
近くにある磁性体からの磁場？

## 問題と思われるところ

- XYステージに使われている磁性体
- チップキャリアを固定しているステンレスねじ
- 室温に繋がっている光ファイバーからの赤外輻射

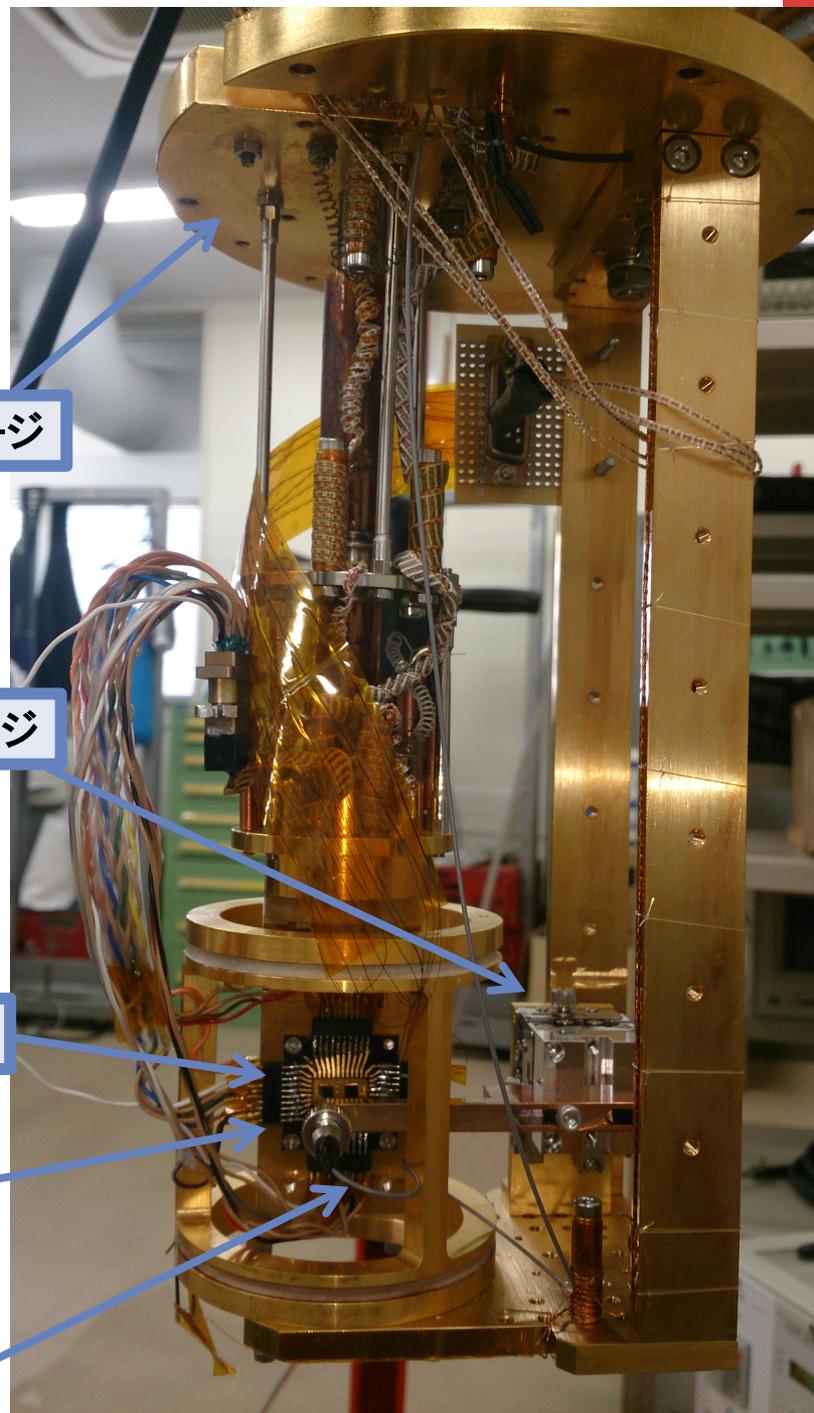
3Kステージ

XYステージ

STJ & chip carrier

ステンレスねじで  
ねじ止め

室温から伸びて  
いる光ファイバー



# 改善した測定系

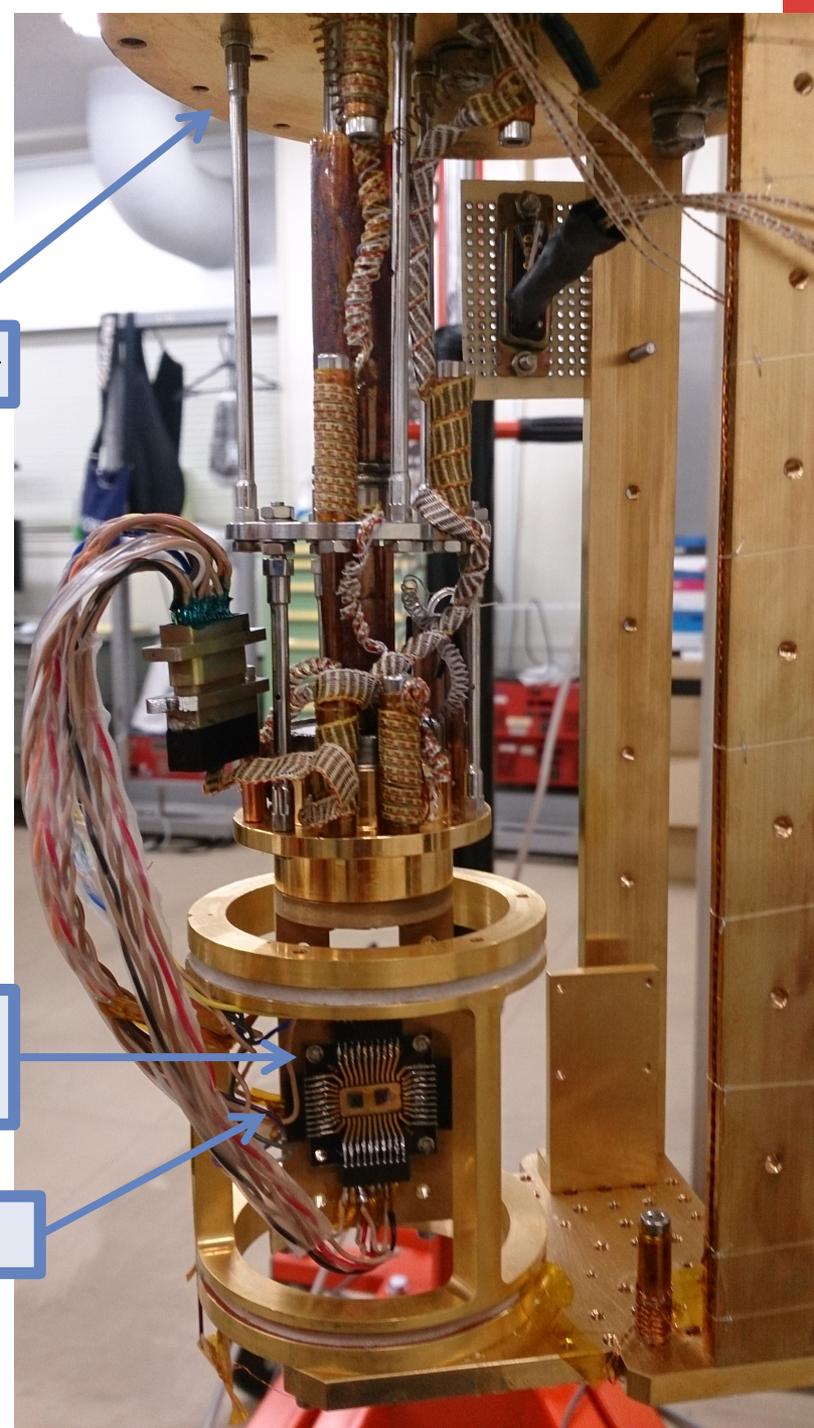
## 改善したところ

- XYステージを除去
- チップキャリアを固定しているステンレスねじをプラスチックねじに変更
- 室温に繋がっている光ファイバーを除去

3Kステージ

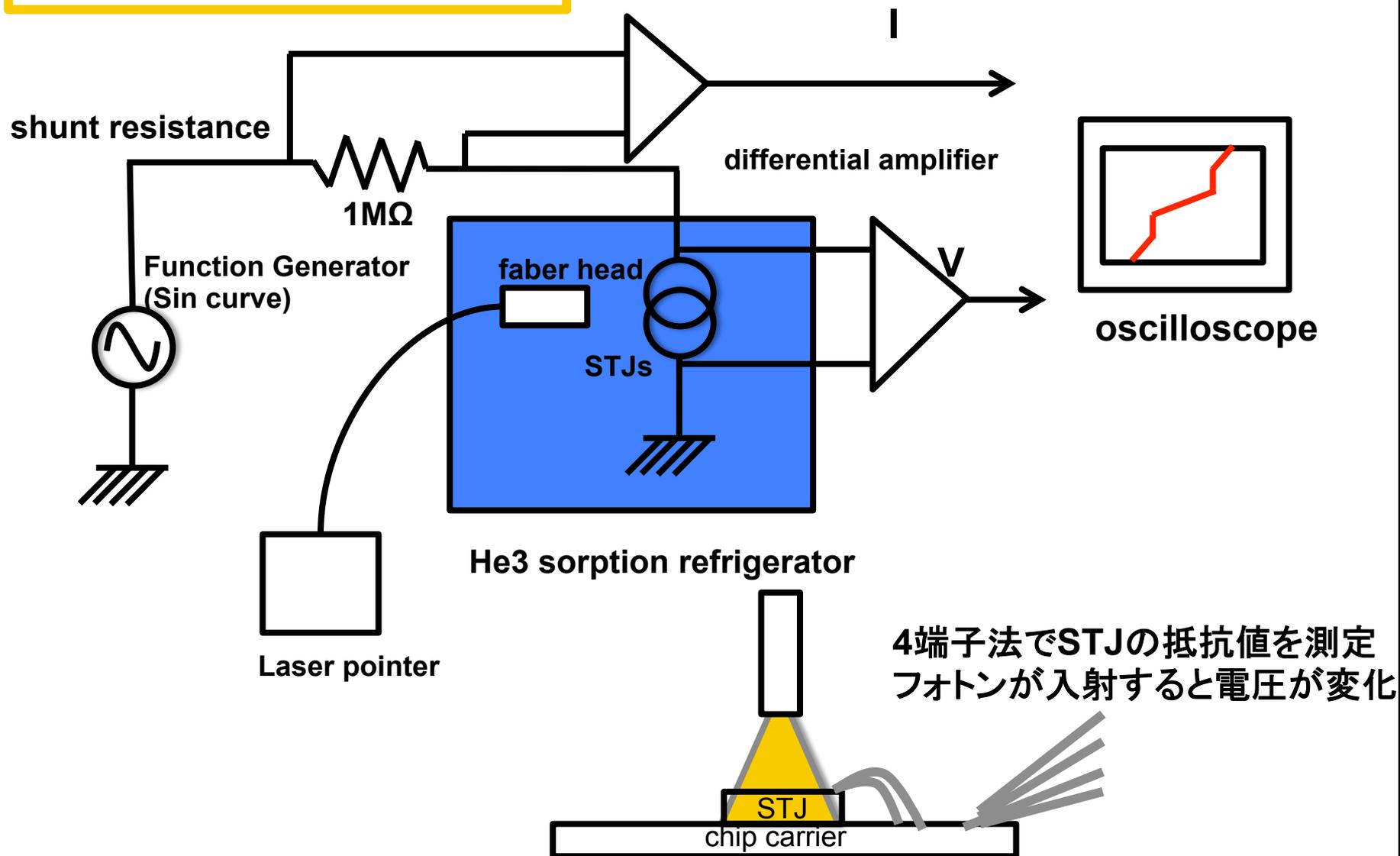
プラスチックねじで  
ねじ止め

STJ & chip carrier



# 測定方法

## STJ測定回路：定電圧回路



# 磁気シールド



60Kシールドをパーマロイテープ(厚さ50um)で覆う  
壁面を3重、底面を1重

ガウスマータで磁気シールドの効果を確認する

60Kシールド外 : 0.1~0.3Gauss

60Kシールド内 : 0~0.1Gauss (測定限界)

パーマロイテープ

# L-R 対称模型でのニュートリノの寿命

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 17, NUMBER 5

1 MARCH 1978

1395

## Properties of neutrinos in a class of gauge theories

M. A. B. Bégin and W. J. Marciano

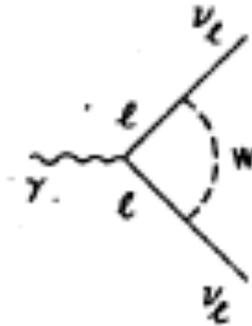
The Rockefeller University, New York, New York 10021

M. Ruderman

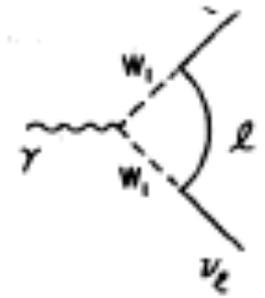
Columbia University, New York, New York 10027

(Received 5 October 1977)

We discuss the properties of neutrinos in a class of gauge theories characterized by manifest left-right symmetry and spontaneous genesis of parity nonconservation. Topics discussed in detail include: currents with anomalous Lorentz structure (herein called class III currents), electromagnetic properties of neutrinos, and rare processes involving neutrinos which are forbidden in the two-component theory. Calculations of the relevant coupling parameters and reaction rates are presented and compared to the best limits available from terrestrial experiments and astrophysical considerations. Some cosmological implications are also discussed, and it is suggested that all long-lived low-mass neutrinos have been discovered.



(a)



(b)

$$W_1 = W_L \cos \zeta - W_R \sin \zeta$$

$$W_2 = W_L \sin \zeta + W_R \cos \zeta$$

$W_L$  and  $W_R$  はそれぞれ V-A, V+A 結合  
 $\zeta$  は、混合角

M. Bégin, W. Marciano and M. Ruderman Phys. Rev. D17 (1978) 1395-1401

ニュートリノ崩壊幅を  $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)$  模型で計算.

$M(W_2)$  無限大で  $\sin \zeta = 0$  が標準模型と一致。

## 磁気モーメント

$$\kappa_{\nu_\ell} = \frac{G_F}{\pi^2 \sqrt{2}} m_e \left[ m_\ell \left( 1 - \frac{m_{W_1}^2}{m_{W_2}^2} \right) \sin 2\xi + \frac{3}{4} m_{\nu_\ell} \left( 1 + \frac{m_{W_1}^2}{m_{W_2}^2} \right) \right]$$

現在の測定下限値  $M(W_2) > 715 \text{ GeV}/c^2$ ,  $\xi < 0.013$  より,  
 $M(W_2) = 1 \text{ TeV}/c^2$ ,  $\xi = 0.01$ を用いると,最大で,

$$\kappa_{\nu_\ell} \approx \frac{0.02 G_F}{\pi^2 \sqrt{2}} m_e m_\ell = 0.4 \times 10^{-14} \left( \frac{m_\ell}{m_e} \right) \quad (1)$$

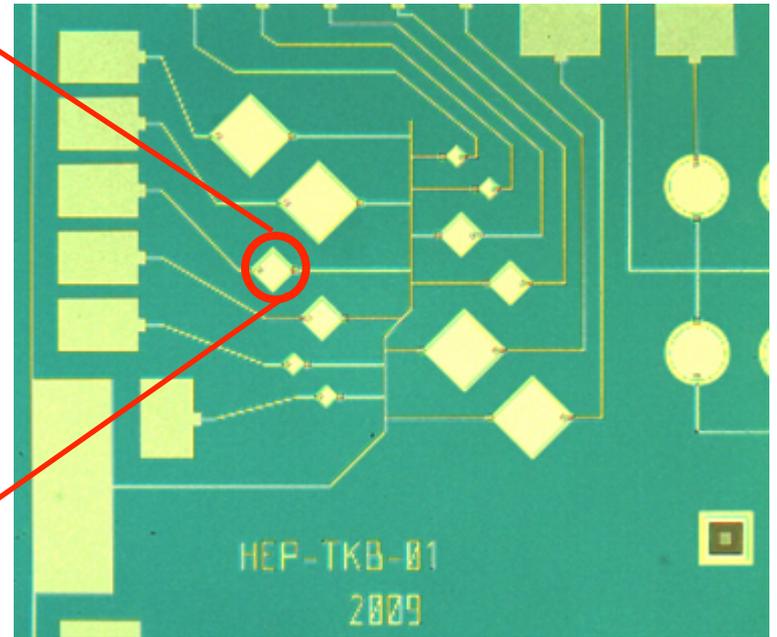
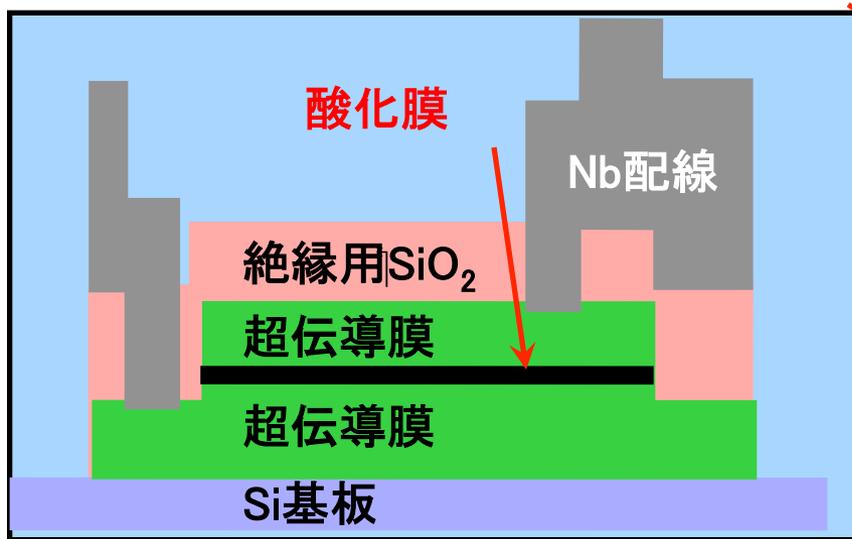
$$\kappa_{\nu_e} = 0.4 \times 10^{-14} \mu_B, \quad \kappa_{\nu_{\mu e}} = 0.8 \times 10^{-12} \mu_B, \quad \kappa_{\nu_\tau} = 3.6 \times 10^{-8} \mu_B$$

$$\kappa_{\nu_e} < 1.3 \times 10^{-10} \mu_B, \quad \kappa_{\nu_{\mu e}} < 6.8 \times 10^{-10} \mu_B, \quad \kappa_{\nu_\tau} < 3.9 \times 10^{-7} \mu_B$$

$$\mu_B = \frac{e}{2m_e} : \text{Bohr Magnetron}$$

# STJの構造

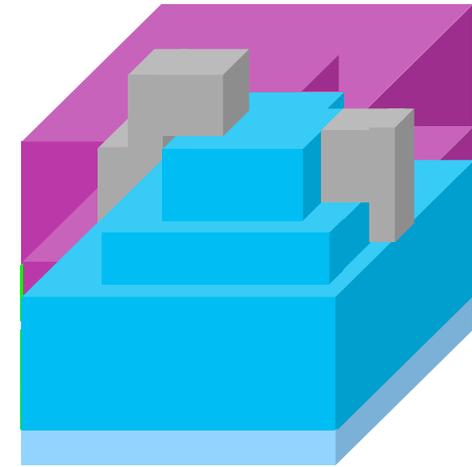
- 超伝導トンネル接合素子 (Superconducting Tunnel Junction)
- 超伝導を使った放射線検出器
- 構造: 超伝導膜 / 絶縁膜 / 超伝導膜



- ◆ 大きさ:  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 600\text{nm}$ 厚  
(超伝導転移するには膜厚が200nm以上必要)
- ◆ 絶縁膜は数nm程度。

# STJの作製方法

- 1.基板上にHfをスパッタ, 酸化の後, 更にHfをスパッタ
- 2.レジストを塗布, 露光・現像しジャンクションのパターンを形成
- 3.ドライエッチング法でHfを適当な高さまで削る
- 4.レジストを除去
- 5.レジストを塗布, 露光・現像しアンダレイヤのパターンを形成
- 6.ドライエッチング法でHfを基板まで削る
- 7.レジストを除去
- 8.酸化膜(SiO<sub>2</sub>)をスパッタ
- 9.レジストを塗布, 露光・現像しコンタクトホールのパターンを形成
- 10.ドライエッチング法で酸化膜(SiO<sub>2</sub>)を削り, コンタクトホールを開ける
- 11.レジストを除去
- 12.Nbをスパッタ
- 13.レジストを塗布, 露光・現像しワイヤのパターンを形成
- 14.ドライエッチングでNbをワイヤの形に削る
- 15.レジストを除去

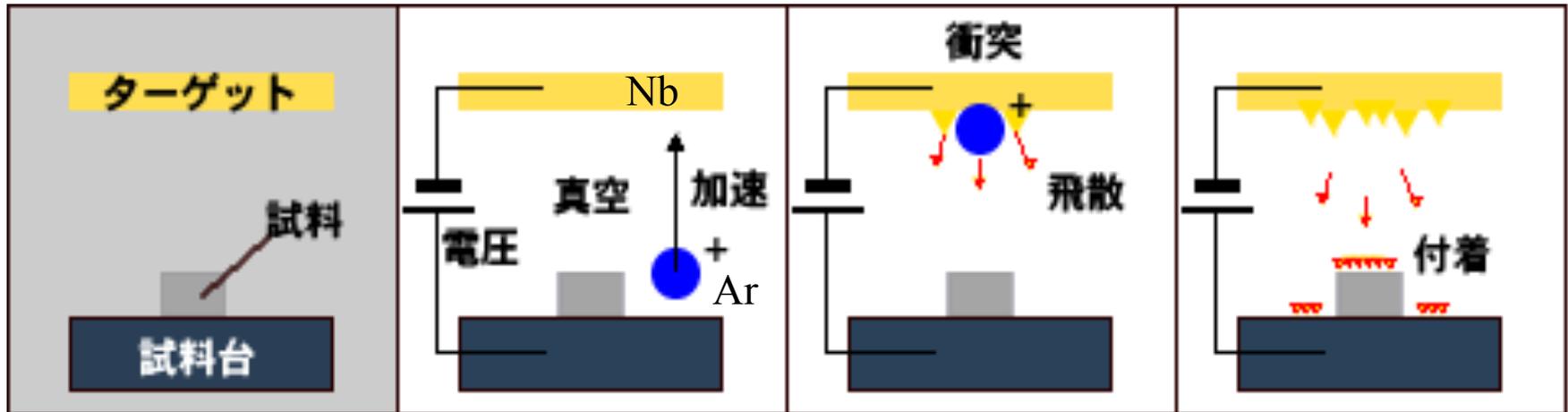


- : Si(基板)
- : Nbワイヤ
- : Hf超伝導膜
- : Hf酸化膜(絶縁膜)
- : レジスト
- : SiO<sub>2</sub>(絶縁用)
- : コンタクトホール

# 金属薄膜の成膜の仕組み

・ 金属薄膜の成膜にはスパッタリング法を用いる

- ①成膜したい金属を上部に、膜を作る試料を下部に配置する
- ②Arガスをプラズマ化させ、高電圧をかけてターゲットに衝突させる
- ③ターゲットが飛散する
- ④下の基板(試料)にターゲットが付着



基板間距離: 固定  $T_s=130\text{mm}$   
Arガス流量: 固定  $50\text{cc/min.}$

投入パワー:  $200\sim 600\text{W}$   
Arガス圧力:  $0.7\sim 3.0\text{Pa}$

# 金属薄膜の加工方法

反応性の気体イオン, ラジカルによってエッチングする方法

エッチングガスを電磁波でプラズマ化

同時に基板を置く陰極に高周波電圧を印加

→ プラズマ中のイオンやラジカルが試料めがけて加速され衝突  
加えて, 独立したバイアスによってイオンを基板に導くことが可能

イオンが垂直に入射, ラジカルが削られた壁面に付着

→ 横方向へのエッチングは抑制され, 垂直に削れる

