

ニュートリノ崩壊の探索のための 検出器開発(Hf-STJ他)

2012年4月17日

KEK測定器開発室

SCD重点レビュー@KEK2号館408号室

武内 勇司(筑波大)

宇宙背景ニュートリノを用いたニュートリノ崩壊探索実験

■ 宇宙背景ニュートリノの検出

- ビッグバン理論で予言されているが未発見

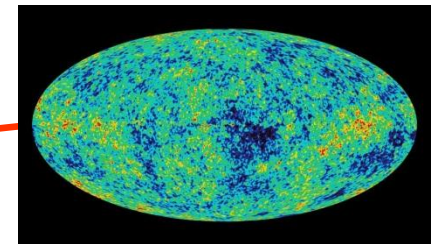
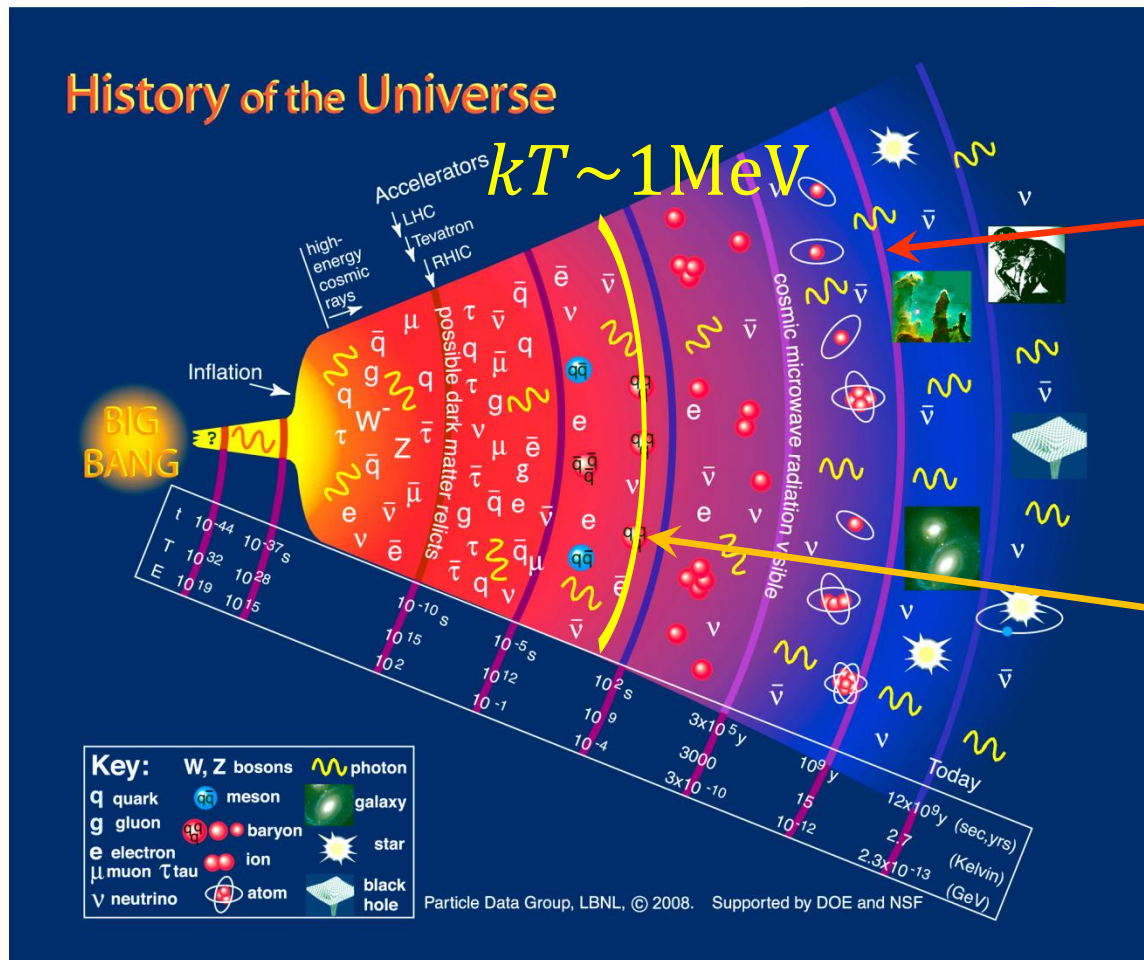
■ ニュートリノと電磁場の相互作用

- ニュートリノ遷移輻射光の検出 ($\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$)
- 標準模型では非常に小さい: $\tau \sim O(10^{43})\text{yr}$
- いくつかの模型では $\tau \geq O(10^{17})\text{yr}$ まであり得る

■ ニュートリノ質量の測定

- 振動実験で測定されている質量二乗差の情報とあわせると質量の絶対値が得られる

ビッグバン宇宙



2.7K宇宙背景輻射
($n_\gamma = 411/\text{cm}^3$)

1.9K宇宙背景
ニュートリノ
($n_\nu = 112/\text{cm}^3/\text{世代}$)

$$T_\nu = \left(\frac{4}{11}\right)^{\frac{1}{3}} T_\gamma = 1.95\text{K}$$

$$n_\nu = n_{\bar{\nu}} = \frac{3}{4} \left(\frac{T_\nu}{T_\gamma}\right)^3 \frac{n_\gamma}{2} = 56\text{cm}^{-3}$$

標準模型でのニュートリノの遷移放射

振動実験から

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

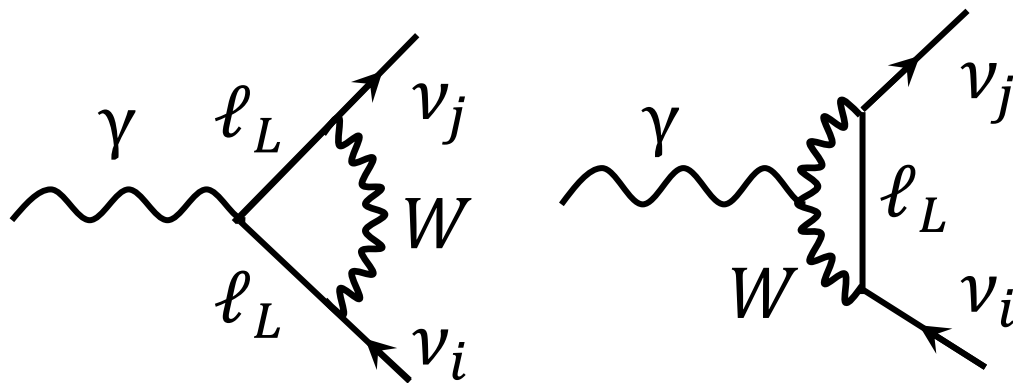
$$|\Delta m_{23}^2| = 2.40 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

もし $m_1^2 \ll m_2^2$ とすると

$$m_2 = 8.7 \text{ meV}$$

$$m_3 = 50 \text{ meV}$$

P.B.Pal and L.Wolfenstein, Phys. Rev.D23, 766-773(1982)



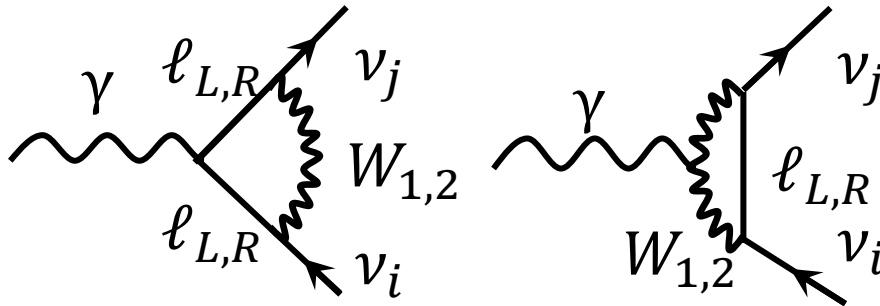
$m_3 = 50 \text{ meV}$ とすると

$$\Gamma_{3 \rightarrow 1,2} \sim (10^{43} \sim 10^{44} \text{ yr})^{-1}$$

標準模型では, ニュートリノの寿命は非常に長い.

L-R 対称模型

M. Beg, W. Marciano and M. Rudeman 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



$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\zeta & -\sin\zeta \\ \sin\zeta & \cos\zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_L \\ W_R \end{pmatrix}$$

W_L and W_R はそれぞれ V-A, V+A 結合
 ζ は, 混合角



質量固有状態

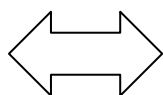


カイラリティ固有状態

- M_{W_2} 無限大で $\sin\zeta = 0$ で標準模型と一致.
- 現在の測定下限値 $M_{W_2}(\zeta = 0) > 715 \text{ GeV}/c^2$, $\zeta < 0.013$
- $M_{W_2} = 1 \text{ TeV}/c^2$, $\zeta = 0.01$, $m_3 = 50 \text{ meV}$ を仮定すると

$$\tau = \Gamma_{3 \rightarrow 2}^{-1} \cong 1.5 \times 10^{17} \text{ yr}$$

標準模型から 10^{26} の増幅

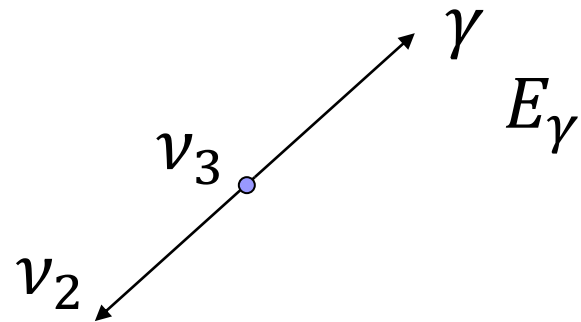


$\tau \sim 0(10^{43}) \text{ yr}$ (標準模型)

ニュートリノ質量と崩壊光子エネルギーとの関係

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

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



$$m_3 = 50 \text{ meV}$$

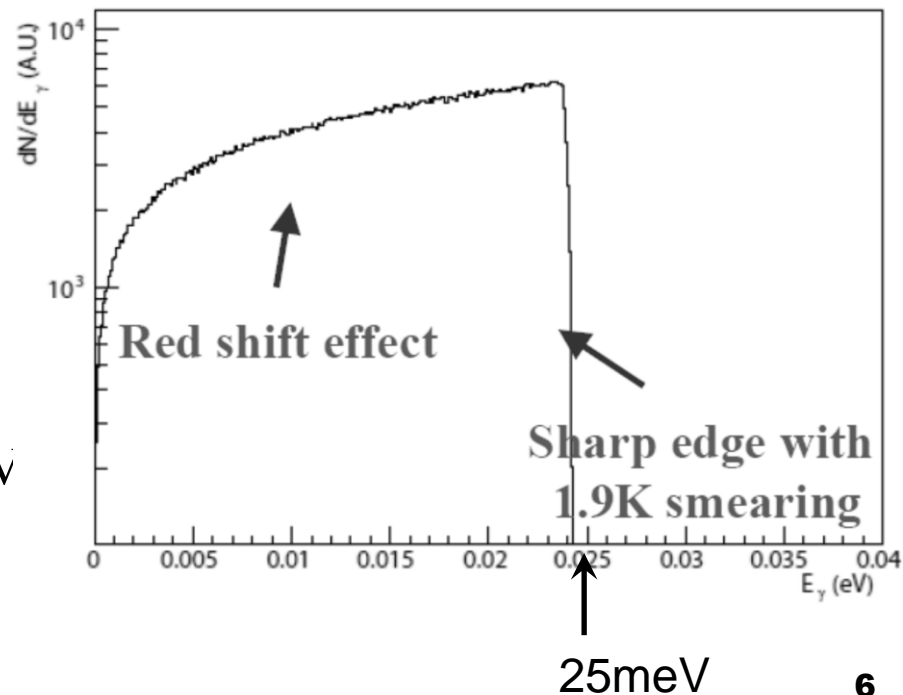
$$E_\gamma = 25 \text{ meV}$$

$$E_\gamma = 24 \text{ meV}$$

$$m_2 = 8.7 \text{ meV}$$

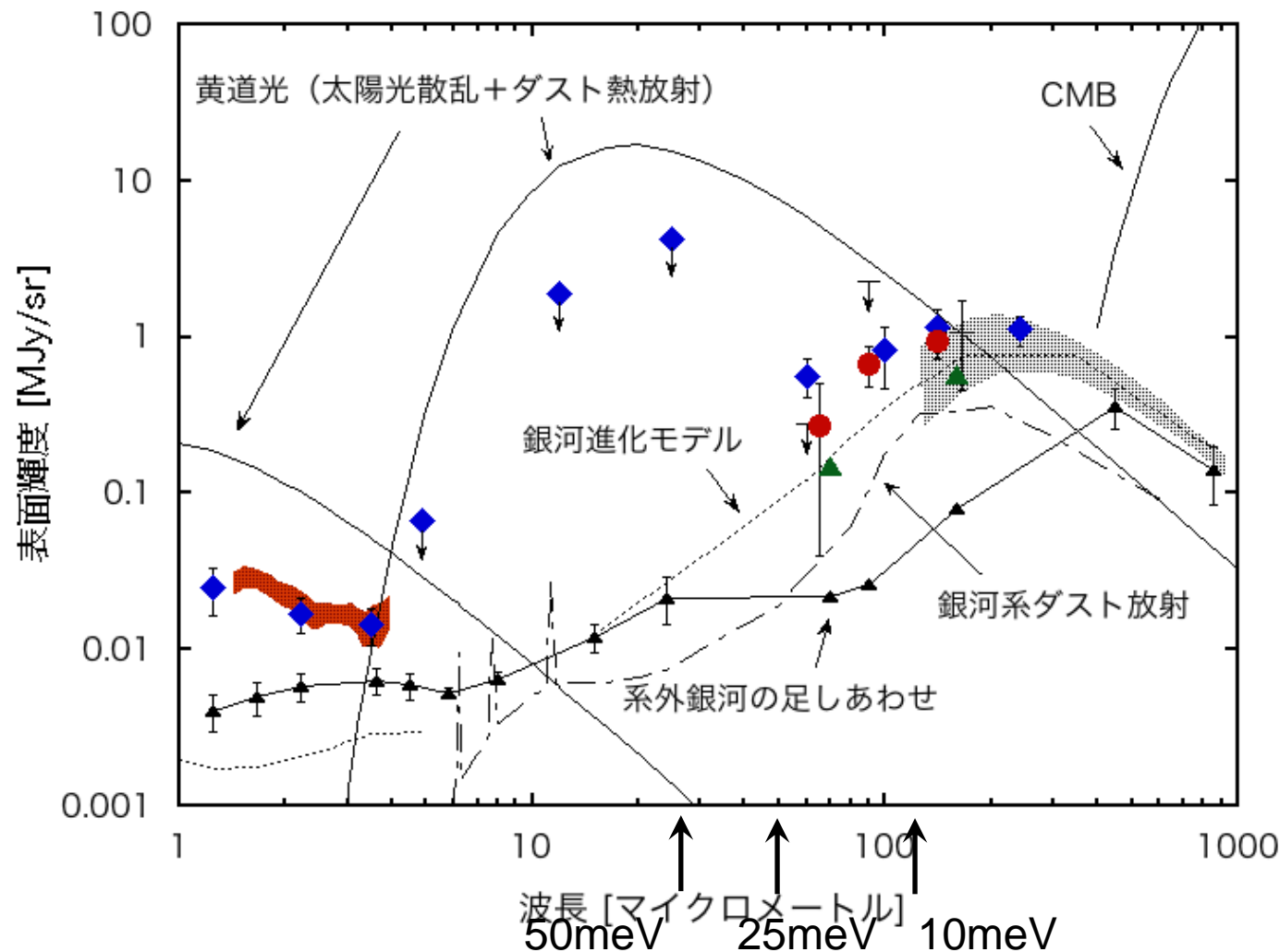
$$m_1 = 1 \text{ meV}$$

$$E_\gamma = 4.4 \text{ meV}$$

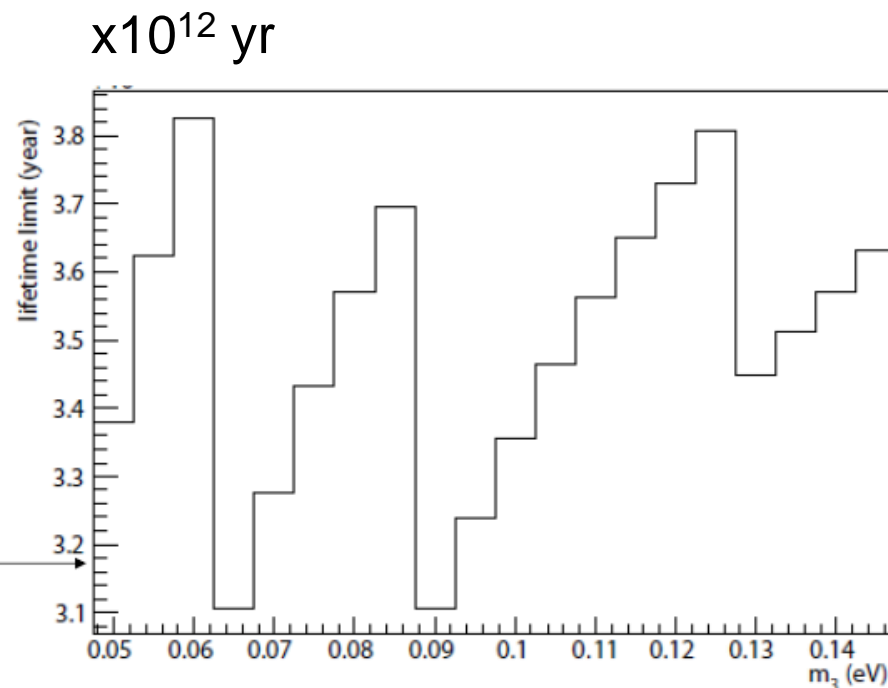
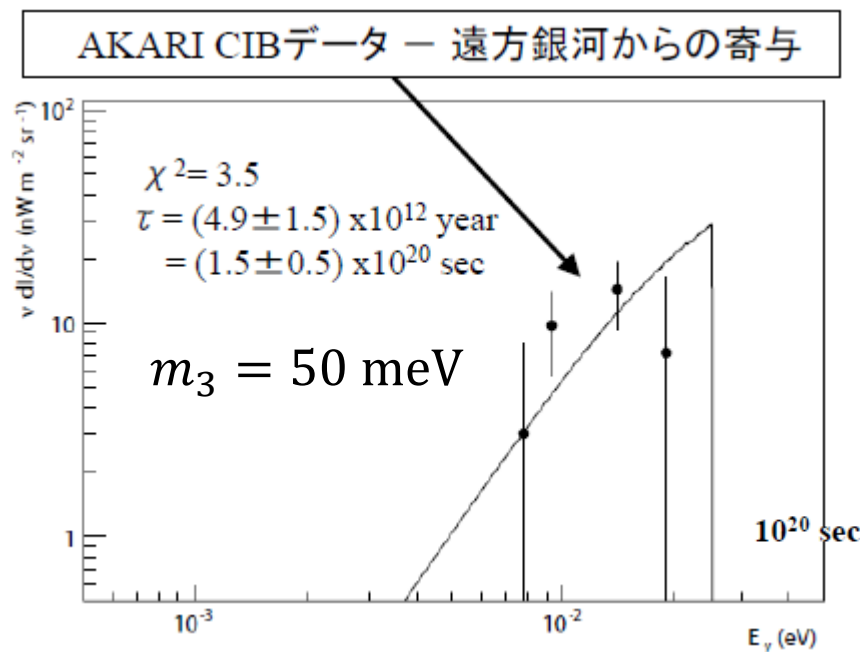


COBEとAKARIの宇宙赤外線背景輻射の測定結果

COBE: M. G. Hauser *et al.* *Astrophys. J.* 508 (1998) 25.
D. P. Finkbeiner *et al.* *Astrophys. J.* 544 (2000) 81.
AKARI: S. Matsuura *et al.* *Astrophys. J.* 737 (2011) 2.



AKARIデータを用いた寿命下限値の評価



$m_3 = 50 \text{ meV} \sim 150 \text{ meV}$

AKARIで測定された遠方銀河からのCIBに対する寄与をすべてニュートリノ崩壊によるものと仮定する

m_3 の関数として求めた ν_3 の寿命の下限値

AKARIデータを用いた寿命下限値の評価

Published in JPSJ 81(2012) 024101

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 MATSUURA¹

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

¹*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 3.1×10^{12} to 3.8×10^{12} years at 95% confidence level for the third generation neutrino ν_3 in the ν_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 ν_3 is predicted to be 1.5×10^{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 1.5×10^{17} years, by measuring a continuous energy spectrum of the cosmic infrared background.

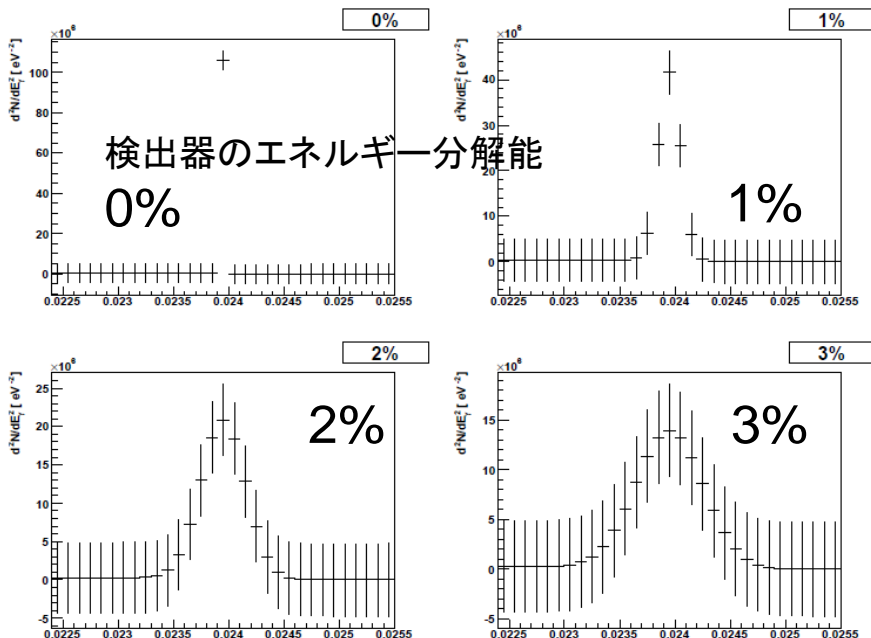
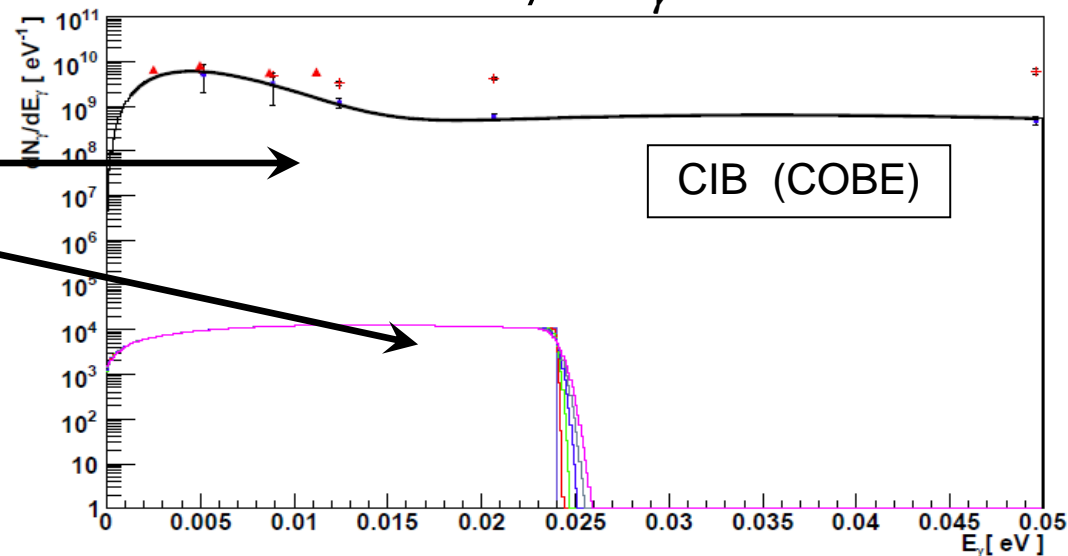
KEYWORDS: neutrino radiative decay, neutrino mass, cosmic background neutrino, cosmic infrared background, COBE, AKARI, Spitzer

信号検出の可能性

宇宙赤外線背景輻射 +
ニュートリノ崩壊からくる光子の
エネルギー分布($E_0 = 25\text{meV}$,
 $\tau = 1.5 \times 10^{17}\text{yr}$)

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

$$dN / dE_\gamma$$



- 2%以下のエネルギー分解能が必要
- $m_3 = 25\text{meV}$, $\tau = 1.5 \times 10^{17}\text{yr}$ であれば 6.7σ で観測可能

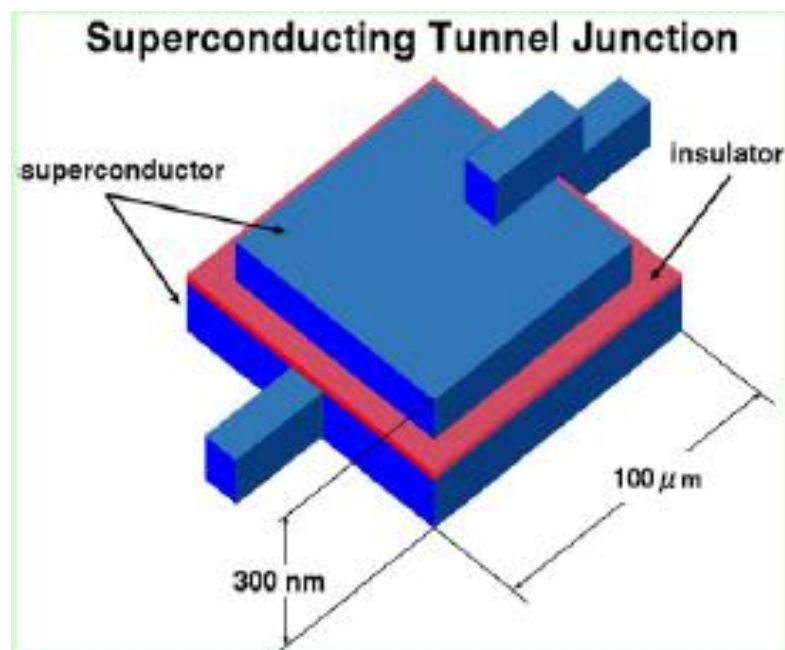
シミュレーションの条件

直径:20cm 視野:0.1度

測定時間:10時間 検出効率:100%

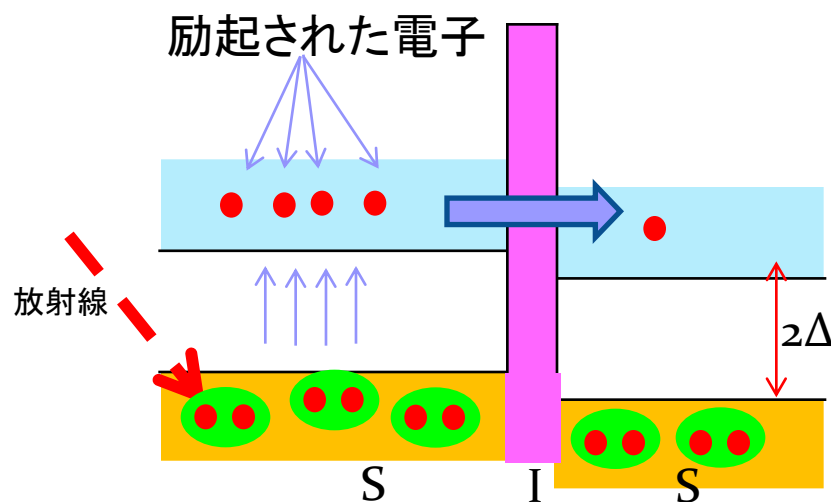
STJ(超伝導トンネル接合)検出器

- Superconducting Tunnel Junction
- 超伝導体 / 絶縁体 / 超伝導体のジョセフソン接合素子



超伝導トンネル接合では、
超伝導体のエネルギーギャップの上に
励起された電子はトンネル効果でトンネル
障壁を通過。

放射線によって励起された電子によるト
ンネル電流を測定することによって、
個々の放射線のエネルギーを測定。



STJのエネルギー分解能

発生する準粒子の個数のゆらぎがエネルギー分解能の限界を決める

➔ 超伝導ギャップエネルギーが小さいものが有利

STJのエネルギー分解能

$$\delta E_{FWHM} = 2.35 \sqrt{(1.7\Delta)FE}$$

Hfを用いた場合の発生準粒子数

$N = 25\text{meV} / 1.7\Delta = 735$ 個

$\Delta E/E < \sqrt{F}/\sqrt{N} = \sqrt{F}/\sqrt{735} = 3.7 \sqrt{F} \% \text{ @ } 25\text{meV}$

Fano factor < 0.7なら分解能2%を達成可能

Δ : バンドギャップエネルギー
F: fano factor
E: 放射線のエネルギー

**Hf-STJの作
製は世界初**

	Si	Nb	Al	Hf
T_c [K]		9.23	1.20	0.165
Δ [meV]	1100	1.550	0.172	0.020
H_c [G]		1980	105	13

T_c : 相転移温度

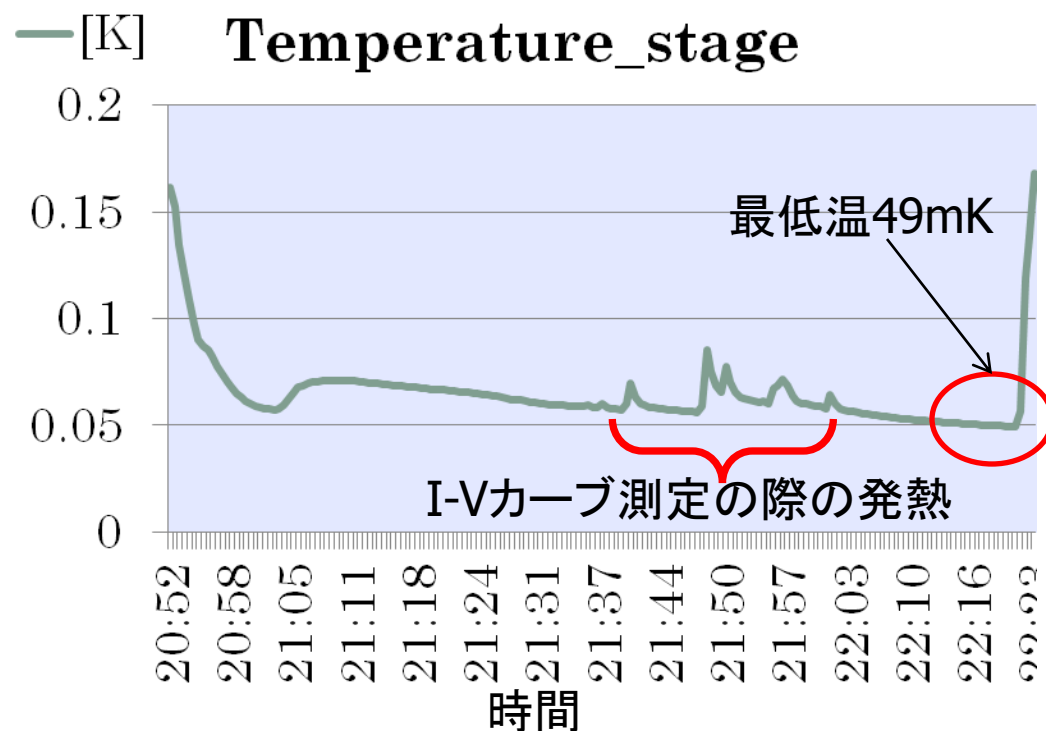
超伝導膜に用いた金属の T_c (相転移温度) の1/10程度で安定動作。

H_c : 臨界磁場

希釈冷凍機立ち上げ

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



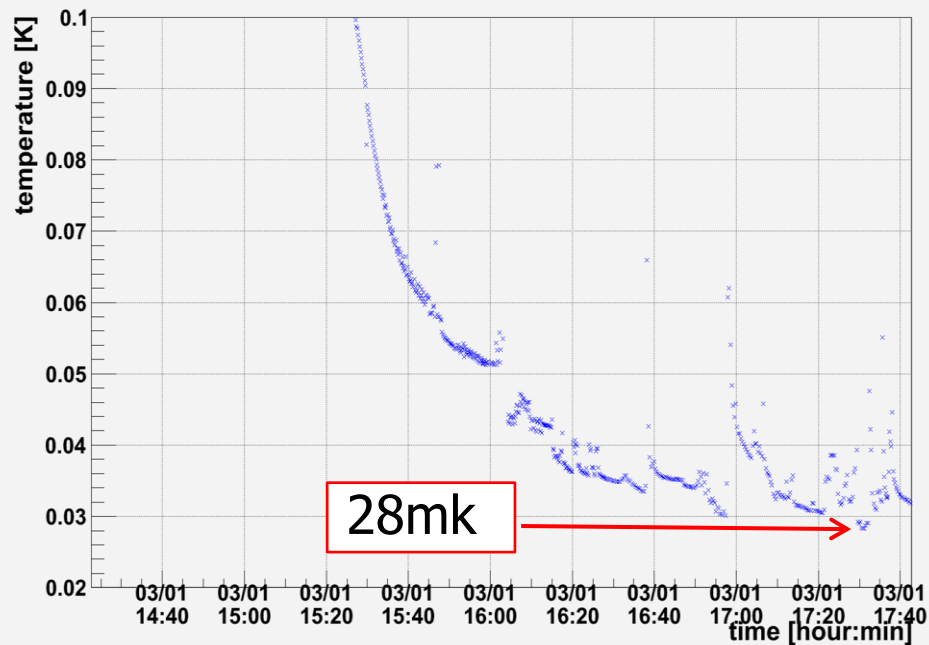
Hf-STJの動作環境

- STJは超伝導転移温度以下の温度で動作

→ 理想的には転移温度の10分の1

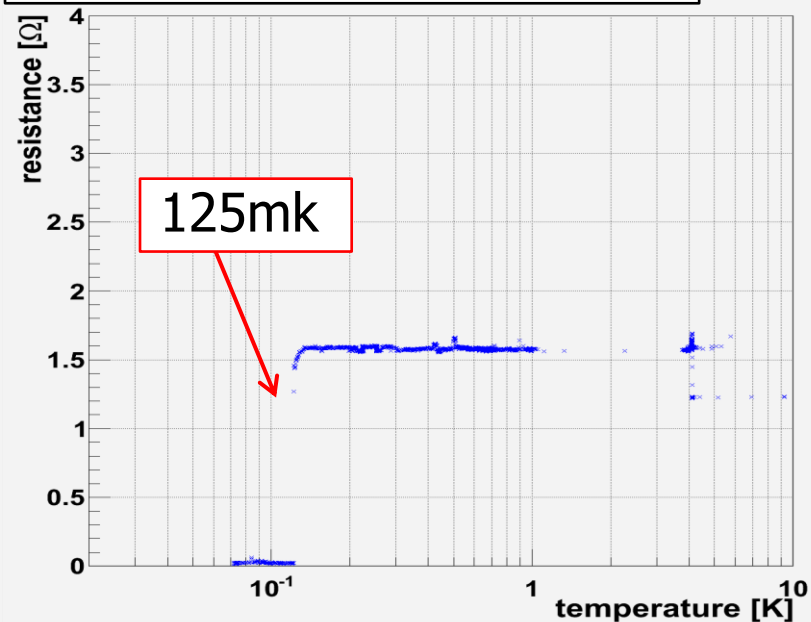
2012年2月29日の実験における最低温

thermometer temperature at the lowest point (20120229)



28mK：希釈冷凍機の最低温
→ 動作を確認するには十分

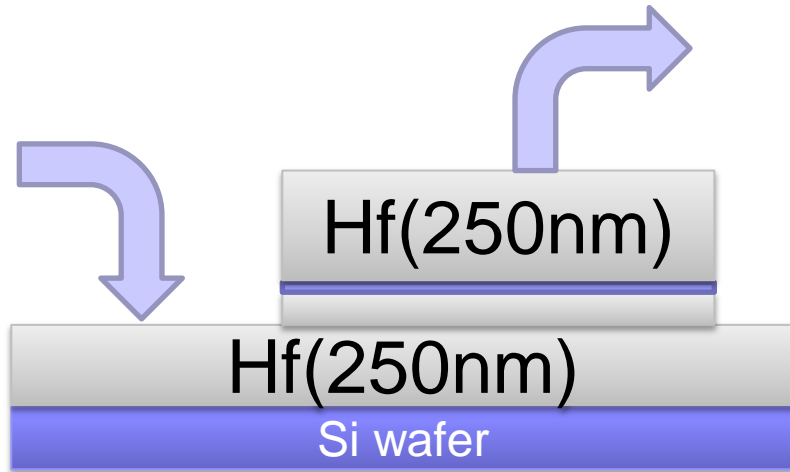
Hf-wireの温度に対する抵抗値



温度計は、メーカーによる校正＋ハフニウムワイヤーの T_c 測定による独自校正

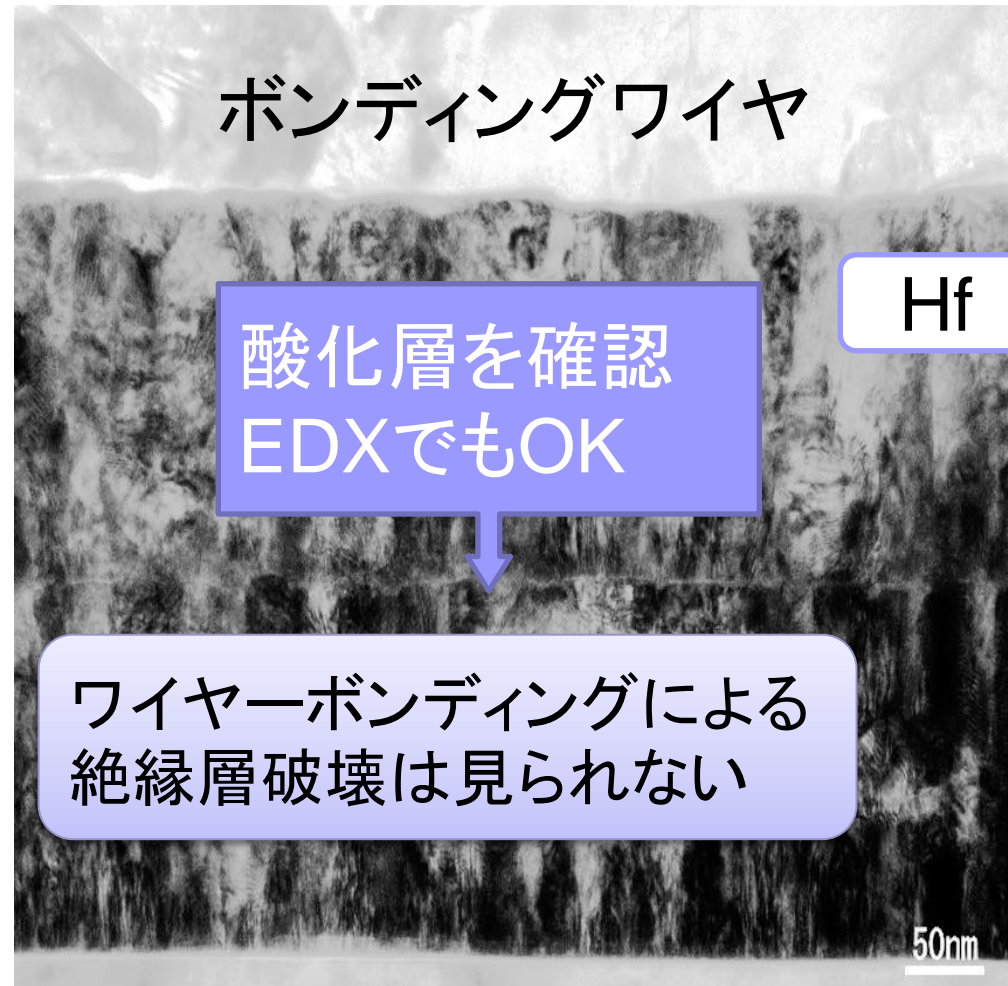
Hf-STJの作製と評価

■ 素子に直接ワイヤーボンディング



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. レジストでパターニング
5. ICP-RIEでエッチング
6. ワイヤーボンディング



Hf-STJ IV特性 酸化(10Torr 1hour)

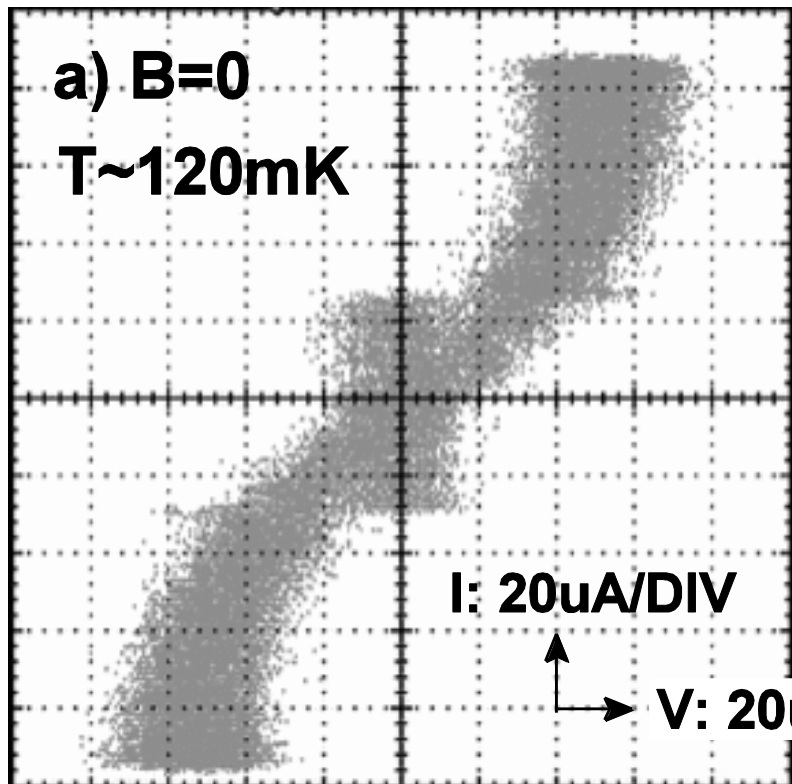
@120-130mK

$200\mu m \times 200\mu m$

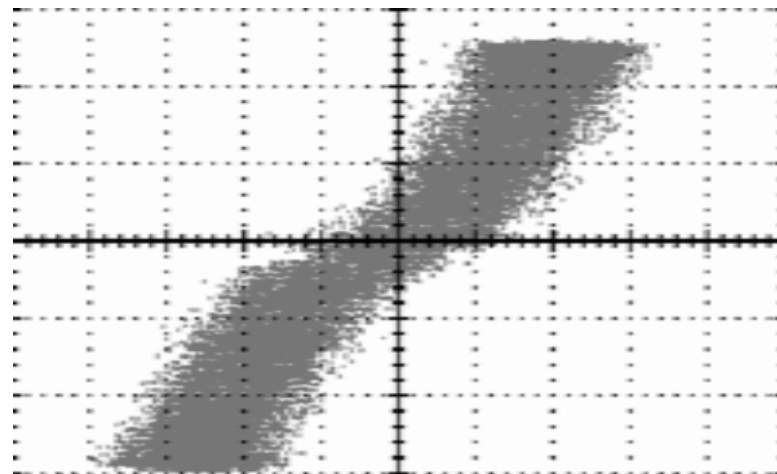
$$I_c = 24\mu A$$

$$R_d = 1\Omega$$

$$2\Delta/e = 40\mu V$$



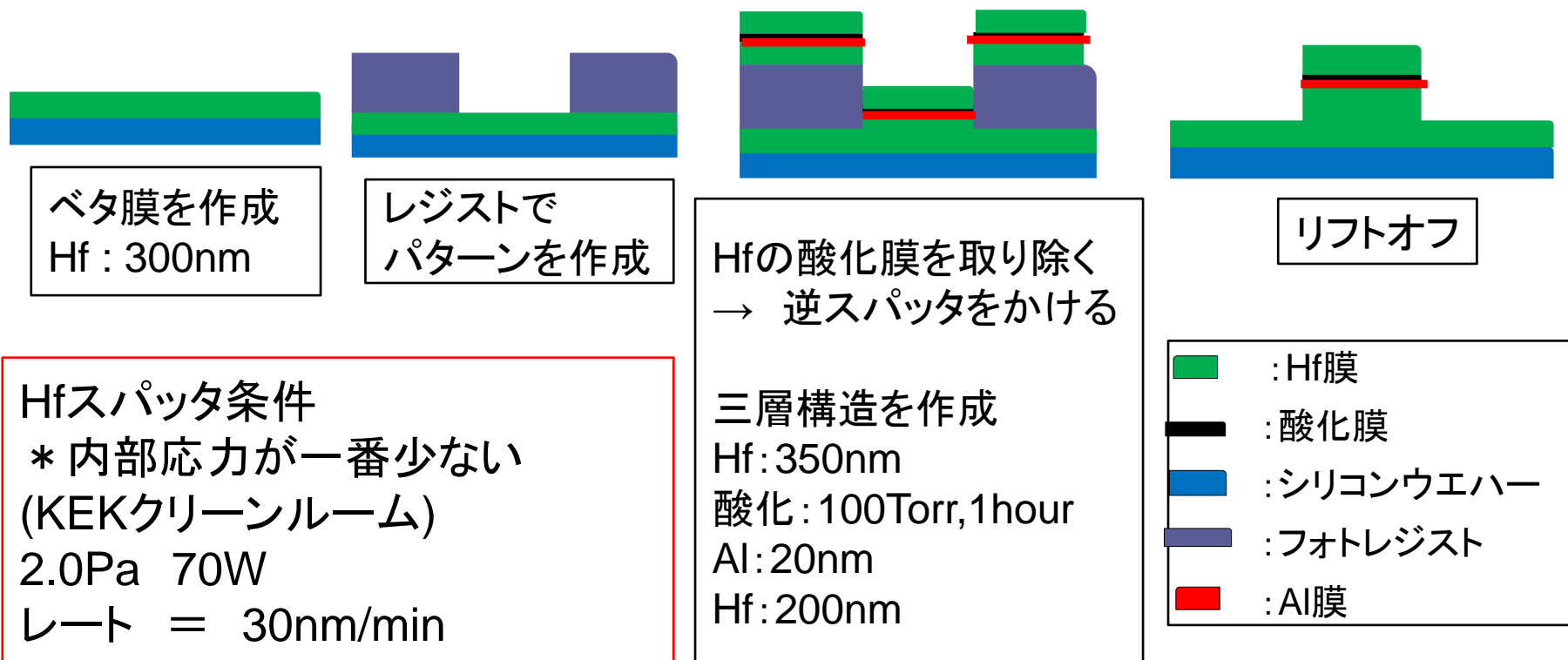
b) B~2Gauss



- 2010年度に初めてHf-HfOx-Hfのジャンクションを確認
- リーク電流のさらなる改善が必要不可欠

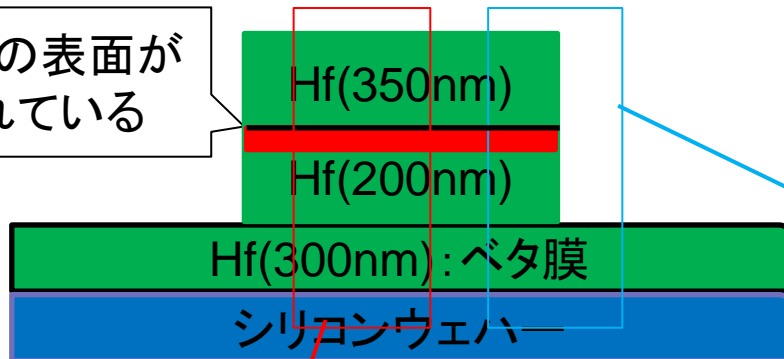
リフトオフを用いたSTJの作製(Hf/Al-STJ)

- 震災後KEK CRのICP-RIEエッチング装置が不調
 - Hfを削らない作製方法
- 絶縁膜としてAlO_xを使用
 - リーク電流を減らす(酸化アルミは、絶縁膜としての実績がある)
 - Alを薄く積めば、Hfへの影響を無視できる

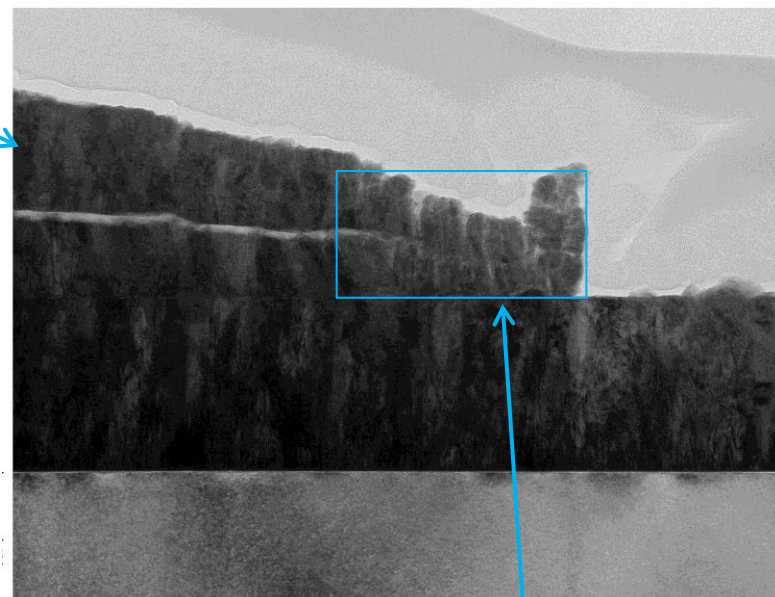


Hf/Al-STJの断面図

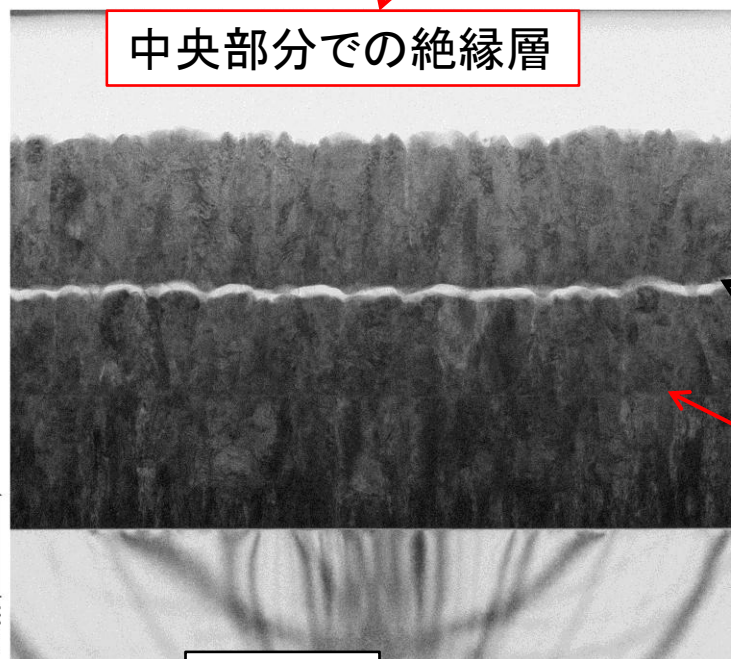
Al(20nm)の表面が酸化されている



側面部分での絶縁層



中央部分での絶縁層



100nm

100nm

絶縁膜のAl

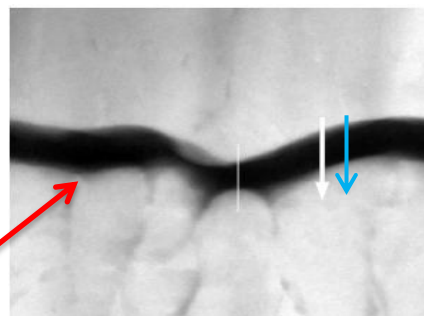
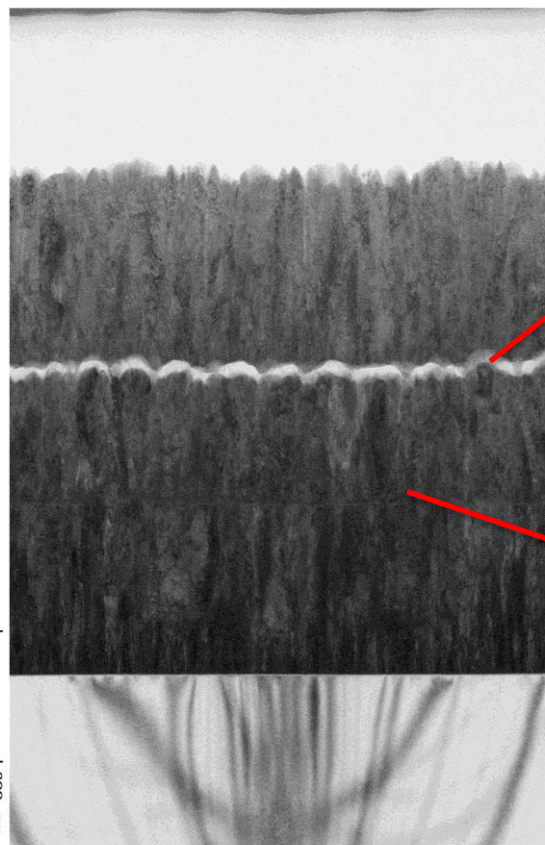
HfとAlの層が混ざっている

ベタ膜の上に薄い層構造
→大気中に出した影響？

200nm

Hf/Al-STJの元素分析 EELS線分析結果

MST-11-113489
試料名: Hf_Al-STJ



EELS線分析結果

20nm

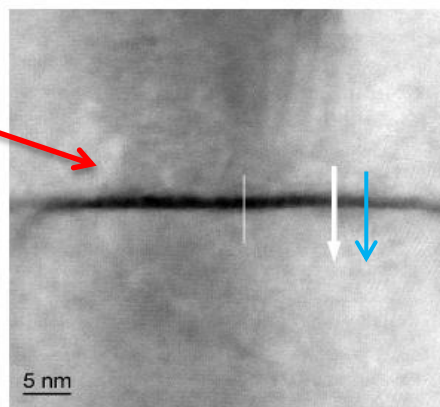
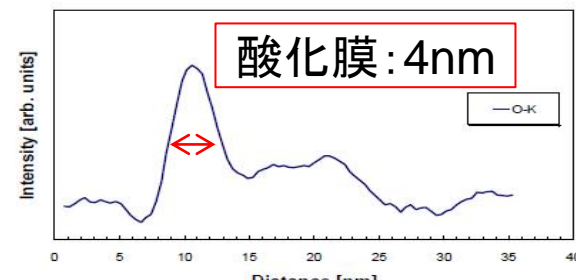


Photo.2-2 ADF-STEM像

5nm

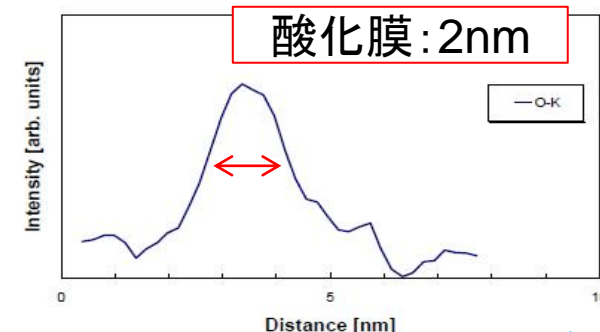


酸化膜: 4nm

0nm

MST-11-113489
試料名: Hf_Al-STJ

40nm



酸化膜: 2nm

0nm

Fig.1-2 EELS線分析結果

10nm

- AlO_xの層を確認.
- Hfが想定したものよりも平坦ではない. (レジストの影響か?)
- Hfベタ膜上の酸化層は2nm厚.

赤外線観測ロケットによる宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

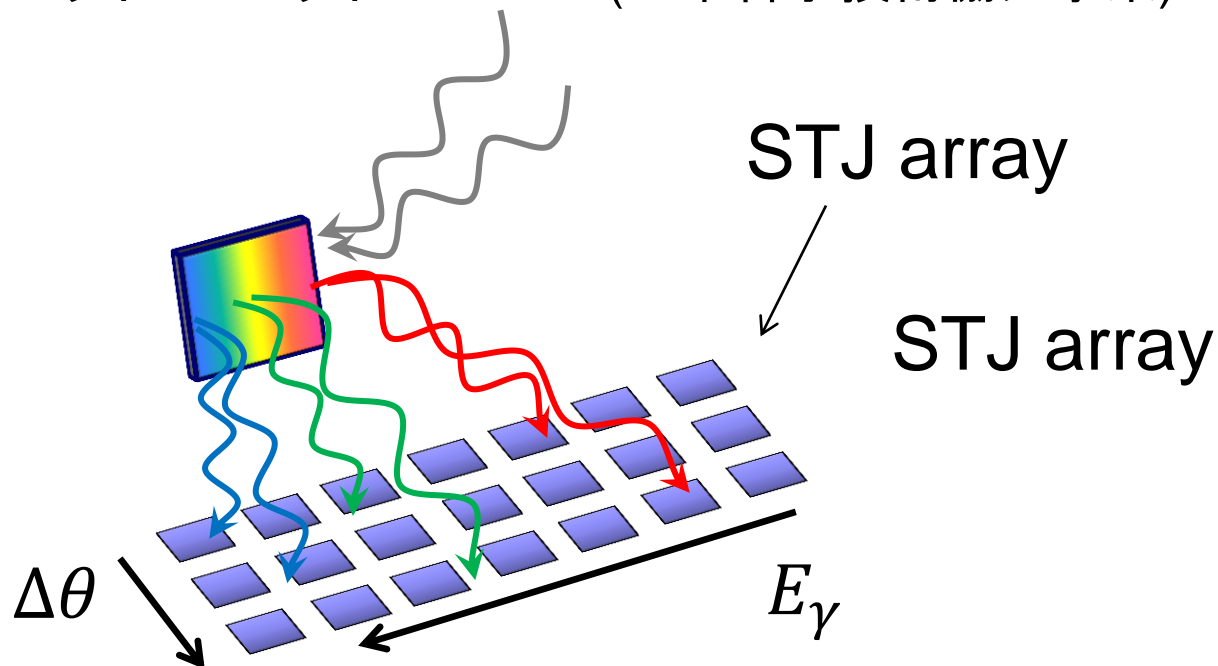
■ 回折格子+Nb/AI-STJの組み合わせによる赤外光子エネルギー測定器

□ Nb/AI-STJのアレイ

- Nb/AI-STJの一つのセルは、非常に良いS/Nの $E_\gamma \sim 25\text{meV}$ のフォトンカウンティング検出器として使用

□ 極低温4K前置増幅器の開発

- フェルミラボとのコラボレーション(日米科学技術協力事業)



US Collaborators' Facility at Fermilab

- March, 2011-

Started a collaboration with Fermilab Milli-Kelvin Facility group who will work on the readout electronics at low temperature around 4K.

Fermilab Milli-Kelvin Facility

Gustavo Cancelo, Herman Cease, Juan Estrada, Jonghee Yoo, Jiangnag Hao, Josh Frieman
Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL, 60510, USA

We propose to build a milli-Kelvin user facility at Fermilab. This facility would provide easy access to a sub-Kelvin cryogenic apparatus for the Fermilab Users. The facility will have immediate uses for SuperCDMS detector R&D, microwave kinetic inductance detector R&D (MKID), and crystal-phase low background detector R&D. Moreover, the facility would attract Users who wish to test devices such as ultra-sensitive superconducting sensors and low-noise quantum devices. An investment in a cryogen-free dilution refrigerator and related test equipment would be instrumental for future detectors and scientific experiments. In this proposal we request engineering/technical hours and support for the facility design and purchase of a cryogen-free dilution refrigerator which requires a year of lead time for delivery.

赤外線観測ロケットによる宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

■ JAXAのCIBER実験

- ロケットで高度200kmまで上昇. 約20分の観測が可能
- 検出器, 光学系, 冷凍機のR&D完了から2年程度で打ち上げ可能

■ R&D

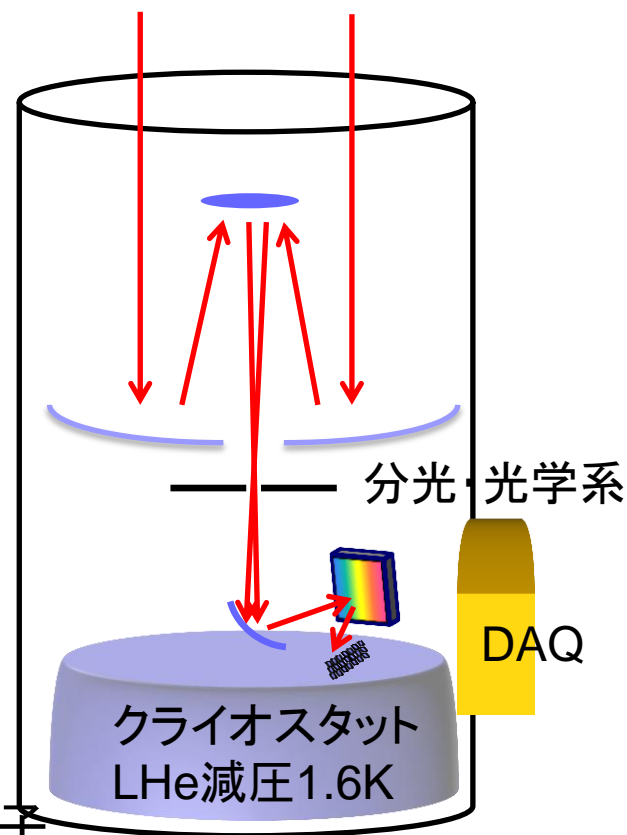
- 分光素子・光学系の設計
- ロケット搭載クライオスタットの設計 (1.6K)
- 検出器(読み出し系), DAQ

Nb/Al-STJで最終的には, $E_\gamma \cong 25\text{meV}$
($\lambda \sim 50\mu\text{m}$)の1光子検出器を目指す.

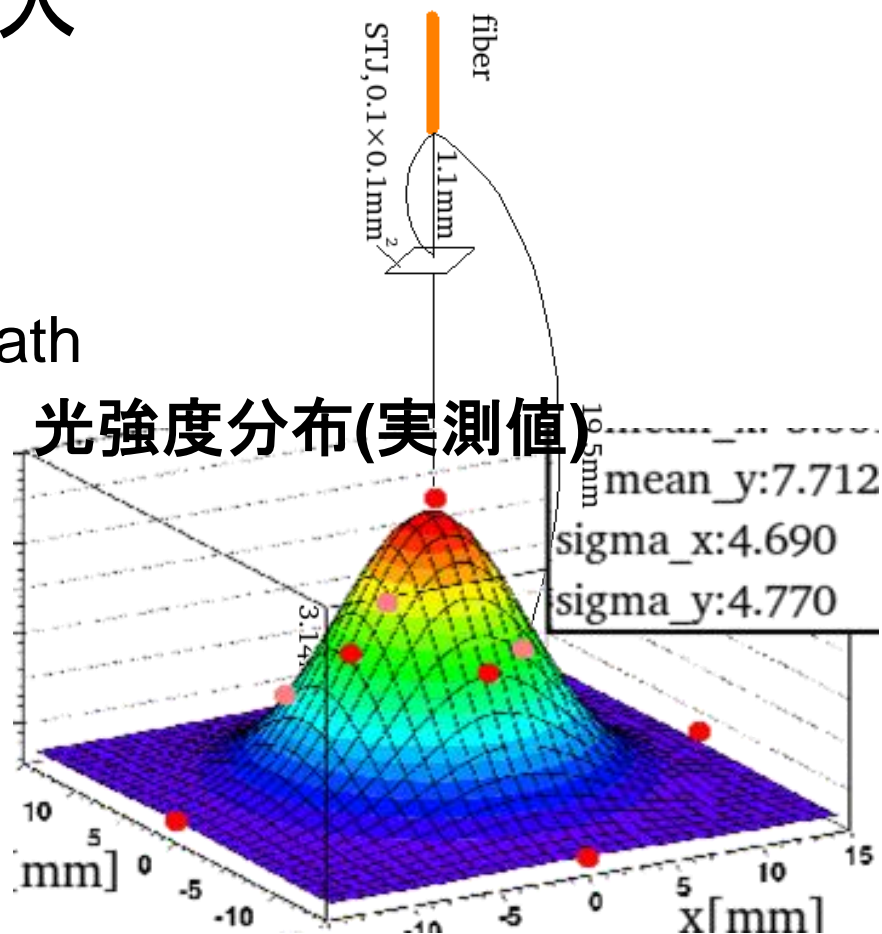
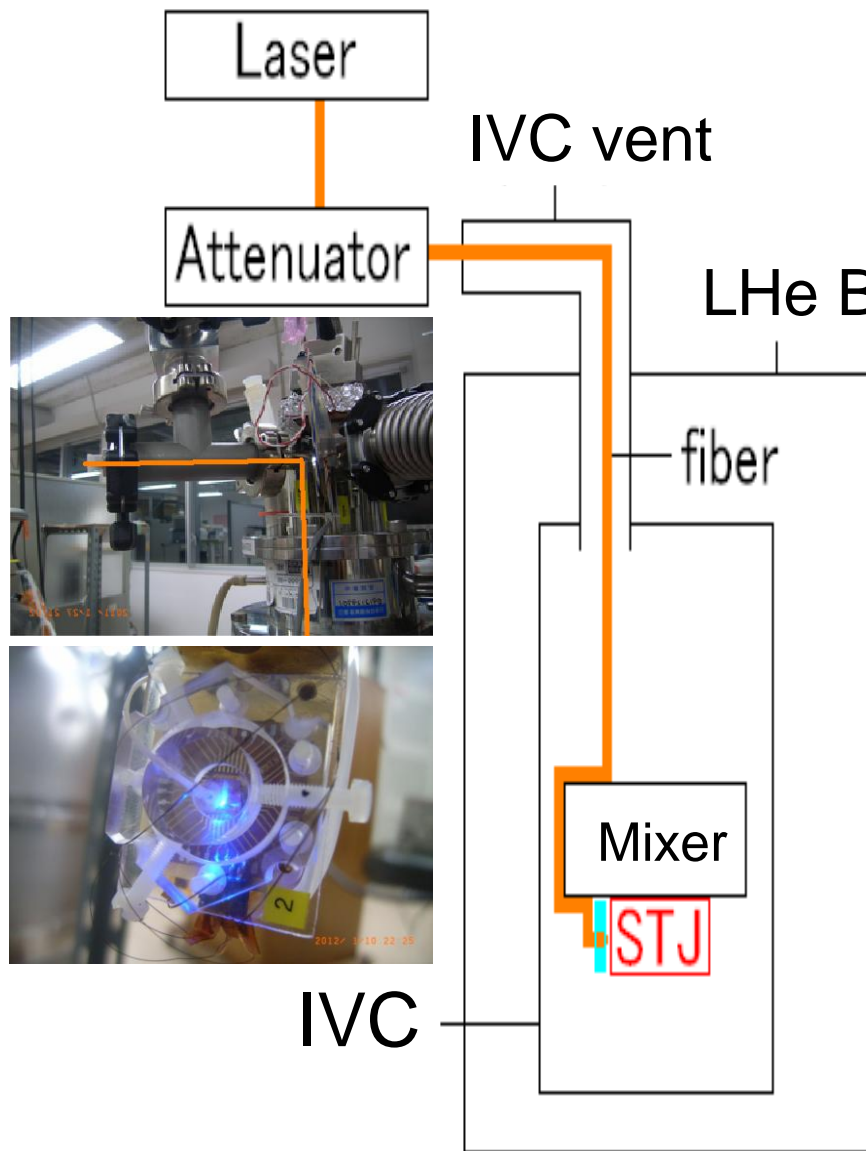


最初のステップとして
まず可視光($\lambda \sim 470\text{nm}$, $E_\gamma \cong 2.6\text{eV}$)の大
光量の光子検出を試す.

⇒可視域1光子⇒近赤外域1光子⇒遠赤外域1光子
これらの経験はHf-STJの読み出しの際にも応用可能



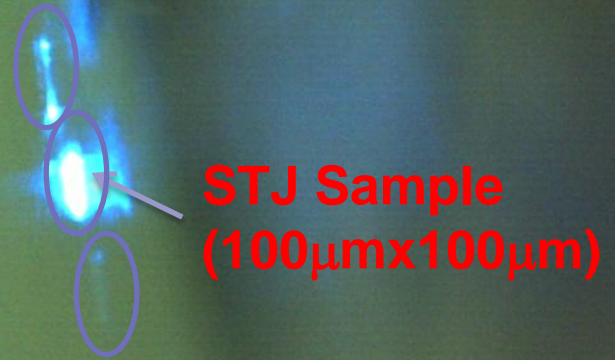
低温ステージへの光導入



ファイバーからの光強度分布とサンプルまでの距離を仮定すると

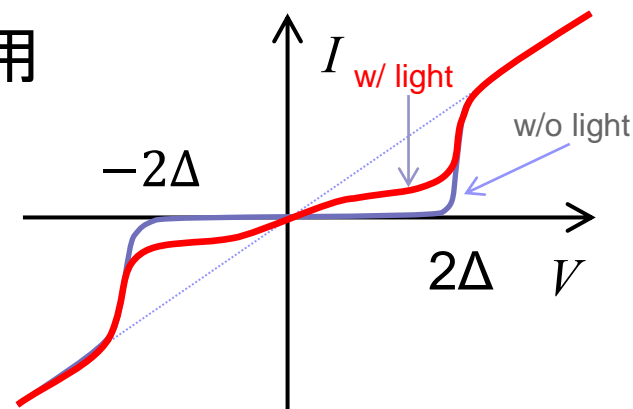
→ 100 μm x 100 μm の面積に対して
最大 **数 10^4 photons/laser pulse**

Optical fiber head



Nb/Al-STJ の可視光域DC光レーザーに対する応答

- 美馬氏(岡山大⇒理研)作成@KEKを使用
- パルスレーザーを高周波数で点灯(DC光源として使用)
 - $f = 1\text{MHz}$
 - $N_\gamma/\text{pulse} \sim O(10^4)$ (不定性大)



• 仮に

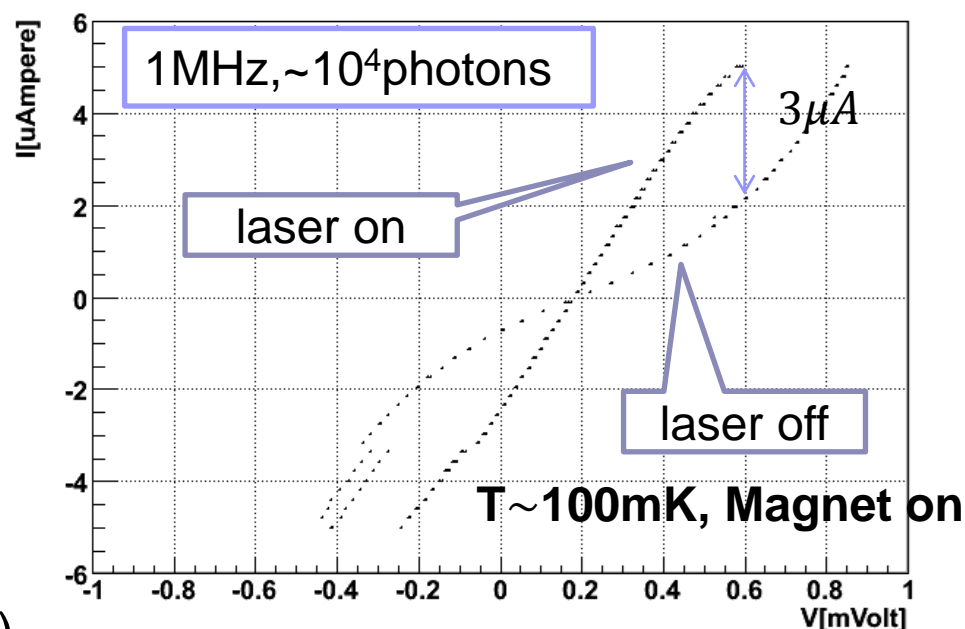
- $N_\gamma/\text{pulse} = 10^4$
- $f = 1\text{MHz}$
- Q.E.=0.5
- トラップ層による増幅率: 10
- 電荷収集率: 1

→ $I = 14\mu\text{A}$ (\Leftrightarrow 実測 $3\mu\text{A}$)

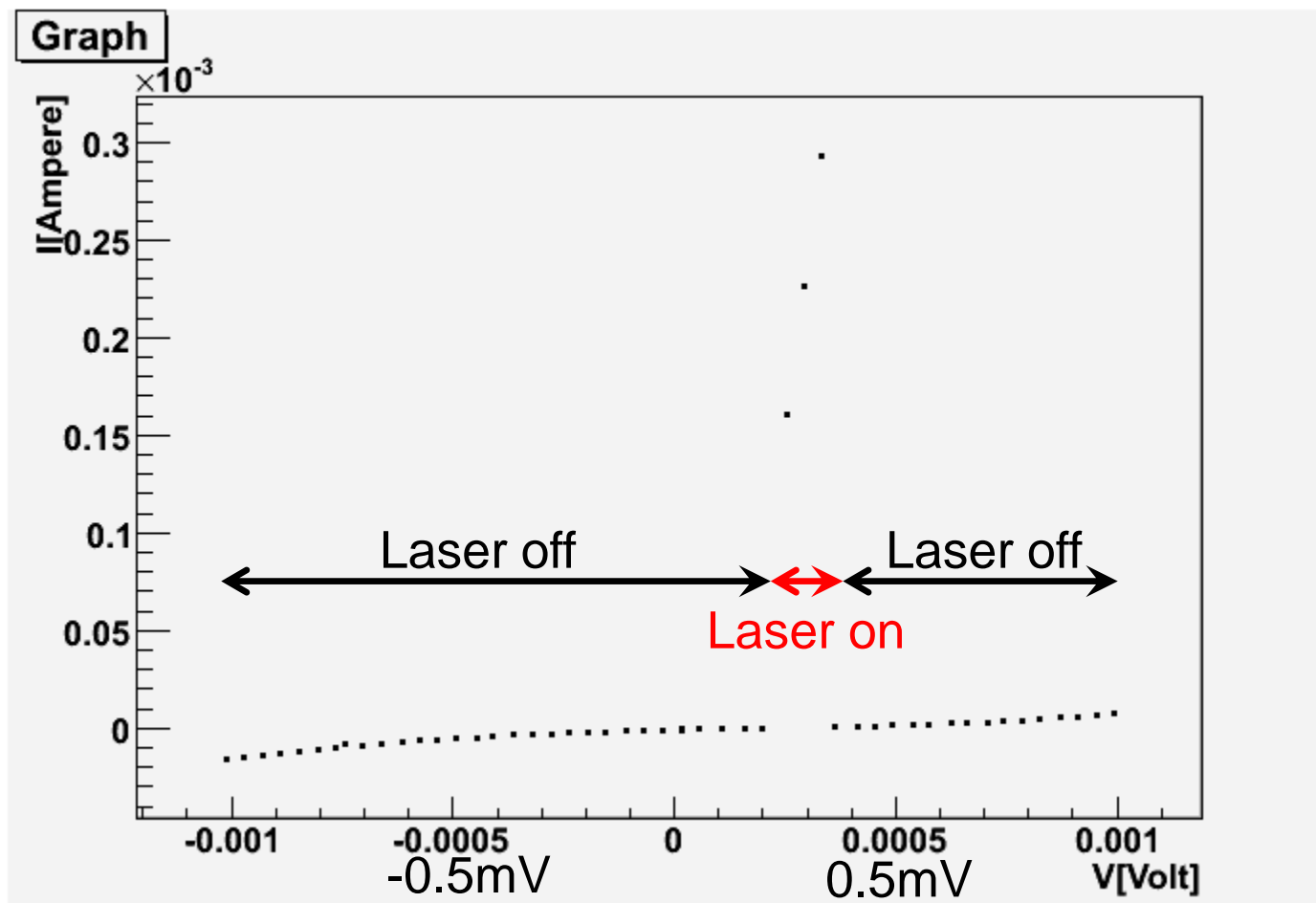
→ $14\text{pC}/\text{single pulse}(10^4 \text{ photon})$

IV curve

I-V curve of Nb/Al-STJ sample



Nb/Al-STJ の可視光域DC光レーザーに対する応答



- I-Vカーブ測定のVoltage sweep の間(一秒程度)にLaserを数十ミリ秒ほど点灯
- 電流値は, Laser offで直ちに減少⇒基板の熱上昇によるものではない

まとめ

- ニュートリノ崩壊探索のための検出器開発
 - 分光素子+Nb/Al-STJ (ロケット搭載実験を目指す)
 - 遠赤外光のカウンティング検出器としての動作が必要
 - 光応答テストのための予備実験(可視光応答)を開始
 - 可視域大光量DC光⇒可視域大光量1パルス⇒可視域1光子⇒近赤外域1光子⇒遠赤外域1光子
 - 低温アンプの開発をFNALと共同実験で開始
 - Hf-STJ(将来の衛星搭載を目指す)
 - 2010年度世界初のHf-STJで SIS構造でjunctionを確認
 - 震災後は, KEK CRのICP-RIE不調のため, これを再現できず.
 - 新たなトンネルバリア(AIOxなど)を模索中
 - Nb/Al-STJの信号読み出しでHf-STJ読み出しのノウハウを蓄積可能
- KEK CR の継続的な支援をお願いします.



Backup