

# 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索COBAND実験

## Cosmic Background Neutrino Decay search COBAND Experiment

金 信弘  
筑波大学数理物質系 / 宇宙史研究センター



### COBAND Collaboration

金 信弘, 武内勇司, 武政健一, 永田和樹, 八木俊輔, 若狭玲那, 浅野千沙, 飯田 崇史, 笠島 誠嘉 (筑波大学),  
池田博一, 和田武彦, 長勢晃一 (JAXA/ISAS), 松浦周二 (関西学院大学), 吉田拓生, 坂井 誠, 中村 昂弘, 西村 航 (福井大学),  
美馬 覚 (理化学研究所), 木内健司 (東京大学), 加藤幸弘 (近畿大学), 新井康夫, 倉知郁生, 羽澄昌史 (KEK),  
大久保雅隆, 浮辺雅宏, 志岐成友, 藤井剛 (産総研), 石野宏和, 樹林敦子 (岡山大学), 川人 祥二 (静岡大学),  
Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov (Fermilab), Soo-Bong Kim (Seoul National University)

- はじめに
  - 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索COBAND実験の動機
- COBANDロケット実験提案
- COBAND実験測定器開発の現状

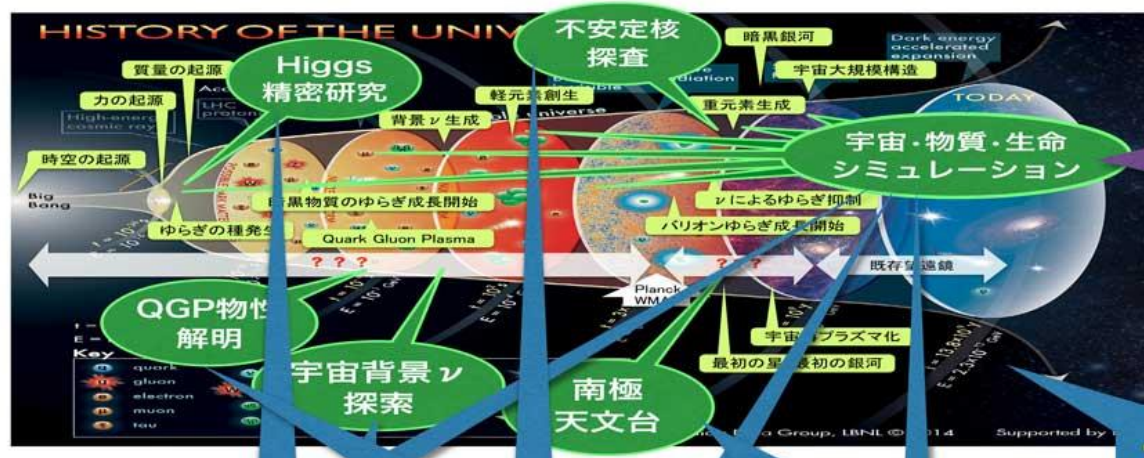


筑波大学

# 宇宙史研究センター

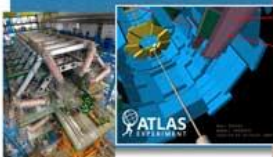
Tomonaga Center for the History of the Universe

COBAND実験は宇宙史研究センターの5大プロジェクト（いずれも日本学術会議のマスタープラン2017大型研究計画）の一つ



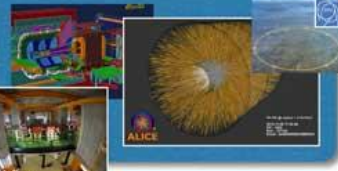
## 素粒子構造 研究部門

質量の起源であるヒッグス粒子の精査、新粒子探索／宇宙年齢数秒からの宇宙背景ニュートリノの発見に向けたロケット・衛星実験／超弦理論による時空の起源の解明



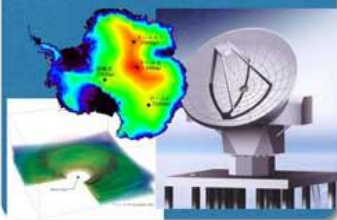
## クォーク・ 核物質 研究部門

宇宙初期や中性子星内部のクォーク・グルーオン・プラズマを探索／不安定核の質量測定による重元素の起源とRプロセスの解明



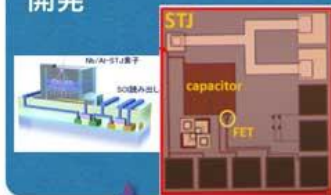
## 南極天文学 研究部門

南極天文学による暗黒銀河探索／銀河、銀河系、宇宙構造の観測的研究／宇宙の構造と進化、生命の起源に至る物質進化の理論的研究



## 光量子計測器 開発部門

TIA-ACCELERATEと協働し、超伝導検出器・光量子計測器を開発



エネルギー物質科学  
研究センター  
TIA-ACCELERATE

# 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

- 素粒子の質量がなぜ1桁以上違うのか？
- 同じ性質の（質量のみ異なる）粒子の繰り返し：  
なぜ？

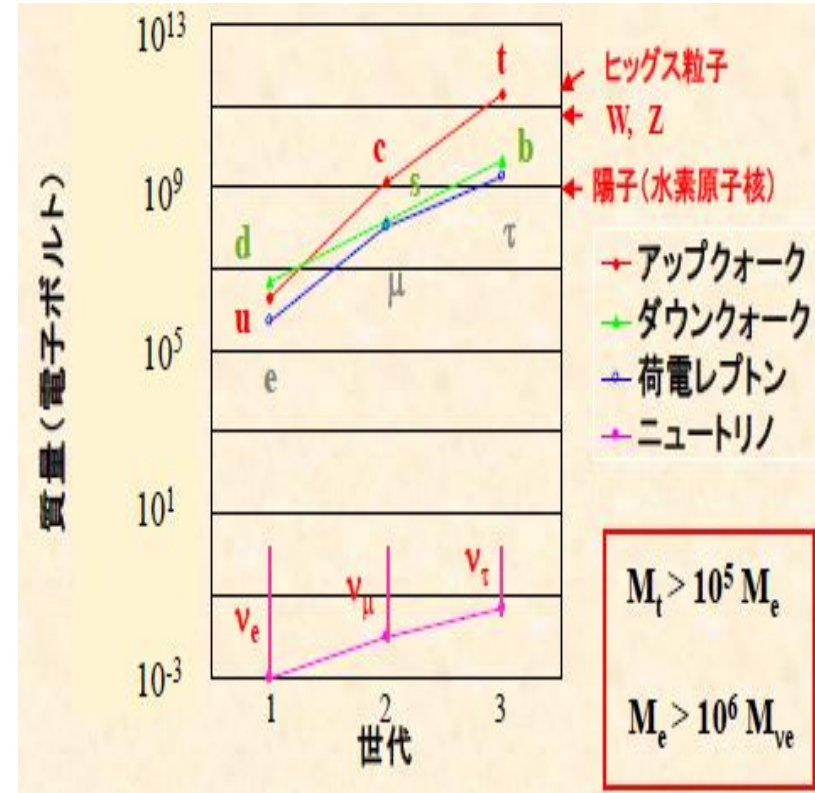
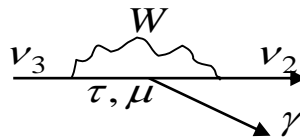
## ニュートリノ質量の理解が先決

- まだ測定されていない
- 質量二乗差  $\Delta m^2$  はニュートリノ振動実験により既知

## 本実験：ニュートリノ崩壊を観測し，質量を決定

重いニュートリノ  $\rightarrow$  軽いニュートリノ + 光子  
 光子（赤外線領域）のエネルギーを測定  
 $\rightarrow$  ニュートリノ質量の決定

$$\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$$



- ニュートリノ： 寿命が長く、まれにしか崩壊しない。現在の寿命の下限 =  $10^{12}$ 年  
 探索には大量のニュートリノが必要  
 加速器で作るのは不十分  
 宇宙に大量に存在するはずの **宇宙背景ニュートリノ** が唯一の探索方法

宇宙論で予言されるが未観測  $\rightarrow$  その観測は宇宙論検証の意義を持つ

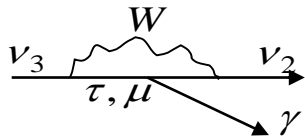
ニュートリノ崩壊発見によるニュートリノ質量の測定  
 宇宙背景ニュートリノの発見

それぞれが  
非常に重要な発見



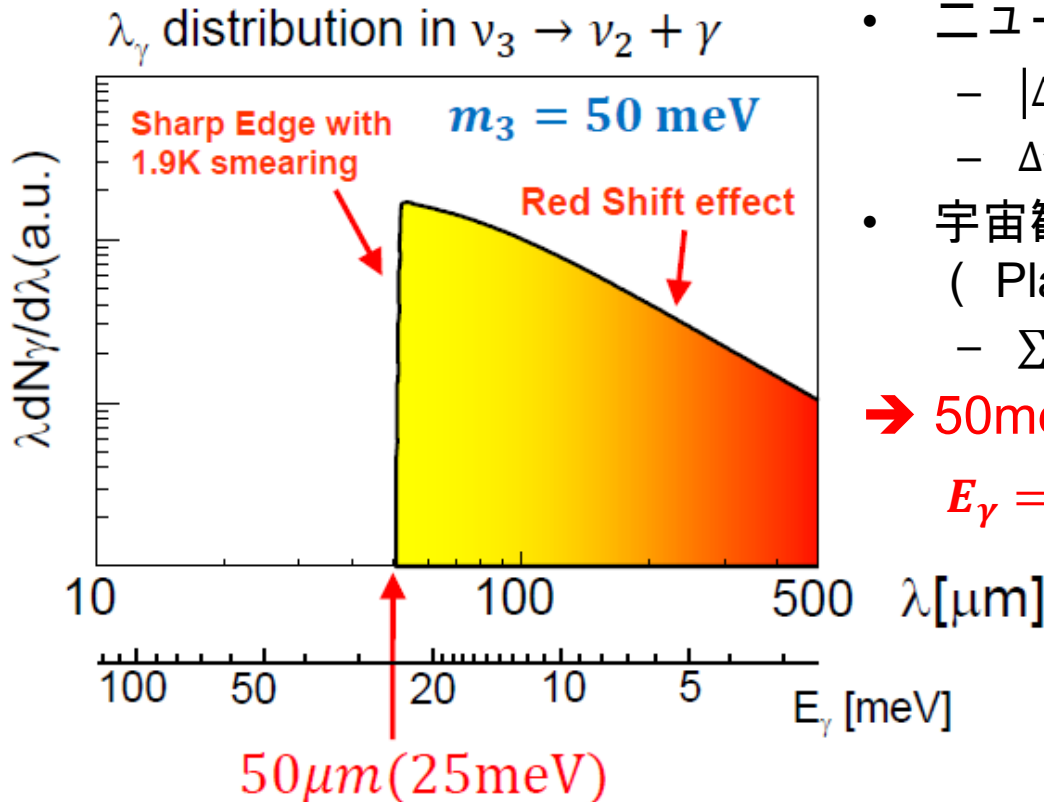
# ニュートリノ崩壊で生成する光子のエネルギー分布

## ● 崩壊光子のエネルギーとニュートリノ質量の関係



$$\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$$

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_{1,2}^2}{2m_3} \quad (\nu_3 \text{ 静止系})$$



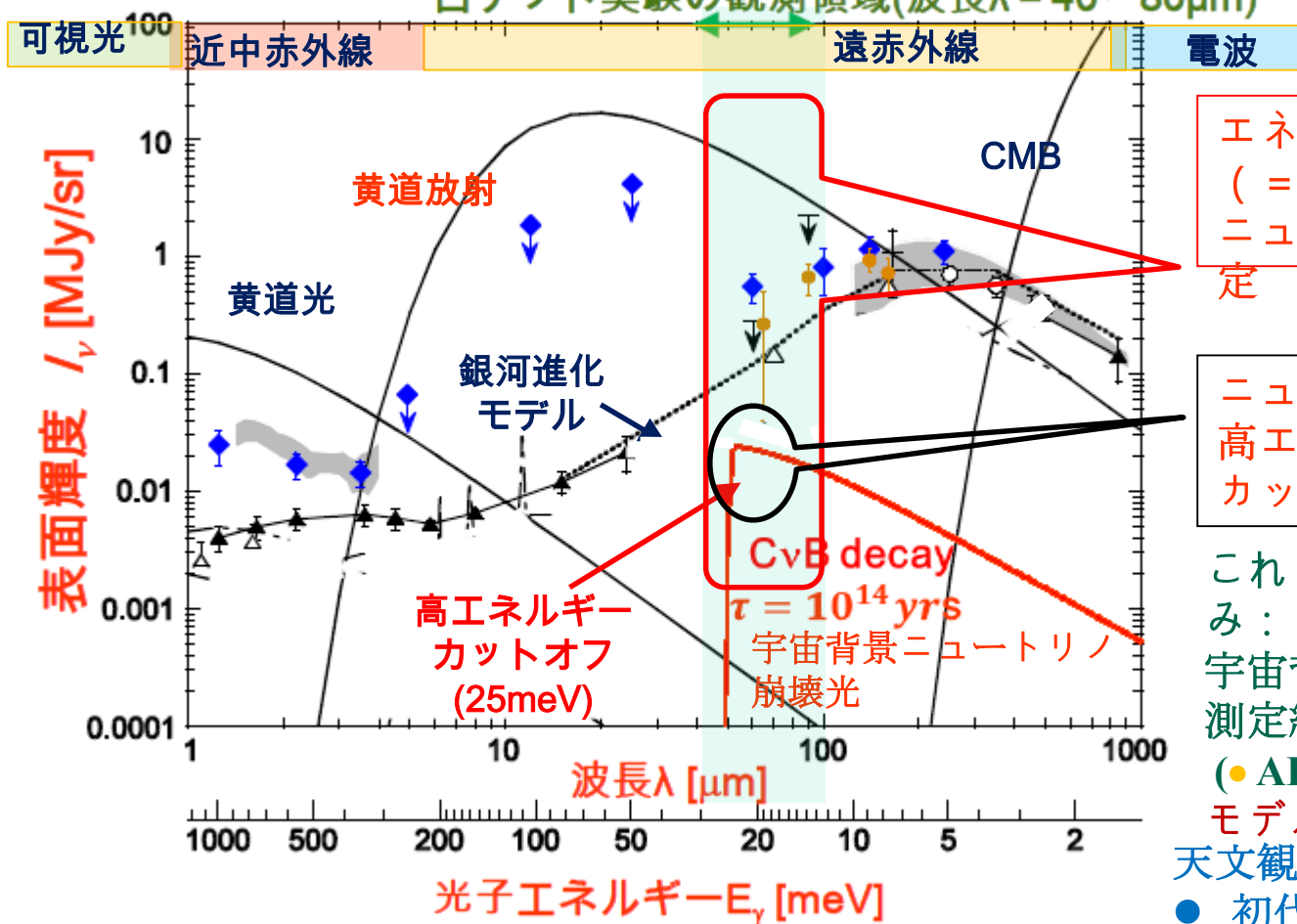
- ニュートリノ振動実験結果
    - $|\Delta m_{23}^2| = |m_3^2 - m_2^2| \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
    - $\Delta m_{12}^2 \sim 7.65 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
  - 宇宙観測結果  
( Planck+WP+highL+BAO )
    - $\sum m_i < 0.23 \text{ eV}$
- ➔  $50 \text{ meV} < m_3 < 87 \text{ meV}$   
 $E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV} \quad (\lambda_\gamma = 51 \sim 89 \mu\text{m})$



# 宇宙赤外線観測による宇宙背景ニュートリノ崩壊の探索

## 宇宙赤外線光のエネルギースペクトル

ロケット実験の観測領域(波長 $\lambda = 40 \sim 80 \mu\text{m}$ )



エネルギー連続スペクトル  
( = 黄道放射 + 宇宙背景  
ニュートリノ崩壊光 ) を測  
定

ニュートリノ崩壊の信号 =  
高エネルギーでの急激な  
カットオフ

これまでは離散的な測定のみ:

宇宙背景赤外線輻射CIBの  
測定結果

(● AKARI衛星, ◆ COBE衛星)

モデル予言より超過あり。

天文観測としての重要性

- 初代天体収縮時の水素分子線
- 残骸ブラックホールの降着円盤
- 初代重元素ダスト熱放射

Ref: 久野(筑波大)らのサブミリ波観測  
ロケット実験 SPIE 2553 (1995) 568

ニュートリノの現在の寿命下限は  $3 \times 10^{12}$  年。  
ロケット実験で100倍の検出感度 (寿命 $10^{14}$ 年まで観測可能)  
左右対称模型の理論予言値は $\sim 10^{17}$ 年 (衛星実験で検出可能)

\* 宇宙遠赤外線は大気で吸収されるので、大気圏外での観測が不可欠。

# 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索COBANDロケット実験・衛星実験

ロケット実験計画: 2021-22年に高度200 kmで5分間データ収集 (実質200秒間)

JAXA観測ロケットS520搭載

ニュートリノ寿命が $10^{14}$ 年以下なら観測可能。(現在の寿命下限は $3 \times 10^{12}$ 年).

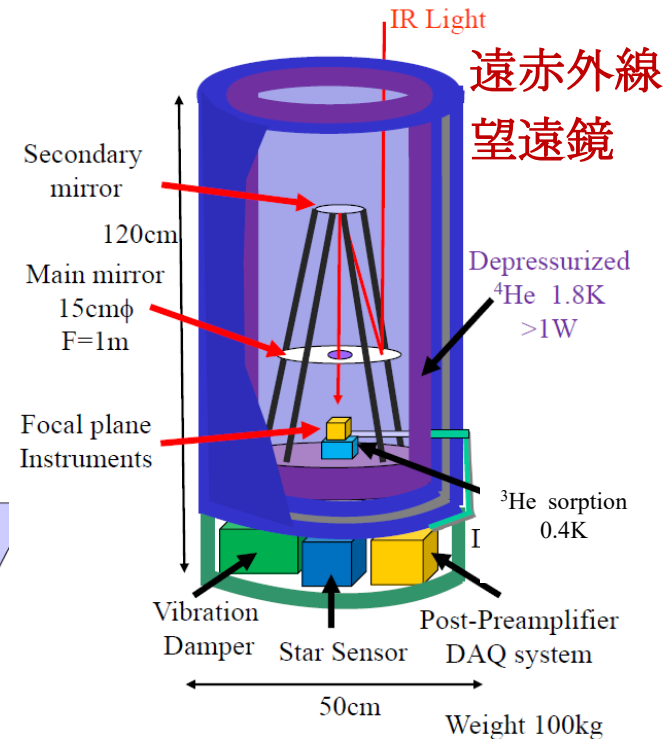
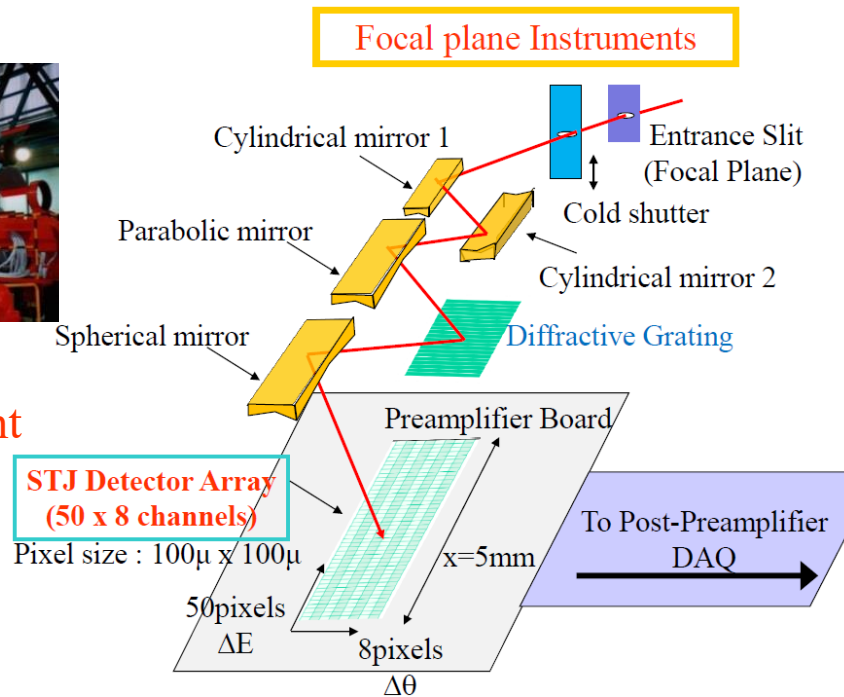
»超伝導トンネル接合(STJ)赤外線検出器を開発

50 Nb/Al-STJ ピクセルアレイと回折格子で遠赤外線エネルギー測定



JAXA Rocket  
CIB Experiment

(Feb 2, 1992)



衛星実験 : 寿命 $\tau(\nu_3) \sim 10^{17}$ 年(左右対称模型の予言値)なら観測可能

> Hf-STJ 赤外線検出器で衛星実験 (S. H. Kim et al. JPSJ 81,024101 (2012) )

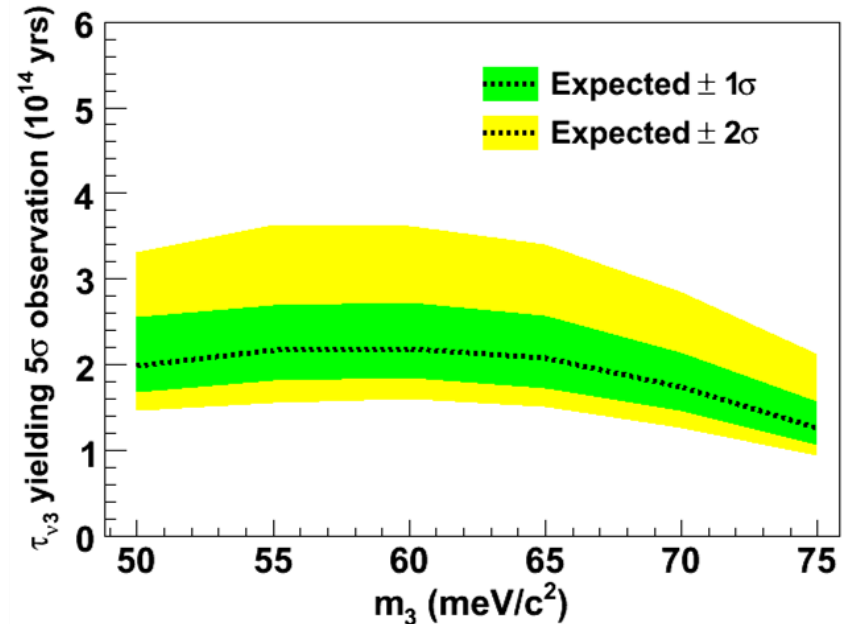
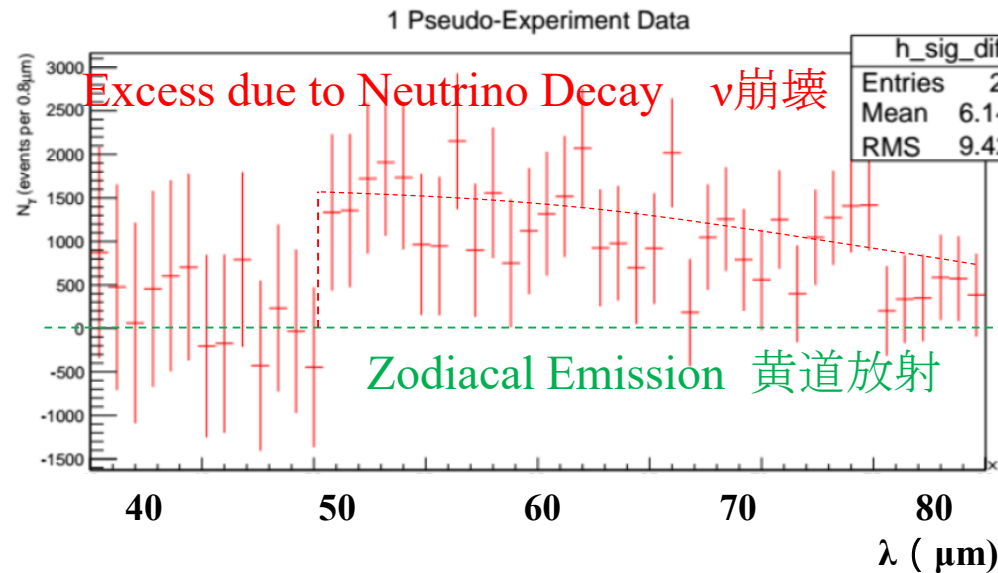
- $\Delta = 20 \mu\text{eV}$  : ハフニウムの超伝導エネルギーギャップが小さいので、回折格子なしでエネルギー測定。

# ロケット実験のニュートリノ崩壊検出感度

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験のパラメータ：

直径15cm，焦点距離1mの主鏡，および8x50個の100 $\mu$ m角の検出器を焦点位置に設置，データ収集時間を200秒としてシミュレーションを行った．

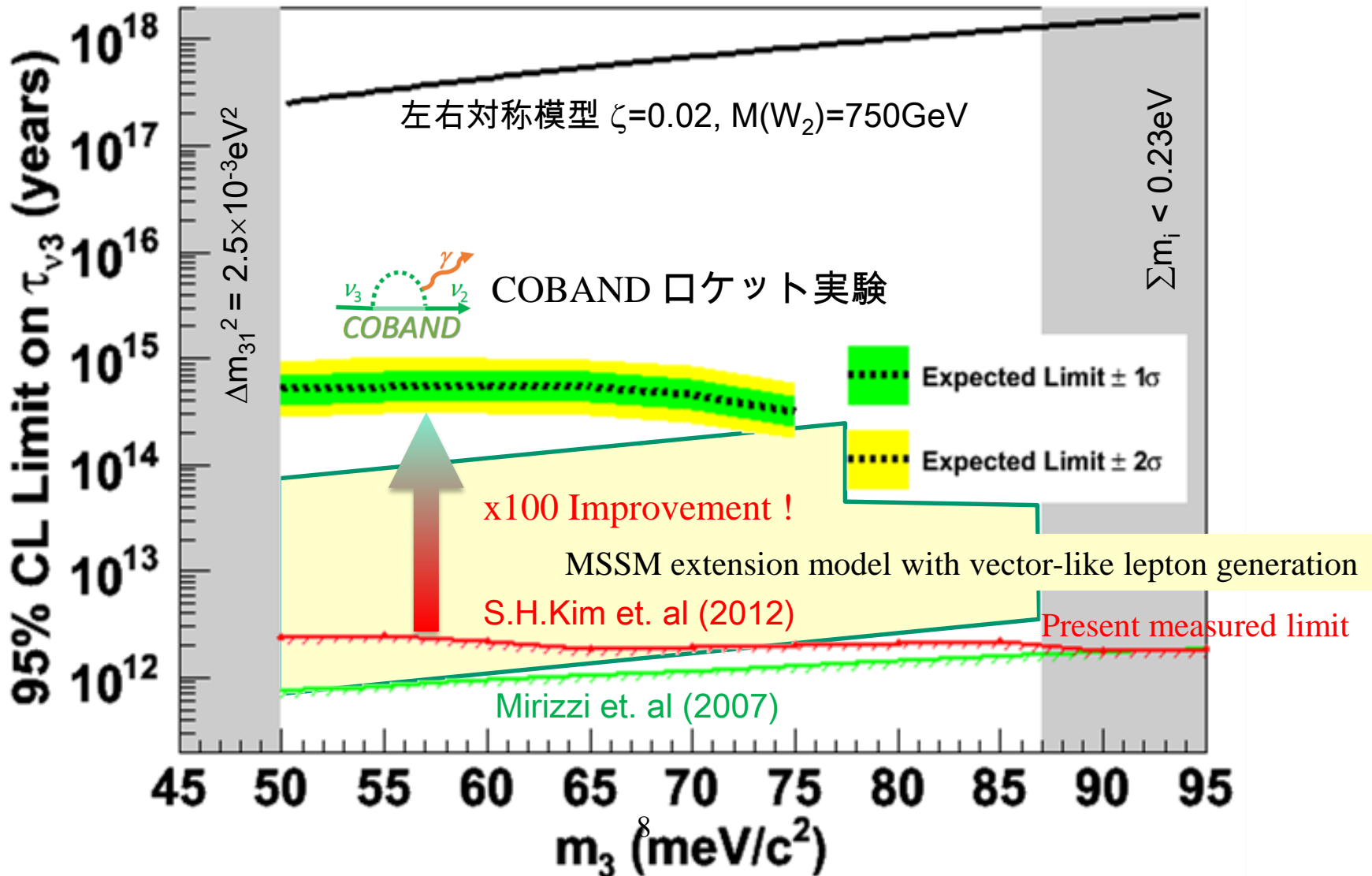
ニュートリノ寿命の感度 (  $5\sigma$  )  
 $\nu$  S ニュートリノ質量  $m_3$



ニュートリノ寿命の感度  
 $\sim 2 \times 10^{14}$ 年



# COBAND 実験ニュートリノ崩壊検出感度と理論予言との比較



# COBANDロケット実験シーケンス

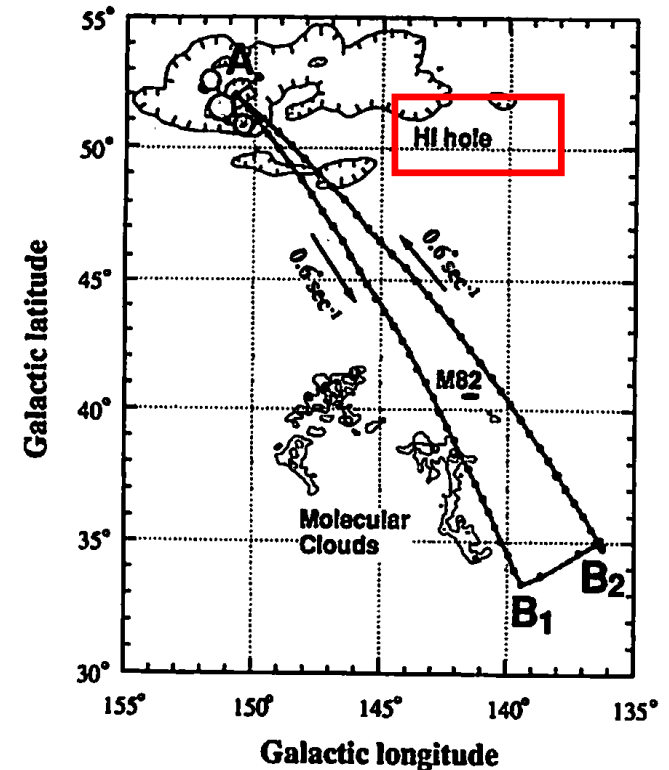
本実験は1992年2月2日午前1時に実施されたS520-15実験で測定したのと同じ方向からの宇宙赤外線を観測する。

## 打ち上げ前の作業

X	-	10時間10分	1回目 液体Heトランスファー開始
	-	4時間10分	2回目 液体Heトランスファー開始 ( 充填 ) 発射角 $Az=145^\circ$ , $EL=85^\circ$
	-	1時間43分	電源オン (外部電源)
	-	40分	クライオスタット・タンクのポンピング開始
	-	5分	ポンピングラインのバルブを閉じる。 内部電源に切り替える。
	-	4分	ポンピングラインを切り離す。
X			打ち上げ

## 打ち上げ後の作業

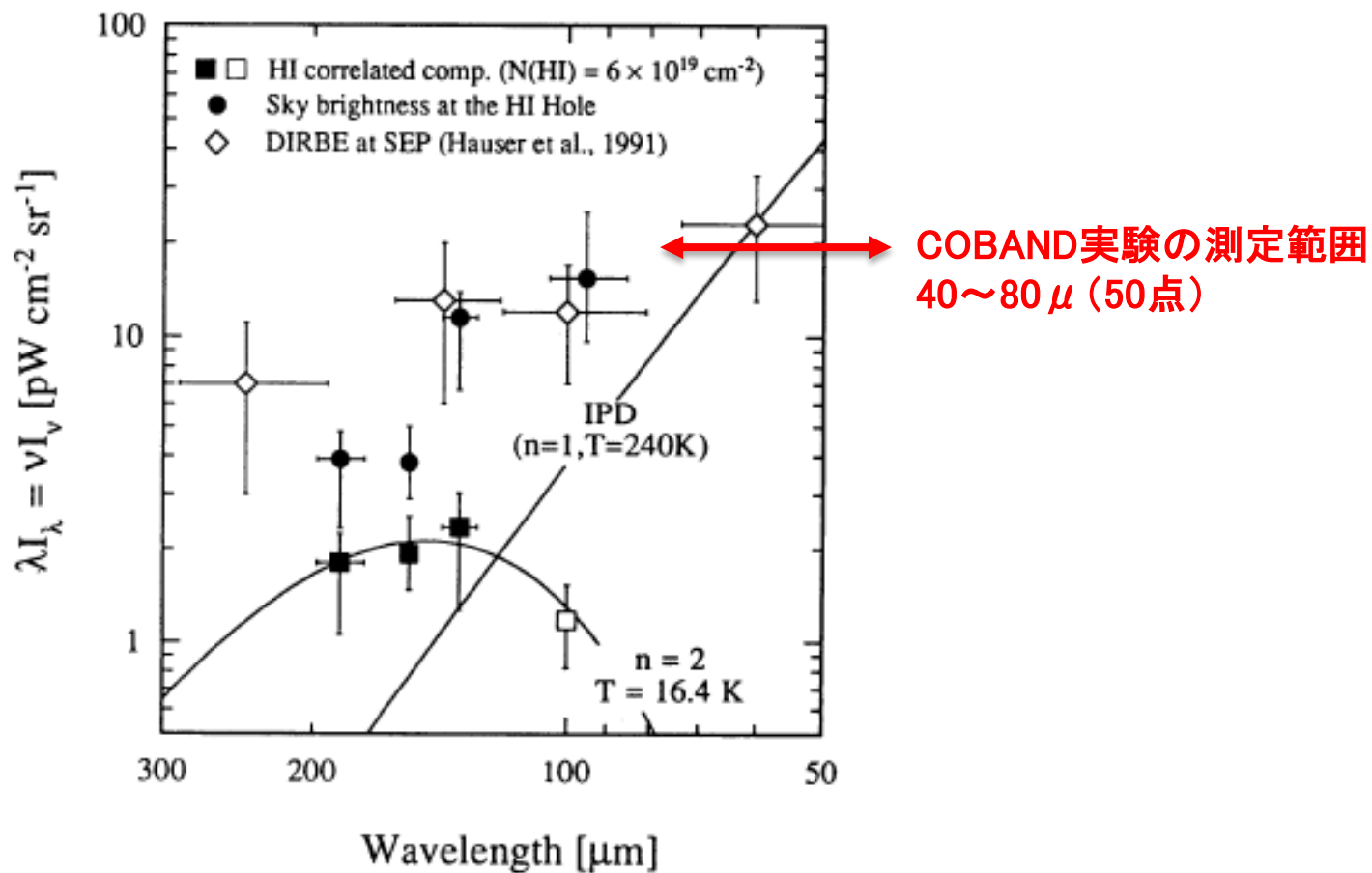
X	+	55秒	ロケットノーズコーンのカバーを除去 ポンピングラインのバルブを開ける。
	+	60秒	ロケットモーターを切り離す。
	+	61秒	ガスシェードを開ける。
	+	63秒	飛行姿勢コントロールを開始。
	+	90秒 ~	A点
	+	130秒	クライオスタットの蓋を開ける。 高度220km
	+	220秒 ~ 255秒	A点からB1点まで移動 ( 毎秒0.6° )
	+	255秒 ~	B2点へ
	+	277秒 ~ 310秒	B2点からA点まで移動 ( 毎秒0.6° ) 高度338km
	+	310秒 ~ 430秒	A点
	+	430秒 ~	地上へ向かう。( 回復作業 )
	+	480秒	装置放棄 高度182km



## 測定点と移動経路。

この図はS520-15実験から参照された。観測は、S520-15実験と同じように、A点（銀緯52°銀経151°）で行う。校正を目的として、A点からB1点（銀緯33°銀経140.5°）へ移動し、さらにB2点（銀緯35°銀経136.5°）を経由して点Aへ戻ってきて、観測を行う。移動速度は毎秒0.6°とする。

# H520-15遠赤外線観測結果とCOBAND実験の測定範囲



M. Kawada *et al.*

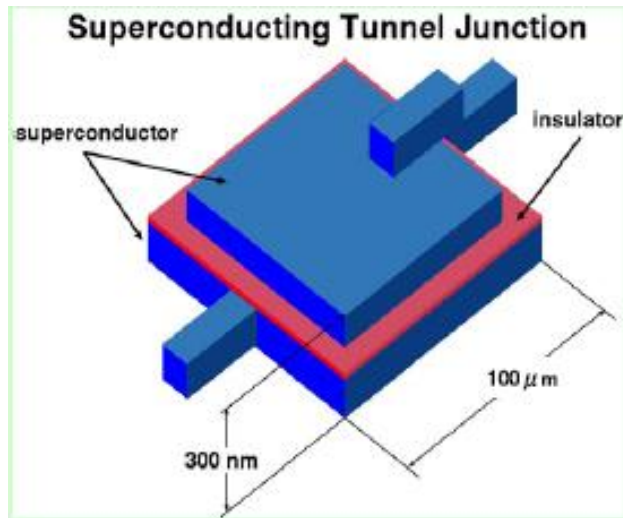
Astrophysical Journal Letters 425 (1994) 89



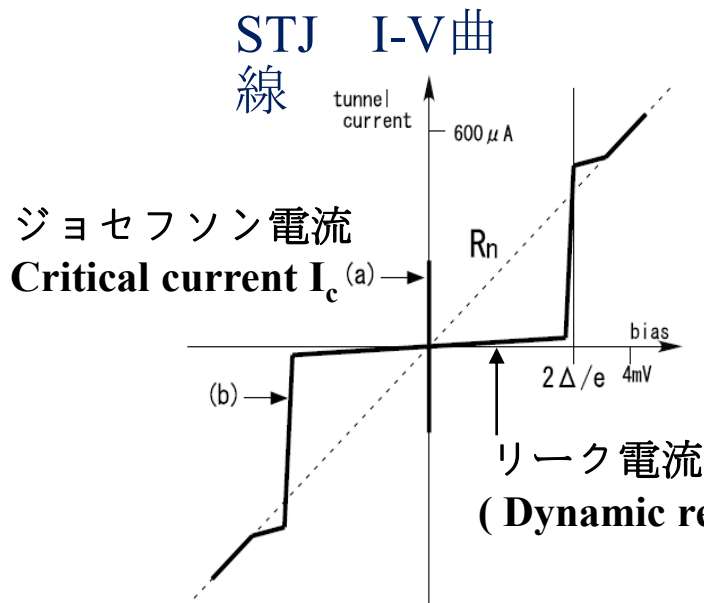
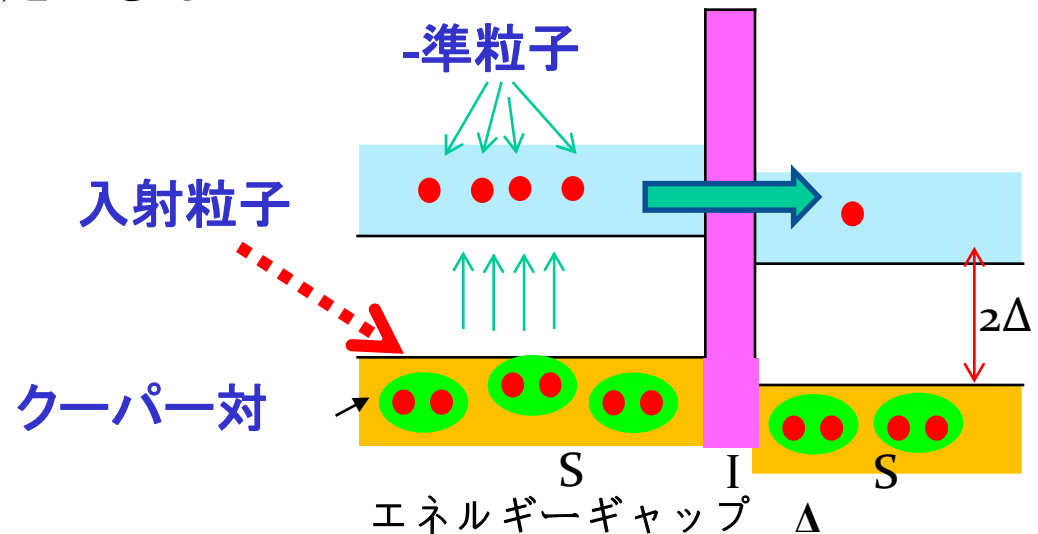
# 超伝導トンネル接合検出器

## STJ (Superconducting Tunnel Junction ) Detector

- 超伝導体 / 絶縁体 / 超伝導体 ジョセフソン接合



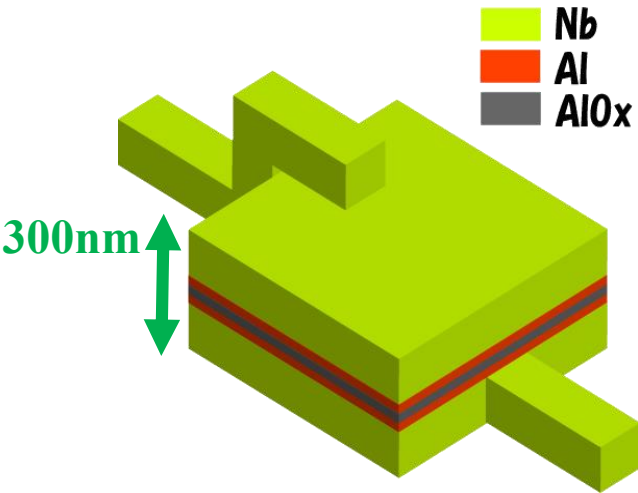
ジョセフソン接合で、準粒子はトンネル効果によって障壁を通過する。入射粒子によって励起された準粒子のトンネル電流を測定することによって、入射粒子のエネルギーを測定できる。



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

# Nb/Al-STJ 遠赤外光子検出器

STJ: 入射光子 → クーパー対を壊して準粒子励起 → トンネル電流



バックトンネリング効果 → トラッピングゲイン

- トンネル障壁近くの準粒子がクーパー対を壊し、信号のゲインとなる。
- 2層の超伝導層は有効エネルギーギャップを構成する。  
Nb(200nm)/Al(70nm)/AlOx/Al(70nm)/Nb(100nm)

$$\Delta_{\text{Nb/Al}} = 0.57 \text{ meV}$$

- トラッピングゲイン: 10 for Al

Nb/Al-STJの準粒子数

$$N_q = G_{\text{Al}} E_0 / 1.7 \Delta$$

$G_{\text{Al}}$ : Alのトラッピングゲイン(~10)

$E_0$ : 入射光子エネルギー

$\Delta$ : 超伝導体のエネルギーギャップ

25meV の一光子に対して  $N_q = 250 e$

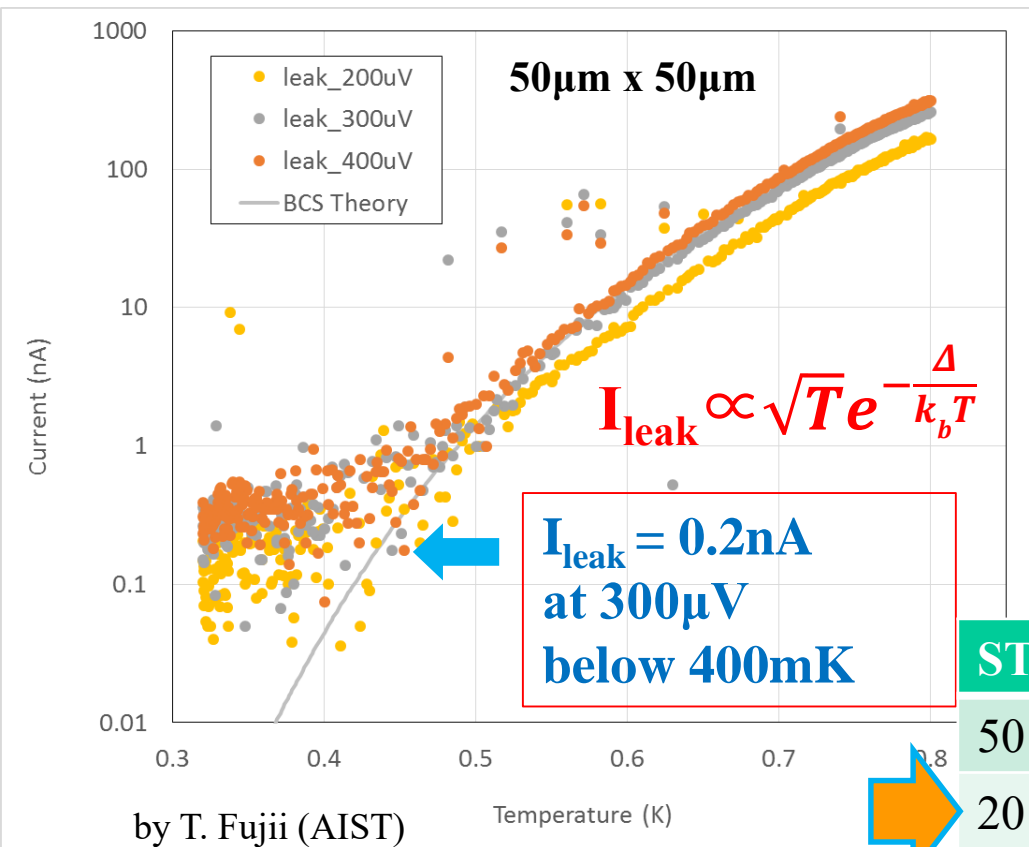
検出器に対する要求

- リーク電流  $I_{\text{leak}} < 0.1 \text{ nA}$ : 20 $\mu$ 角のNb/Al-STJが要求を満たす。
- 10 $\mu$ s間に積分されるノイズ < 30e: 極低温増幅器が必要

# Nb/Al-STJのリーク電流

- Nb/Al-STJのリーク電流  $I_{\text{leak}}$  は0.1nA以下が要求される。  
←遠赤外線 ( $\lambda = 40 - 80\mu\text{m}$ ) 一光子を検出するため。

## リーク電流の温度依存性



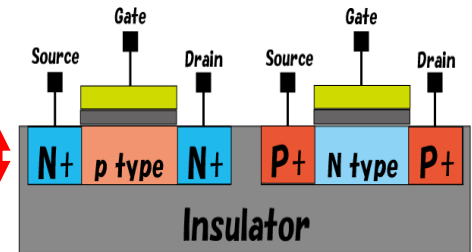
2014年に、産総研グループが  
COBANDに参加し、CRAVITYプロ  
セス施設を用いてNb/Al-STJを作成。  
リーク電流は0.1nA以下という要求を  
満たした。

STJ size	# of samples	$I_{\text{leak}}$ at 0.3mV
50 x 50 $\mu\text{m}^2$	18	224 $\pm$ 29 pA
20 x 20 $\mu\text{m}^2$	7	39 $\pm$ 13 pA
10 x 10 $\mu\text{m}^2$	20	14 $\pm$ 7 pA



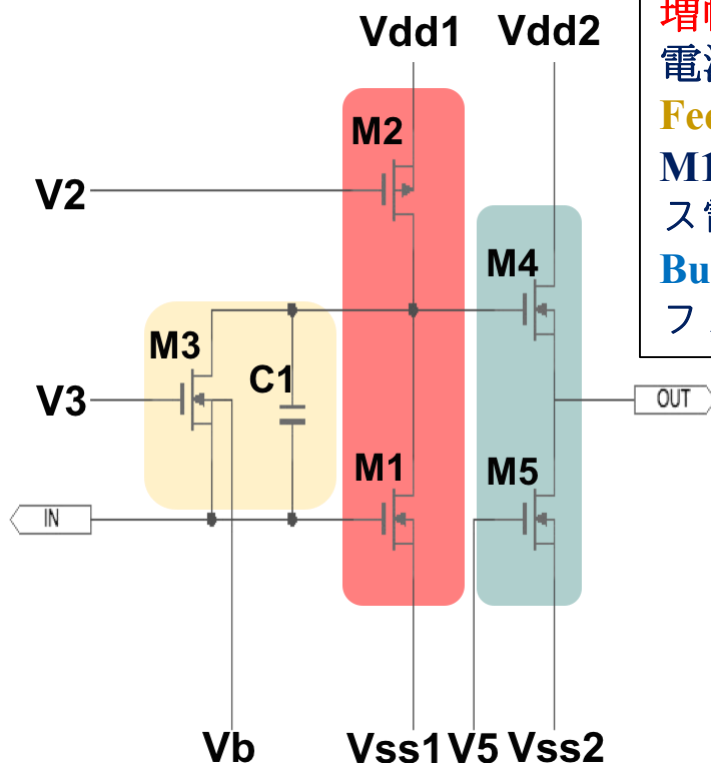
# 極低温SOI 増幅器

## FD-SOI -MOSFET



FD-SOI (Fully Depleted Silicon-On-Insulator) デバイスは JAXA/KEK グループによって極低温 4K で動作することを示された (AIPC 1185,286-289(2009)).

## SOI-STJ4 (the 4<sup>th</sup> prototype)



このSOI増幅器は LAPIS セミコンダクター社製.

### 増幅部

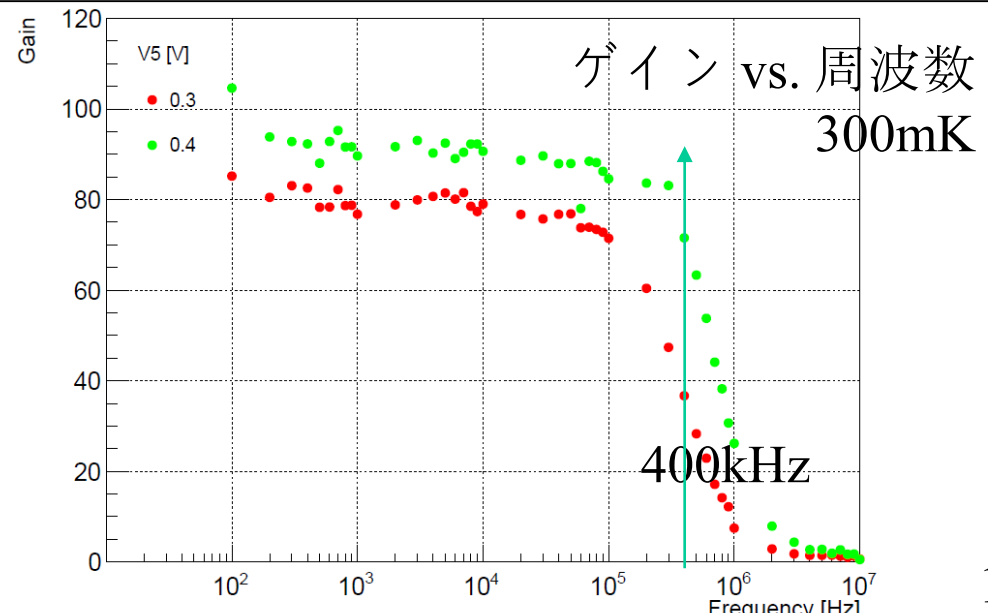
電流源として、抵抗をSOIFET (M2) に置き換えた.

### Feedback

M1のドレインとゲート間にフィードバックを用いて、バイアス電圧を安定化する.

### Buffer

フォロワーで出力インピーダンスを小さくする.

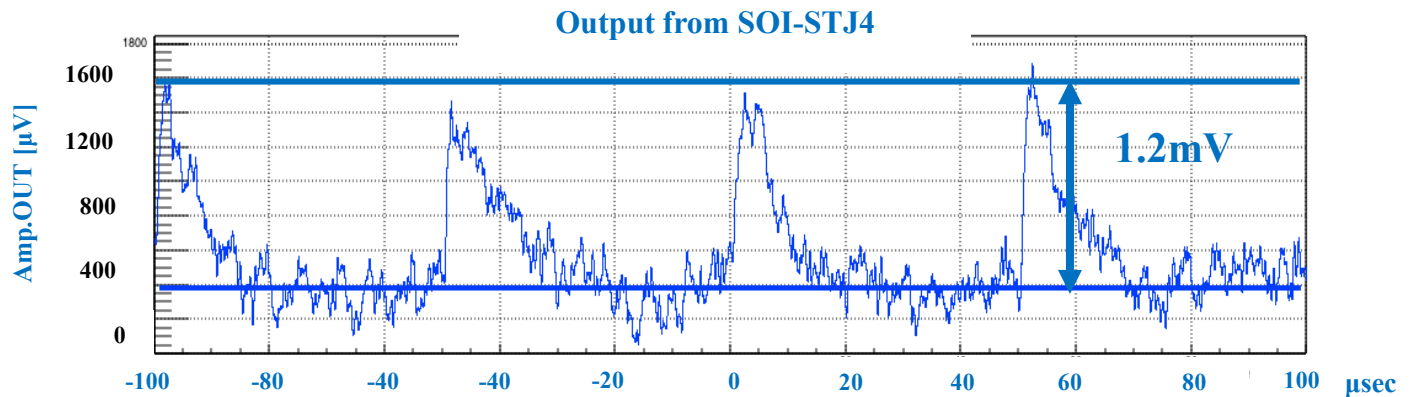
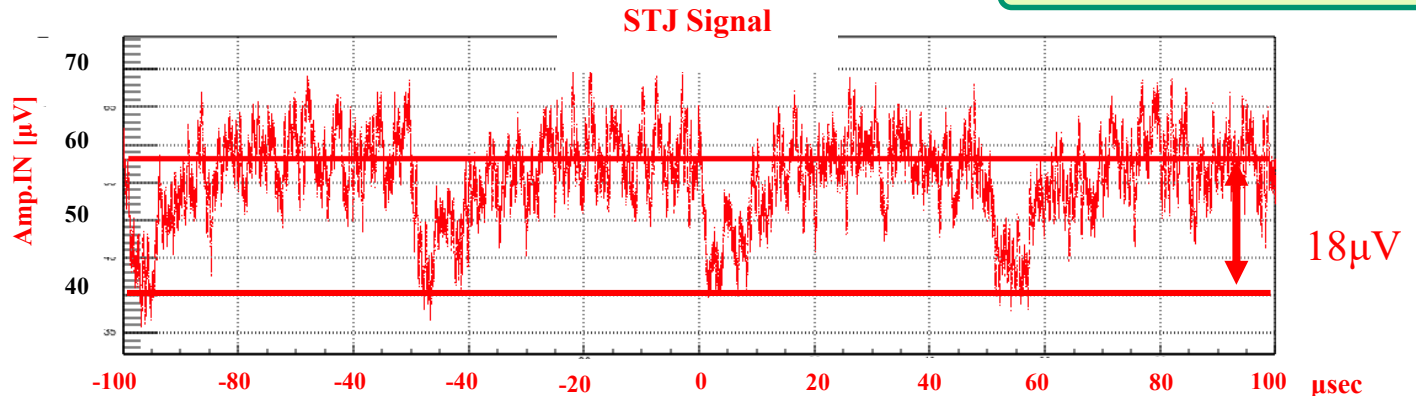
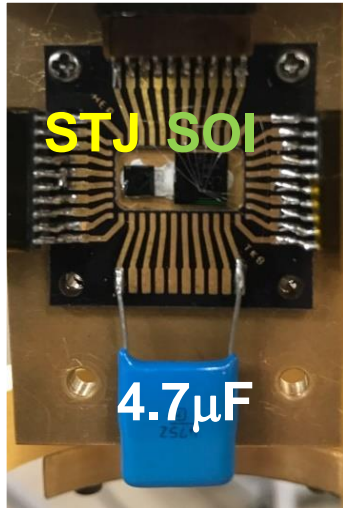


# 極低温SOI増幅器によるSTJ光応答信号の増幅

極低温350mKで、Nb/Al-STJ の可視光レーザー応答信号を極低温SOI増幅器によって70倍増幅することに成功。

STJ 信号： 可視光レーザー  $\lambda = 465\text{nm}$ , 20kHz

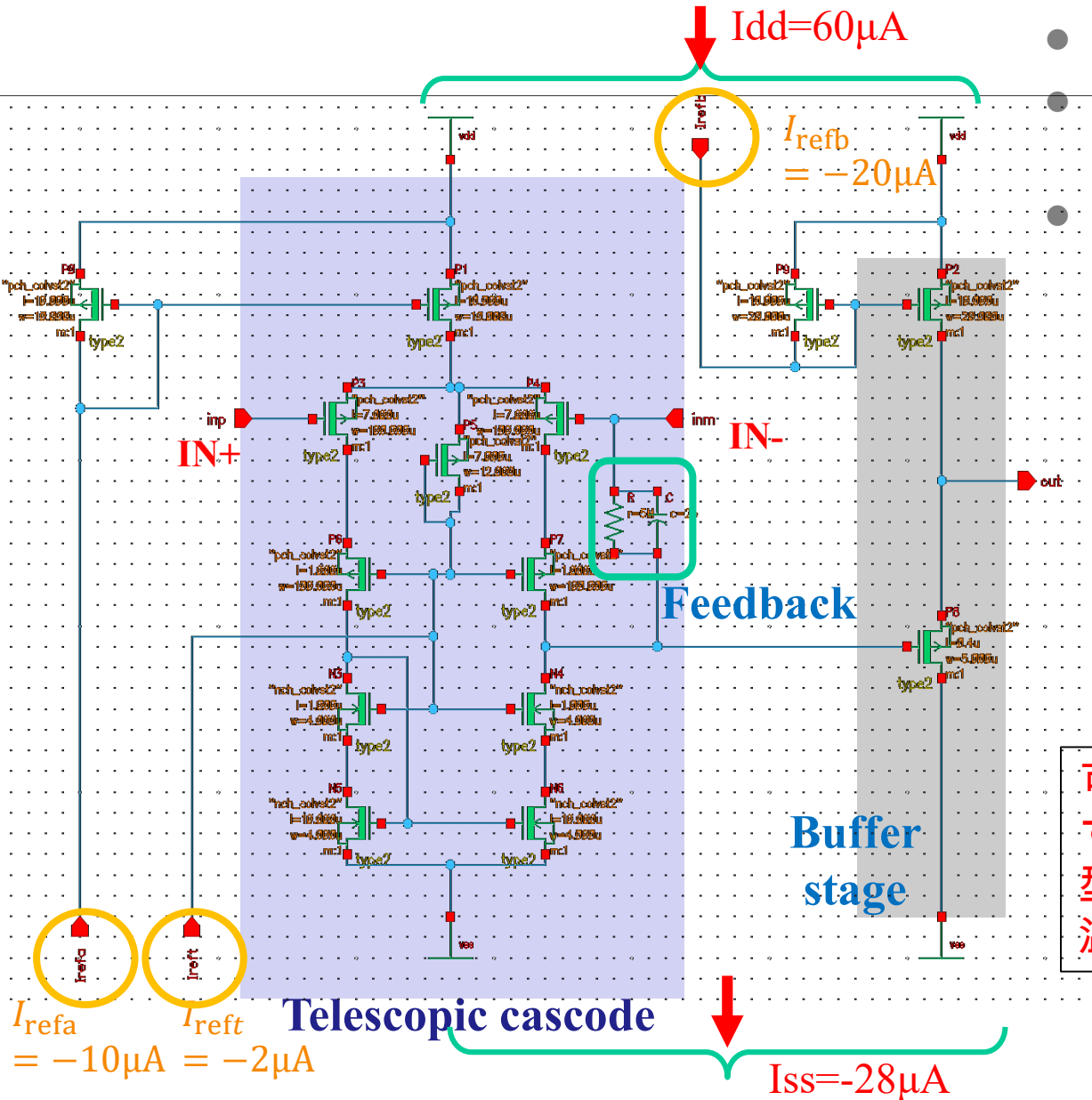
T=350mK



増幅ゲイン： 70

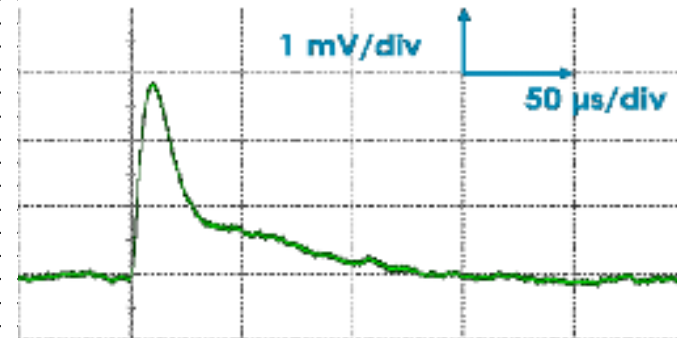
S/N： 2倍以上改善

# STJ用電荷積分型増幅器 (SOI-STJ5 design)



- 差分増幅オペアンプ
- フィードバック  $C(2pF) \times R(5M\Omega) = 10\mu s$
- 消費電力  $\sim 150\mu W$

## 増幅器試験結果



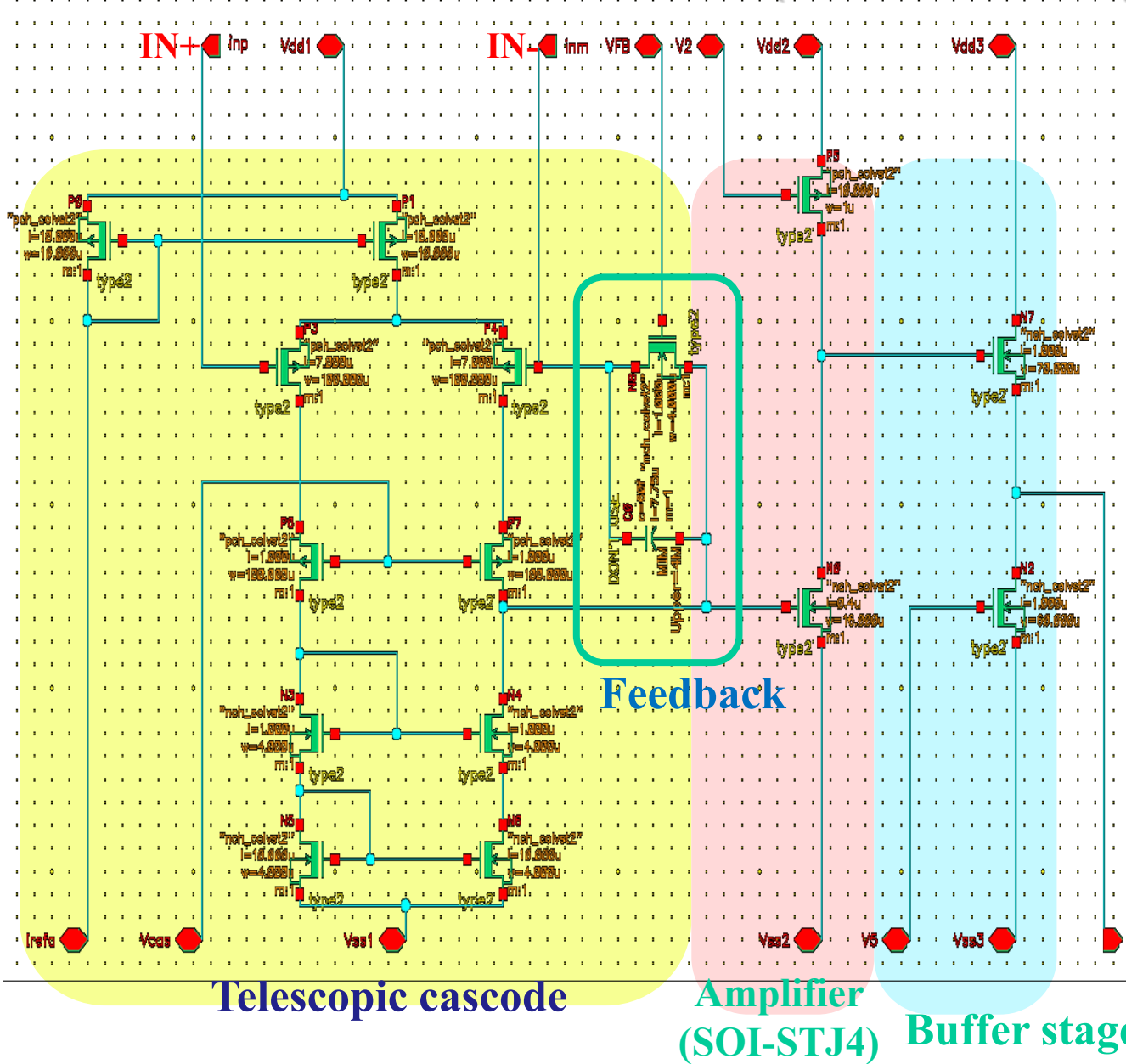
可視光レーザーパルス光に対するSTJ信号が極低温電荷積分型増幅器で増幅された。  
温度350mK. 増幅率0.5mV/fC

次期電荷積分型増幅器は25meVの一光子を検出できるゲインを持つ。



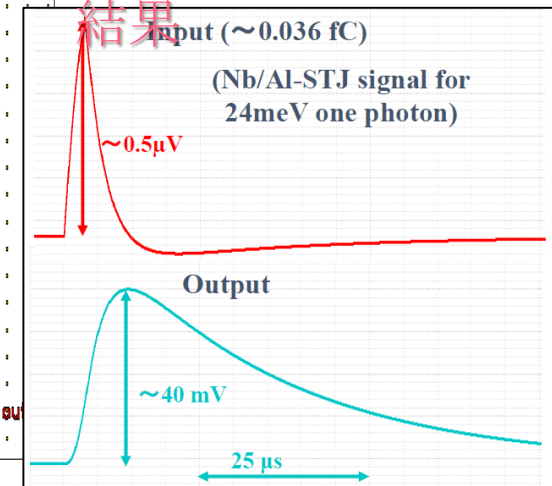
# 新STJ用電荷積分型増幅器 (SOI-STJ6 design)

- フィードバック  
2pF → 60fF
- 消費電力~150μW
- 24meV 1光子 (0.03fC)  
~ 40mV 増幅器出力



シミュレーション

結果

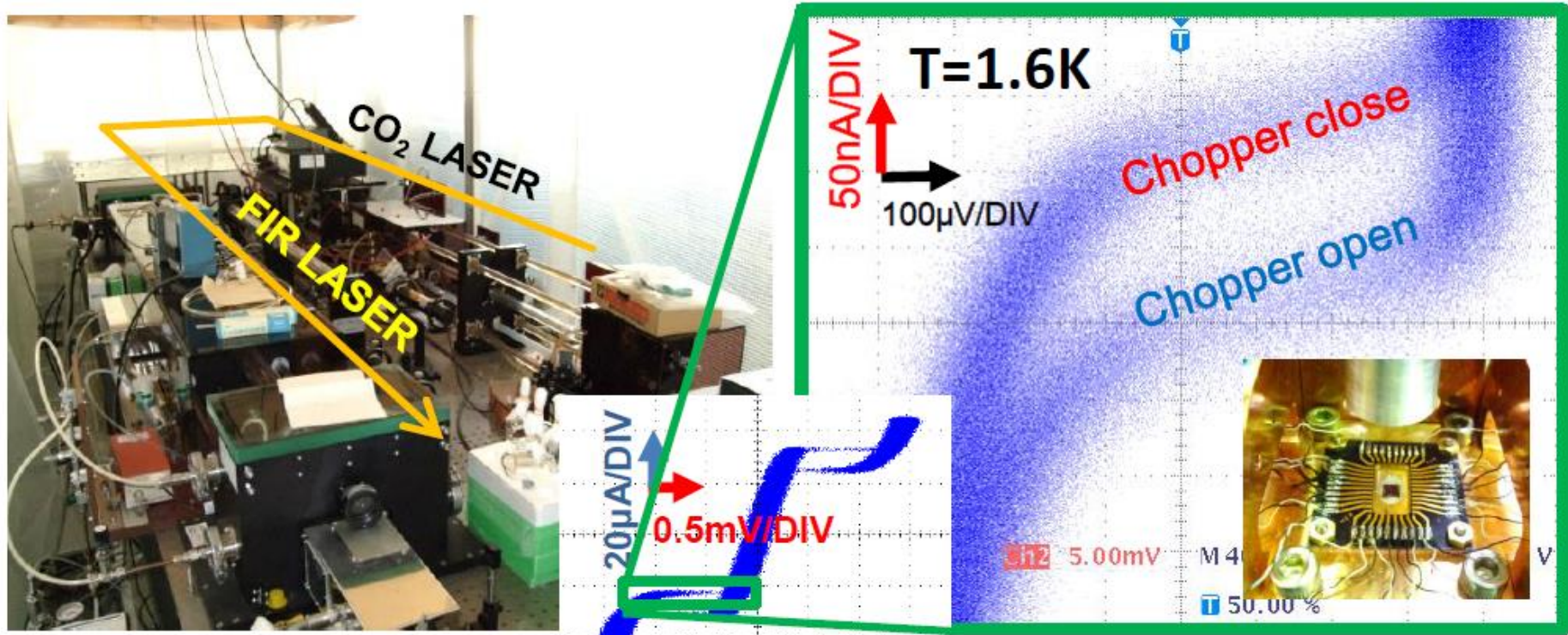


この極低温電荷積分型増幅器は筑波大で現在試験中。

# 遠赤外線ビームに対するNb/Al-STJ応答

福井大学の遠赤外線レーザー ( $\lambda=57.2\mu\text{m}$ )

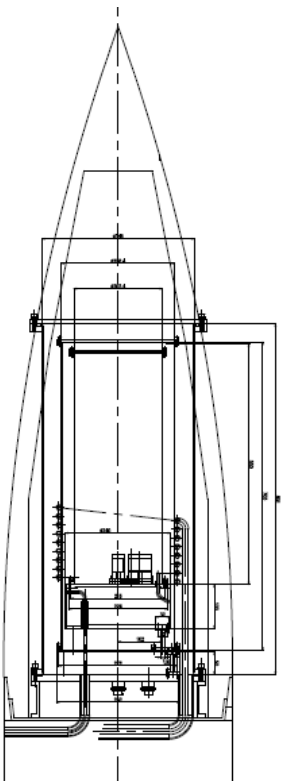
Nb/Al-STJ の遠赤外線レーザー応答



- 20μm角Nb/Al-STJ (産総研 CRAVITY 施設で製造)
- 遠赤外線レーザー：周波数200Hzでチョッパーが開閉.
- 遠赤外線レーザーのON/OFFでの I-V 曲線の変化を測定：電流変化50~100nA.

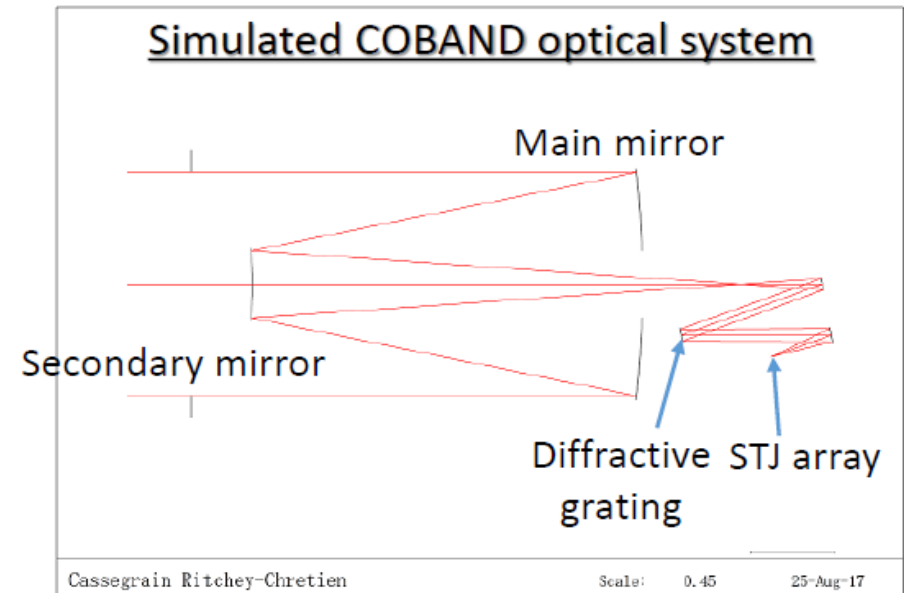
# ロケット搭載用冷凍機・光学系

2017年4月に、ロケット搭載用冷凍機プロトタイプを製作。 $^4\text{He}$  減圧1.8K 冷凍機内  $^3\text{He}$  ソープション0.3K 冷凍機 (現在は $^4\text{He}$  減圧1.8K 冷凍機のみ)



- ジェック東理社製

COBAND実験光学系の最終設計を行うために、光学シミュレーションを行っている。

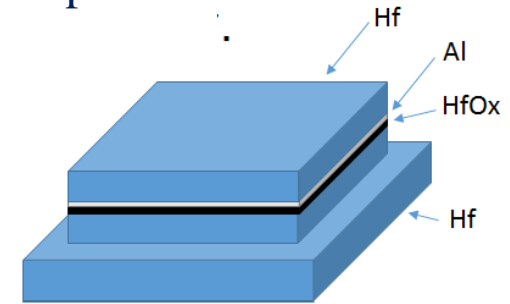


# 将来衛星実験用Hf-STJの開発



# Hf-STJ 開発の現状 – レーザー光応答

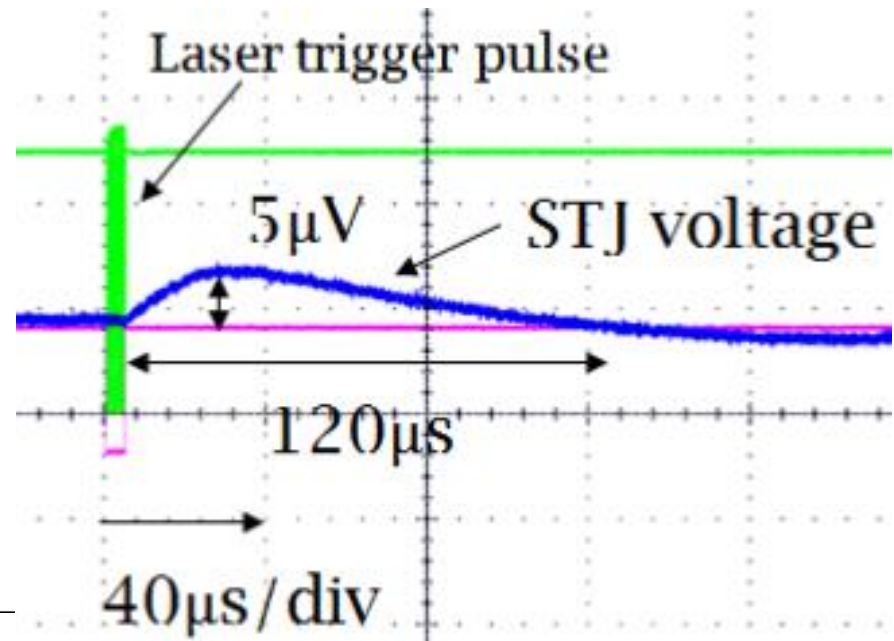
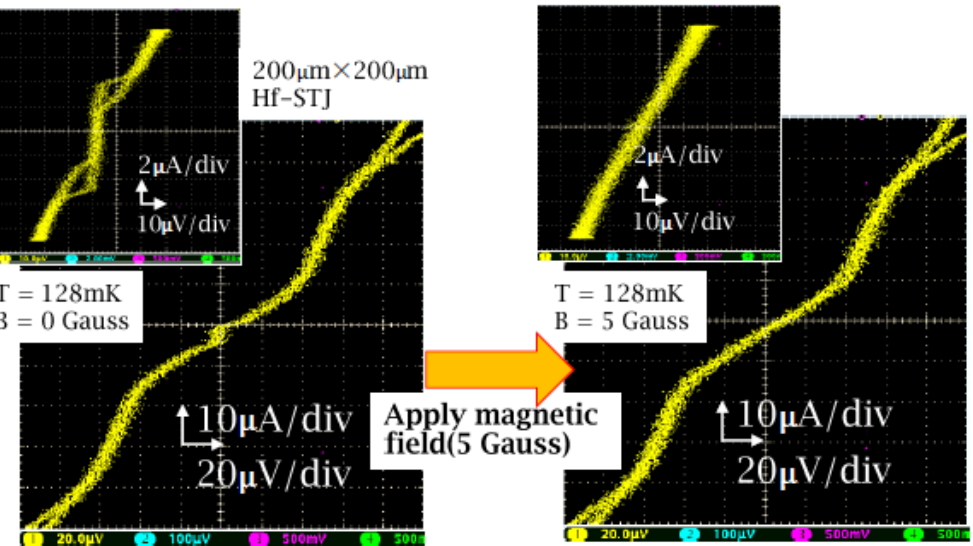
We made a thin aluminum layer (9nm) on the HfO layer (1-2 nm) to improve the insulation of the HfO<sub>x</sub> layer. Hf/Al/HfO<sub>x</sub>/Hf-STJ



$$\Delta = 20 \sim 30 \mu\text{eV}$$

Leakage current = 5  $\mu\text{A}$  @ 128mK  
for 200  $\mu\text{m}$ -square sample.

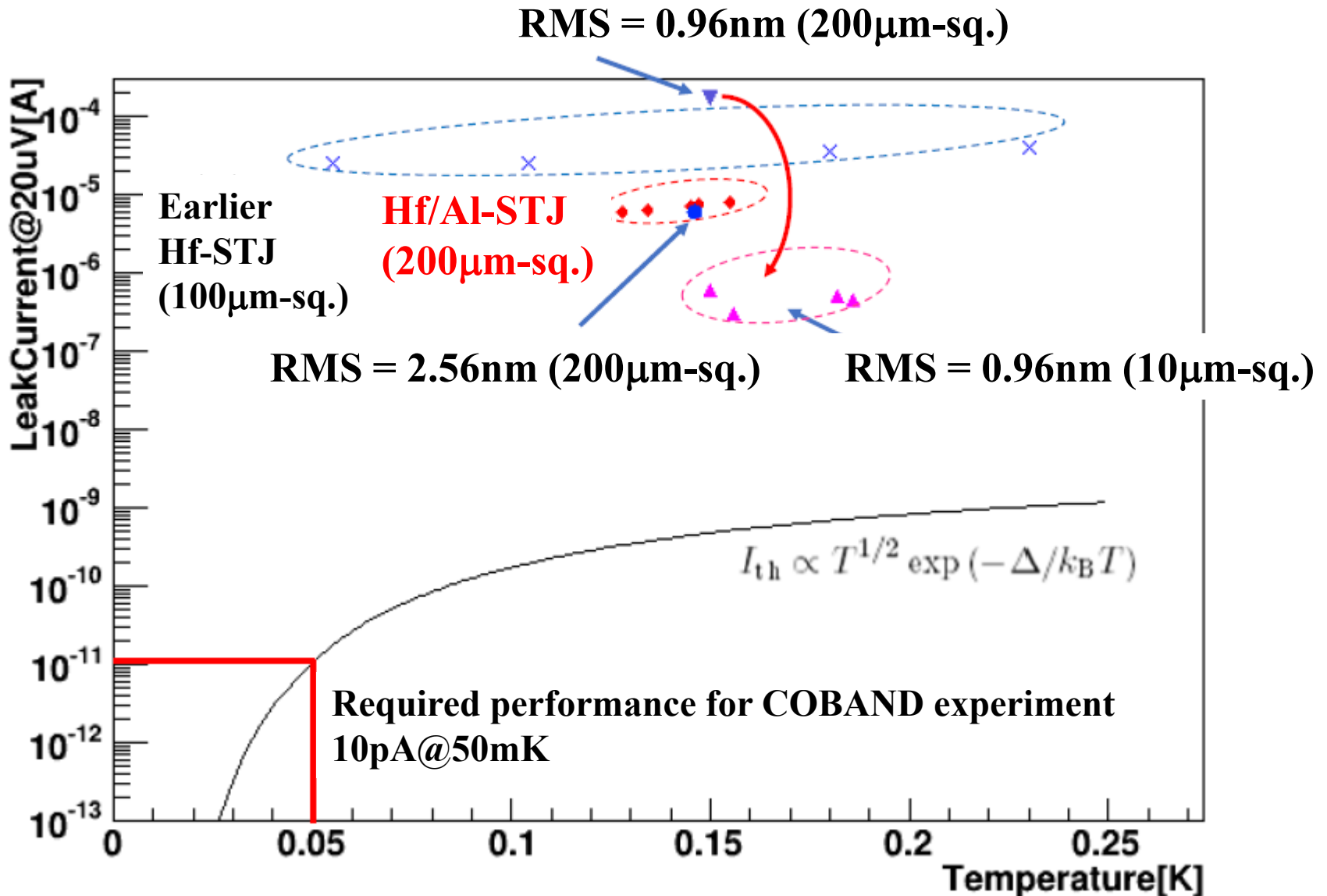
Visible light laser ( $\lambda=465\text{nm}$ ) 10Hz duration



Response speed (120  $\mu\text{s}$ ) is slower than Nb/Al-STJ response speed ( around a few  $\mu\text{s}$ ).



# Hf-STJのリーク電流の改善

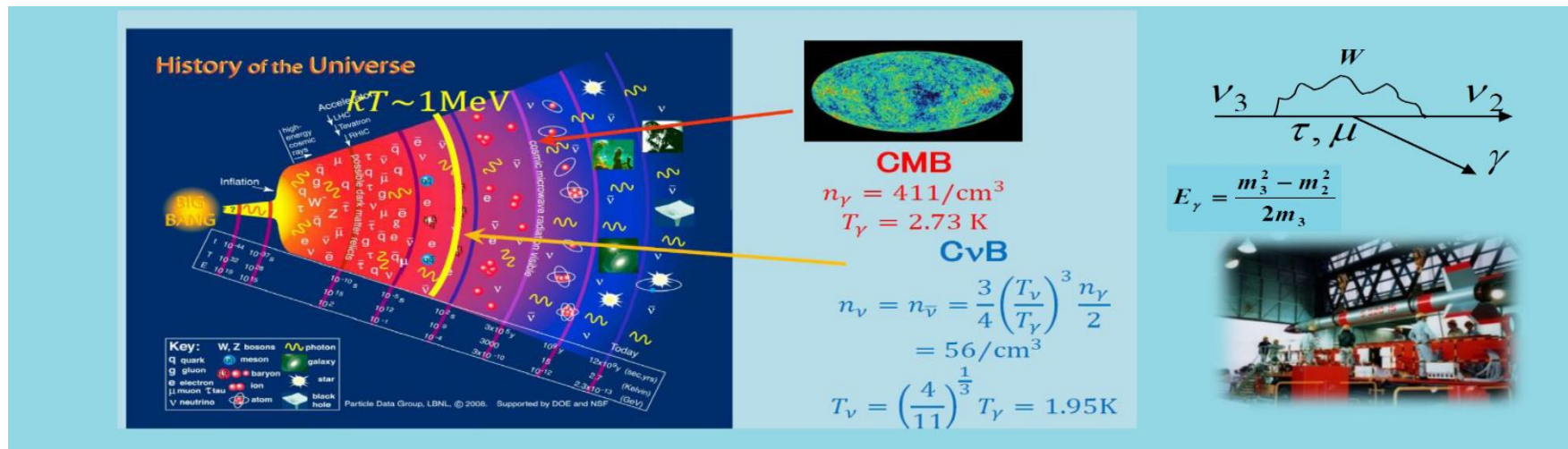


# まとめ

1. 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索COBANDロケット実験提案
2. COBAND実験のための測定器開発
  - 多チャンネルNb/Al-STJ検出器  
要求リーク電流( $<0.1\text{nA}$ )を満たすSTJ作成に成功
  - 極低温SOI増幅器  
極低温0.4 K でSTJ信号増幅に成功
  - 遠赤外線源ビーム ( エネルギー校正用 )
  - 光学系・回折素子
  - ロケット搭載用冷凍機 ( 0.4K  $^3\text{He}$  sorption)
3. 将来のCOBAND衛星実験のためのHf-STJ検出器の開発  
可視光パルスレーザーに対するHf-STJ応答信号を観測

BACKUP

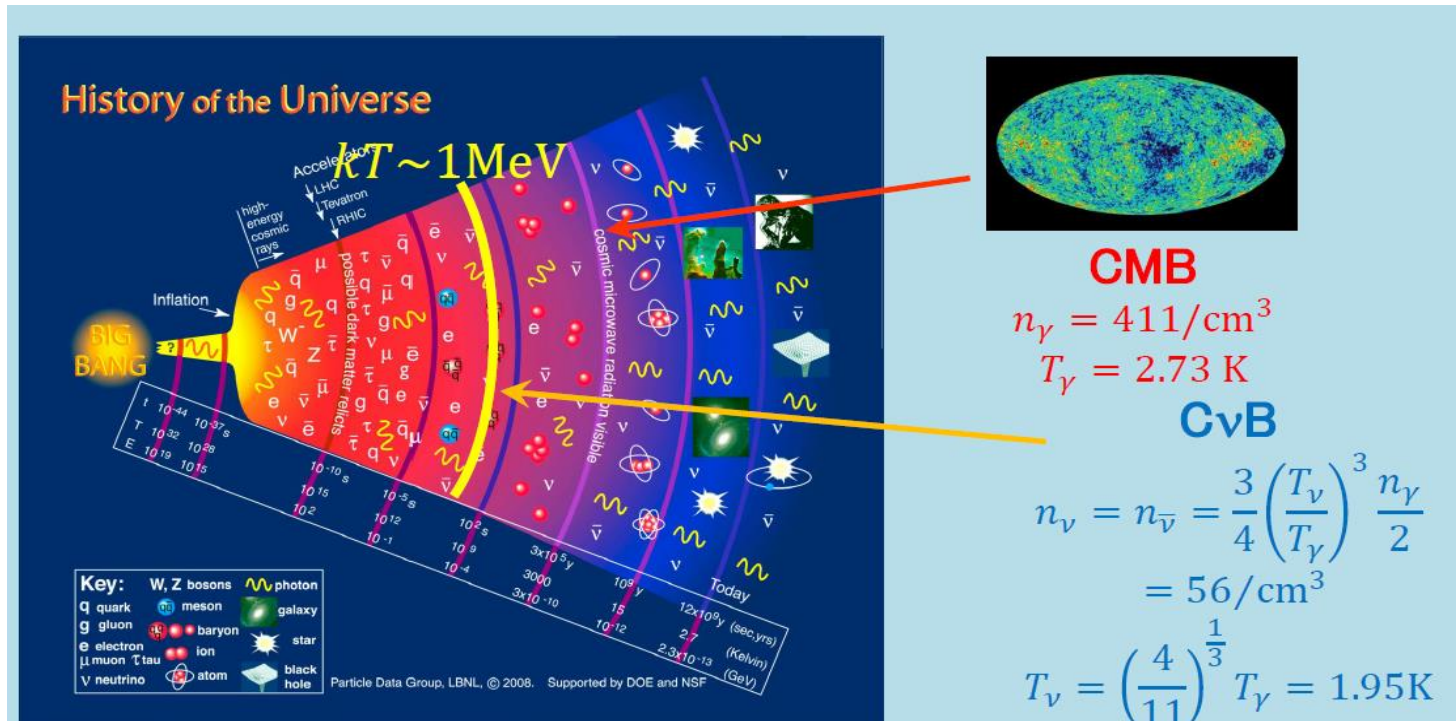
# COBAND (COsmic Background Neutrino Decay)実験共同研究者



金 信弘, 武内勇司, 武政健一, 永田和樹, 八木俊輔, 若狭玲那,  
 浅野千沙, 飯田 崇史, 笠島 誠嘉 (筑波大学),  
 池田博一, 和田武彦, 長勢晃一 (JAXA/ISAS),  
 松浦周二 (関西学院大学),  
 吉田拓生, 坂井 誠, 中村 昂弘, 西村 航 (福井大学),  
 美馬 覚, 木内健司 (理化学研究所),  
 加藤幸弘 (近畿大学),  
 新井康夫, 倉知郁生, 羽澄昌史 (KEK)  
 大久保雅隆, 浮辺雅宏, 志岐成友, 藤井剛 (産総研)  
 石野宏和, 樹林敦子 (岡山大学),  
 川人 祥二 (静岡大学),  
 Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov (Fermilab)  
 Soo-Bong Kim (Seoul National University)



# ビッグバン宇宙論と宇宙背景ニュートリノ (CνB)



- ビッグバン宇宙誕生の数秒後 → 宇宙背景ニュートリノ CνB
- ビッグバン宇宙誕生の30万年後 → 宇宙背景マイクロ波放射 CMB

CνB :

宇宙の極初期の情報を持つ → 宇宙起源の理解の重要な鍵  
 約100個/cm<sup>3</sup> と大量に存在 → ニュートリノ崩壊探索のニュートリノ源

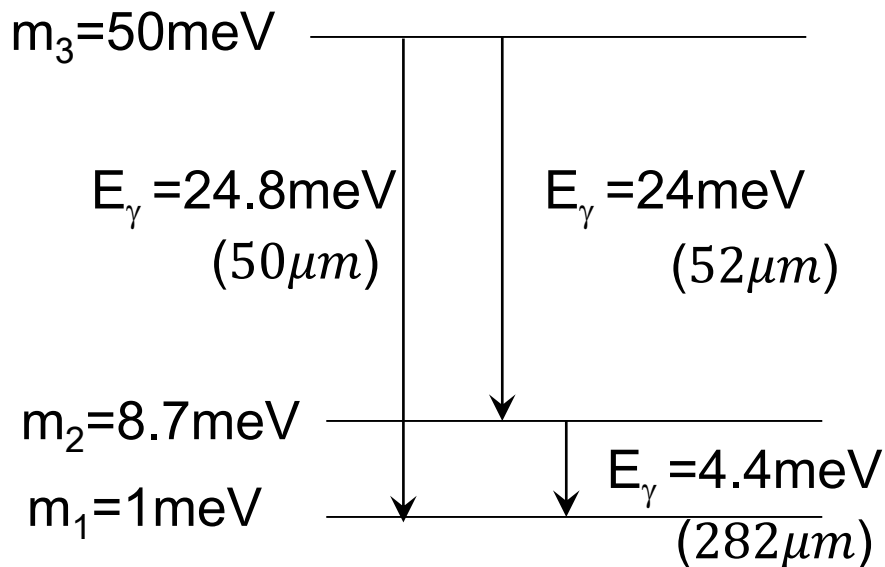
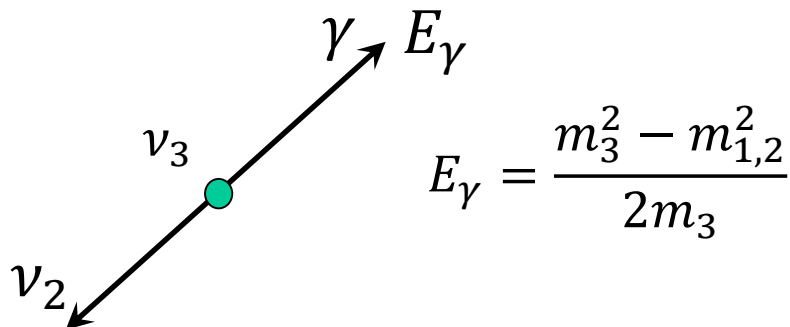
現行のν研究： 加速器ニュートリノ、大気ニュートリノ、原子炉ニュートリノを用いた研究  
 宇宙背景ニュートリノの研究は世界でも未だ着手されていない。筑波大グループが本研究を提案、主導。



# ニュートリノ崩壊で生成される光子のエネルギー

## ニュートリノ2体崩壊

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



## ニュートリノ振動実験結果

- $|\Delta m_{23}^2| = |m_3^2 - m_2^2| \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
- $\Delta m_{12}^2 \sim 7.65 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

## 宇宙観測結果

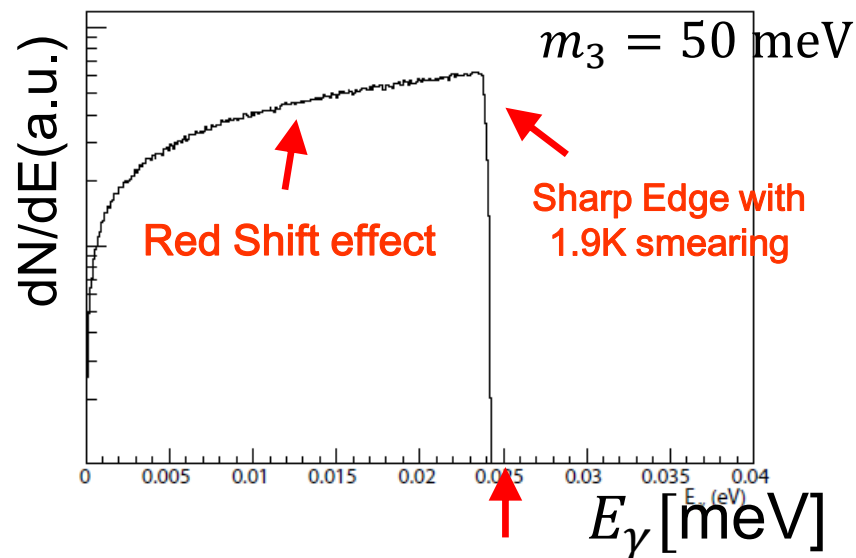
( Planck+WP+highL+BAO )

- $\Sigma m_i < 0.23 \text{ eV}$

→  $50 \text{ meV} < m_3 < 87 \text{ meV}$

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

光子エネルギー分布  $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$



$25 \text{ meV} \text{ (波長 } 50 \mu\text{m)}$  27

# ニュートリノの寿命

M. Beg, W. Marciano and M. Rudeman Phys. Rev. D17 (1978) 1395-1401

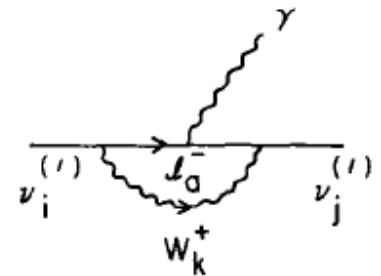
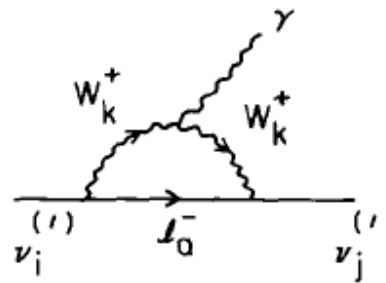
R. E. Shrock Nucl. Phys. B206 (1982) 359-379

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。

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

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

$W_L$  と  $W_R$  とはそれぞれ左巻き、右巻きウィークボソン。  
 $\zeta$  はそれらの混合角。  $W_1$  と  $W_2$  は質量固有状態。

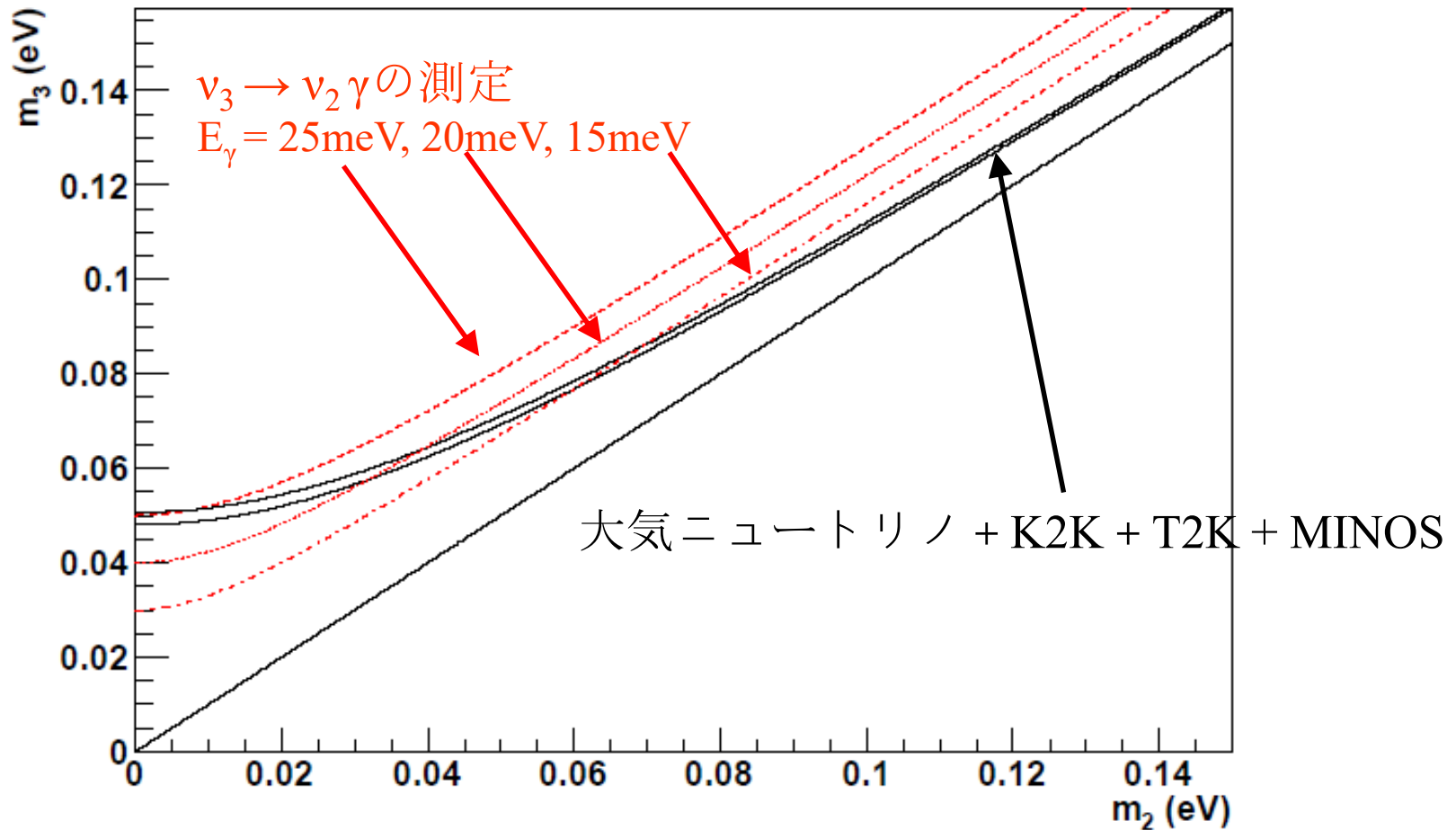


質量下限  $M(W_R) > 715 \text{ GeV}/c^2$ , 混合角上限  $\zeta < 0.02$ ,

$m_3 = 50 \text{ meV}$  を用いて計算すると,

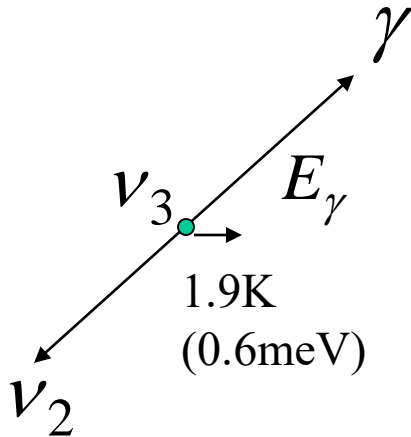
$$\tau(\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma) = \boxed{1.5 \times 10^{17} \text{ year}} \quad (\text{標準模型では } 2.1 \times 10^{43} \text{ year})$$

# ニュートリノ振動実験結果とニュートリノ崩壊



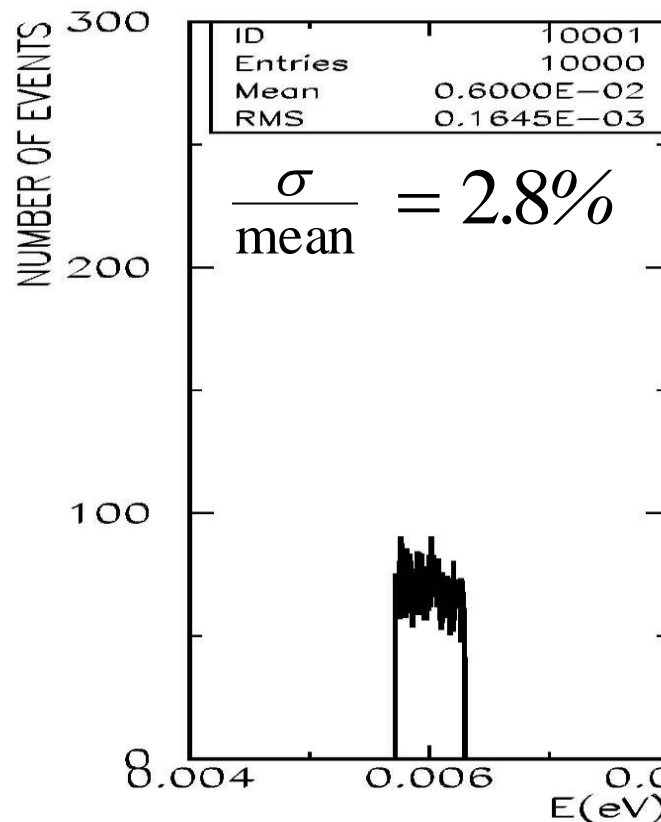
# 崩壊光子のスペクトル ( 1.9K $\nu$ による smearing )

宇宙背景ニュートリノは1.9K ( 0.6meV)の平均エネルギーでプランク分布。



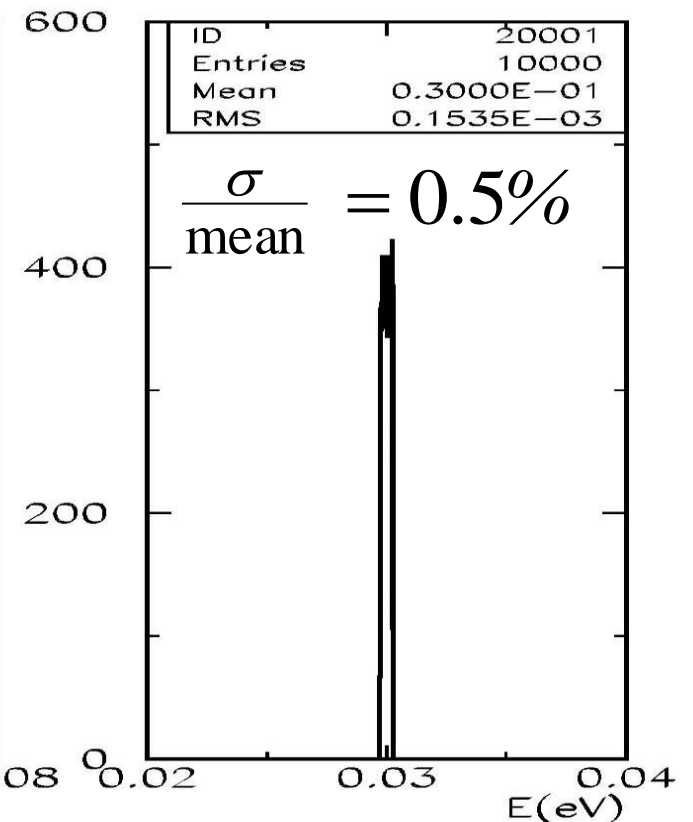
$$\nu_2 \rightarrow \nu_1 + \gamma$$

$$E_\gamma = 0.0006\text{eV}$$



$$\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$$

$$E_\gamma = 0.03\text{eV}$$



# Our paper published in JPSJ on Jan. 18<sup>th</sup>, 2012

Journal of the Physical Society of Japan **81** (2012) 024101

FULL PAPERS

DOI: [10.1143/JPSJ.81.024101](https://doi.org/10.1143/JPSJ.81.024101)

## Search for Radiative Decays of Cosmic Background Neutrino using Cosmic Infrared Background Energy Spectrum

Shin-Hong KIM\*, Ken-ichi TAKEMASA, Yuji TAKEUCHI, and Shuji MATSUURA<sup>1</sup>

*Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan*

<sup>1</sup>*Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, Sagami-hara 252-5210, Japan*

(Received September 8, 2011; revised November 22, 2011; accepted December 1, 2011; published online January 18, 2012)

We propose to search for the neutrino radiative decay by fitting a photon energy spectrum of the cosmic infrared background to a sum of the photon energy spectrum from the neutrino radiative decay and a continuum. By comparing the present cosmic infrared background energy spectrum observed by AKARI and Spitzer to the photon energy spectrum expected from neutrino radiative decay with a maximum likelihood method, we obtained a lifetime lower limit of  $3.1 \times 10^{12}$  to  $3.8 \times 10^{12}$  years at 95% confidence level for the third generation neutrino  $\nu_3$  in the  $\nu_3$  mass range between 50 and 150 meV/ $c^2$  under the present constraints by the neutrino oscillation measurements. In the left-right symmetric model, the minimum lifetime of  $\nu_3$  is predicted to be  $1.5 \times 10^{17}$  years for  $m_3$  of 50 meV/ $c^2$ . We studied the feasibility of the observation of the neutrino radiative decay with a lifetime of  $1.5 \times 10^{17}$  years, by measuring a continuous energy spectrum of the cosmic infrared background.

KEYWORDS: neutrino radiative decay, neutrino mass, cosmic background neutrino, cosmic infrared background, COBE, AKARI, Spitzer

Search Region:  $\lambda = 35 \sim 250 \mu\text{m}$  (  $E_\gamma = 35 \sim 5 \text{ meV}$  )  
In Rocket experiment,  $\lambda = 40 \sim 80 \mu\text{m}$  (  $E_\gamma = 31 \sim 15 \text{ meV}$  )



# Neutrino Lifetime by Left-Right Symmetric Model

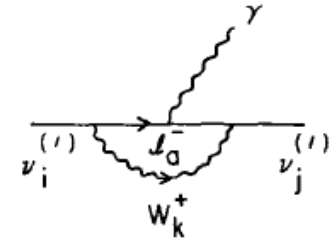
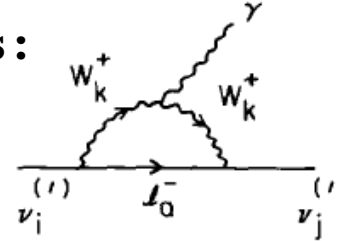
In the Left - Right Symmetric Model  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)$

(PRL 38, 1252(1977), PRD 17, 1395(1978) NP B206, 359(1982)),

there are two Weak Boson mass eigenstates :

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

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



$W_L$  and  $W_R$  are fields with pure V-A and V+A couplings, respectively, and  $\zeta$  is a mixing angle.

$$\tau^{-1} = \frac{\alpha G_F^2}{128\pi^4} \left( \frac{m_3^2 - m_2^2}{m_3} \right)^3 \times |U_{32}|^2 |U_{33}|^2 \left[ \frac{9}{64} (m_3^2 + m_2^2) \frac{m_\tau^4}{M_{W1}^4} \left( 1 + \frac{M_{W1}^2}{M_{W2}^2} \right)^2 + 4m_\tau^2 \left( 1 - \frac{M_{W1}^2}{M_{W2}^2} \right)^2 \sin^2 2\zeta \right],$$

where  $\alpha$  is a fine structure constant,  $G_F$  is a Fermi coupling constant,  $m_\tau$ ,  $M_{W1}$  and  $M_{W2}$  are masses of  $\tau$ ,  $W_1$  and  $W_2$ , respectively.<sup>21,22)</sup>  $U_{ij}$  is the (i, j)-th element of the Maki-Nakagawa-Sakata mixing matrix<sup>23)</sup> and we took  $|U_{32}| = 1/\sqrt{2}$  and  $|U_{33}| = 1/\sqrt{2}$ .

$$\tau^{-1} = \frac{\alpha G_F^2}{128\pi^4} \left( \frac{\Delta m_{32}^2}{m_3} \right)^3 m_\tau^2 \sin^2 2\zeta$$

Using a lower mass limit  $M(W_R) > 715 \text{ GeV}$ , a mixing angle limit  $\zeta < 0.02$ , and  $m_3 = 50 \text{ meV}$ ,

$$\tau = 1.5 \times 10^{17} \text{ year}$$

Measured neutrino lifetime limit  $\tau < 3 \times 10^{12} \text{ year}$  from CIB results measured by COBE and AKARI

# Lifetime Calculation

R. E. Schrock, Nucl. Phys. 28 (1982) 359.

Calculate the neutrino decay width in  $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)$

$$\tau^{-1} = \frac{\alpha G_F^2}{128\pi^4} \left( \frac{m_3^2 - m_2^2}{m_3} \right)^3 \times |U_{32}|^2 |U_{33}|^2 \left[ \frac{9}{64} (m_3^2 + m_2^2) \frac{m_\tau^4}{M_{W1}^4} \left( 1 + \frac{M_{W1}^2}{M_{W2}^2} \right)^2 + 4m_\tau^2 \left( 1 - \frac{M_{W1}^2}{M_{W2}^2} \right)^2 \sin^2 2\zeta \right],$$

where  $\alpha$  is a fine structure constant,  $G_F$  is a Fermi coupling constant,  $m_\tau$ ,  $M_{W1}$  and  $M_{W2}$  are masses of  $\tau$ ,  $W_1$  and  $W_2$ , respectively.<sup>21,22)</sup>  $U_{ij}$  is the (i, j)-th element of the Maki-Nakagawa-Sakata mixing matrix<sup>23)</sup> and we took  $|U_{32}| = 1/\sqrt{2}$  and  $|U_{33}| = 1/\sqrt{2}$ .

$$\tau^{-1} \approx \frac{\alpha G_F^2}{64\pi^4} \left( \frac{\Delta m_{32}^2}{m_3} \right)^3 m_\tau^2 \sin^2 2\zeta$$

$$M_{W2} = 0.715 \text{ TeV}, \sin \zeta = 0.013, \Delta m_{32}^2 = 2.43 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, m_\tau = 1.78 \text{ GeV}, m_3 = 50 \text{ meV},$$

$$\tau = 1.5 \times 10^{17} \text{ year}$$

In the standard model,

$$\tau^{-1} \approx \frac{9\alpha G_F^2}{8192\pi^4} \left( \frac{\Delta m_{32}^2}{m_3} \right)^3 (m_3^2 + m_2^2) \left( \frac{m_\tau^2}{M_W^2} \right)^2 \quad \text{Thus } \tau = 2.1 \times 10^{43} \text{ year}$$

ref. K. Sato and M. Kobayashi, Prog. Theor. Phys. 58 (1977) 1775. and others.

# Other papers citing our JPSJ paper

PHYSICAL REVIEW D 88, 013019 (2013)

## Radiative decays of cosmic background neutrinos in extensions of the MSSM with a vectorlike lepton generation

Amin Aboubrahim,<sup>2,\*</sup> Tarek Ibrahim,<sup>1,2,†,§,||</sup> and Pran Nath<sup>3,4,‡,¶</sup>

<sup>1</sup>*Department of Physics, Faculty of Science, University of Alexandria, Alexandria 21511, Egypt*

<sup>2</sup>*Department of Physics, Faculty of Sciences, Beirut Arab University, Beirut 11-5020, Lebanon*

<sup>3</sup>*Department of Physics, Northeastern University, Boston, Massachusetts 02115-5000, USA*

<sup>4</sup>*KITP, University of California, Santa Barbara, California 93106-4030, USA*

(Received 11 June 2013; published 30 July 2013)

An analysis of radiative decays of the neutrinos  $\nu_j \rightarrow \nu_l \gamma$  is discussed in minimal supersymmetric standard model extensions with a vector like lepton generation. Specifically we compute neutrino decays arising from the exchange of charginos and charged sleptons where the photon is emitted by the charged particle in the loop. It is shown that while the lifetime of the neutrino decay in the Standard Model is  $\sim 10^{43}$  yrs for a neutrino mass of 50 meV, the current lower limit from experiment from the analysis of the Cosmic Infrared Background is  $\sim 10^{12}$  yrs and thus beyond the reach of experiment in the foreseeable future. However, in the extensions with a vectorlike lepton generation the lifetime for the decays can be as low as  $\sim 10^{12} - 10^{14}$  yrs and thus within reach of future improved experiments. The effect of  $CP$  phases on the neutrino lifetime is also analyzed. It is shown that while both the magnetic and the electric transition dipole moments contribute to the neutrino lifetime, often the electric dipole moment dominates even for moderate size  $CP$  phases.

MSSM extension with a vectorlike lepton generation

$$\rightarrow \tau_\nu \sim 10^{12} \sim 10^{14} \text{ years}$$

# MSSM extension model with a vectorlike lepton generation

PHYSICAL REVIEW D 88, 013019 (2013)

## Radiative decays of cosmic background neutrinos in extensions of the MSSM with a vectorlike lepton generation

Amin Aboubrahim,<sup>2,\*</sup> Tarek Ibrahim,<sup>1,2,†,§</sup> and Pran Nath<sup>3,4,‡,¶</sup>

PHYSICAL REVIEW D 89, 055009 (2014)  
Large neutrino magnetic dipole moments in MSSM extensions

Amin Aboubrahim,<sup>2,\*</sup> Tarek Ibrahim,<sup>1,2,†</sup> Ahmad Itani,<sup>2,‡</sup> and Pran Nath<sup>3,§</sup>

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \quad Q = T_3 + Y$$

$$\psi_{iL} = \begin{pmatrix} \nu_{iL} \\ l_{iL} \end{pmatrix} \sim \left(1, 2, -\frac{1}{2}\right), \quad l_{iL} \sim (1, 1, 1), \quad (3)$$

$$\nu_{iL}^c \sim (1, 1, 0), \quad i = 1, 2, 3$$

$$\chi^c = \begin{pmatrix} E_L^c \\ N_L^c \end{pmatrix} \sim \left(1, 2, \frac{1}{2}\right), \quad E_L \sim (1, 1, -1), \quad \text{vectorlike lepton generation}$$

$$N_L \sim (1, 1, 0), \quad V+A^{(4)} \text{ interaction}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_{\tau R} \\ N_R \\ \nu_{\mu R} \\ \nu_{e R} \end{pmatrix} = D_R^\nu \begin{pmatrix} \psi_{1R} \\ \psi_{2R} \\ \psi_{3R} \\ \psi_{4R} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ N_L \\ \nu_{\mu L} \\ \nu_{e L} \end{pmatrix} = D_L^\nu \begin{pmatrix} \psi_{1L} \\ \psi_{2L} \\ \psi_{3L} \\ \psi_{4L} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

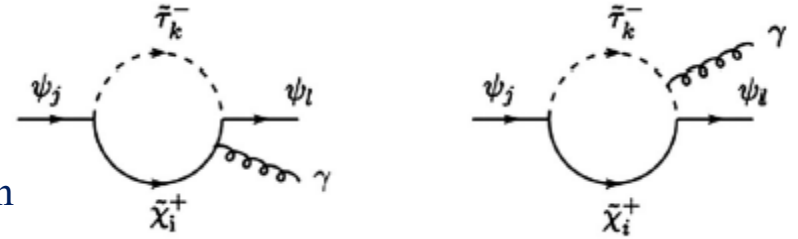
In Eq. (16)  $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$  are the mass eigenstates for the neutrinos, where in the limit of no mixing we identify  $\psi_1$  as the tau neutrino,  $\psi_2$  as the heavier mass eigenstate,  $\psi_3$  as the muon neutrino and  $\psi_4$  as the electron neutrino. To make contact with the normal neutrino hierarchy we relabel the states so that

$$\nu_1 = \psi_4, \quad \nu_2 = \psi_3, \quad \nu_3 = \psi_1, \quad \nu_4 = \psi_2, \quad (18)$$

which we assume has the mass hierarchical pattern

$$m_{\nu_1} < m_{\nu_2} < m_{\nu_3} < m_{\nu_4}. \quad (19)$$

$$-\mathcal{L}_{CC} = \frac{g}{2\sqrt{2}} W_\rho^\dagger \{ \bar{\nu}_\tau \gamma^\rho (1 - \gamma_5) \tau + \bar{\nu}_\rho \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \mu + \bar{\nu}_e \gamma^\rho (1 - \gamma_5) e + \bar{N} \gamma^\rho (1 + \gamma_5) E \} + H.c. \quad (24)$$

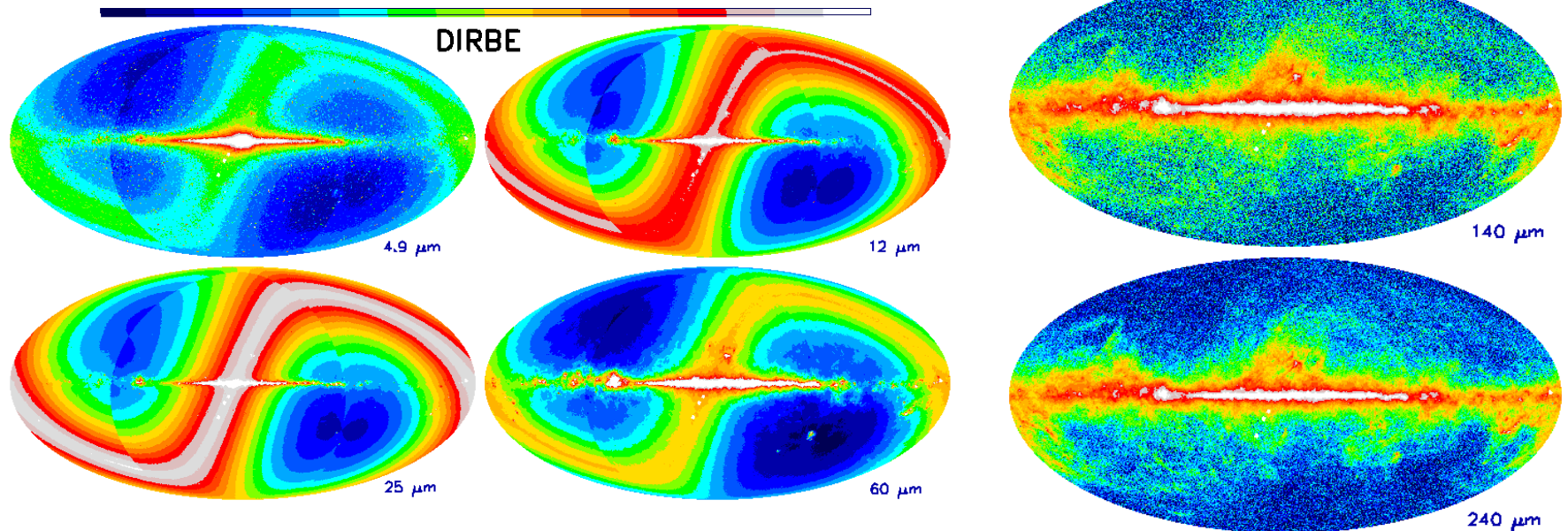


Neutrino mass eigenvalues (GeV)		$m_{\nu_3} = 5.2 \times 10^{-11}$ $m_{\nu_2} = 9.2 \times 10^{-12}$ $m_{\nu_1} = 9.7 \times 10^{-13}$
(i) $m_{\chi^\pm} = 256$ GeV $m_{\tilde{\tau}} = 162$ GeV	$\mu_2$ $\mu_1$ $\nu_3$ lifetime	$1.2 \times 10^{-10}$ $2.5 \times 10^{-13}$ $3.9 \times 10^{14}$ yr
(ii) $m_{\chi^\pm} = 267$ GeV $m_{\tilde{\tau}} = 202$ GeV	$\mu_2$ $\mu_1$ $\nu_3$ lifetime	$4.6 \times 10^{-10}$ $1.3 \times 10^{-12}$ $2.5 \times 10^{14}$ yr
(iii) $m_{\chi^\pm} = 268$ GeV $m_{\tilde{\tau}} = 158$ GeV	$\mu_2$ $\mu_1$ $\nu_3$ lifetime	$2.2 \times 10^{-10}$ $1.1 \times 10^{-13}$ $1.8 \times 10^{14}$ yr
(iv) $m_{\chi^\pm} = 272$ GeV $m_{\tilde{\tau}} = 195$ GeV	$\mu_2$ $\mu_1$ $\nu_3$ lifetime	$-7.6 \times 10^{-10}$ $-1.3 \times 10^{-13}$ $8.8 \times 10^{13}$ yr



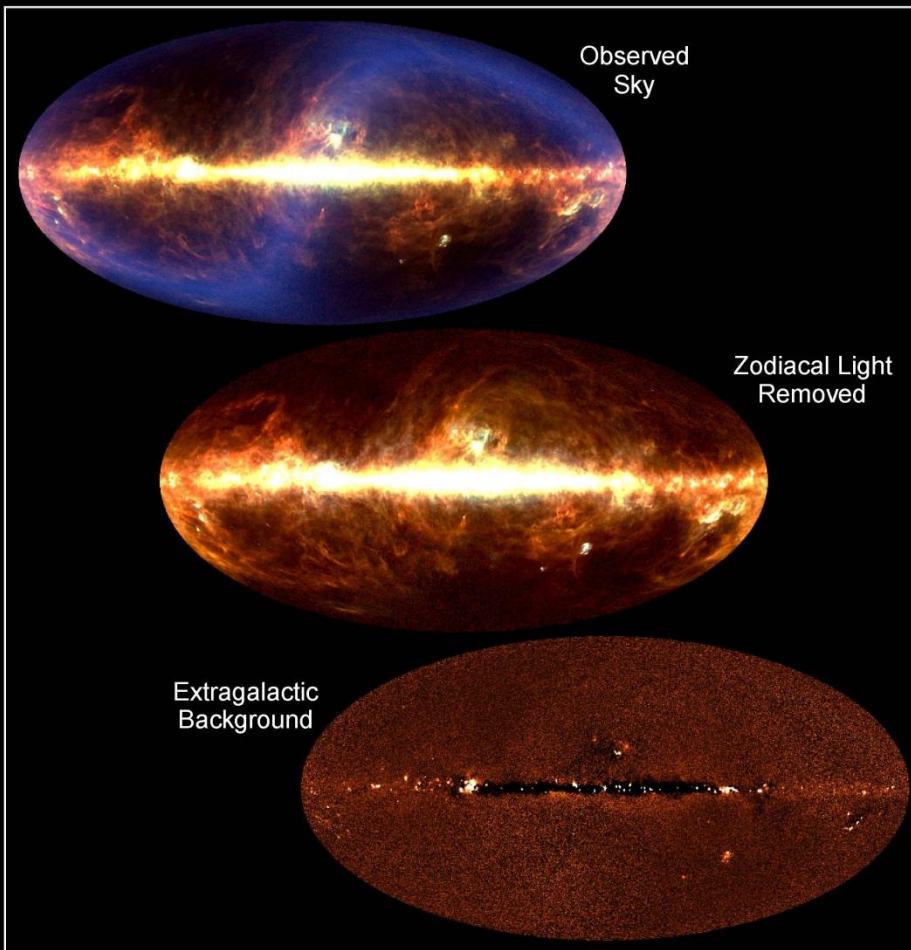
# COBEによる赤外線背景輻射観測(続き 2 )

宇宙から観測される全赤外線各波長ごとのマップ。中心を横切る明るい部分は銀河系の星間ガスから放出される赤外線。S字の明るい部分は太陽系の惑星間のダストから放出される赤外線。短い波長では、これらのバックグラウンドが特に大きい。





# COBEによる赤外線背景輻射観測(続き 3)



( 上 )

宇宙から観測される全赤外線のマッ  
プ。中心を横切る明るい黄色または  
オレンジ色の部分は銀河系の星間ガ  
スから放出される赤外線。青いS字  
の部分は太陽系の惑星間のダストか  
ら放出される赤外線。

( 中 )

上から太陽系の赤外線を除去したも  
の

( 下 )

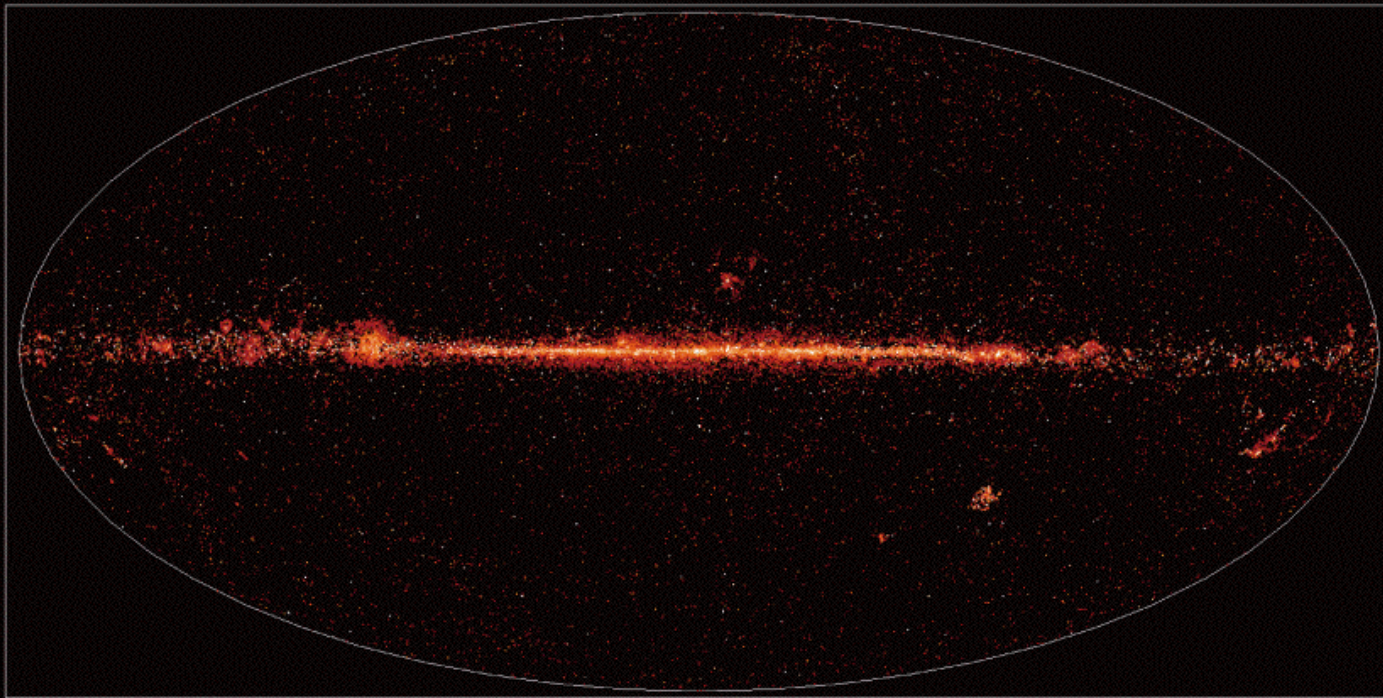
さらに銀河系などの赤外線を除去し  
たもの。中央の黒い部分は銀河系に  
遮られて観測できなかった部分。

# あかり赤外線背景輻射観測の成果

約 64,000 天体の 65, 90, 140, 160  $\mu\text{m}$  の  
4 波長の情報を含む遠赤外線カタログ



## 「あかり」遠赤外線天体の全天分布



「あかり」遠赤外線サーベイヤー（観測波長90  $\mu\text{m}$ ）

# 宇宙赤外線観測ロケット実験S-520-15 (1992年)

PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan 46, 665-676 (1994)

## Rocket-borne Instrument for Observations of Near-Infrared and Far-Infrared Extended Astrophysical Emission

Hideo MATSUHARA, Mitsunobu KAWADA, Toshio MATSUMOTO, Shuji MATSUURA, and Masahiro TANAKA

*Department of Astrophysics, Nagoya University, Nagoya 464-01*

*E-mail (HM) maruma@toyo.phys.nagoya-u.ac.jp*

and

James J. BOCK, Viktor V. HRISTOV, Andrew E. LANGE, Philip D. MAUSKOPF, and Paul L. RICHARDS

*Department of Physics, University of California, Berkeley, CA 94720, U.S.A.*

(Received 1993 October 4; accepted 1994 June 20)

### Abstract

We give a detailed description of the design and flight performance of an instrument onboard the S-520-15 rocket of the Institute of Space and Astronautical Science. The instrument, consisting of a near-infrared spectrometer and a far-infrared photometer at the focus of a 10 cm liquid-helium cooled telescope, was designed to observe both the brightness and distribution of diffuse emission with high sensitivity. The rocket was successfully launched and the instrument observed near-infrared and far-infrared continuum emission, as well as [CII] 157.7  $\mu\text{m}$  line emission from regions at high Galactic latitude. We also give a brief description of the design and performance of an onboard attitude control system.

**Key words:** Cosmic background radiation — Infrared: spectra — Instruments — ISM: general

5 minutes DAQ at 200km height in 1992.

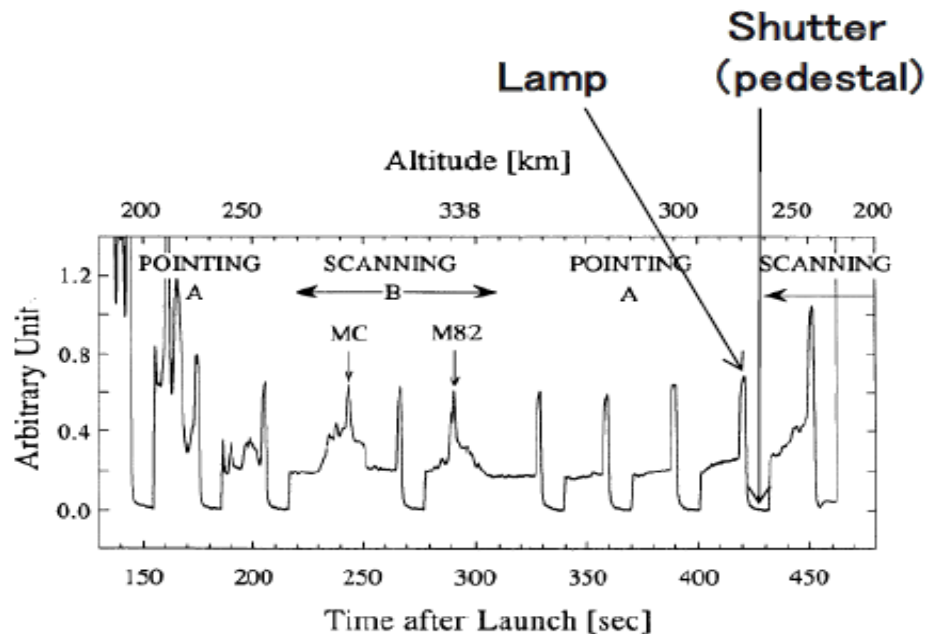
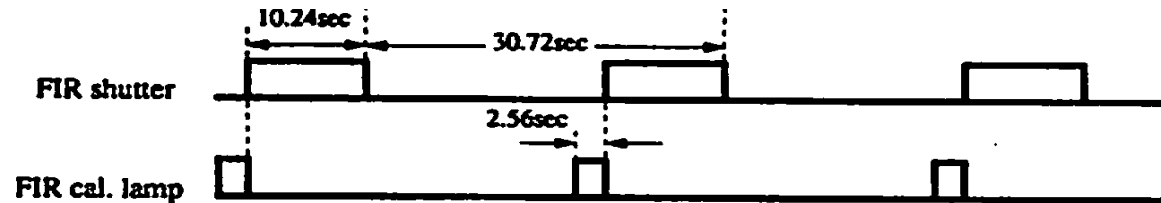
Launched at 1:00, Feb. 2, 1992.

Started the measurement at 1:02.

Finished the measurement at 1:07.



# COBANDロケット実験 In-flight Calibration



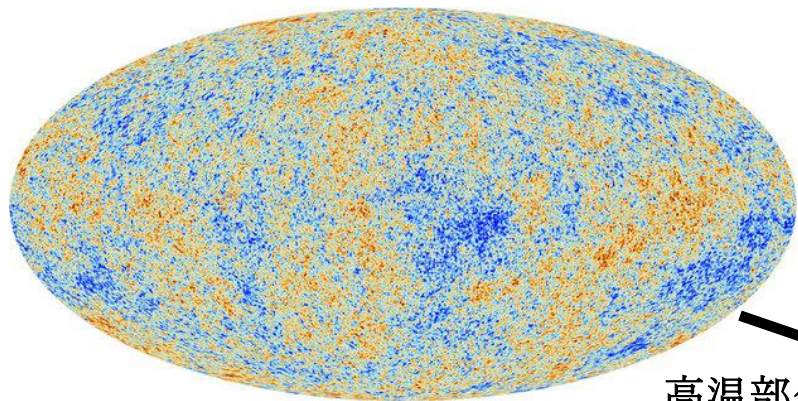
飛行中キャリブレーションのタイミング(上)と予想される検出器応答の時間変化(右)。これらの図はS520-15実験から参照された。

A: HI hole  
MC: Molecular Cloud  
M82: Starburst Galaxy

飛行中にcold shutterを閉めてpedestalをとる。  
また、calibration lampをONにしてcalibrationを行う。

# 宇宙大規模構造と宇宙背景ニュートリノ

Planck衛星によって観測した  
宇宙背景輻射の温度ゆらぎ

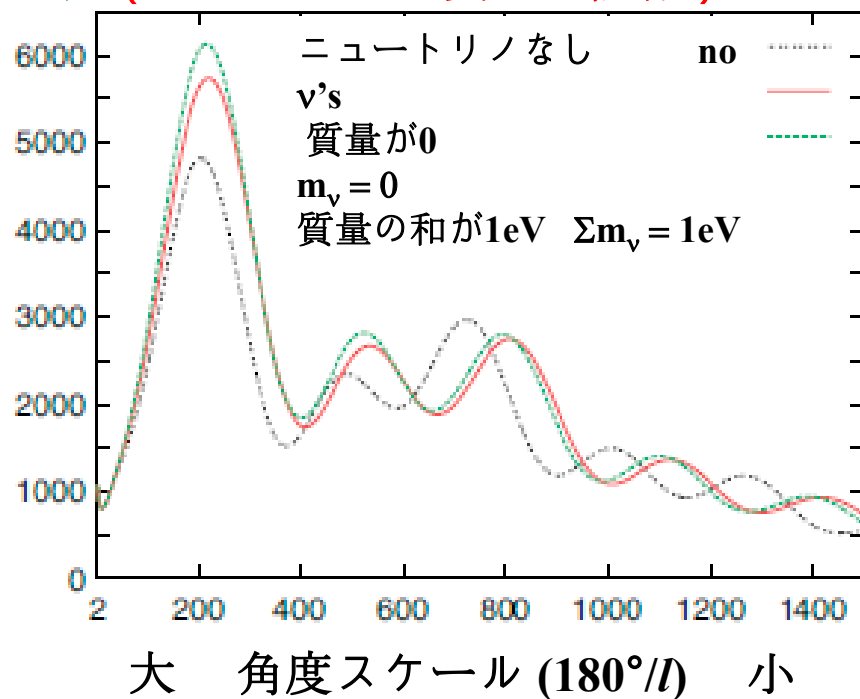


高温部分の  
角度相関

温度ゆらぎの決定要因：  
暗黒物質、暗黒エネルギー、  
ニュートリノ

↓  
物質密度の高低を決める  
即ち宇宙大規模構造を決定する

宇宙背景輻射の温度ゆらぎを表す角  
度相関のパワースペクトルの理論予  
言 (ニュートリノ質量に依存)



温度が高い所 = 銀河物質密度の高い所  
宇宙背景ニュートリノが存在し、質量が大きくなるほど  
大角度部分のゆらぎが大きくなる  
Ref. J. Lesgourgues, S. Pastor Phys. Rep. 429 (2006)  
307



# STJ Energy Resolution

## STJ Energy Resolution

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

Using Hf as a superconductor,

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

$\Delta$ : Band gap energy

F: Fano factor (= 0.2)

E: Incident particle energy

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

### Tc : Critical Temperature

Operation is done at a temperature around 1/10 of Tc

We reported that Hf-STJ worked as a STJ in 2011.

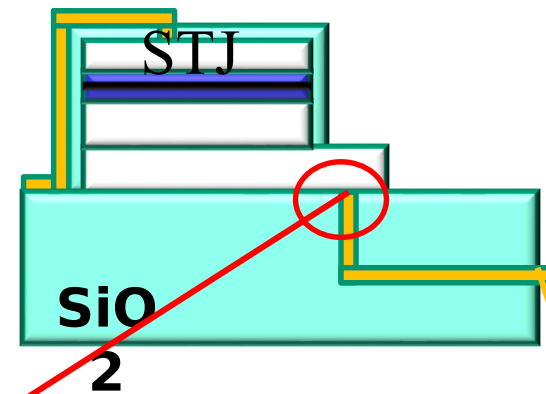
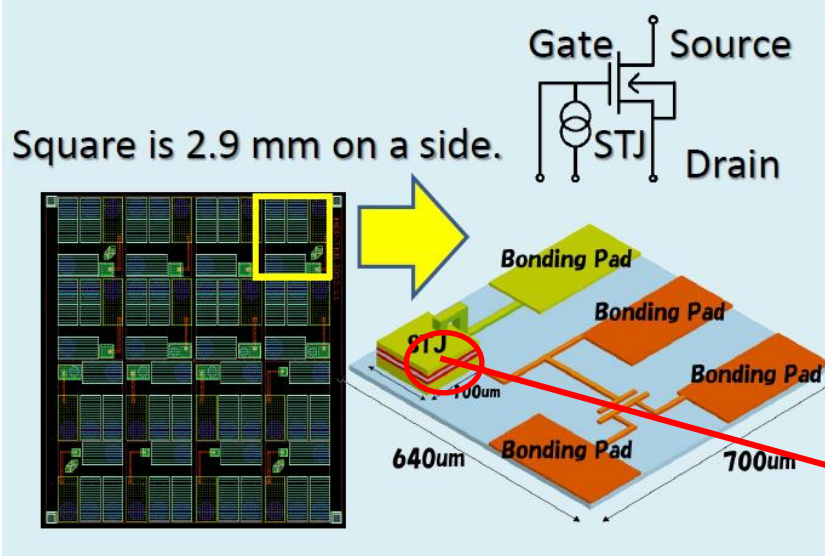
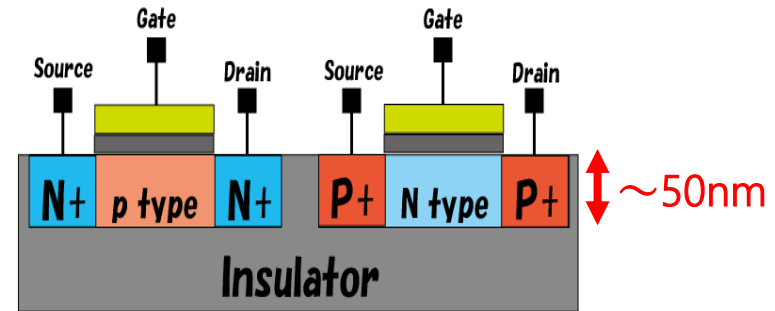
# R&D Status of SOI Cryogenic Preamplifier for STJ

# 新型超伝導検出器SOI-STJの開発

## ■ SOI-STJの開発

- SOIは，極低温(4K)で増幅器が動作した実績がある。
  - Nagata et al., AIPC 1185, 286-289 (2009)
- SOI-STJは，SOI基板の上に直接STJを形成する野心的な試み→STJ ピクセル検出器の可能性

FD-SOI -MOSFET



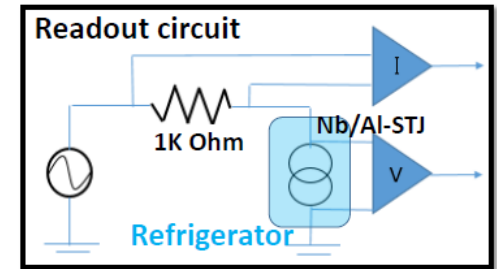
SOIとSTJのVia  
を介した接触部

SOI pre-Ampへ

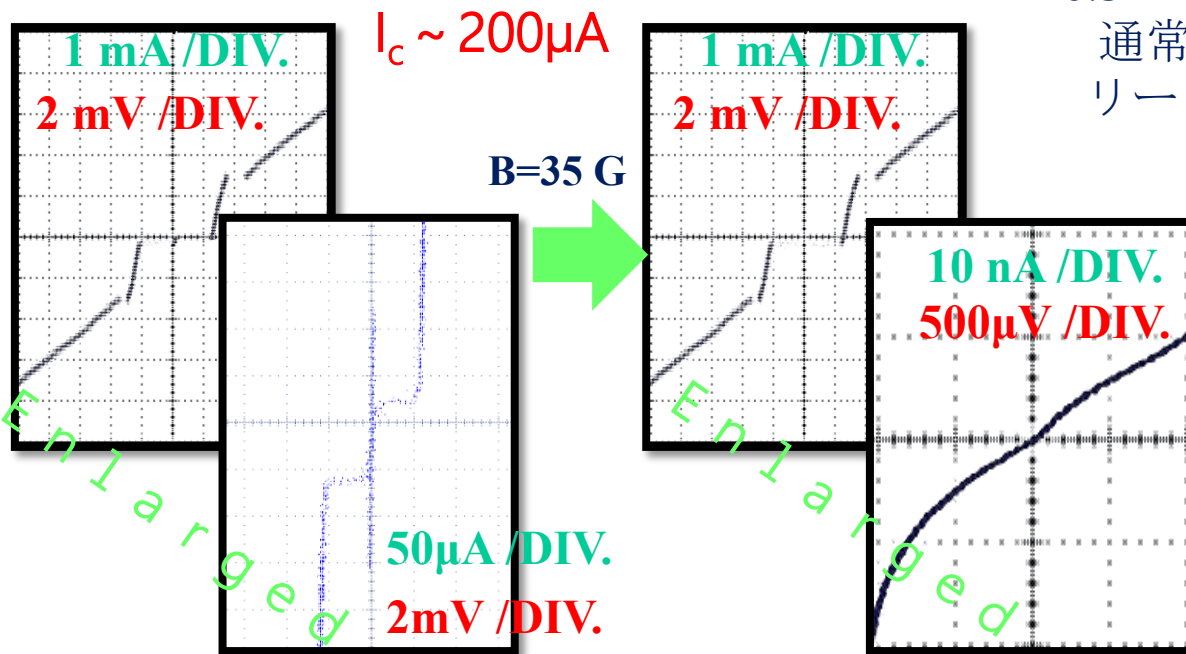
# SOI-STJ一体型検出器上のNb/Al-STJの性能

SOI基板上にプロセスしたNb/Al-STJ ( $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ ) のI-V曲線を測定。

700mK (希釈冷凍機を用いた)

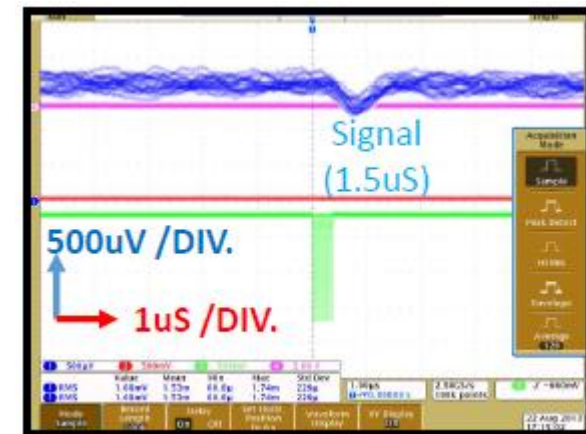


## □ Nb/Al-STJのI-V 曲線



□ 0.5mVでのリーク電流は6nA。  
通常のNb/Al-STJ (100um 角) のリーク電流 10nA.に近い。

□ SOI-STJ 一体型検出器のNb/Al-STJの可視光 (465nm) パルスへの応答信号



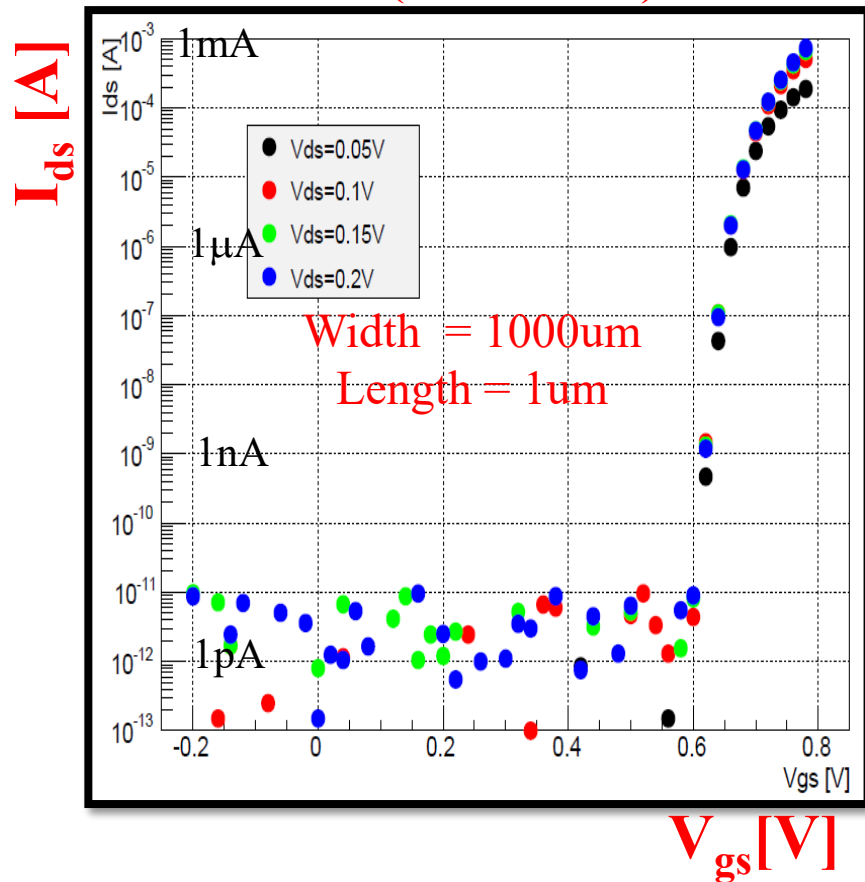
□ Quality Factor  
( $R_{\text{dynamic}}/R_{\text{normal}}$ )

Si 基板上 :  $5 \times 10^5$   
SOI基板上 :  $3 \times 10^5$

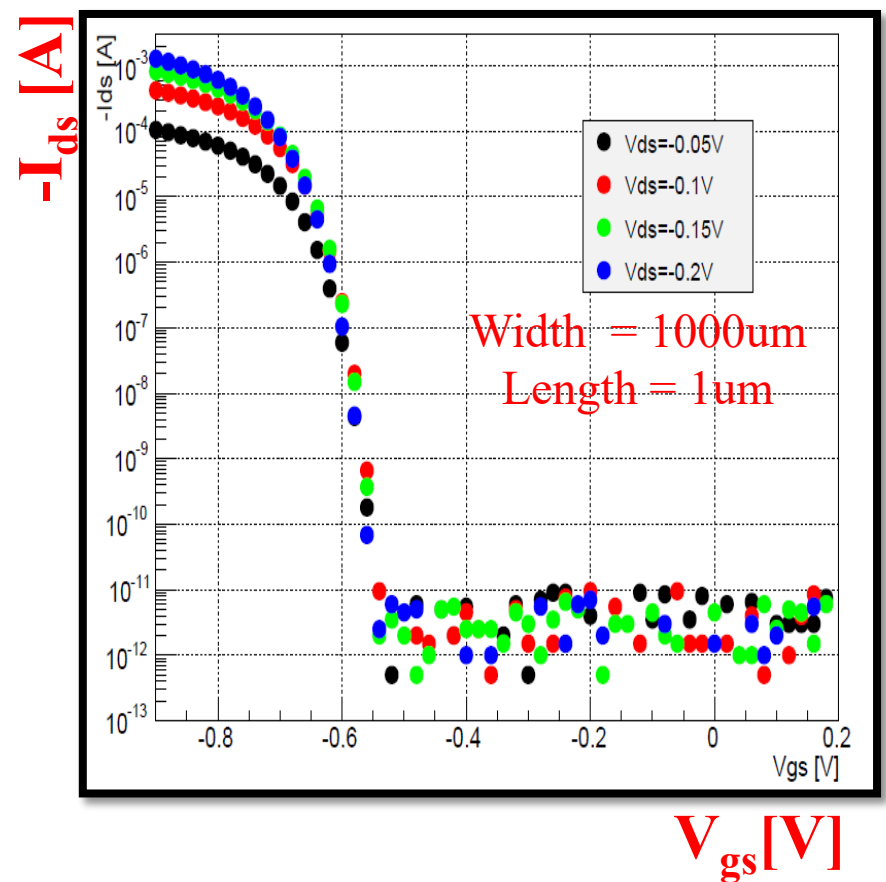
# SOI-FET の極低温下での動作

- SOI基板上にNb/Al-STJを形成後のFETのI-V曲線
- 希釈冷凍機で測定

nMOS(690-750mK)



pMOS(750mK)



- 800mK以下でnMOSもpMOSもFETとして動作



# COBAND実験のコンパクト化されたデータ・フォーマット

## ( 1 ) ペDESTALと校正データ

### ( 1 ) ペDESTALとCalibration Light校正データ

- シャッター閉 ( 12.5秒間 )
  - 2.5秒間 : Calibration Light校正データ
  - そのあと10秒間 : ペDESTALデータ
  - 10msecごとに50μsec積分の平均値を記録  
( 毎秒100イベントを記録 )
- Thresholdsは0でデータをとる。
- ペDESTALとCalibration Light校正データを収集している期間は  $9 \times 12.5\text{sec} = 113\text{sec}$  なので , Data Block1の全データサイズは 32.0Mbitsである。

Data Block1

時間	15ビット
ADCデータ #1	7ビット
ADCデータ #2	7ビット
ADCデータ #3	7ビット
:	
ADCデータ #400	7ビット

Data Block1

( ペDESTALとCalibration Light校正データ )  
毎秒のデータサイズは , 100イベント毎秒 \*  
[15ビット時間 ( 15ビット ) + 400 \* ADC ( 7ビット ) ] =  $15 \times 100 + 400 \times 7 \times 100\text{bps} =$   
0.283Mbps

# COBAND実験のコンパクト化されたデータ・フォーマット

## ( 2 ) 実データ

### ( 2 ) 実データ

- シャッター開 ( 18 秒間 )

- Calibration Light 消

18秒間： 0.5photon thresholdsを超えたピクセルについて，50μsecの積分を行い，平均値をとり，1 イベントとして記録する。

- 実データ収集期間は11x18sec = 198secなので,全データサイズは618Mbitsである。

Data Block2

時間	15ビット
時間	10ビット
ピクセルアドレス #N	9ビット
ADCデータ #N	7ビット
:	
時間	10ビット
ピクセルアドレス #N	9ビット
ADCデータ #N	7ビット

Data Block2

( 実データは10msec毎に記録 )

ヘッダー ( 15ビット時間 ) とデータ ( 10ビット時間 ( 10ビット ) + ピクセルアドレス ( 9ビット ) + ADC ( 7ビット ) ) 10msごとにヘッダー

その時間当たりのデータサイズは

毎秒15bits x 100Hz + 26bits x 1 channel x 120,000 Hz [bits] = 3.123Mbps

( 1 ) + ( 2 ) より、Light校正 + ペDESTAL + 実データ → 3.41M b p s

# 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

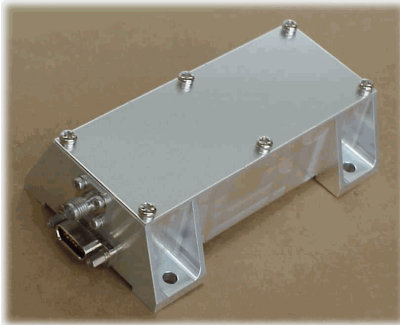


観測データを**3.5Mbps**の転送速度で地上に送る必要がある。

JAXA/ISAS観測ロケットの送信機の転送速度は1.6Mbps (S-band)  
⇒ 要求される転送速度を満足する送信機が必要である。



転送速度10Mbps程度の送信機を追加搭載する。



Addnics社製  
ロケット用2.2 GHz送信機

- ロケットは2台の送信機を搭載可能
- Addnics社製送信機は高転送速度の送信機を製作
- 2台の送信機を使用する。
- 地上局は十分な受信能力を有する ( 50Mbps, S-band)

計画： 高速送信機的设计決定 ( 会社との共同検討 )  
データ様式仕様の決定。

# SPICA SENSITIVITY vs. NEP

Yasuo Doi at SPICAWorkshop Dec 16-17, 2010

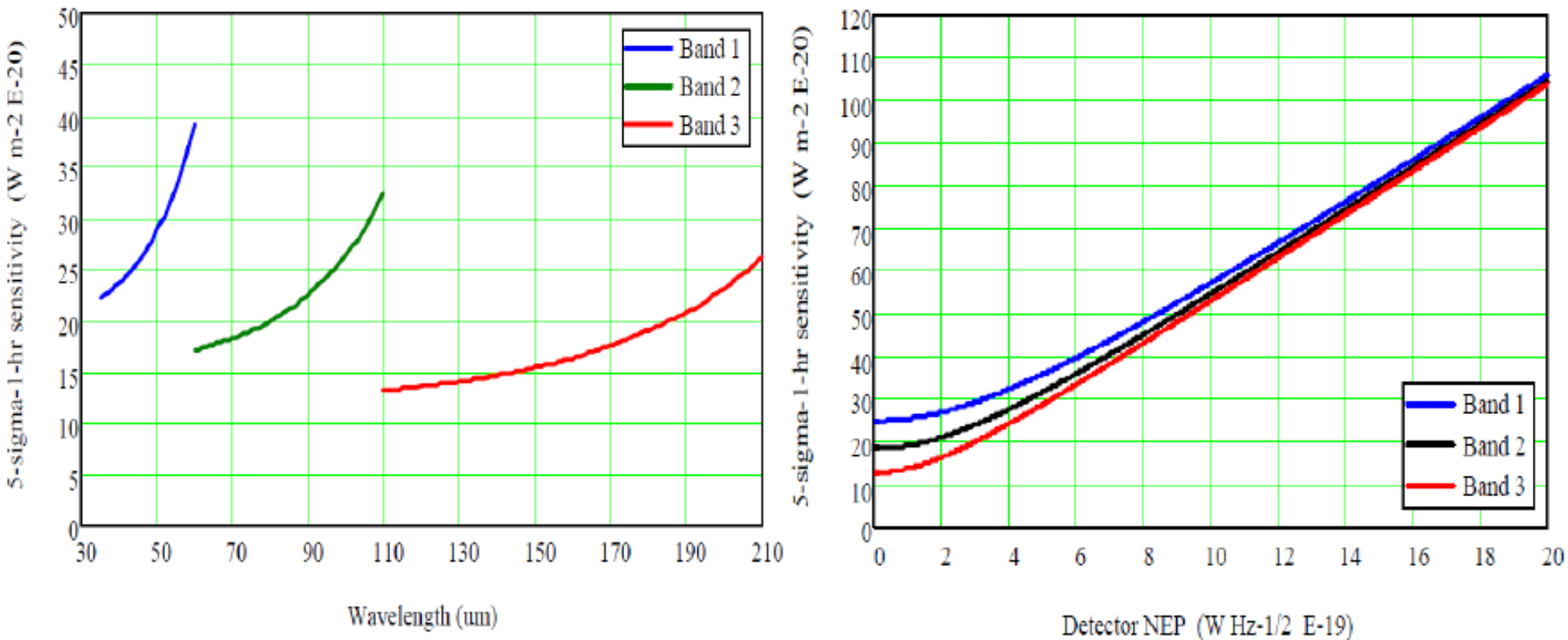
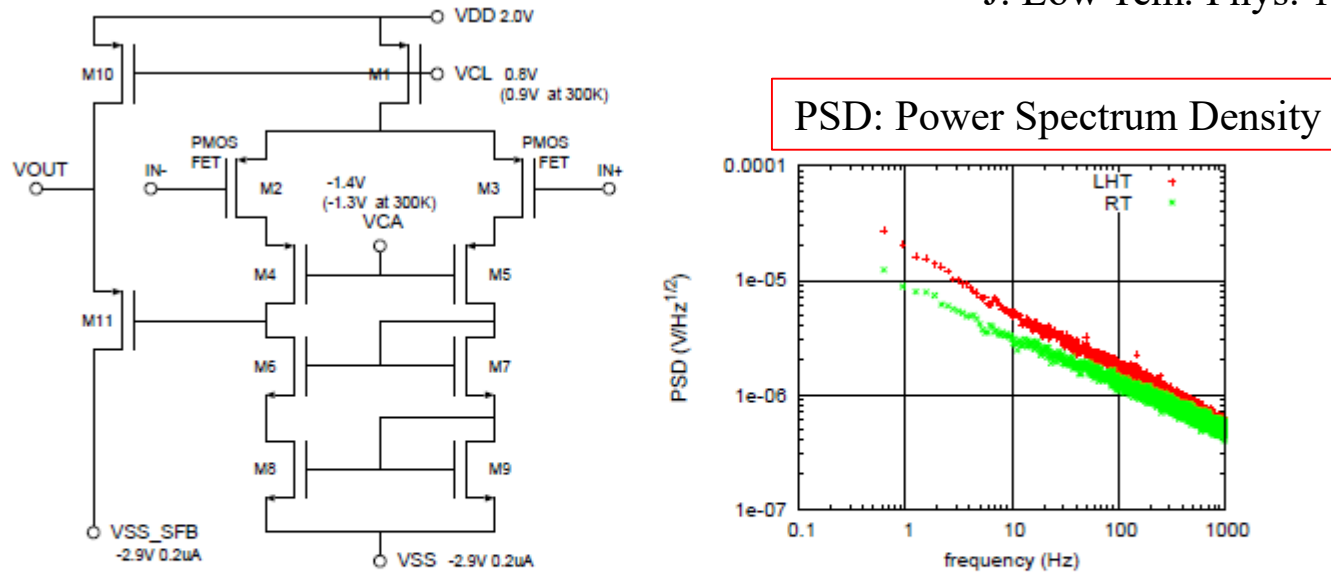


Figure 3: Impact of detector NEP on the resolved line sensitivity

**NEP =  $2 \times 10^{-19}$  W Hz<sup>-1/2</sup> is good enough.**

# FD-SOI 4K preamplifier

T.Wada, H.Nagase, H. Ikeda, Y. Arai, M. Ohno and K. Nagase “Development of low power cryogenic readout integrated circuits using fully-depleted-silicon-on-insulator CMOS technology for far-infrared image sensors”  
J. Low Tem. Phys. 167 (2012) 602



**Fig. 4** (Color online) Schematic diagram of the OP-AMP (left). All FETs are ST FD-SOI-CMOS with a gate size of  $W/L=0.63/5.0$ , except the input PMOSs ( $W/L=5/5$ ). Input referred noise spectra (right) of the OP-AMP at liquid helium temperature (LHT) and room temperature (RT).

**Table 2** Characteristics of FD-CMOS OP-AMP at 4K

	design	measurement	
temperature	4K	4–300K*	excellent
open loop gain	> 1000	7000	excellent
Output swing	> 1V	1.3V	excellent
input referred noise	14–20 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	19 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	good
power	1.1 $\mu\text{W}$	1.3 $\mu\text{W}$	good
input offset	0mV	2mV	good

\*: adjustment of bias voltage is required in room temperature operation.

1Hz sampling



# MKID NEP

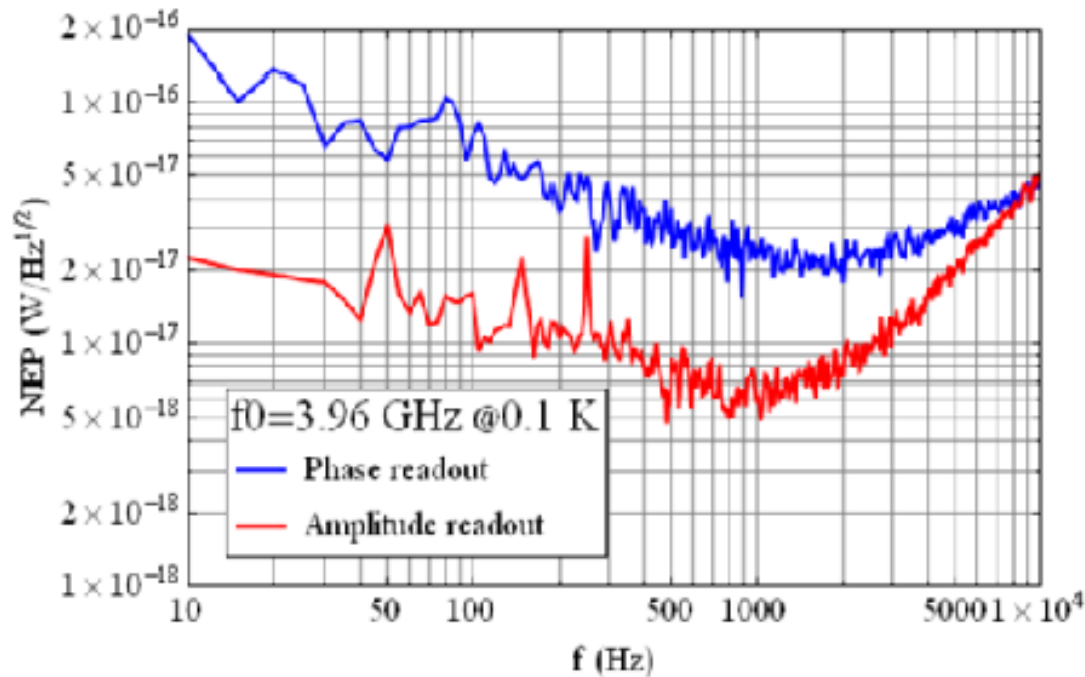


図 3 MKID の NEP (M. Naruse Ph. D Thesis, Tokyo Univ. 2012)

M. Naruse  
PhD Thesis  
Univ. of Tokyo,  
2012

3.96GHzへの応答

10kHz sampling で  
 $\text{NEP} = 5 \times 10^{-17} \text{ WHz}^{-0.5}$

SPICAのdesign NEPに比べて2桁大きい。

# 常温低雑音FET (筑波大、東工大)

K. Ohmori et al.

Application of Low-Noise TIA ICs for Novel Sensing of MOSFET Noise up to the GHz Region”

VLSI Symposia on Technology and Circuits 2013

プレスリリース 2013年6月7日「独自技術の雑音プローブに開発したICを搭載し、電子デバイスの雑音特性を広帯域で計測可能に」筑波大、東工大など

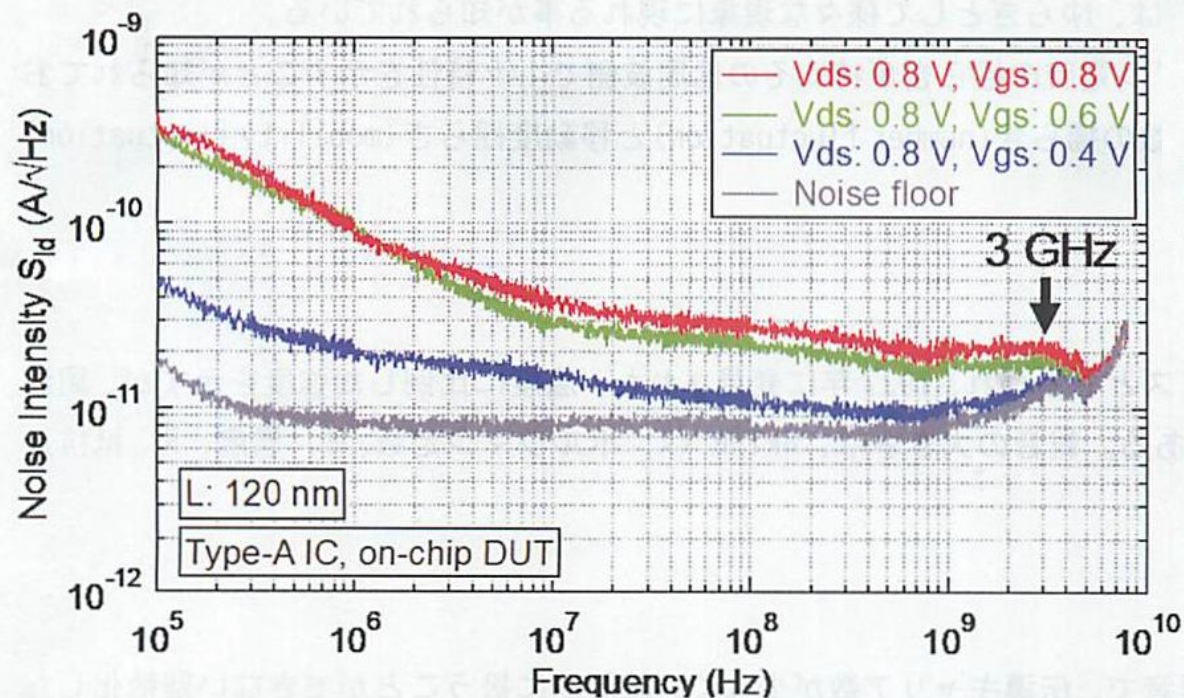


図7 ICにDUTを内蔵する事により、3GHzまでの広帯域でのMOSFET雑音評価を可能にした。

\* DUT: 被測定素子

参考図

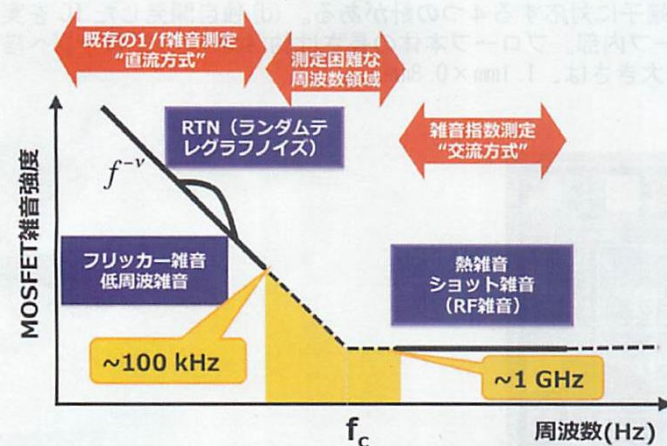


図1 MOSFET素子雑音の周波数依存性。

1MHz sampling で  
 $NEC = 2 \times 10^{-11} AHz^{-0.5}$

# Requirement for the photon detector in COBAND rocket experiment

- Sensitive area of  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$  for each pixel
- High detection efficiency for a far-infrared single-photon in  $\lambda = 40\mu\text{m} \sim 80\mu\text{m}$
- Dark count rate less than 300Hz (expected real photon rate)

$$\rightarrow \text{NEP} = \epsilon_{\gamma} \sqrt{2f_{\gamma}} \sim 1 \times 10^{-19} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$$

(Noise Equivalent Power) , where  $\epsilon_{\gamma}$  is a photon energy and  $f_{\gamma}$  is a photon rate.

We are trying to achieve  $\text{NEP} \sim 10^{-19} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$  by using

- Superconducting Tunneling Junction detector  
(leakage current per pixel  $< 100\text{pA}$ )
- Cryogenic amplifier readout

# 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索の研究体制

数理物質融合科学センター宇宙史国際研究拠点宇宙史コンソーシアムの一部

物質起源探求のCDF国際共同実験(1980年～)グループ+超伝導検出器開発グループ



筑波大がリードする世界最先端の宇宙背景ニュートリノ国際研究グループ

ソウル大  
S.B.Kim  
STJ検出器

近畿大  
加藤  
データ転送

福井大  
吉田  
遠赤外線源

岡山大  
石野  
STJ検出器

FNAL  
E. Ramberg  
エレクトロニクス

KEK  
新井、羽澄  
エレクトロニクス

産総研  
大久保  
SOI-STJ検出器

筑波大学  
金、武内  
STJ検出器、  
クライオスタット、  
エレクトロニクス、光学系

理研  
美馬  
STJ検出器

JAXA/ISAS  
和田、池田  
ロケット、エレクトロニクス

関西学院大  
松浦  
クライオスタット、光学系

2015年～ 関学大

2014年～ 産総研

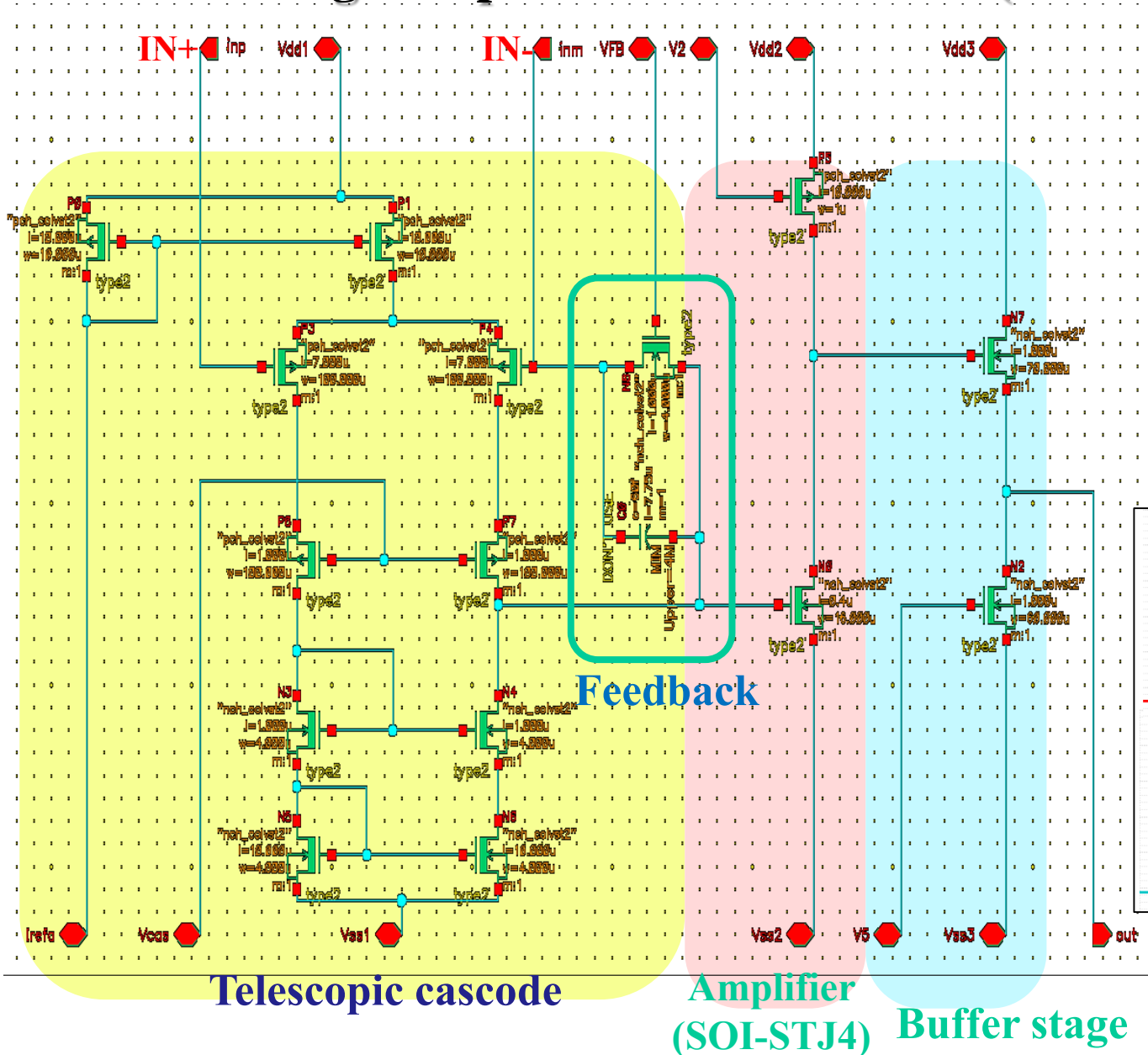
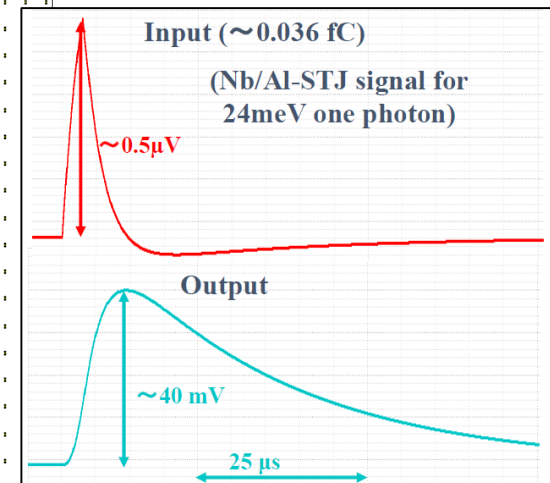
2011年～ FNAL、岡山大、福井大、近畿大

2007年～ 筑波大学、JAXA/ISAS、理研、KEK、ソウル大

# New Charge Amplifier Circuit for STJ (SOI-STJ6 design)

- Feedback capacitance  $2\text{pF} \rightarrow 60\text{fF}$
- Power Consumption  $\sim 150\mu\text{W}$
- 24meV one photon (0.03fC) gives  $\sim 40\text{mV}$  Output

## Simulation Result



This charge amplifier will arrive at our University soon.



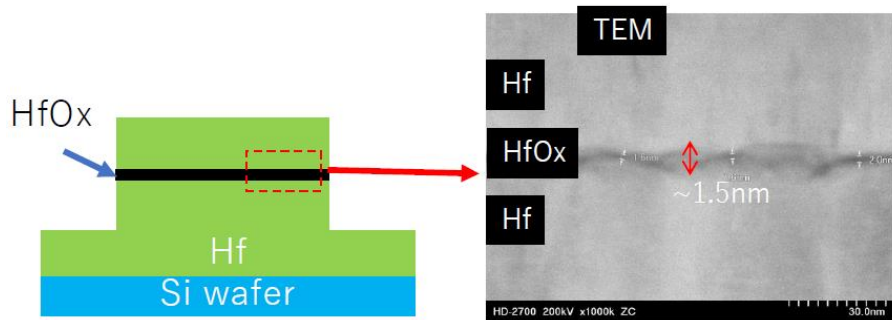
# R&D Status of Hf-STJ

Goal: Measure energy of a single far-infrared photon for neutrino decay search experiment within 2% energy resolution.

Micro-calorimeter: Hf-STJ can generate enough quasi-particles from cooper pair breakings to achieve 2% energy resolution for photons with  $E_g = 25\text{meV}$ .

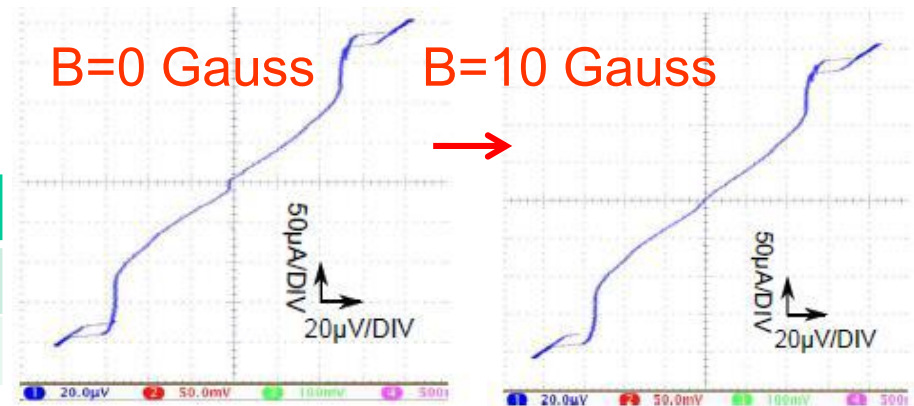
Earlier version of our Hf-STJ in 2011

- Structure: Hf/HfOx/Hf = 250nm/1.5nm/300nm
- Leakage current  $20\mu\text{A}@50\text{mK}$ ,  $20\mu\text{V}$  for  $100\mu\text{m}$ -square sample (our requirement :  $10\text{pA}$ )



I-V curve of Hf-STJ ( $100\times 100\mu\text{m}^2$ )

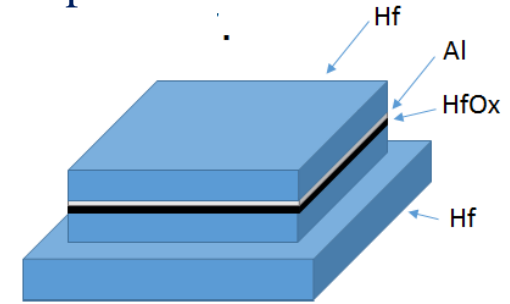
- $T\sim 40\text{mK}$ ,  $I_c=10\mu\text{A}$ ,  $R_d=0.6\Omega$



STJ size	# of samples	$R_d$
$200 \times 200\mu\text{m}^2$	3	$0.22\pm 0.01 \Omega$
$100 \times 100 \mu\text{m}^2$	3	$0.60\pm 0.10 \Omega$

# Laser Light Response of Hf-STJ

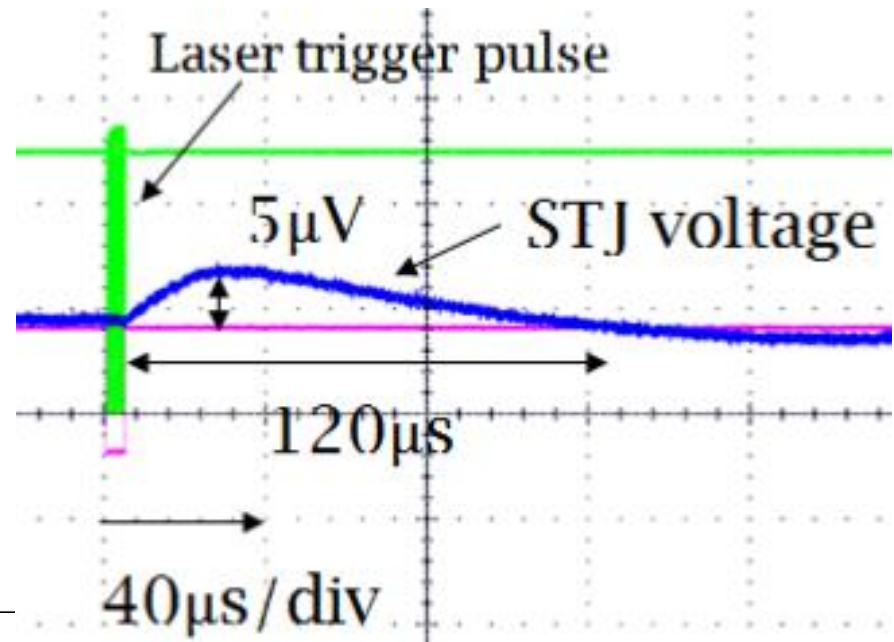
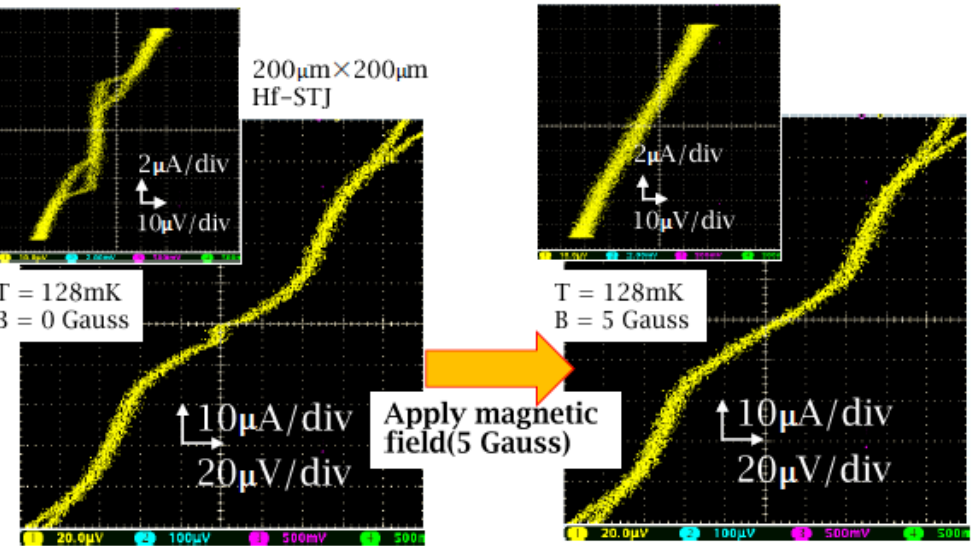
We made a thin aluminum layer (9nm) on the HfO layer (1-2 nm) to improve the insulation of the HfO<sub>x</sub> layer. Hf/Al/HfO<sub>x</sub>/Hf-STJ



$$\Delta = 20 \sim 30 \mu\text{eV}$$

Leakage current =  $5 \mu\text{A}$  @  $128\text{mK}$   
for  $200 \mu\text{m}$ -square sample.

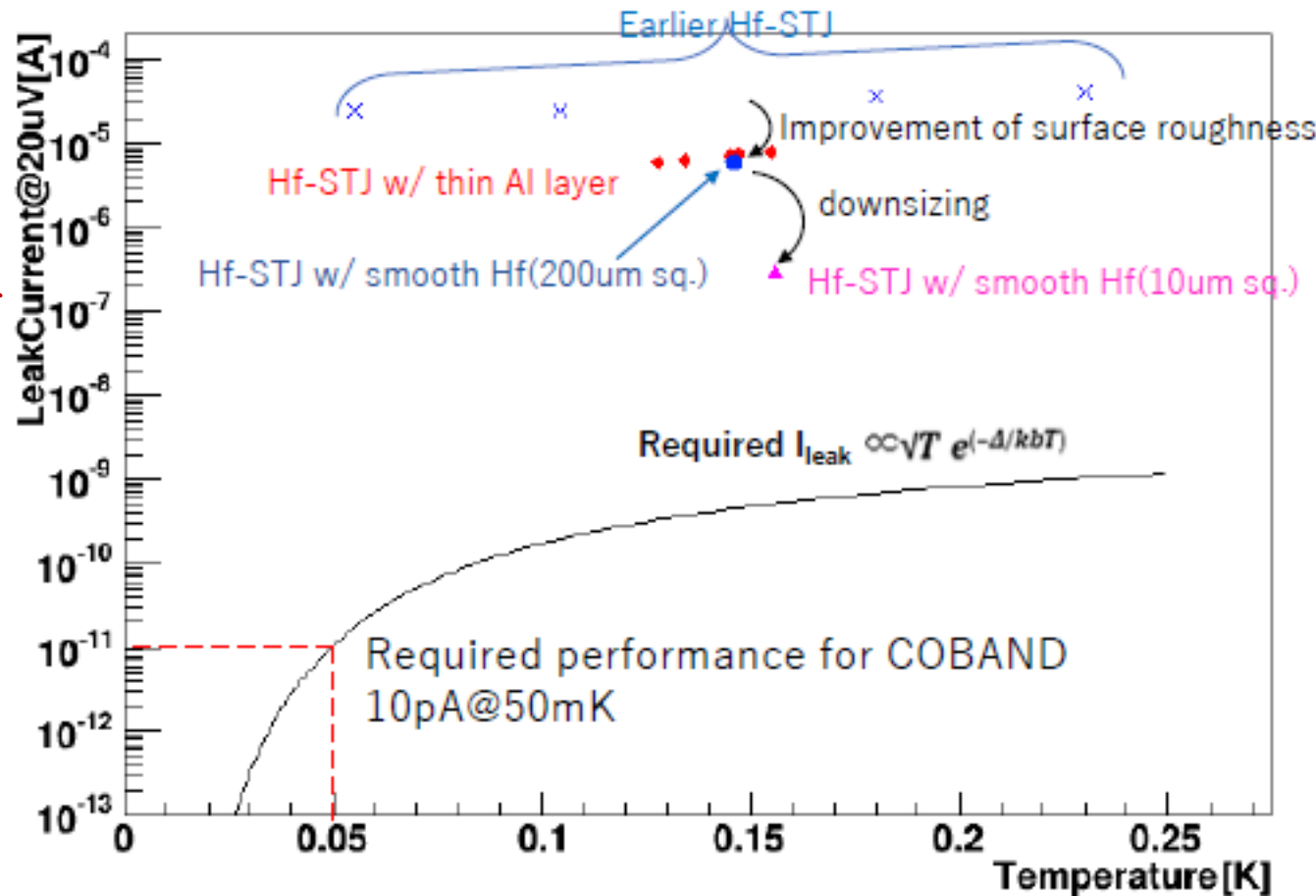
Visible light laser ( $\lambda=465\text{nm}$ ) 10Hz duration



Response speed ( $120 \mu\text{s}$ ) is slower than Nb/Al-STJ response speed ( around a few  $\mu\text{s}$ ).

# Improvement of Hf-STJ Leakage Current

- Hf/Al/HfO<sub>x</sub>/Hf-STJ reduced the leakage current to one-tenth.
- Hf-STJ with **smoothed Hf layer** reduced the leakage current to one-tenth.
- **Small size** Hf-STJ (10μ-square) reduced the leakage current to 1/24.



We are working on the study on downsizing of Hf-STJ.

We plan to decrease the operation temperature using another better dilution refrigerator.

# Improvement of Hf-STJ Leakage Current

- Hf-STJ was proved to work as a photon detector.
- To satisfy our leakage current requirement for COBAND experiment, we need decrease the leakage current of Hf-STJ.

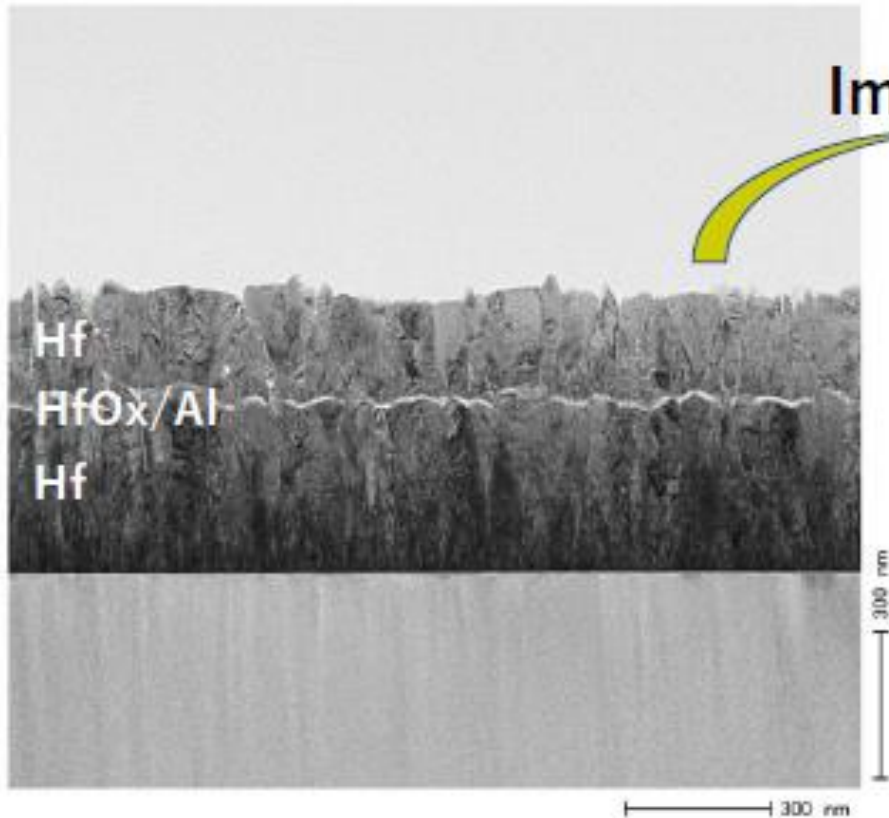
We are working on this improvement by the following methods:

- Optimize the Hf sputtering conditions to make Hf surface smoother. Because the imperfect insulator layer causes high leakage current.
- Downsize Hf-STJ. Because the leakage current is proportional to the junction size.

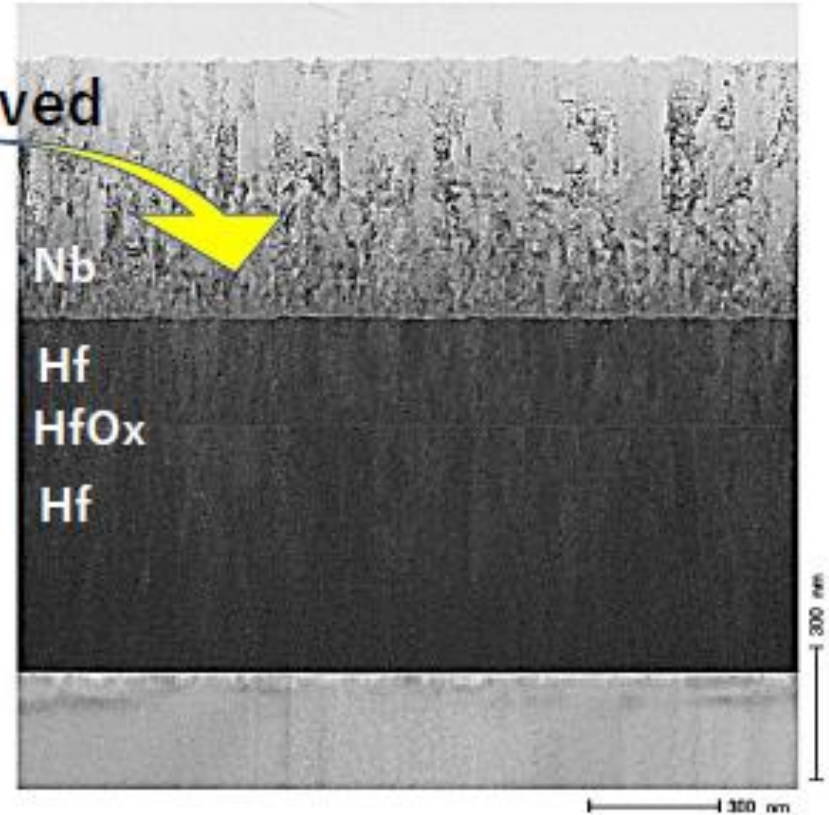
# Improvement of Hf Surface Smoothness

- We improved the Hf surface smoothness by optimizing the Hf sputtering parameters.

Old sputtering condition  
Ar 2.0Pa, 80W



New sputtering condition  
Ar 0.5Pa, 50W

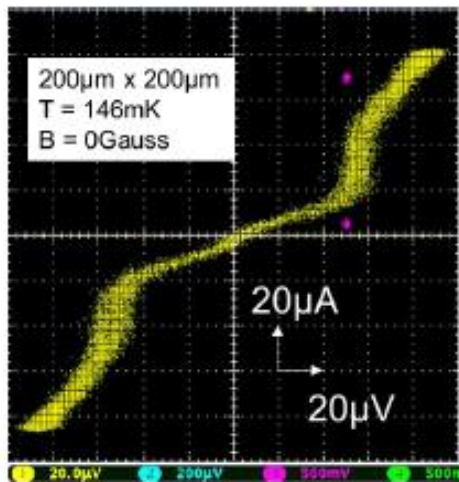




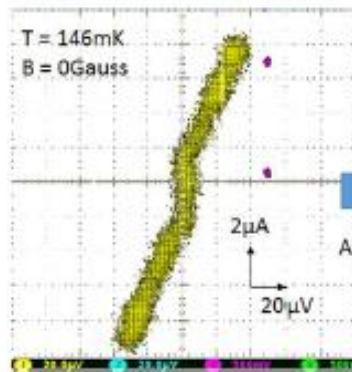
# Hf-STJ with Improved Smoothness

200 $\mu$ m square Hf-STJ with improved smoothness. Wire bonding readout line.

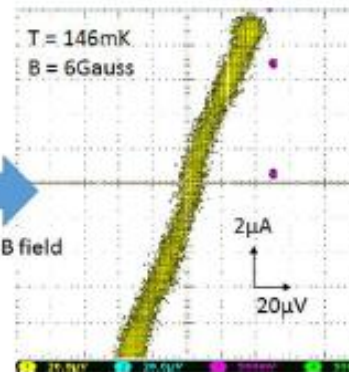
- Josephson current is 2 $\mu$ A.
- Effective energy gap  $\Delta = 25\mu$ eV.
- Leakage current at 20 $\mu$ V is 7 $\mu$ A.



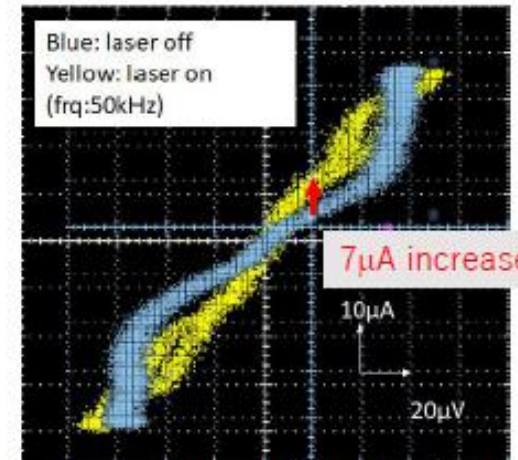
IV characteristic



IV characteristic  
(near 0V, B=0Gauss)



IV characteristic  
(near 0V, 6Gauss)

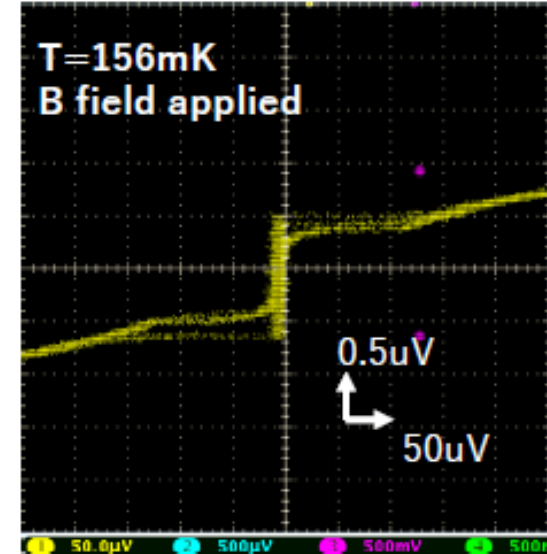
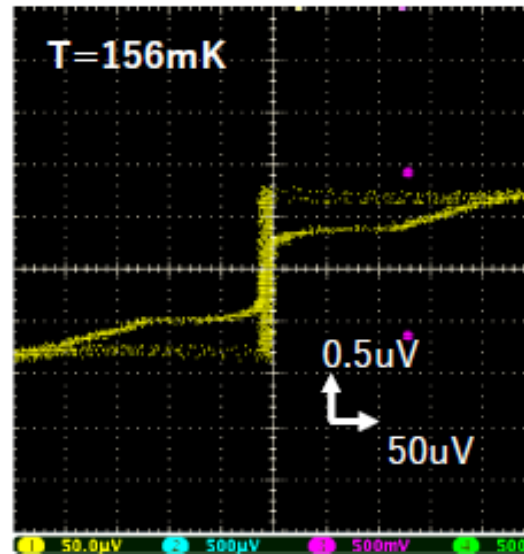
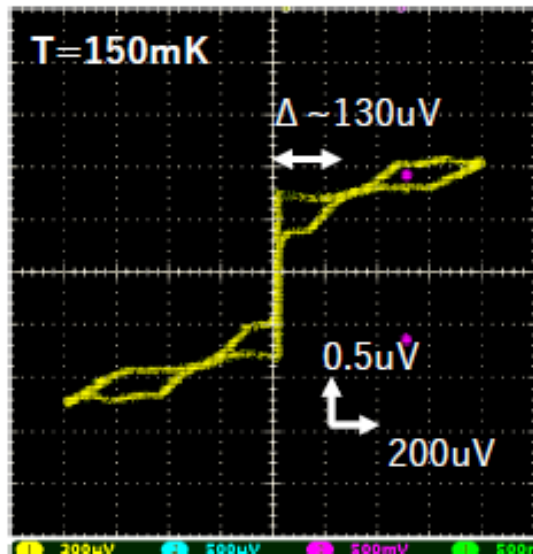


Response to visible( $\lambda=465$ nm) DC-like laser light  
T = 140mK, 9Gauss B field is applied.

# Small-size Hf-STJ with improved smoothness

10 $\mu$ -square Hf-STJ. Signal line was made by sputtered Nb line not by wire bonding.

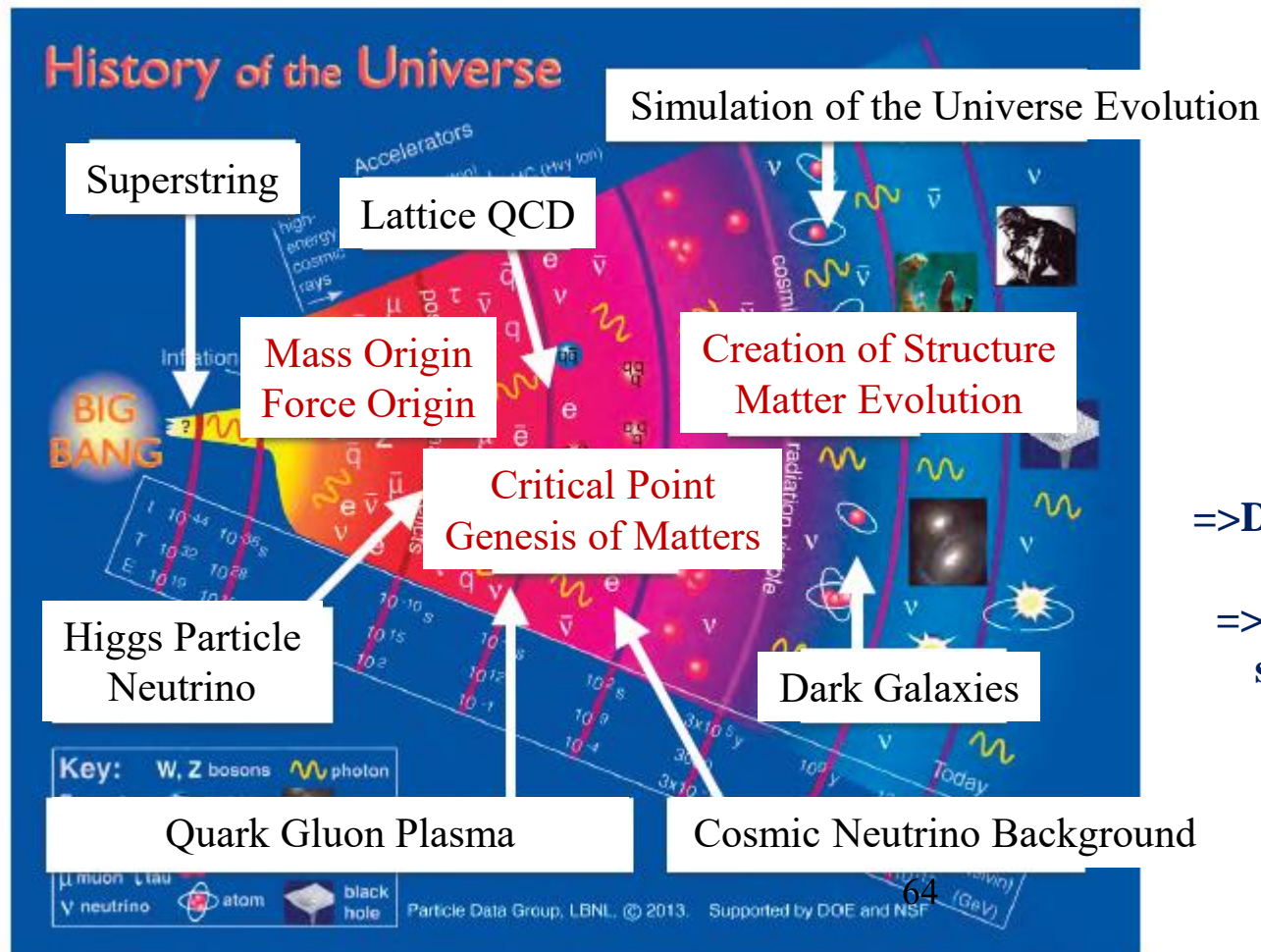
- Josephson current is 0.7 $\mu$ A.
- Effective energy gap  $\Delta = 130\mu$ eV.
- Leakage current at 20 $\mu$ V is 0.3 $\mu$ A (1/24 of 200 $\mu$ -square Hf-STJ).



# Research Core for the History of the Universe

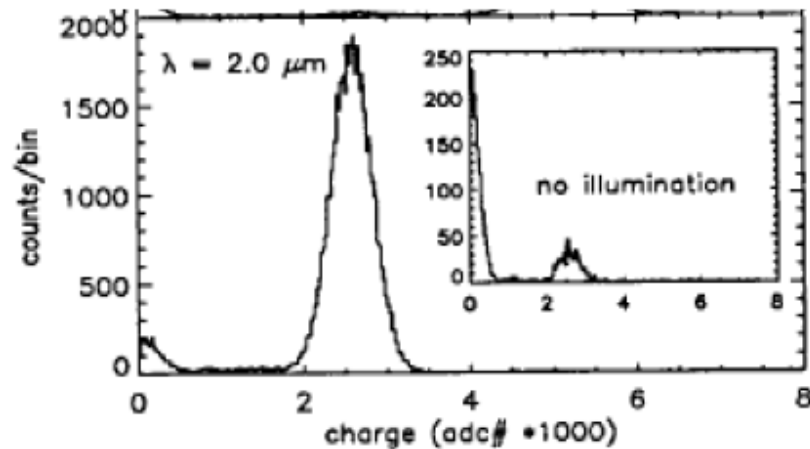
under Center for integrated Research in Fundamental Science and Engineering,  
University of Tsukuba (founded on Sep. 1, 2014)

**Mission:** coordinate the studies in elementary particles, quark nuclear matters and astrophysics to construct an integrated view of the History of the Universe.



**Illuminate the “Darkness”:**  
=>Dark matter, Dark energy , Dark galaxies  
=>Genesis of matters, creation of structure and their evolution

# STJ Energy Resolution for Near-Infrared Photon



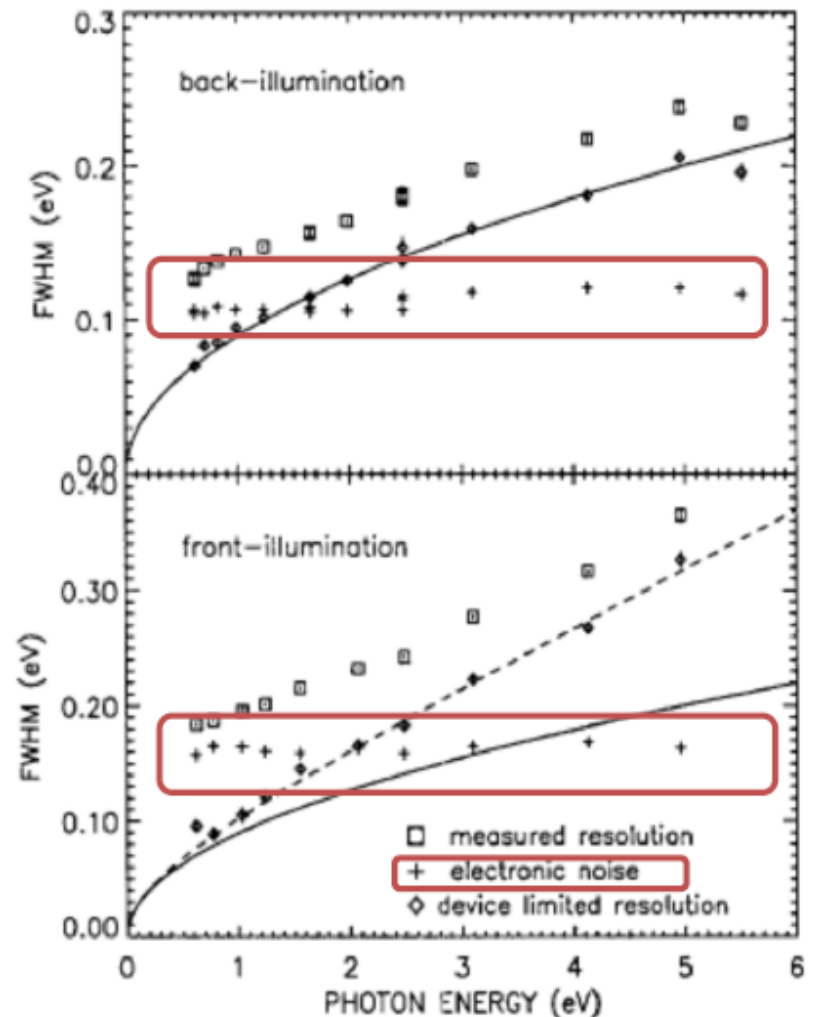
P. Verhoeve et. al 1997

■ 30 $\mu\text{m}$  sq. Ta/Al-STJ

■  $\Delta E \sim 130 \text{ meV}$  @  $E = 620 \text{ meV} (\lambda = 2 \mu\text{m})$

■ Charge sensitive amplifier at room temp.

□ Electronic noise  $\sim 100 \text{ meV}$



In sub-eV  $\sim$  several-eV region, STJ gives the best energy resolution among superconductor based detectors, but limited by readout electronic noise.



# COBAND実験のデータ収集(400channel FADC)

イベントレート：  $\text{Rate}/50\text{pixel-spectrometer} = 15 \text{ kHz} \text{ ( } 300\text{Hz/pixel)}$

8列の50pixel-spectrometer  $\rightarrow 120\text{kHz}$

データサイズ： 7ビット FADC ( サンプルング  $1 \mu\text{s}$  毎、最大  $127 \text{ counts}$  )

10ビット時間 (  $10 \mu\text{s}$  単位で最大  $10 \text{ ms}$  )

データ収集時間：  $340\text{sec}$

< データをコンパクト化しない場合 >

- 毎秒 7ビットFADC  $\times 10^6 \text{ Hz} \times 400\text{channels} = 2.8 \text{ Gbits/sec}$

- 全体340秒間  $2.8 \times 340 = 952 \text{ Gbits}$

- すべての生データ(コンパクト化していないデータ)を収納したディスク・USB Memoryを実験後に回収

< データをコンパクト化した場合 >

- 時間データとして, 15ビット時間 (  $10\text{ms}$  単位で最大  $650\text{sec}$  ) と10ビット時間 (  $1\mu\text{s}$  単位で最大  $10\text{msec}$  ) を用いる。

- Light校正 + ペDESTAL + 実データ  $\rightarrow 3.41 \text{ Mbps}$  である。

- すなわち, コンパクト化したデータについて,  $3.5\text{Mbps}$  でデータ転送を行う必要がある。

以上を示したコンパクト化されたデータは, データ収集と並行して, 無線データ転送装置 ( 通信速度  $6\text{Mbps}$  ) を用いて地上局に転送する。コンパクト化しない生データは無線データ転送が難しいので, コンパクトディスクおよびUSBメモリーに収納して, ロケット落下後に回収することを希望する。