## 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND実験と その超伝導光検出器開発

素粒子実験研究室

武政健一

第一回宇宙史サロン 2016/12/12

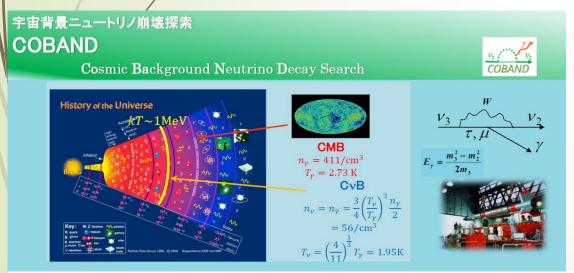
#### COBAND実験

## (COsmic BAckground Neutrino Decay Search)

- 超伝導光検出器を乗せたロケット/衛星を打ち上げ、宇宙赤外線の遠赤外領域 (Eγ~数10meV)のエネルギー分布を測定する。
- そこに含まれる宇宙背景ニュートリノの崩壊事象を見つけ出す。



- 宇宙背景ニュートリノの存在の検証
- ニュートリノ質量の決定

















SEOUL













http://hep.px.tsukuba.ac.jp/coband/index.html



## 宇宙の基本構成要素 素粒子 のひとつ

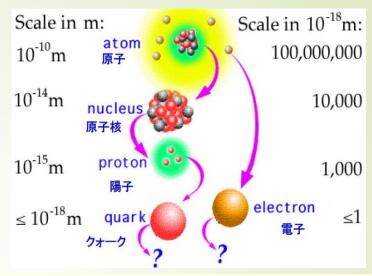
例えば, 中性子の β 崩壊において生じる

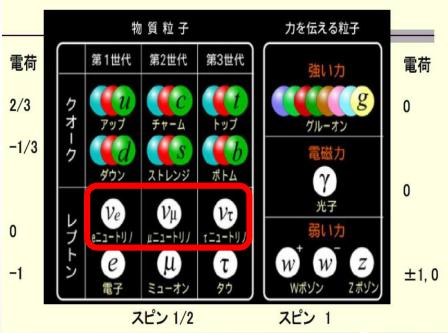
$$n \to p e^- \bar{\nu}_e$$

- ▶ 物質粒子(クォーク・電子と同類)
- > 電荷を持たない
- ▶ 弱い相互作用のみ行う

長い間、質量が零であると思われてきたが, 1998年にニュートリノ振動現象が観測された → 小さいながら,零でない質量を持つ

- ◆ 他の物質粒子と比べて格段に軽い
- ◆ 質量が零でないことは判ったが、その絶対値は 測定されていない





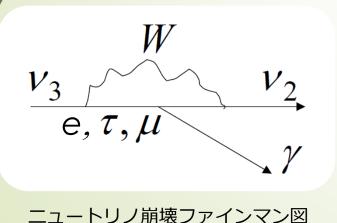
#### 「素粒子標準理論」の素粒子

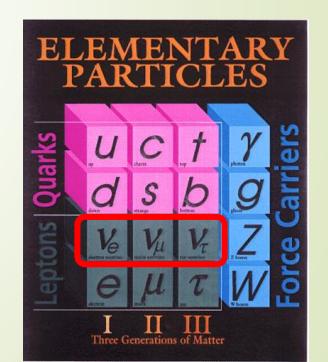
- 物質を構成する粒子(クォークとレプトン)
- 力を伝える粒子(グルオン・光子・W, Zボソン)
- 質量を与える粒子(ヒッグス粒子)

#### モチベーション

#### ニュートリノ質量の決定

- ニュートリノ振動が観測されたことで質量自乗差は測定されたが、 質量そのものは測定されていない。
  - $\Delta m_{32}^2 = m_3^2 m_2^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ ,  $\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- <u>二ユートリノ崩壊</u>を観測することでニュートリノ振動と独立な物理量が得られる。
  - 崩壊で放出される光子のエネルギー:  $E_{\gamma} = \frac{\Delta m_{32}^2}{2m_3}$
- これにより、ニュートリノ質量を決定できる。





## 5 ニュートリノ崩壊

- ニュートリノが重い質量固有状態から軽い質量固有状態と光子に崩壊する現象
  - $\sim$   $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$
  - $\blacksquare$  崩壊で放出される光子のエネルギー:  $E_{\gamma} = \frac{\Delta m_{32}^2}{2m_3}$
- From neutrino oscillation

$$-\Delta m_{23}^2 = |m_3^2 - m_2^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

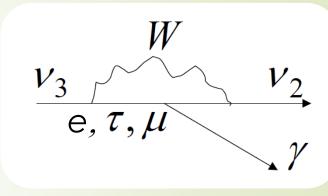
$$-\Delta m_{12}^2 = 7.65 \times 10^{-5} eV^2$$

- From Planck+WP+highL+BAO
  - $-\sum m_i < 0.23 \text{ eV}$

 $\rightarrow$  50meV< $m_3$ <87meV

$$E_{\nu} = 14 \sim 24 \text{meV}$$

$$\lambda_{\gamma} = 51 \sim 89 \mu \text{m}$$

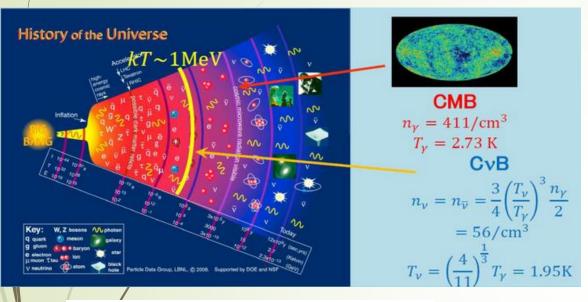


ニュートリノ崩壊ファインマン図

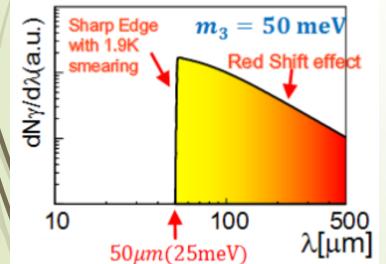
- 寿命は、 T<sub>3</sub>>3×10<sup>12</sup>year (J.Phys.Soc.Jpn.81,024101(2012))
  - $_{3} > 10^{43}$  years (標準模型,  $v_{3}$  質量を50 meV/c<sup>2</sup>と仮定した場合)
  - т<sub>3</sub> > 1.5×10<sup>17</sup> years (LR対称模型)

ニュートリノの寿命は非常に長いので、崩壊を観測するためには大量のニュートリノが必要 → 宇宙背景ニュートリノを観測対象にする

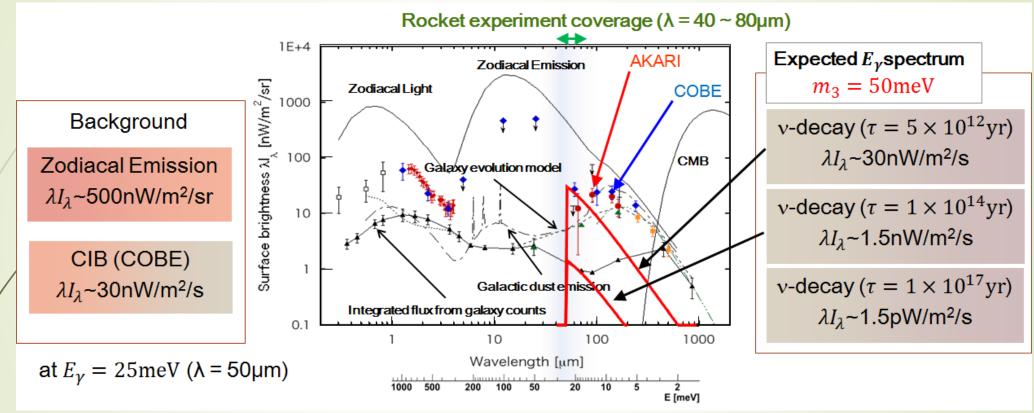
## 宇宙背景ニュートリノ



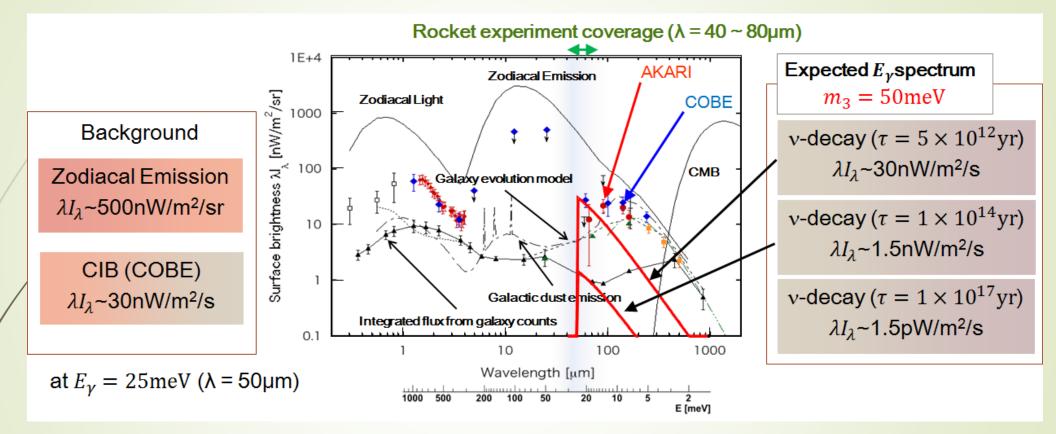
- 宇宙背景放射と同様に宇宙初期に生成され、宇宙空間に 一様に存在すると予言されている。
- ビッグバンの数秒後に自由になり,現在の宇宙空間に 1.9Kの温度で一様に1cm³あたり110個存在する。
- 宇宙最初期の情報を持つ→宇宙起源の理解へのプローブ
- 宇宙中に大量に存在 → ニュートリノ崩壊観測の対象



- ← 予測される宇宙背景ニュートリノ崩壊のエネルギースペクトル $(v_3 \rightarrow v_2 + \gamma)$ 
  - m<sub>3</sub> = 50meVを仮定
  - 重心系でのEγ = 25meV
- ニュートリノ自身の運動(1.9K)によりsmear。
- 宇宙膨張により赤方偏移 → 長波長側へテールを引く



- 黄道光(zodiacal emission)が主な背景事象
  - Zodiacal emission: 太陽光により暖められた薄いダストの黒体放射~270K
  - 黄道光の最も暗い黄極方向では  $\nu I_{\nu}[W/m^2/sr] = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{exp(h\nu/kT) 1} \times (\nu \times 10^{-5}/c)^{0.3} \times 6 \times 10^{-8}$



宇宙赤外線を連続的に測定し、その中から宇宙背景ニュートリノの崩壊によるエッジを見つけ出す。 エッジを観測するためには、 $E_{\gamma} \sim 25 \text{meV}(\lambda \sim 50 \mu \text{m})$  の光子をエネルギー分解能2%で検出できる 検出器が必要。

## 9 COBAND実験



#### COBAND実験は2つの観測実験を予定している

#### - ロケット実験

- 上空200kmにて200secのデータ収集 (2019年)
- 現在のv3寿命の下限値を2桁更新する。(~1014years).
- ▲望遠鏡:直径15cm,視野 0.006°×0.05°
- 検出器: 50x8 Nb/Al-STJアレイ + 回折格子(λ=40-80μm)

Nb/Al-STJはエッジを観測する分解能は持たないが、光子のカウントは可能。

回折格子で分光し、Nb/Al-STJでカウントする。

# $\lambda = 40 - 80 \mu \text{m}$

#### 衛星実験

- 人工衛星にて100日間のデータ収集(2020年以降)
- τ(v3) ~ 10<sup>17</sup>年の感度
- ■望遠鏡: 直径20cm, 視野: 0.1°
- 検出器: Hf-STJ

Hf-STJはエッジを観測できるだけのエネルギー分解能を達成可能。



## COBAND実験に用いる光検出器

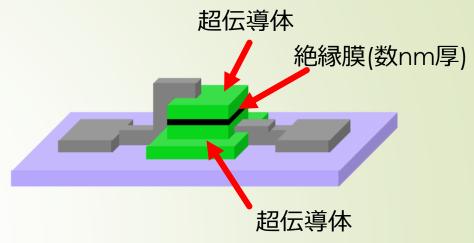
#### ▶検出器への要求

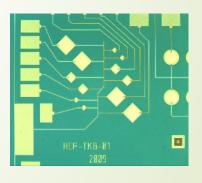
- 1. E~25meVの光子のエネルギーを分解能2%で測定できる
- 2. E~25meVの光子の1光子観測できる
- 3. 応答速度が400Hzよりも早い(ロケット実験の場合)
- 4. ロケット/衛星で実験に使用できる

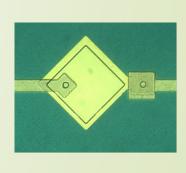
これらを満たす検出器として超伝導トンネル接合素子検出器(STJ検出器)の開発を行っている。

## 超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器

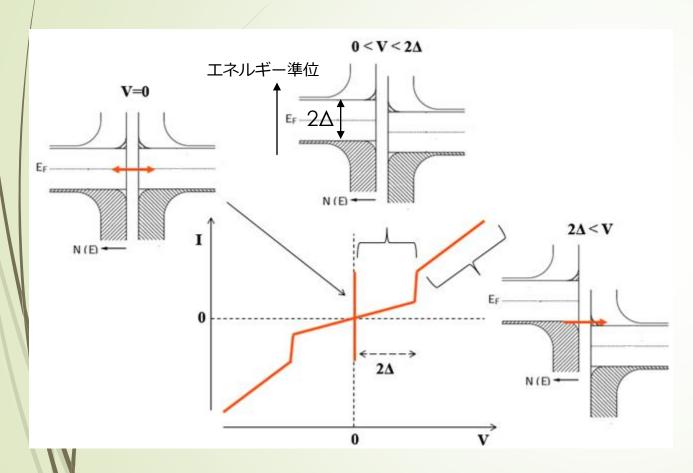
- Superconducting Tunnel Junction detector
- ▶ 絶縁膜を超伝導体で挟み込んだサンドイッチ構造
- 縦横:数10~数100µm角、厚さ:~500nm
- ▶特徴
  - 高エネルギー分解能 (半導体検出器の数十倍のエネルギー分解能)
  - ▶ 広帯域 (クーパー対の励起の必要なエネルギーが小さい)
  - ▶ 不感層なし(検出器全体が検出層)
  - 応答速度 ~µsec
  - 高集積化が可能 (AISTが1000pixelアレイを作っている)
  - 動作させるために冷却が必要 (熱起因のノイズを抑制するため、素材の相転移温度の1/10が目安)
  - ▶ 検出器として動作させるには磁場が必要







### STJのIV特性・動作原理



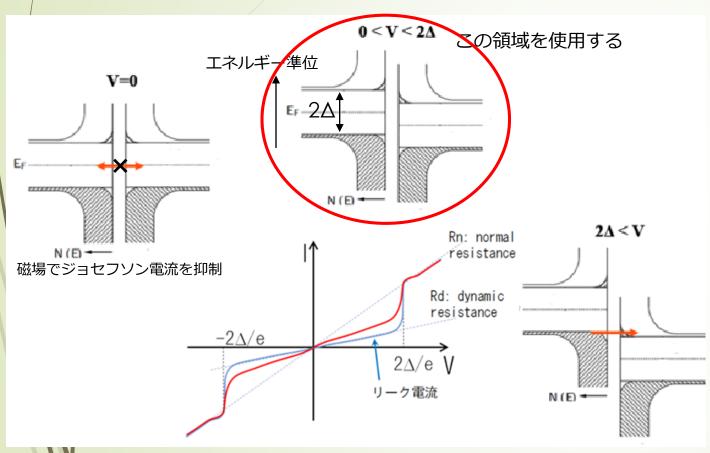
Δ: 超電導体のエネルギーバンドギャップ

- **►** V=0
  - ジョセフソン電流が流れる。
- **■** 0<V<2△
  - 理想的には電流の流れない領域。
  - 実際には熱起因の漏れ電流が存在。
  - ▶ 検出に用いる領域。
- **■** 2△<∨
  - 電圧に比例した電流が流れる領域

Rd

- ▶ 検出器として使用するときは、
  - 磁場をかけてジョセフソン電流を抑制
  - 超伝導転移温度の1/10以下に冷却し、 熱ノイズを抑制する

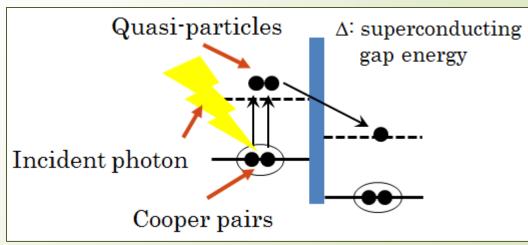
## STJのIV特性・動作原理



光が入射すると、励起された準粒子分電流が増加する。

#### 動作原理

- 電圧 0< V < 2∆をかける</li>
- ・光が入射し、クーパー対にエネルギー付与され、 乖離が起こり準粒子が生成される。
- 準粒子が他のクーパー対の乖離させたり、 フォノンを生成する。
- 準粒子が絶縁膜をトンネルしてもう一方の 超伝導体へ <del>)</del> 信号



## 14 エネルギー分解能

- STJのエネルギー分解能は、準粒子数の統計揺らぎに依存する。
- 超伝導エネルギーバンドギャップ∆が小さいほど準粒子数が多くなり、エネルギー分解能が良くなる。

$$\sigma_E = \sqrt{(1.7\Delta)F\varepsilon}$$

Material	Tc(K)	Δ(meV)
Niobium	9.20	1.550
Aluminum	1.14	0.172
Hafnium	0.13	0.021

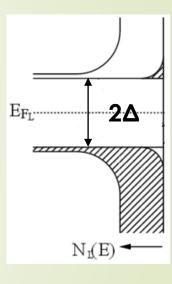
BSC理論では、 $2\Delta = 3.5k_BT_c$ 

Δ: Superconducting gap energy

F: fano factor

ε: Photon energy

Tc: Superconducting critical temperature
Need ~1/10Tc for practical operation



#### Nb

- Nb/Al-STJとして確立している。
- $N_{q,p} = 25 \text{meV}/1.7 \Delta = 9.5$
- エッジを認識できる分解能は持たないが 計数は可能

#### Hf

- Hf-STJは実用化されていない。
- $N_{q.p.} = 25 \text{meV}/1.7\Delta = 735$
- エッジを認識できるだけの分解能が達成可能. (F<0.3の場合)</li>

## Nb/Al-STJの開発

15

#### 産総研のCRAVITYにて作成

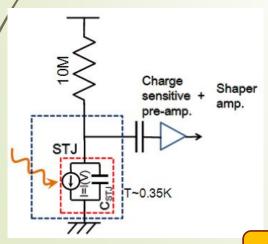
構造: Nb/Al/AlOx/Al/Nb = 100nm/70nm/1nm/70nm/200nm

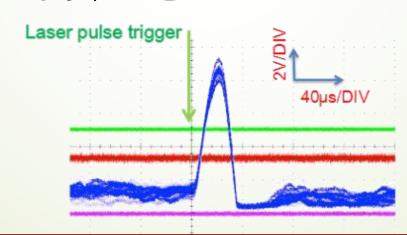


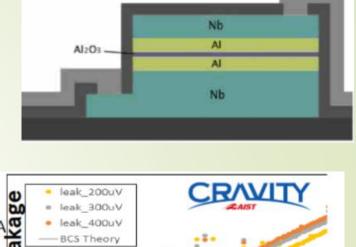
- 要求値: I<sub>leak</sub> < 100pA
- 実測値: I<sub>leak</sub> (400mK以下で下げ止まり)
  - $\sim$  200pA (50 $\mu$ m $\times$ 50 $\mu$ m sample)
  - $\sim$  50pA (20 $\mu$ m × 20 $\mu$ m sample)

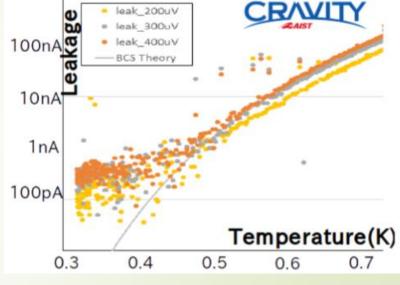
#### - 周波数特性

■ 要求値: 400Hz = 2.5msより早いこと







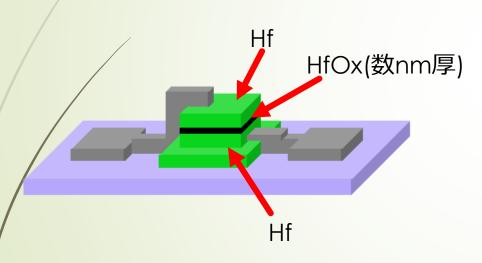


465nmレーザーへの応答
(using charge sensitive pre-amp. and shaper amp.)
~10 photons are detected

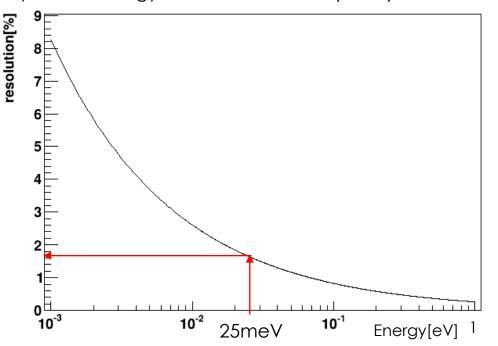
Nb/Al-STJはロケット実験の要求値を達成!

#### 16 Hf-STJ

- 超伝導体にHfを用いたSTJ。
- STJ単体でエネルギー分解能2%@25meVを達成可能。
- 衛星実験に用いる予定。



Expected energy resolution of Hf-STJ (F=0.2)



- 実際には構造欠陥や熱起因の漏れ電流が存在し、それを考慮に入れた目標値は
  - V=20µVかけたときの漏れ電流 <10pA@50mK (if signal width = 1µsec)
- Hf-STJは実用化されていないので、自分達で作成条件を探索する必要がある。

## 17 Hf-STJの開発

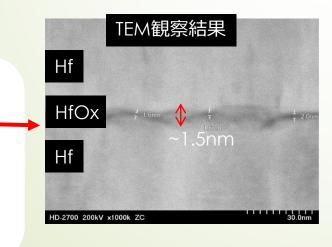
HfOx

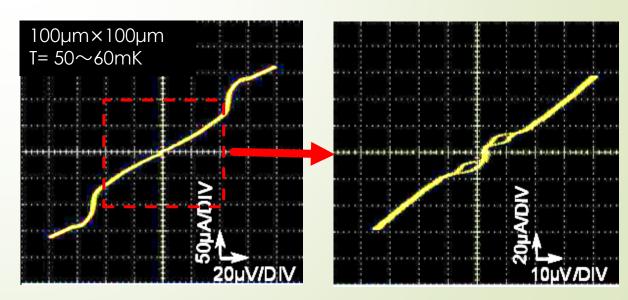
Si wafer

- ► KEKのクリーンルームにて作成
- 今年初めまでのHf-STJ
  - 構造: Hf/HfOx/Hf = 250nm/1.5nm/300nm
  - △ ~ 20µeV
  - 漏れ電流@20µV = 20µA@50mK (100µm角の素子)

#### 漏れ電流が非常に大きい。

漏れ電流の要求値@20µV = 10pA@50mK



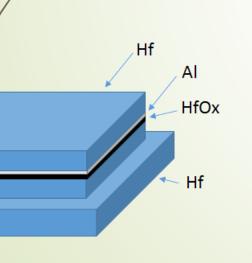


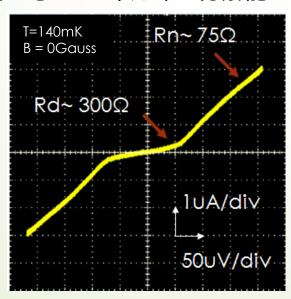
### Hf-STJの開発

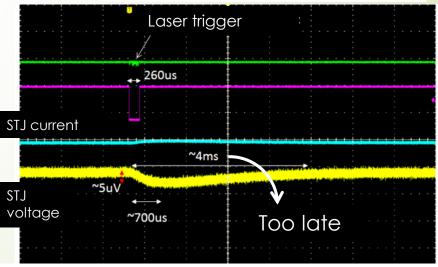
18

- ▶ 漏れ電流の抑制のため、構造を見直し
- 絶縁膜と上部Hf層の間にAI層を追加(10nm)
- I<sub>leak</sub>@20µeV = 60nA@140mK (200µm角)
- ジョセフソン電流が観測できない
- Δ = 30~100µeV. ← AIの近接効果
- 漏れ電流は改善されたが...
  - 信号も通さない
  - Δが大きくなっている → エネルギー分解能の悪化

Response to visible light λ=465um 10MHz oscillation 260μs per 1s







大光量でないと反応しない。反応速度が遅い。 → 光照射による温度上昇が見えているのではないか。

#### Hf-STJの開発

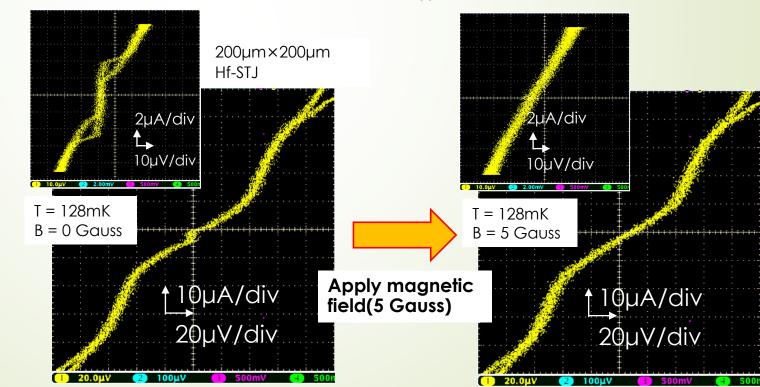
- AI層をエッチング
- ジョセフソン電流を観測。磁場で抑制されることを確認。
- $\Delta = 20 \sim 25 \mu eV (\sim \Delta_{Hf})$

Αl

HfOx

Hf

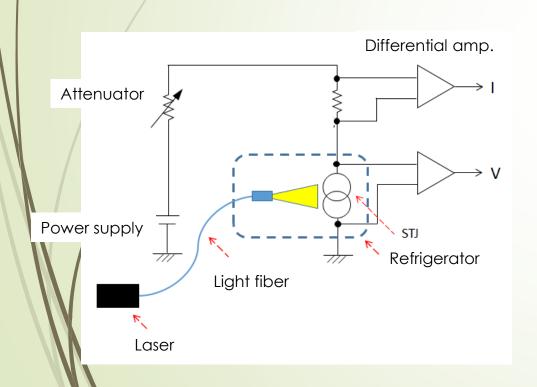
- I<sub>leak</sub> @20µeV = 5µA@128mK (200µm角)
   漏れ電流が年初のサンプルと比較して1/4に減少。(サイズ差を考慮に入れれば1/16)
  - 改善はしたが、いまだに要求値は達成していない。(要求I<sub>leak</sub> @20µeV = 30pA@120mK)

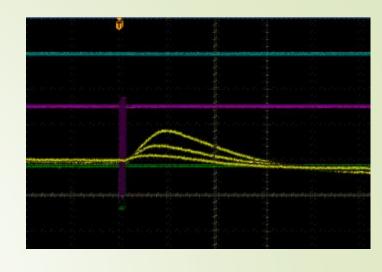


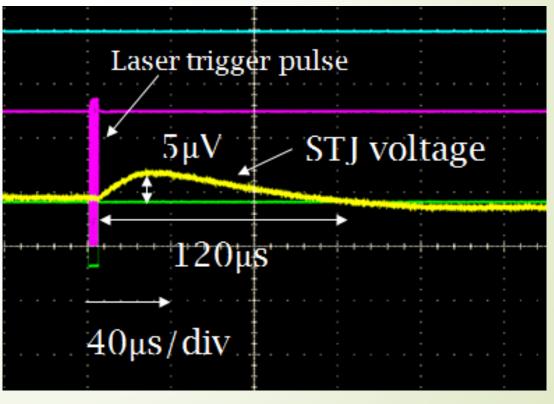
## Hf-STJ光応答試験

#### パルス光に対する応答

- 波長465nm laser
- 100ms毎に5µs間5MHzの発振



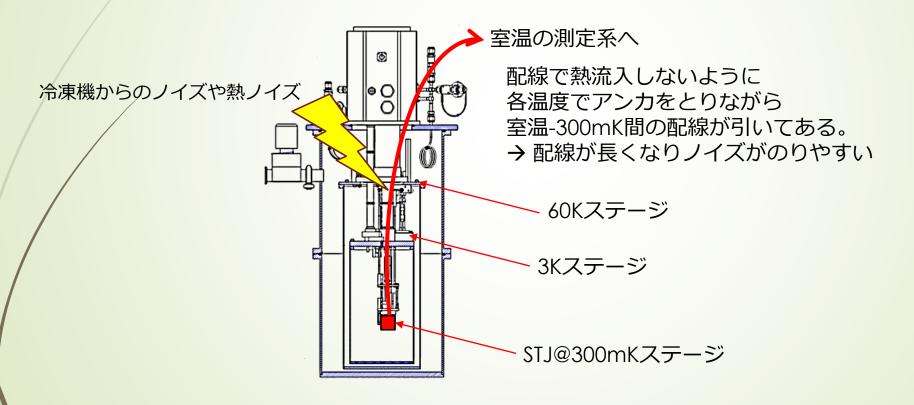




実験に用いるには漏れ電流が大きすぎるが、光検出器としての動作は確認。

## 極低温前置増幅器

■ ロケット実験用のNb/Al-STJ検出器は要求性を満たしているが、 読み出しノイズの影響で遠赤外単一光子の検出には至っていない。

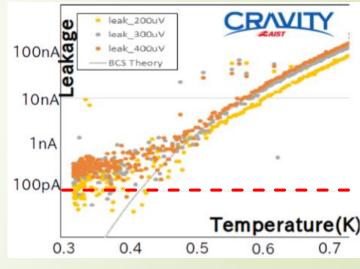


■ S/Nを改善するため、STJ検出器直近で動作する極低温前置増幅器の開発を行っている。

#### 22

## 極低温前置増幅器

- ▶前置増幅器への要求
  - ▶ 極低温環境下で動作すること
    - ▶ Nb/Al-STJ検出器への漏れ電流の要求地は100pA。
    - 熱起因の漏れ電流( $\propto \sqrt{T} e^{(-\Delta/kbT)}$ )を抑制するため0.3K以下に冷却する必要がある。
    - STJの直近に置くために、増幅器も300mK以下で動作する必要がある。
  - 低消費電力
    - ▶ 冷凍機の300mKステージの冷却能力は100µW。
    - 多くとも100µW、できるだけ小さくしたい。
  - 応答速度
    - STJ検出器の電荷収集時間は数µ秒。
    - 1MHzの信号に対して十分な増幅率が必要。

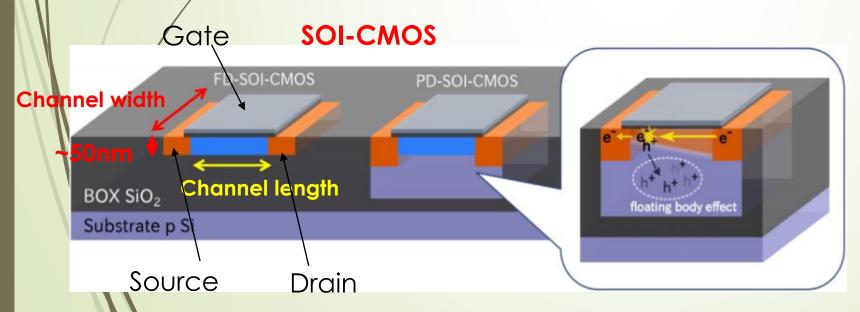


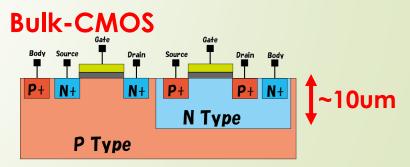
Leakage current of Nb/Al-STJ

→ 要求を満たすSOI(Silicon-On-Insulator)技術を用いた極低温アンプの開発を行っている。

## SOI (Silicon-On-Insulator)デバイス

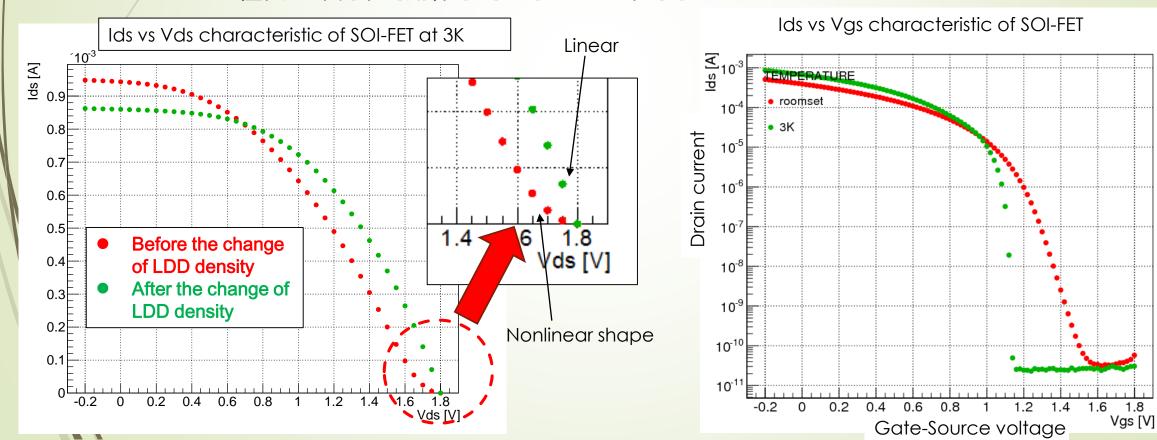
- 絶縁膜上に形成したシリコンで形成されたデバイス。
  - ▶ FD(Fully depleted) SOI-FET: 薄く形成された(通常<50nm)FET。ボディ全体が空乏化する。
- ► FD-SOIデバイスが4.2K環境で動作することがJAXAによって報告されている。
- ▶ 特性:
  - 低消費電力
  - 高速動作
  - 高集積化が可能
  - ボディが薄く全空乏化するため、チャージアップを抑制できる。

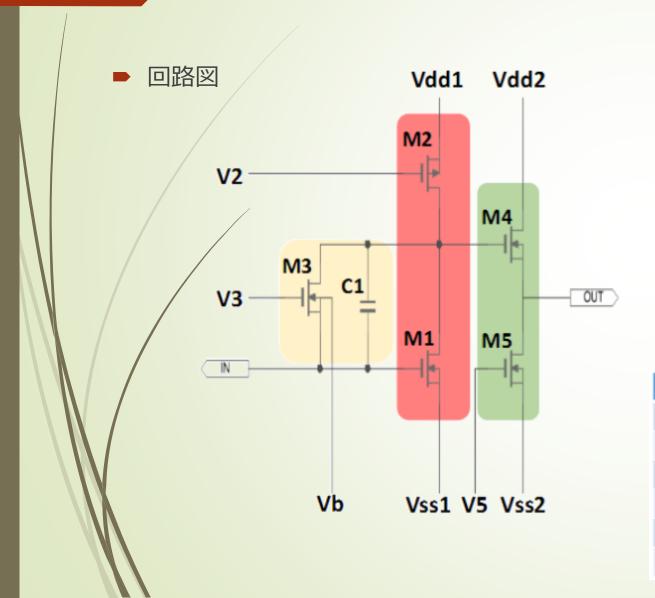


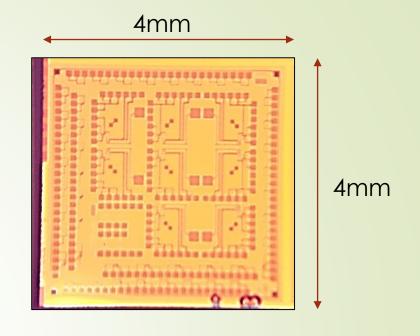


#### 24 極低温化でのFD-SOI-FETの特性

- 極低温化でのI<sub>ds</sub>-V<sub>ds</sub>特性で、線形領域で非線形な特性が現れている。
  - ► LDD (Lightly Doped Drain)濃度を変更することで改善。
- ▶ 極低温環境下では閾値電圧が小さくなっている。
- SOI-FETが極低温環境下で動作していることを確認した。







#### Common source amp.

Feedback circuit

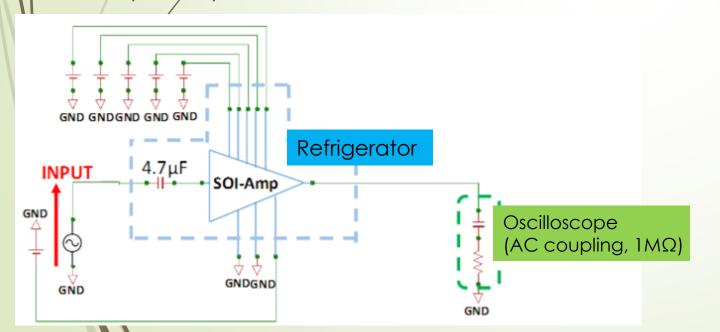
stabilizes bias voltage of common source amp. **Buffer circuit** 

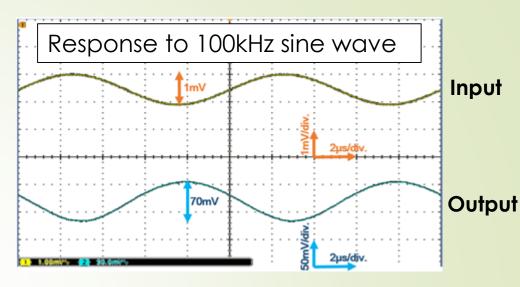
makes output impedance smaller

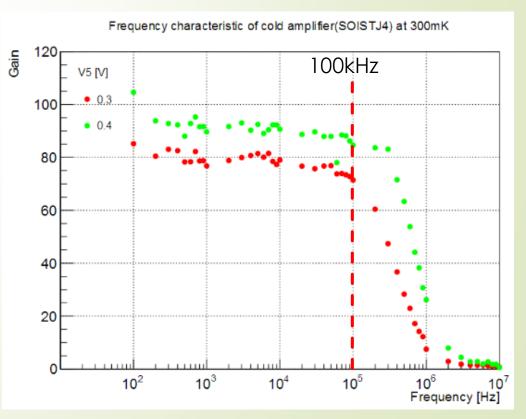
	Туре	W [μm]	L[µm]
M1	Nch-CLst2	40	1
M2	Pch-CLst2	1	10
M3	Nch-CLst2	1.6	10
M4	Nch-CLst2	70	1
M5	Nch-CLst2	60	1
C2	MIM cap.	100 fF	

#### 26 SOI極低温前置増幅器の周波数特性

- ▶ 入力: 1mV<sub>pp</sub>サイン波
- 100kHz以下の周波数に対して、80倍の増幅を確認
  - 1MHzでは30倍の増幅
- ► 消費電力: 230µW
  - ▶ 冷凍機の300mKステージの冷却能力(100µW)を上回っている。
  - ▶ 検出器から離れてしまうが、より冷却能力の大きい3Kステージ (250mW)に設置場所を変更することを検討している。

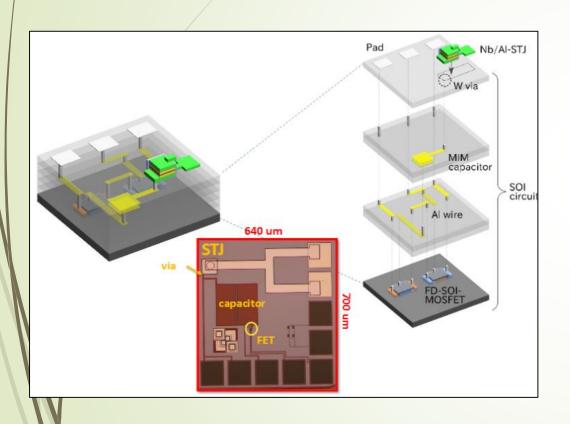




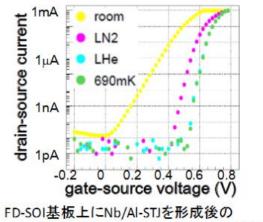


## SOI增幅回路一体型STJ検出器 SOI-STJ

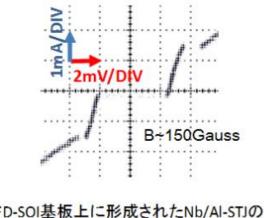
■ SOIを用いた増幅器上にSTJ検出器を形成した一体型の検出器の開発を行っている。



#### SOI基板上にSTJを形成し、その特性を評価



nMOS-FETの特性(KEKのプロセス装置使用)



FD-SOI基板上に形成されたNb/Al-STJの I-V特性(KEKのプロセス装置使用)

SOI基板上にSTJを形成し、その特性を評価。 KEKクリーンルームにてSTJを形成。

SOI基板上のSTJ: 通常のSi基板上のSTJと同様の特性

SOI基板中の-FET: 極低温で動作

産総研CRAVITYでSOI基板上へのSTJの作成をテスト中

## まとめ

- COBAND実験において、宇宙背景ニュートリノ崩壊を探索することにより ニュートリノ質量の決定、または寿命の下限値の更新を行うことができる。
- ► それに用いるSTJ検出器、SOI技術を用いた極低温前置増幅器の開発を行っている。
- ロケット実験用のNb/Al-STJ
  - 目標性能を達成。
- 衛星実験用のHf-STJ
  - 以前と比較して漏れ電流が改善。しかしながら目標達成には至っていない。
  - 可視光レーザーへの応答を確認。
- SOI技術を用いた極低温前置増幅器
  - 300mKの極低温環境下で動作することを確認。
- SOI前置増幅器一体型STJ検出器をテスト中