

# COBAND実験

最近の進展：IBS/CUPでの Hf-STJ測定，他



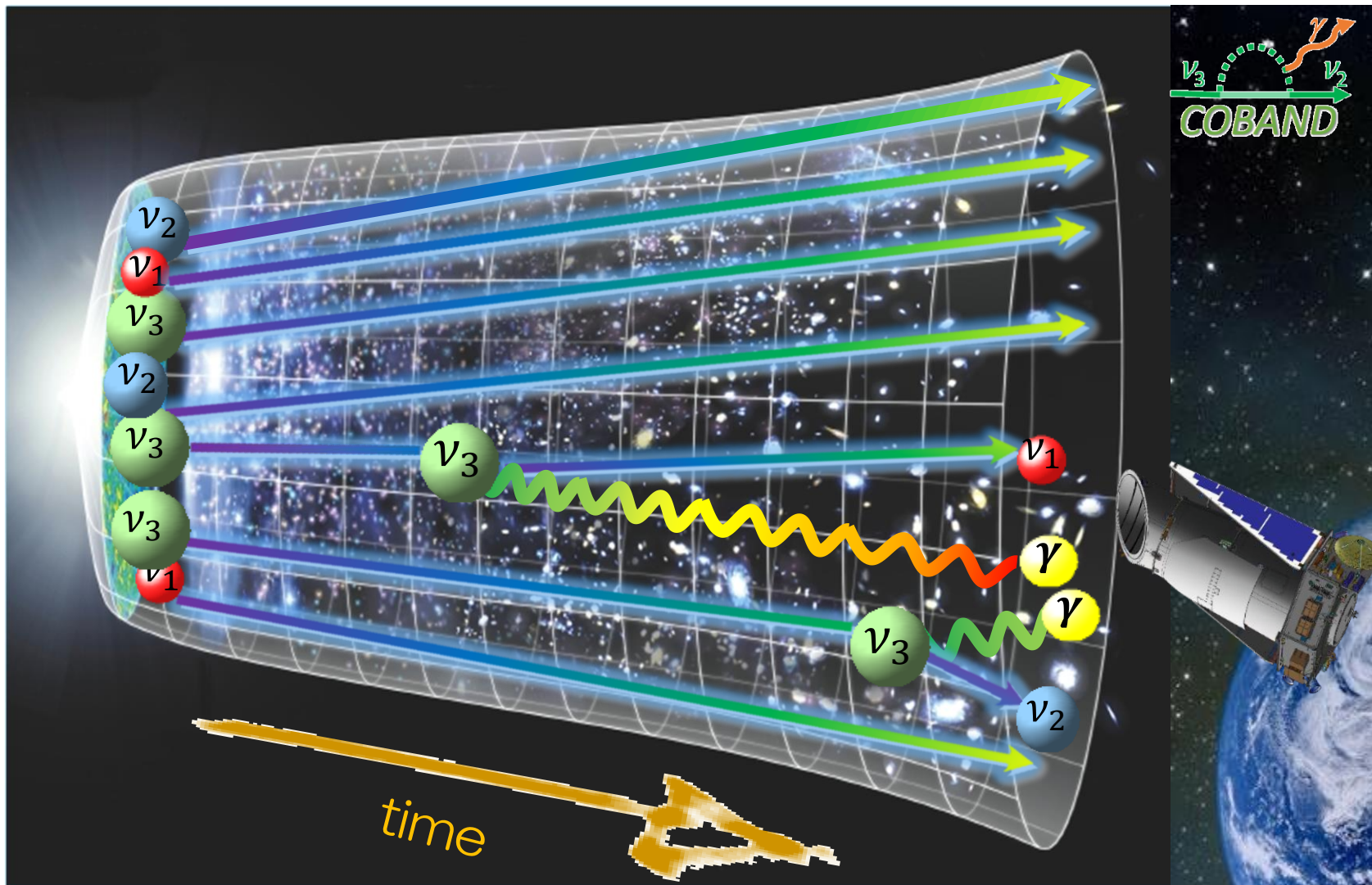
2019年11月4日

2019年度第2回宇宙史研究センター構成員会議

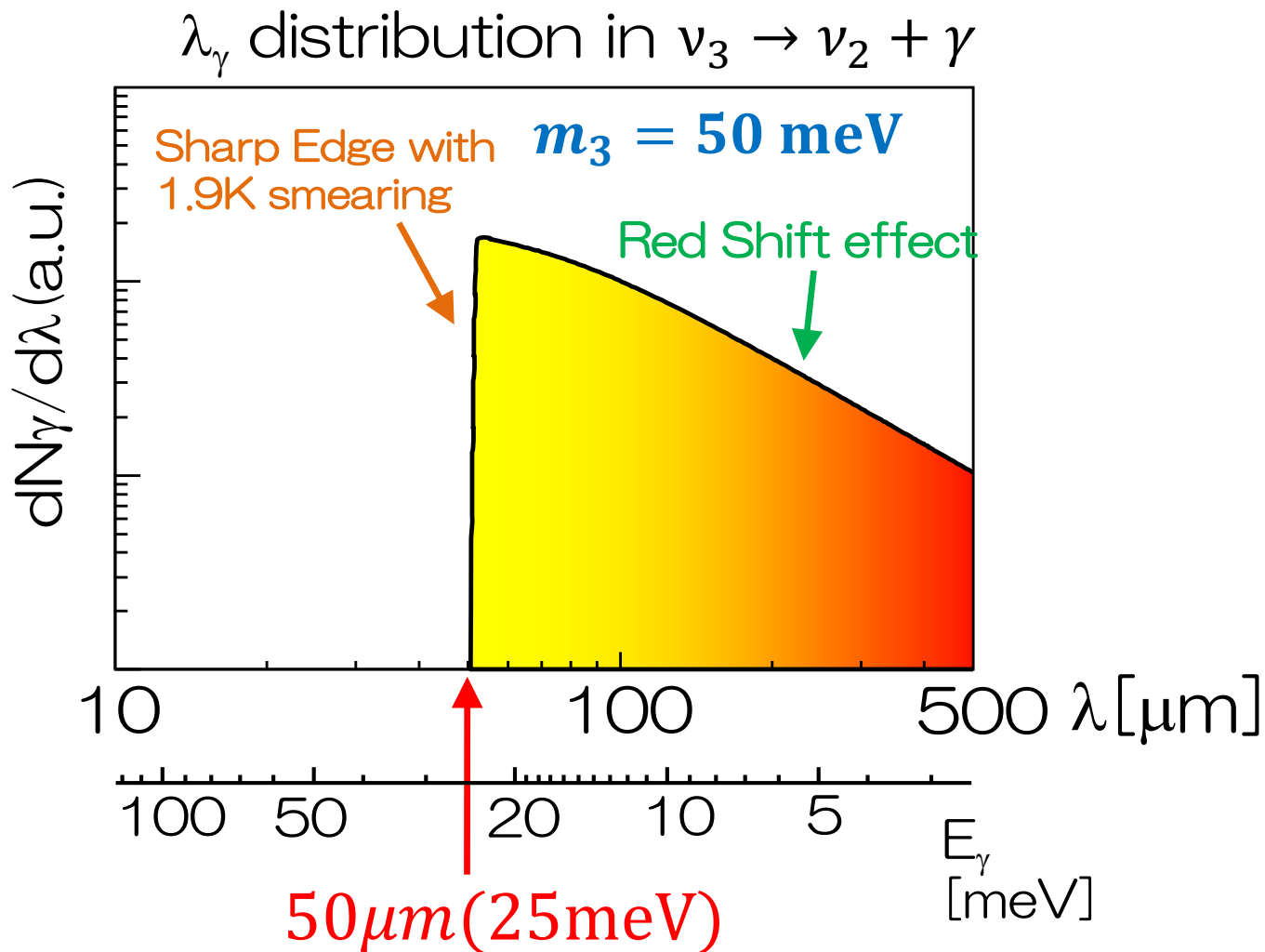
武内 勇司

# COBAND (Cosmic Background Neutrino Decay)

宇宙背景ニュートリノの中で起こるニュートリノ崩壊からの遠赤外光 ( $\lambda \sim 50 \mu\text{m}$ ) を探す

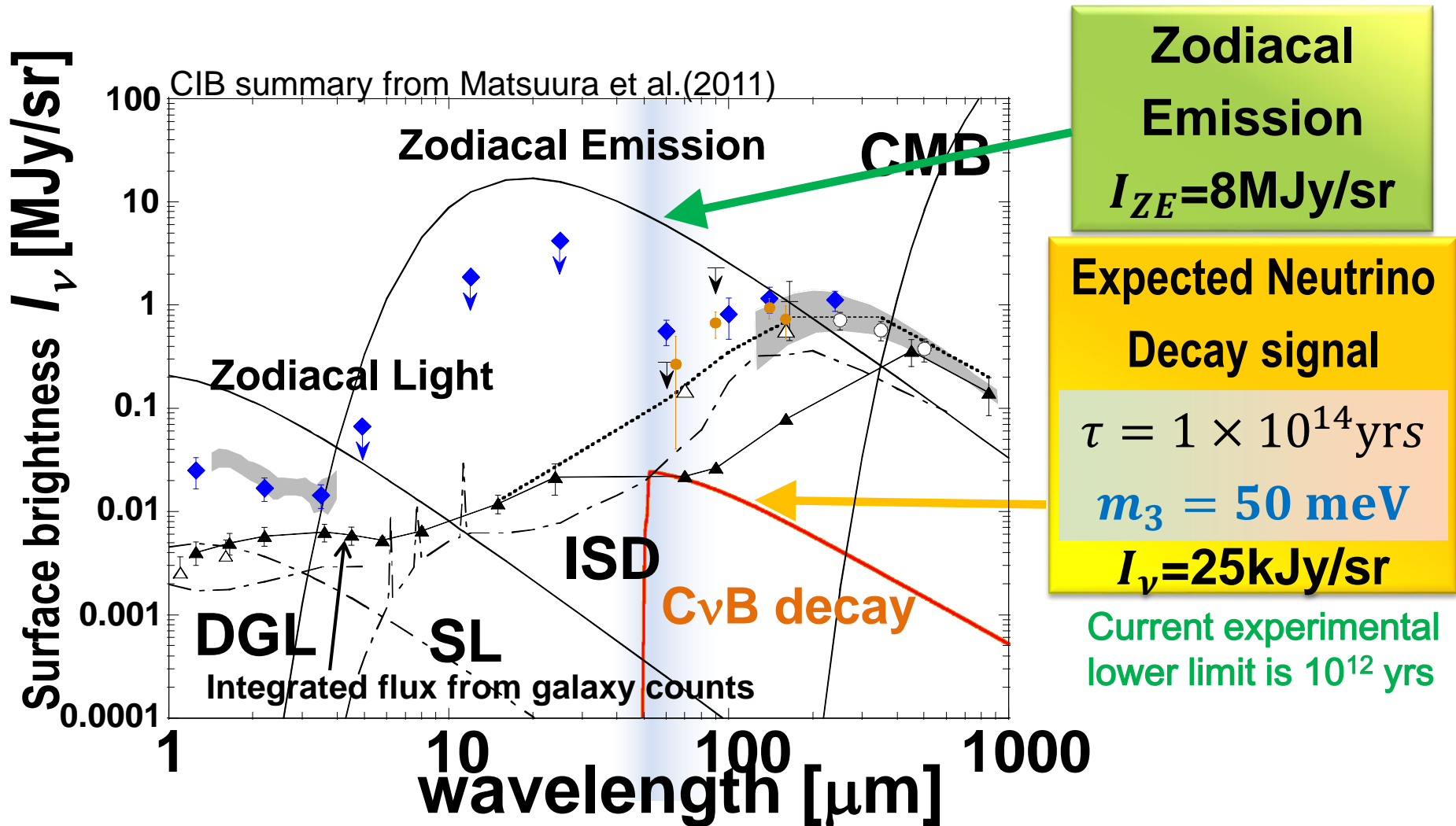


# 期待される宇宙背景ニュートリノの崩壊光の波長分布



鋭いエッジを持った分布は、ある質量を持った粒子の二体崩壊によるもの  
➔ ニュートリノ崩壊の決定的証拠

# Neutrino Decay signal and backgrounds



We can identify  $\nu$  decay signal by highly precise measurement of photon energy spectrum around  $\lambda \sim 50 \mu\text{m}$

# COBAND 実験提案

ニュートリノ寿命測定感度目標

$$\tau(\nu_3) = O(10^{14}) \text{ yrs}$$

## ■ JAXA 観測ロケット S-520

■ [http://www.jaxa.jp/projects/rockets/s\\_rockets/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/rockets/s_rockets/index_j.html)

■ 直径: 520mm

■ ペイロード: 100kg

■ 到達高度: 300km

## ■ 高度200~300km で200秒の測定

■ 主鏡直径20cm, 焦点距離80cm の望遠鏡

■ 光学系(主鏡, 副鏡, フィルター, シャッター, 回折格子等)は全て1.8K程度に冷却

## □ 将来計画: 衛星実験

■ 検出器の視野角を増やし, 60日程度の測定

■  $10^{17}$ 年の測定感度を目指す



# COBAND 実験の要求する光検出器

- ニュートリノ崩壊を同定するため  $\lambda \sim 50\mu\text{m}$  域スペクトル測定により崩壊光子エネルギー端検出が重要
- 光強度測定の系統誤差  $\ll$  光子数の統計誤差.



$\lambda \sim 50\mu\text{m}$  ( $E=25\text{meV}$ ) 単一光子検出が可能な性能

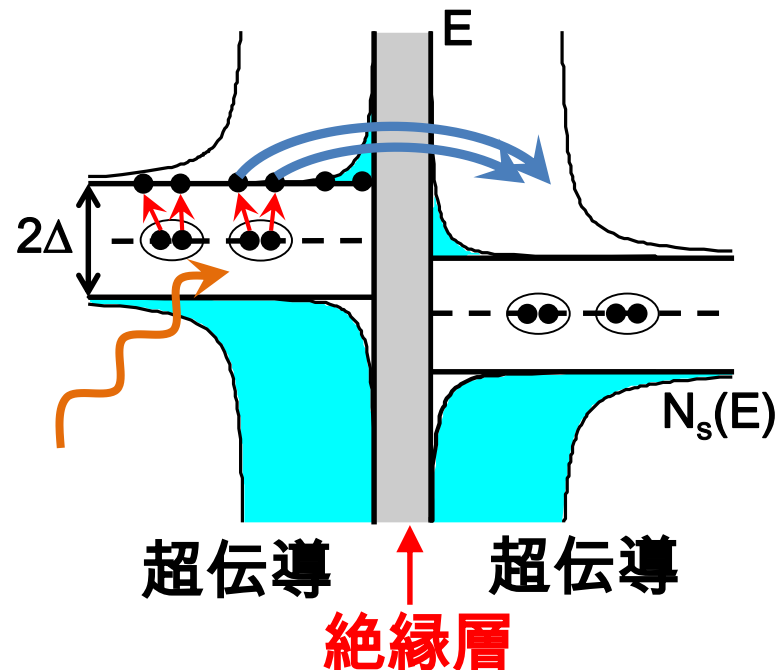
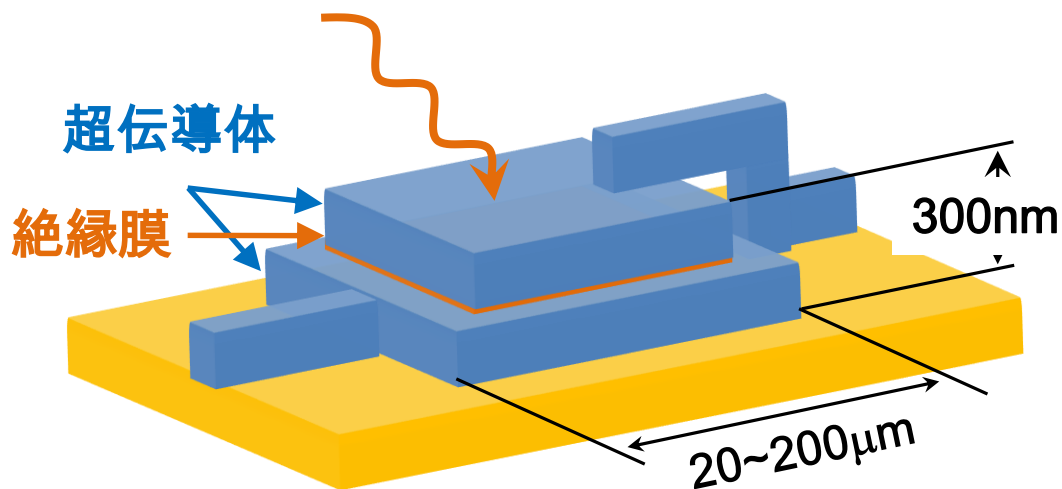
- Dark count rate が到達可能な光強度測定の感度を決める



- Superconducting Tunnel Junction (STJ) sensor
- Cryogenic amplifier readout

# 超伝導トンネル接合素子 Superconducting Tunnel Junction (STJ)

超伝導体/絶縁層/超伝導体の構造 ( ジョセフソン接合 )



接合面を挟んで電位差 ( $|V| < 2\Delta/e$ ) を印加

超伝導体に吸収された光子のエネルギーにより複数のクーパ対が解離(励起)し、生成された準粒子によって、エネルギーに比例したトンネル電流が発生。

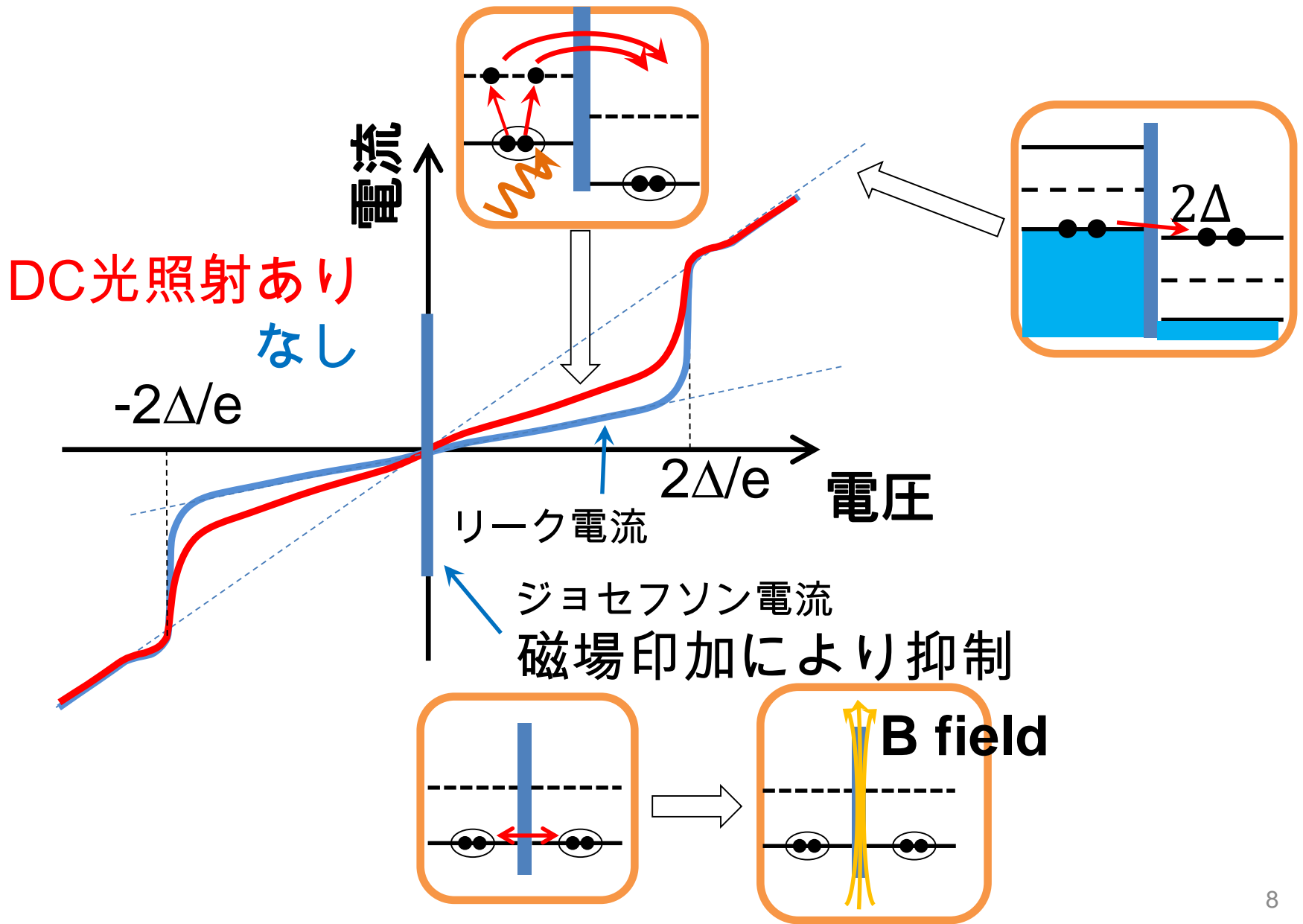
$\Delta$ : 超伝導ギャップエネルギー

超伝導ギャップ( $\Delta$ )は遠赤外光子のエネルギーよりもずっと小さい( $\Delta < 1\text{meV}$ )

→ 原理的には、遠赤外域一光子を検出可能



# STJ I-V 特性





# STJの候補

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

## Nb/Al-STJ

- 最もよく使われていて，製法も確立
  - Al層を入れることにより，近接効果で  $\Delta \sim 0.6\text{meV}$
  - 実用運転の温度  $< 400\text{mK}$
  - バックトンネルゲイン  $\sim 10$
  - $N_{\text{q.p.}} = 25\text{meV}/1.7\Delta \times 10 \sim 250$      $\sigma_E/E \sim 10\%$  for  $E = 25\text{meV}$
- 25meV の一光子検出も原理的には可能．分光光学系と組み合わせ  
→ ロケット実験に使う光検出器候補

## Hf-STJ

- 我々を含め世界中のいくつかのグループが開発中または開発を試みたが，まだ実用段階のものがあったという報告はない
  - $N_{\text{q.p.}} = 25\text{meV}/1.7\Delta \sim 735$
  - 25meV の一光子に対して2% のエネルギー分解能
- 分光光学系なしでエネルギー分布測定可能  
→ 将来の衛星実験に使う光検出器候補

# ニュートリノ崩壊探索実験

COBAND (COsmic BAckground Neutrino Decay)

Collaboration Members (2019年11月)

金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, (武政健一), 浅野千紗, 若狭玲那, 笠島誠嘉, 中原瑳依子, 前川群, 山根 綾太, 大塚洋一 (筑波大学)

松浦周二 (関西学院大学),

池田博一, 和田武彦, 長勢晃一 (JAXA/ISAS),

吉田拓生, 鈴木健吾, 竹下勉, 浅胡武志(福井大学),

石野宏和, 樹林敦子 (岡山大学),

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),

羽澄昌史, 新井康夫, 倉知郁生 (高エネルギー加速器研究機構),

浮辺雅宏, 志岐成友, 藤井剛, 大久保雅隆 (産業技術総合研究所),

川人祥二 (静岡大学)

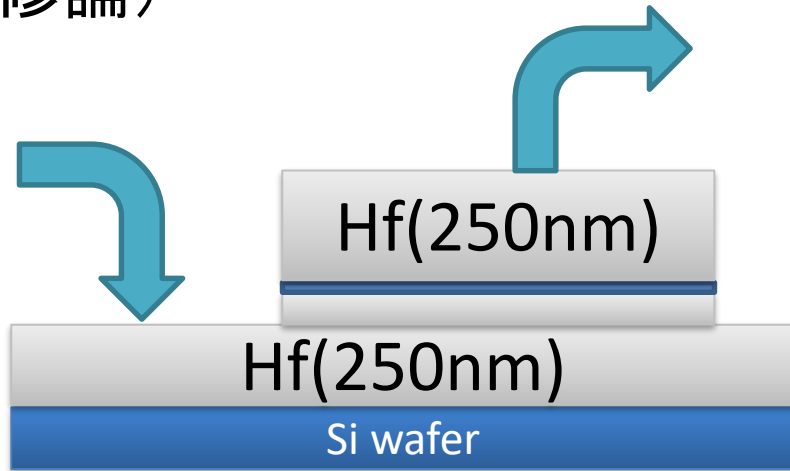
Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov (Fermilab),

Soo-Bong Kim (Seoul National University),

Yong-Hamb Kim, Hyejin Lee (IBS/Center for Underground Physics) ←New!

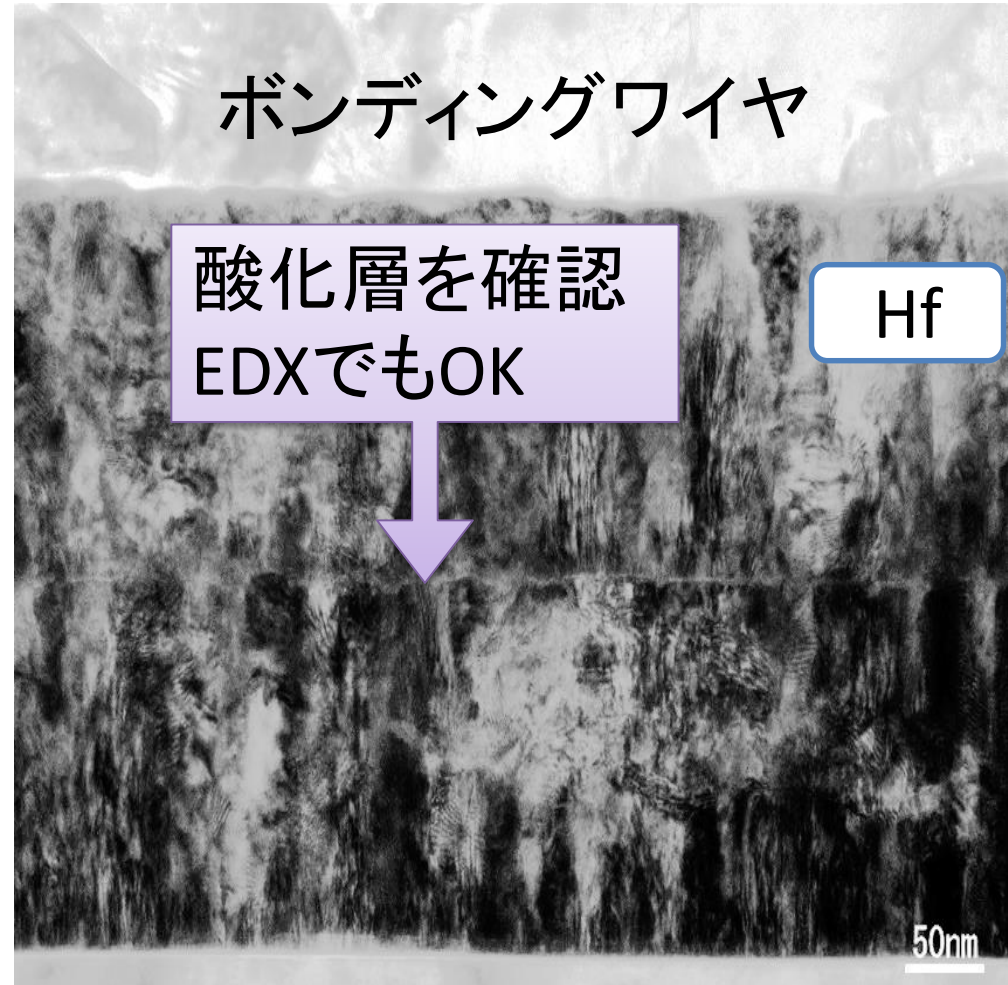
# Hf-STJの作製(2008年)

理研(和光)のICP-RIEでのエッチングでHfの加工に成功(武政修論)



## 作製手順

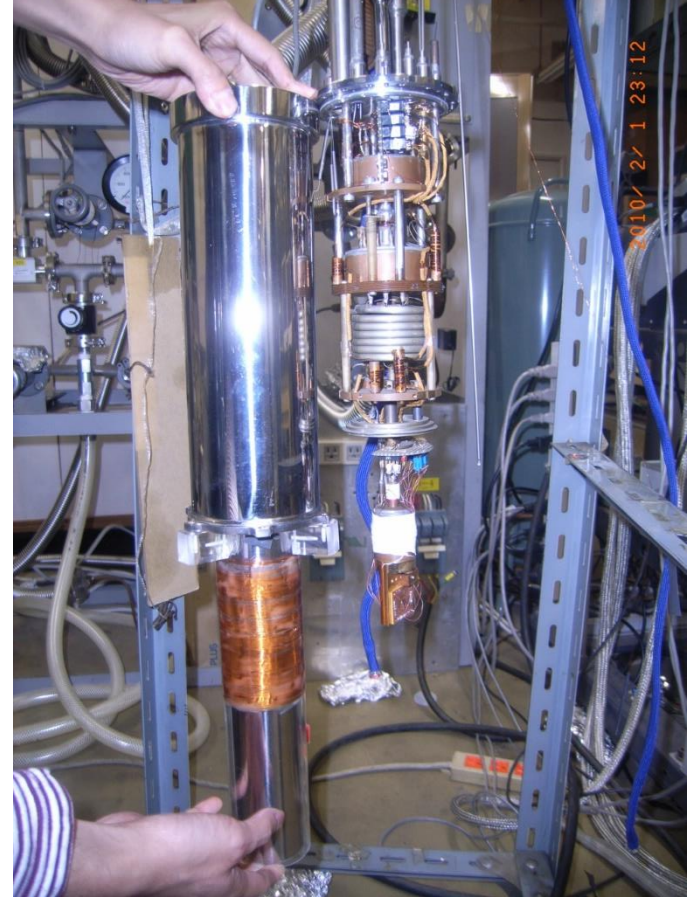
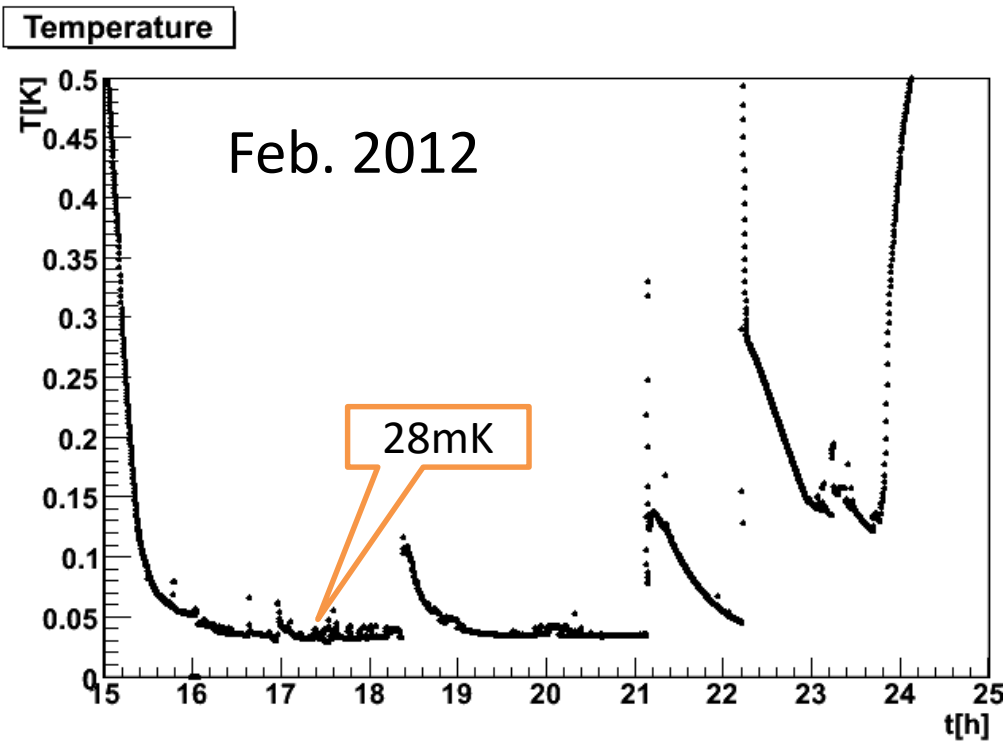
1. Hf(下層)のスパッタリング
2. 酸素雰囲気中で酸化
3. Hf(上層)をスパッタリング
4. レジストでパターンニング
5. ICP-RIEでエッチング
6. ワイヤーボンディング



# 希釈冷凍機立ち上げ(2008年)

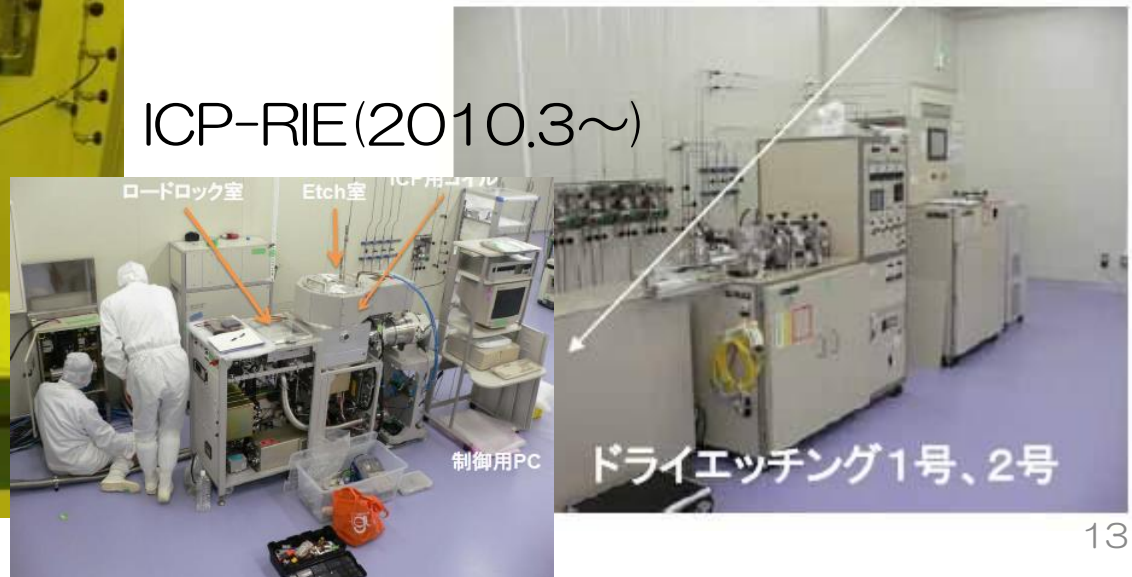
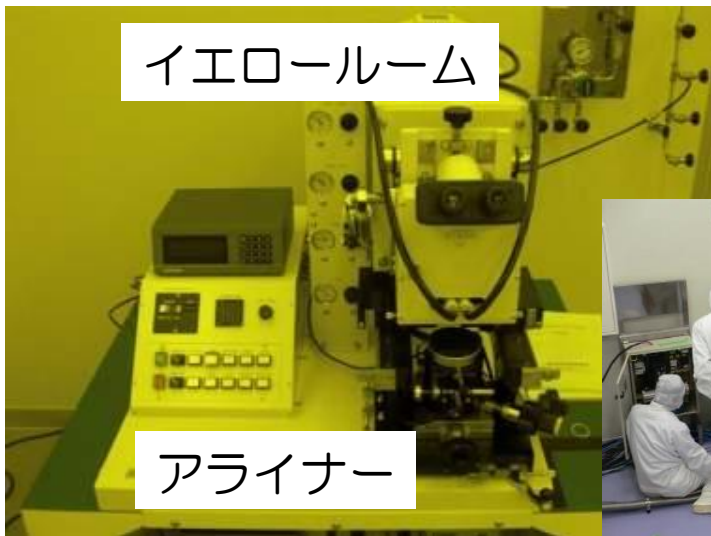
筑波大低温物性グループ(大塚研)より希釈冷凍機を借用

- 2009年7月に49mKを達成/ 2012年2月28mK





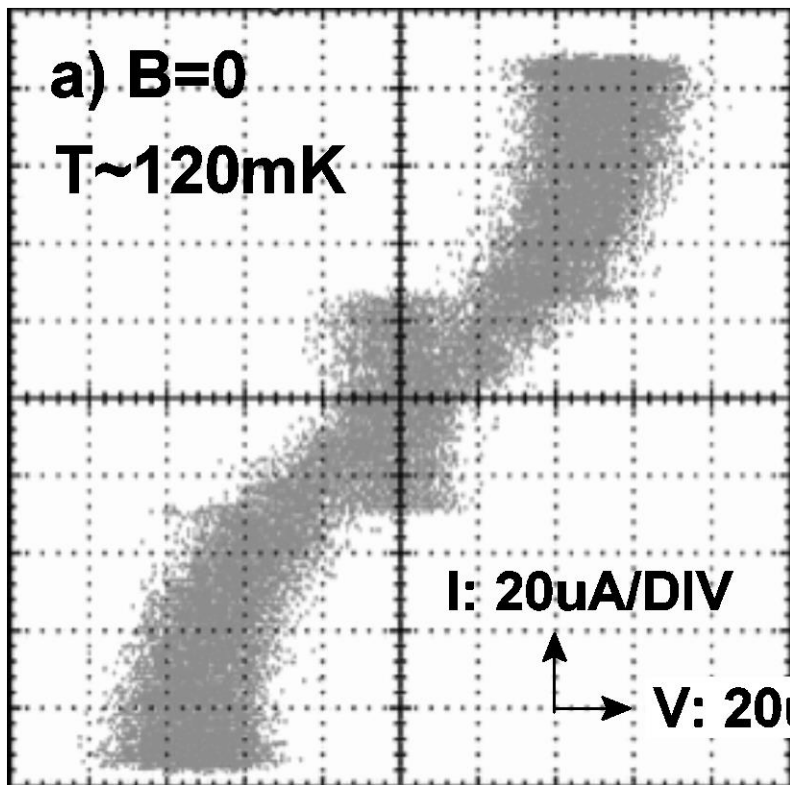
# KEKの超伝導検出器開発システム(2009～)



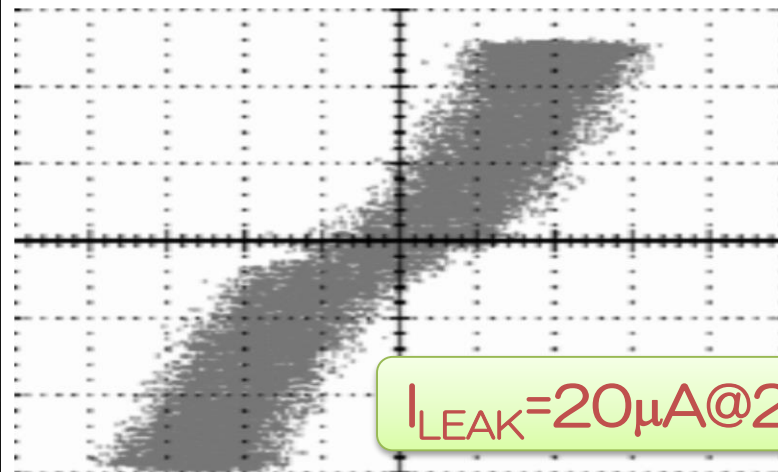
# Hf-STJ で SISジャンクション形成を確認 (2010年木内修論)

@120-130mK  
200 $\mu$ m  $\times$  200 $\mu$ m

$$I_c = 24\mu\text{A}$$
$$R_d = 1\Omega$$
$$2\Delta/e = 40\mu\text{V}$$



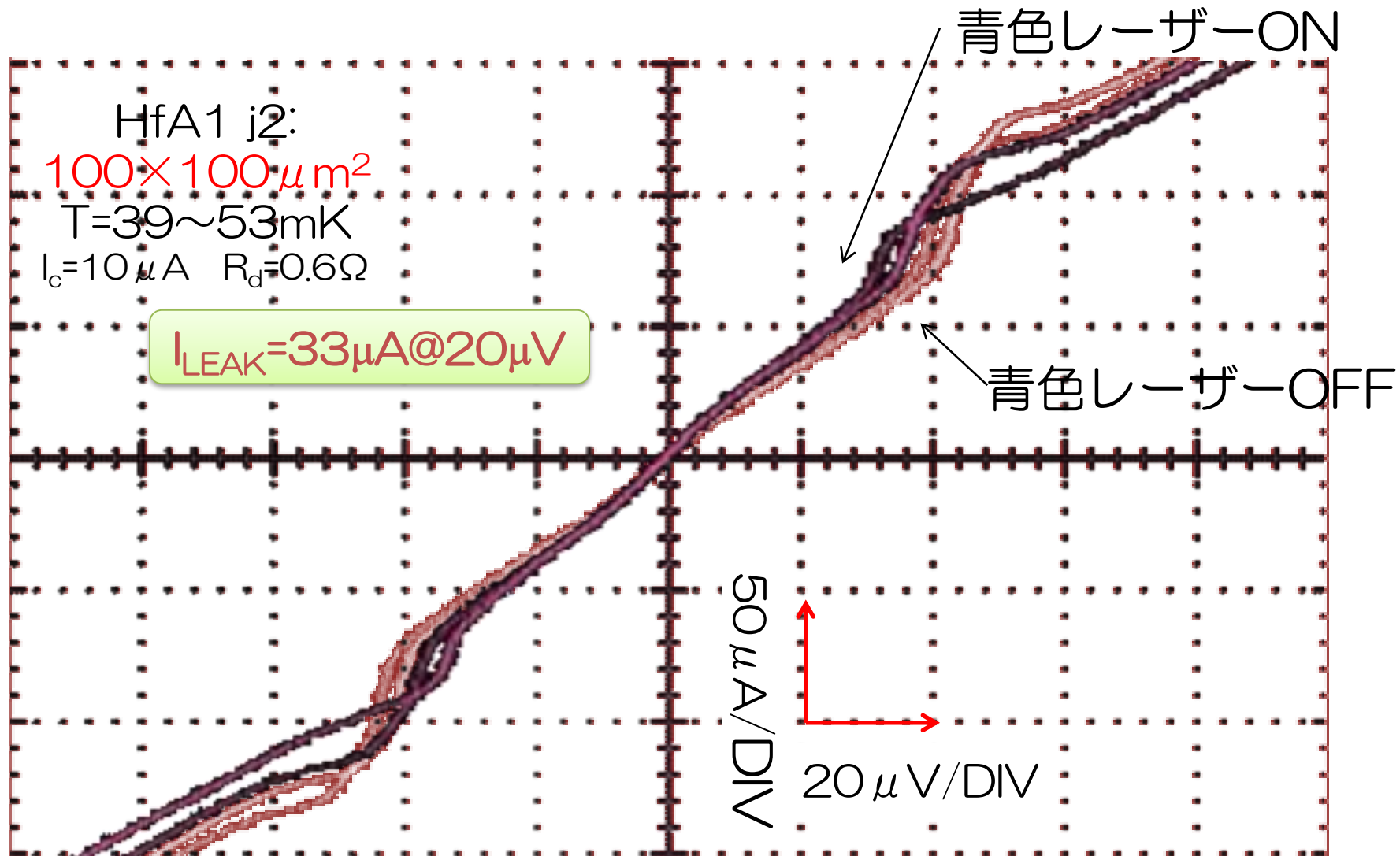
**b) B~2Gauss**



## 世界初！

Hf-HfO<sub>x</sub>-Hf 構造でジョセフソン電流を確認

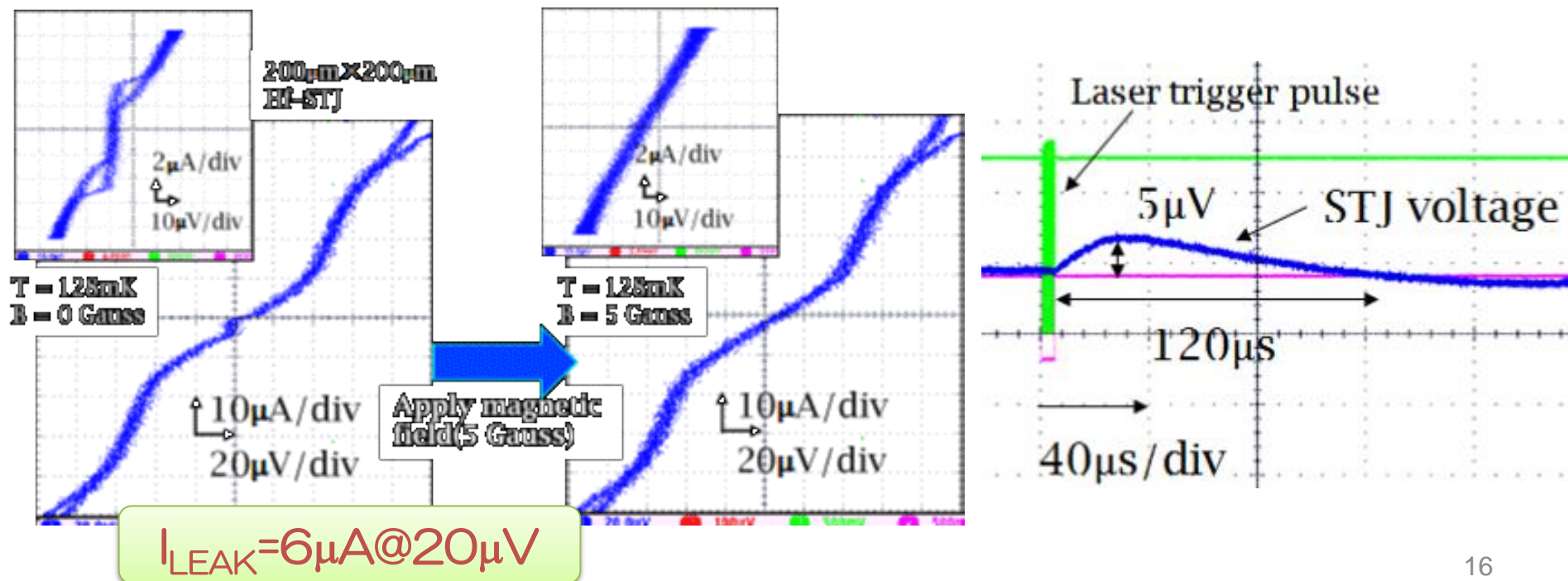
# Hf-STJ の可視DC光に対する応答を確認 (2013.4永田)



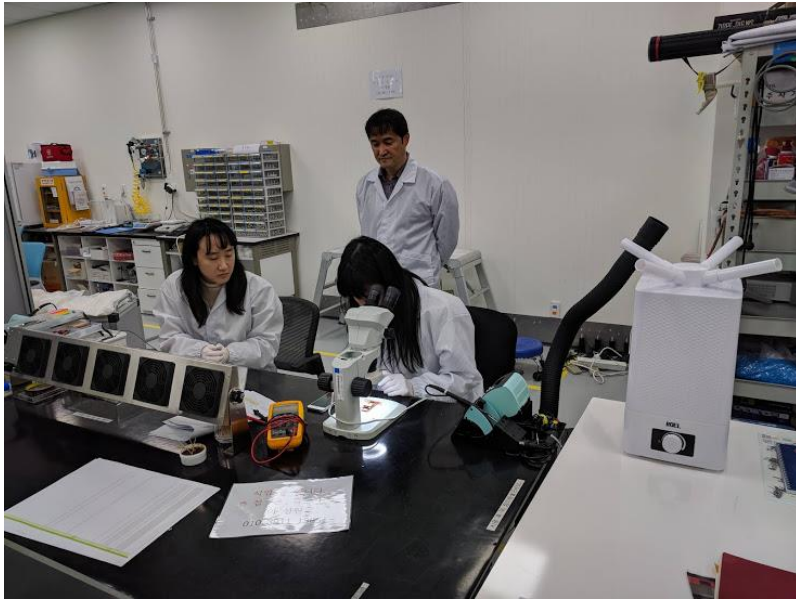


# HfO<sub>x</sub>絶縁膜に薄いAl層を加えたHf-STJ (2016武政)

- ハフニウム酸化層の上に薄いアルミニウム層を用い、従来のHf-STJよりリーク電流密度を低減に成功
  - しかし、リーク電流要求値 数pA に対して、200 $\mu$ m角で 6 $\mu$ A
- このサンプルで可視光パルス(465nm)応答を確認
  - 入射エネルギーは不明.
  - 光は一点でなく全面に当たる.



# IBS CUPでの冷凍機実験(2019.3~2019.6)

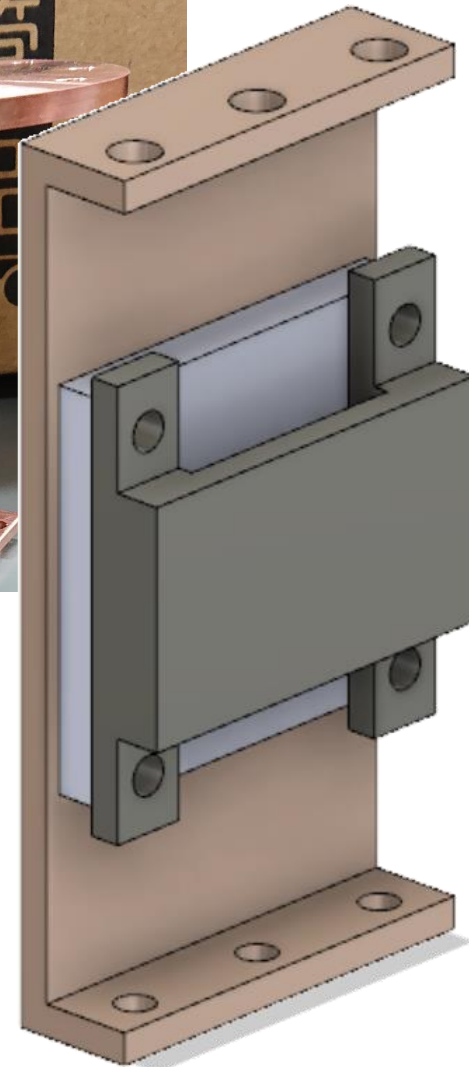
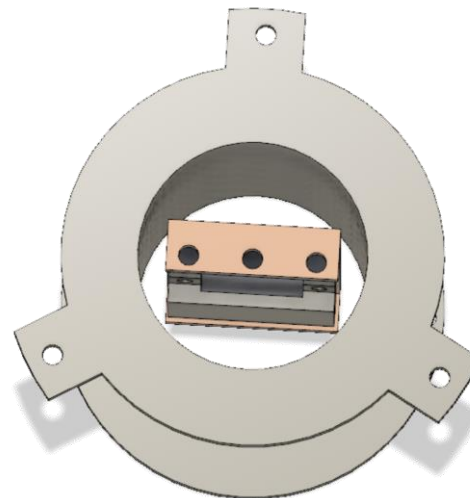
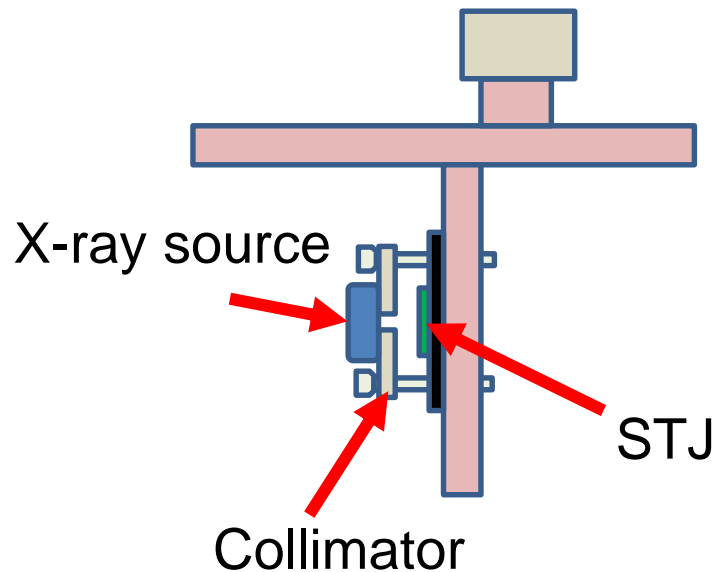
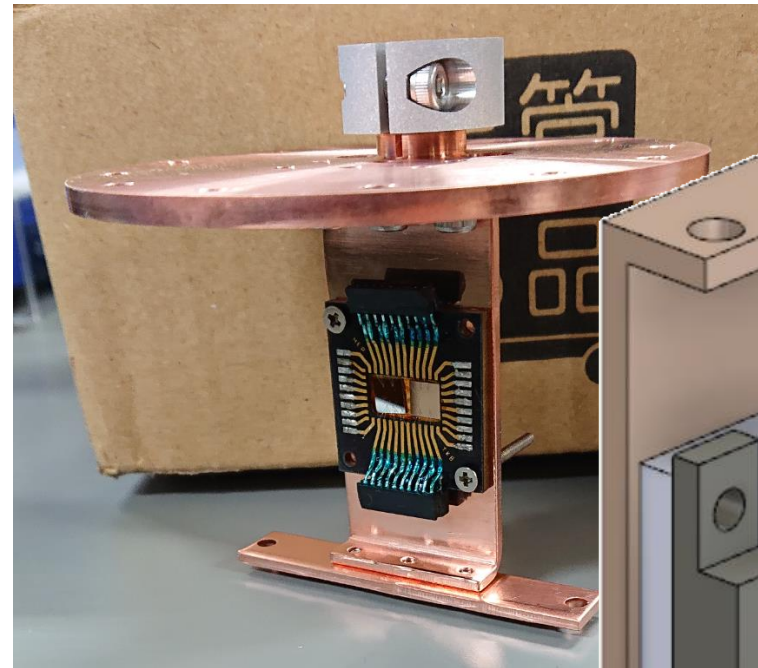


- ADR無冷媒断熱消磁冷凍機
- Hf-STJのI-V測定, X線 ( $^{55}\text{Fe}$ ) 応答試験 (40mKくらいまで可能)

# IBS CUPでの冷凍機実験(2019.3~2019.6)

ADRの最低温ステージに

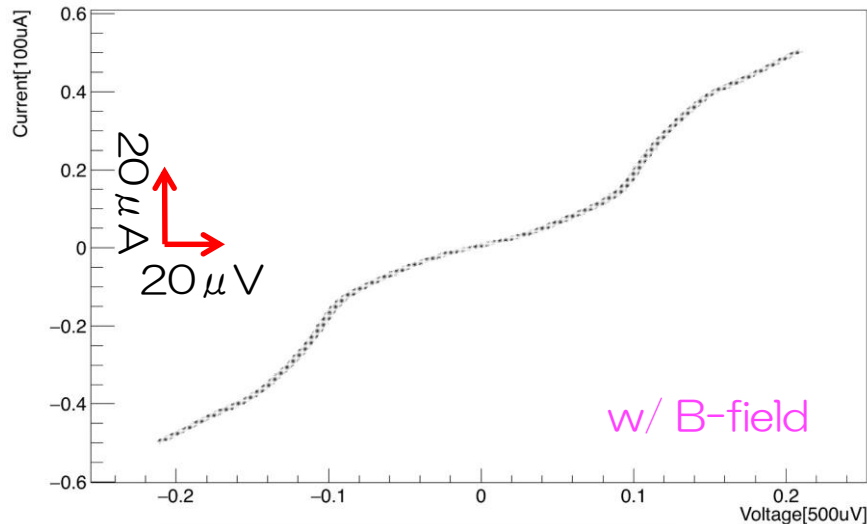
- STJサンプル
  - コリメータ
  - フィルム封印のX線( $^{55}\text{Fe}$ )
  - 磁場印加用ソレノイド
- を設置



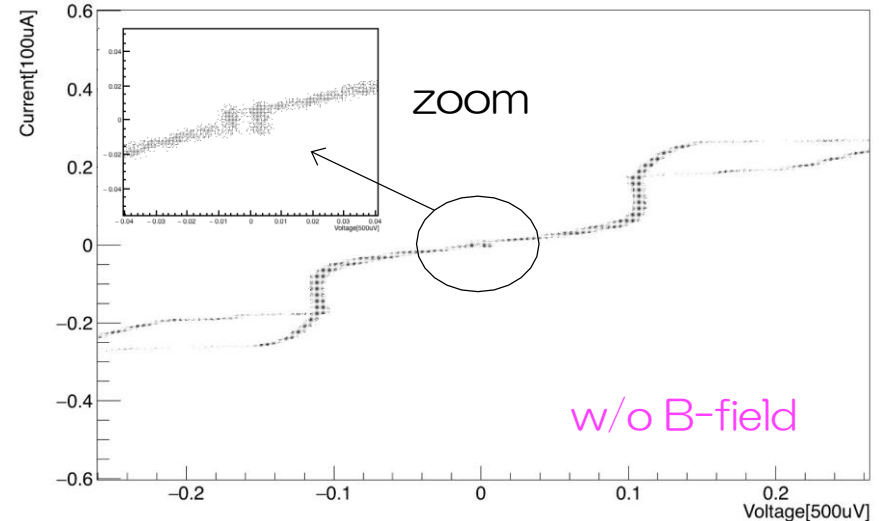
# IBS CUP での Hf-STJ 測定(1)

200 $\mu\text{m}$  角の Hf-STJ @32mK

- 表面粗さを指標に Hf のスパッタ条件を探索し, Hf/Al-STJ と同程度のリーク電流を達成したサンプルを使用
- 32mKにてリーク電流約2 $\mu\text{A}$ (@20 $\mu\text{V}$ )

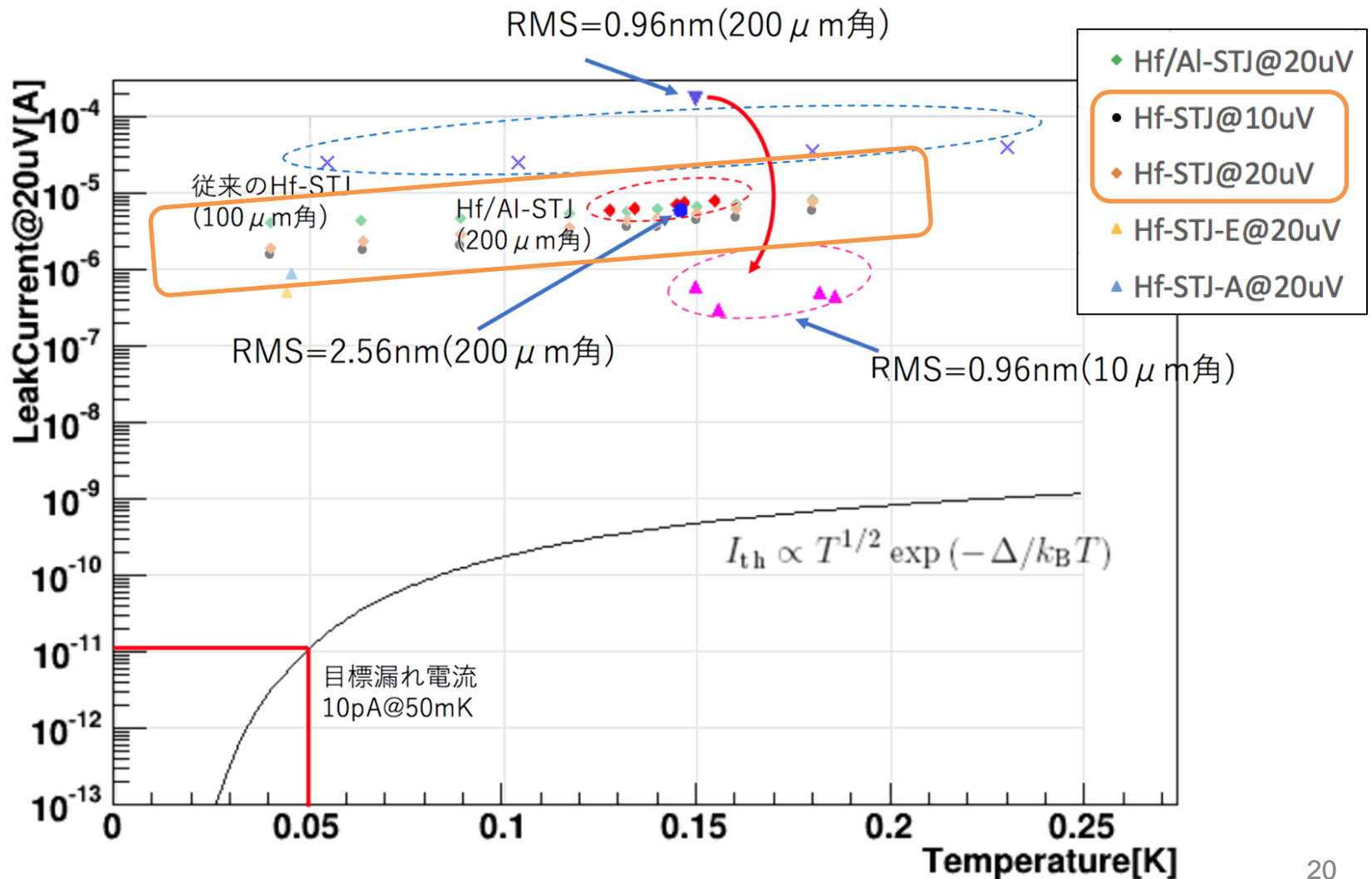


$$I_{\text{LEAK}} = 2\mu\text{A} @ 20\mu\text{V}$$



# IBS CUP での Hf-STJ 測定(2)

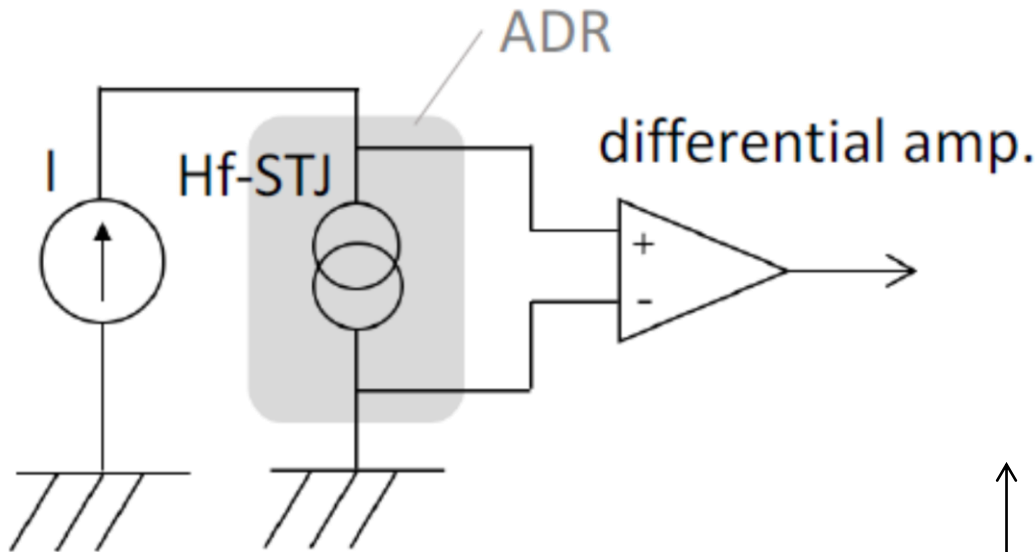
## リーク電流の温度依存性





# IBS CUP での Hf-STJ 測定(3)

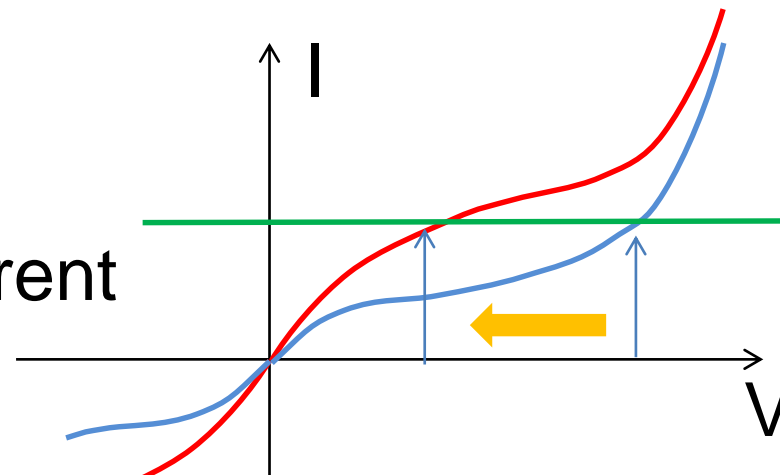
# X線応答



STJに定電流を印加し,  
STJ両端の電位差を差動  
アンプで測定

X線の信号は電圧降下パ  
ルスとして見える。

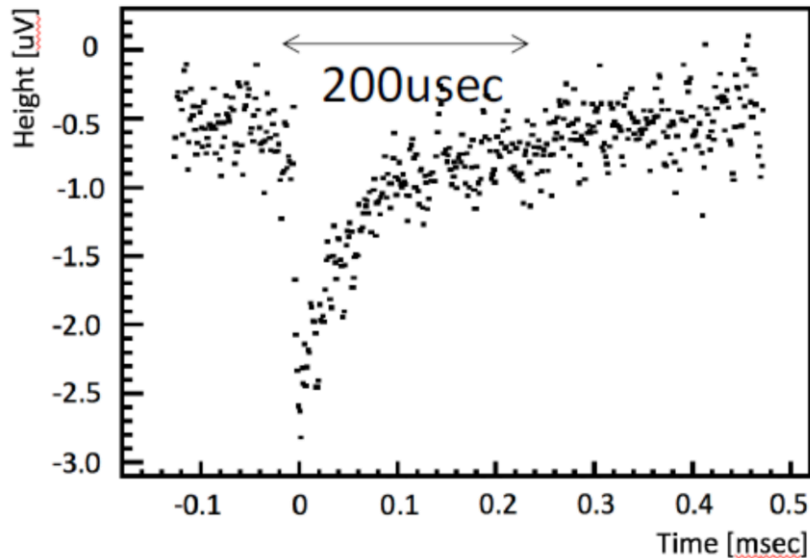
constant current



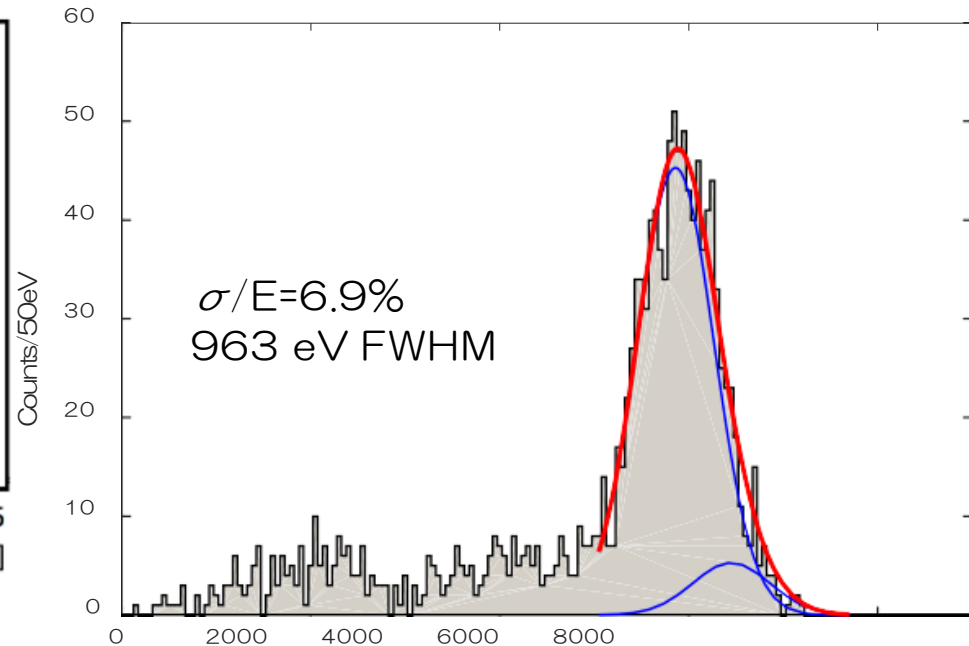
STJ I-V curve w/light w/o light

# IBS CUP での Hf-STJ 測定(4) X線応答

1 event signal shape



X-ray spectrum by Hf-STJ

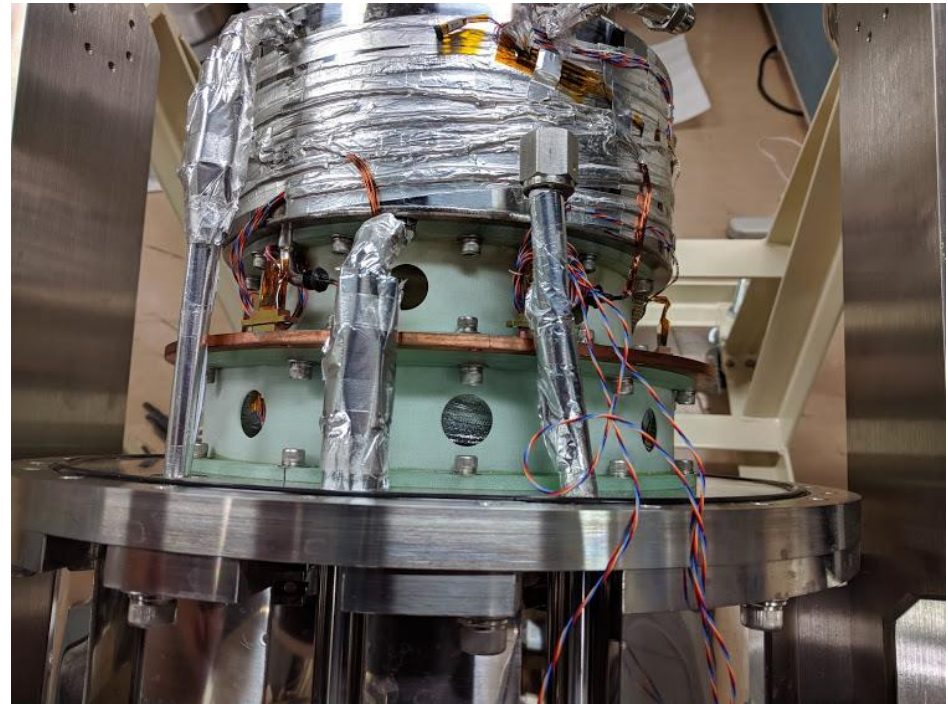


- 応答波形からエネルギー分布を作り, 既知の $^{55}\text{Fe}$ の  $K\alpha$ ,  $K\beta$  のエネルギー及び強度比を使って double gaussian で分布を fit
- 6keVに対する  $\sigma/E=6.9\%$
- Nb/Al-STJ や TES で達成されている分解能には遠く及ばないが, Hf-STJ では**世界初!**



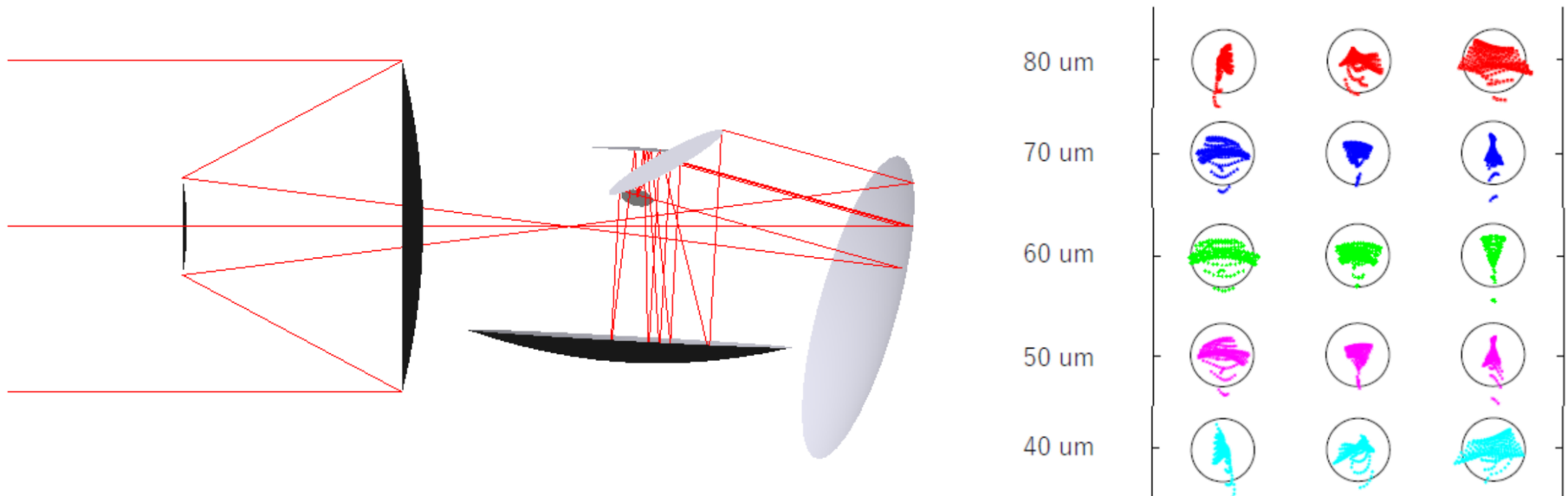
# ロケット搭載用試作冷凍機 (2017.12)

- 液体ヘリウム減圧冷凍機 (<2K) 部分のみ
- ソープションポンプ式He3冷凍機部分は未搭載
- 2017.12にテスト (最低温2.2K) 外からの熱流入が課題



# 光学系，他

- ロケット実験に向けた回折格子を含めた光学系の設計が進行中
- 回折格子を試作．福井大の遠赤外センターでの実測を行った．測定結果をシミュレーションと比較し，回折格子設計に反映させる．
- 焦点位置で分光後の光をSTJ検出器へ集める集光用ホーン的设计に着手
- STJ信号の冷凍機内増幅のための極低温SOI電荷積分型増幅器の高利得化に成功：開ループ利得の更なる向上（負帰還回路時の低入力インピーダンス実現）が課題



# まとめ

- X線ではあるが単一光量子の応答信号をHf-STJで観測した。これは、世界初である。
- ただし、現状のHf-STJ製作手法では、リーク電流の劇的な改善は期待できず、COBAND衛星実験の要求リーク電流値を満たすには、別の薄膜・酸化膜形成装置を用いたアプローチが必要だろう。