



宇宙背景ニュートリノノ崩壊探索

COBAND実験 (COsmic Background Neutrino Decay search)

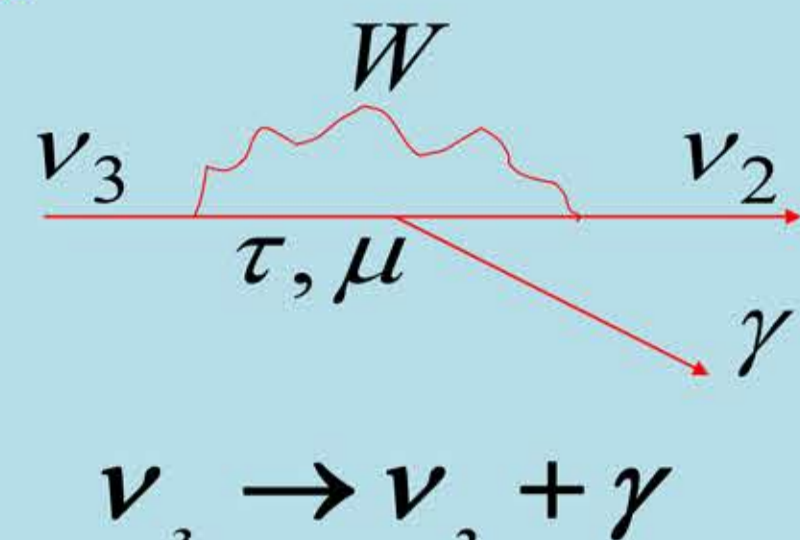
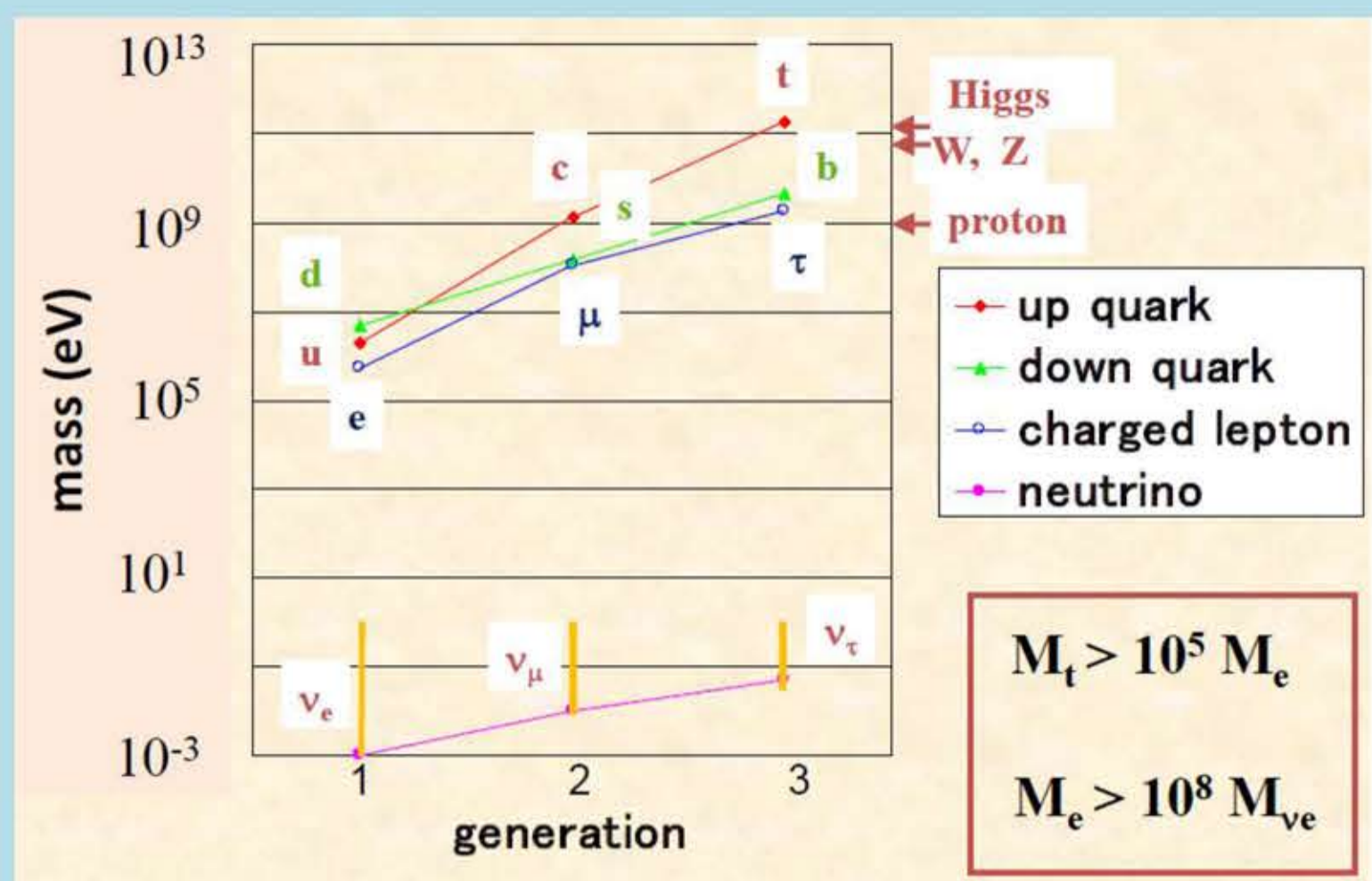


COBAND Collaboration

S. H. Kim, Y. Takeuchi, K. Takemasa, K. Nagata, K. Kasahara, S. Yagi, R. Senzaki, K. Moriuchi, R. Wakasa, C. Asano, T. Iida (Univ. of Tsukuba), S. Matsuura (Kwansai Gakuin Univ.), H. Ikeda, T. Wada, K. Nagase (JAXA/ISAS), H. Ishino, A. Kibayashi (Okayama Univ.), S. Mima, K. Kiuchi (RIKEN), T. Yoshida, T. Nakamura, M. Sakai (Univ. of Fukui), M. Hazumi, Y. Arai, I. Kurachi (KEK), Y. Kato (Kindai Univ.), G. Fujii, S. Shiki, M. Ukibe, M. Ohkubo (AIST), S. Kawahito (Shizuoka Univ.), E. Ramberg, P. Rubinov, D. Sergatskov (FNAL), S. B. Kim (Seoul National Univ.)

はじめに

現在、素粒子の中でニュートリノの質量のみが測定されていない。そのニュートリノ質量を決定することは質量の起源を解明するためにヒッグス粒子の性質の研究を行うのと同様に重要である。ニュートリノの異なる質量固有状態間の質量二乗差 Δm_{ij}^2 はニュートリノ振動実験で高精度で測定されているが、質量そのものは測定されていない。ニュートリノ崩壊を検出することによって、ニュートリノ振動とは独立な量を測定することができ、それによってニュートリノ質量を決定することができる。



$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3} = \frac{\Delta m_{23}^2}{2m_3}$$

$$\text{Using } \Delta m_{23}^2 = (2.43 \pm 0.09) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$E_\gamma = 10 \sim 25 \text{ meV at } \nu_3 \text{ rest frame.}$$

$$(\text{Far - Infrared region } \lambda = 50 \sim 125 \mu\text{m})$$

ニュートリノの寿命は非常に長いので、崩壊観測するためのニュートリノ源として、宇宙背景ニュートリノ (CvB) を用いる。したがって、このニュートリノ崩壊を観測することは宇宙論で予言されている宇宙背景ニュートリノの発見となる。

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

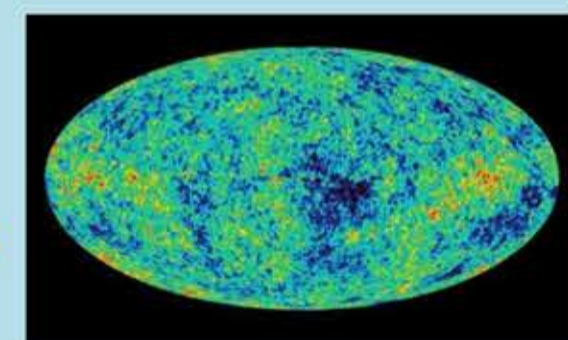
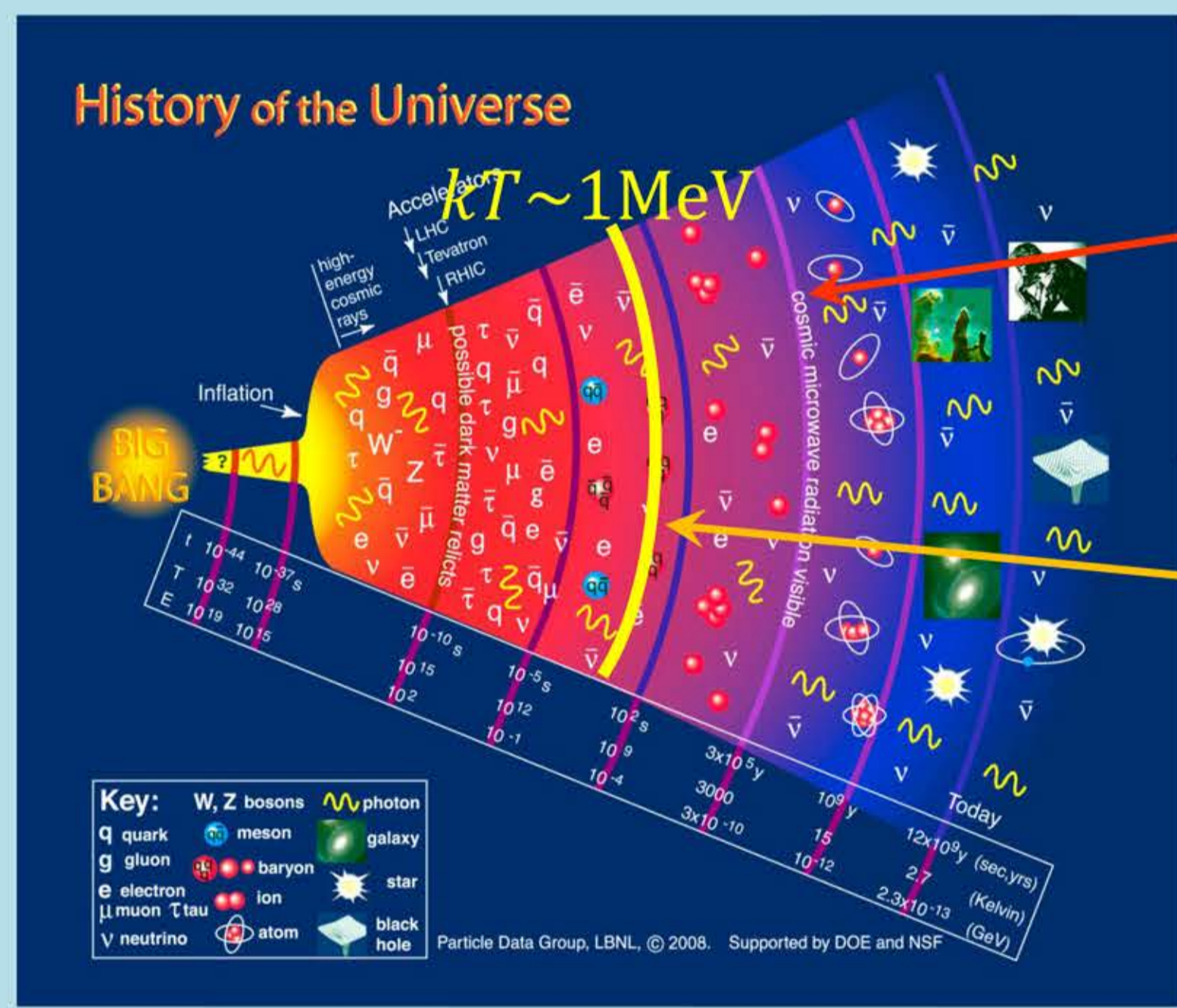
(PRL 38, 1252(1977), PRD 17, 1395(1978)),

there are two Weak Boson mass eigenstates: $W_1 = W_L \cos \zeta - W_R \sin \zeta, W_2 = W_L \sin \zeta + W_R \cos \zeta.$

Using present limits of $M(W_R) > 715 \text{ GeV}/c^2$, mixing angle $\zeta < 0.02$ and $m_3 = 50 \text{ meV}$, lifetime is

$$\tau(\nu_3 \rightarrow \nu_{2,1} + \gamma) = 1.5 \times 10^{17} \text{ year} \quad (2.1 \times 10^{13} \text{ year in the Standard Model}).$$

現在のニュートリノ寿命の下限はCOBE とAKARIの宇宙赤外線背景放射 (CIB) から求められた 3×10^{12} 年である。



CMB
 $n_\gamma = 411/\text{cm}^3$
 $T_\gamma = 2.73 \text{ K}$
CvB
 $n_\nu = n_{\bar{\nu}} = \frac{3}{4} \left(\frac{T_\nu}{T_\gamma}\right)^3 n_\gamma$
 $= 56/\text{cm}^3$
 $T_\nu = \left(\frac{4}{11}\right)^{1/3} T_\gamma = 1.95 \text{ K}$

宇宙赤外線観測ロケット実験 (COBAND実験) 計画

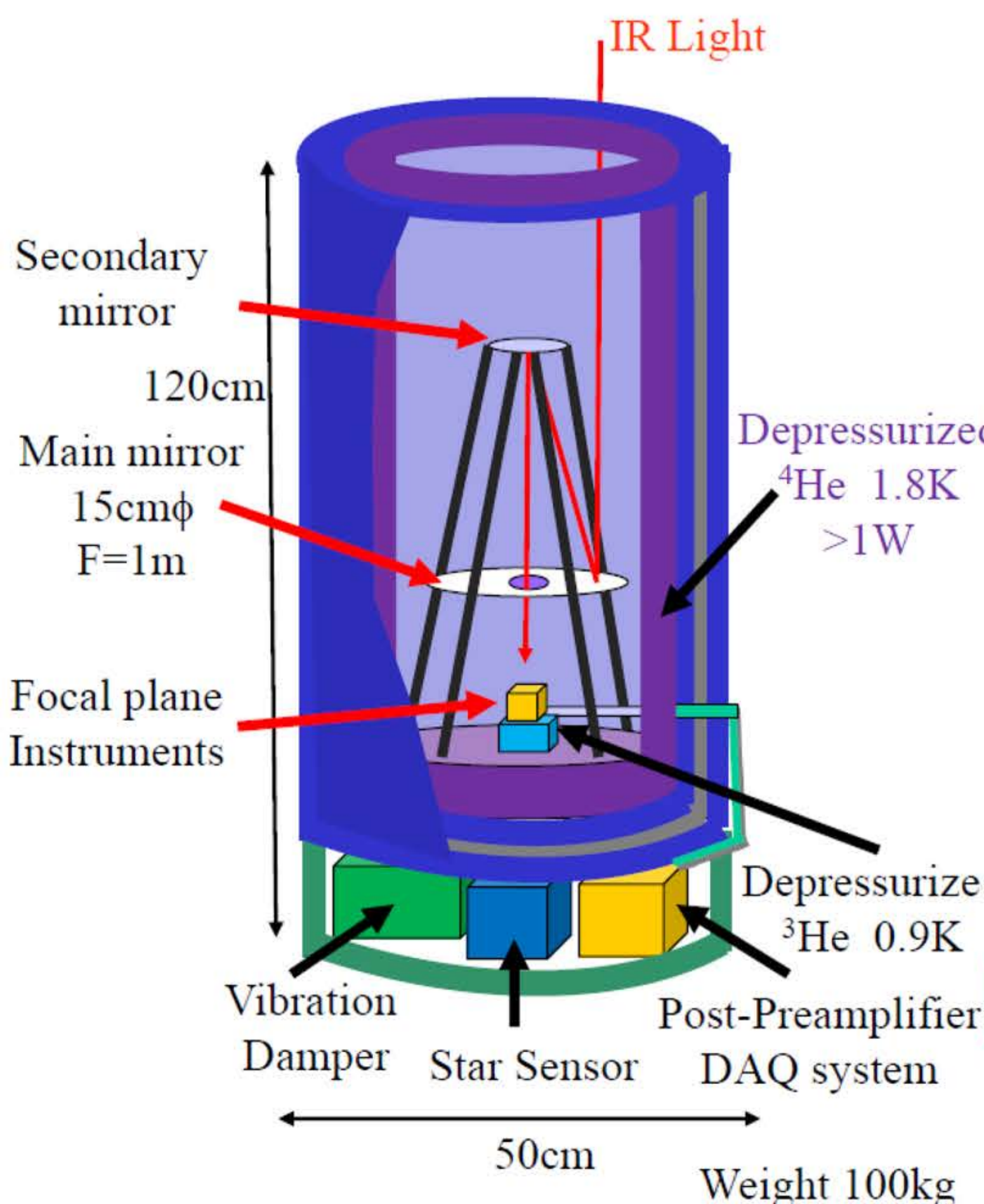
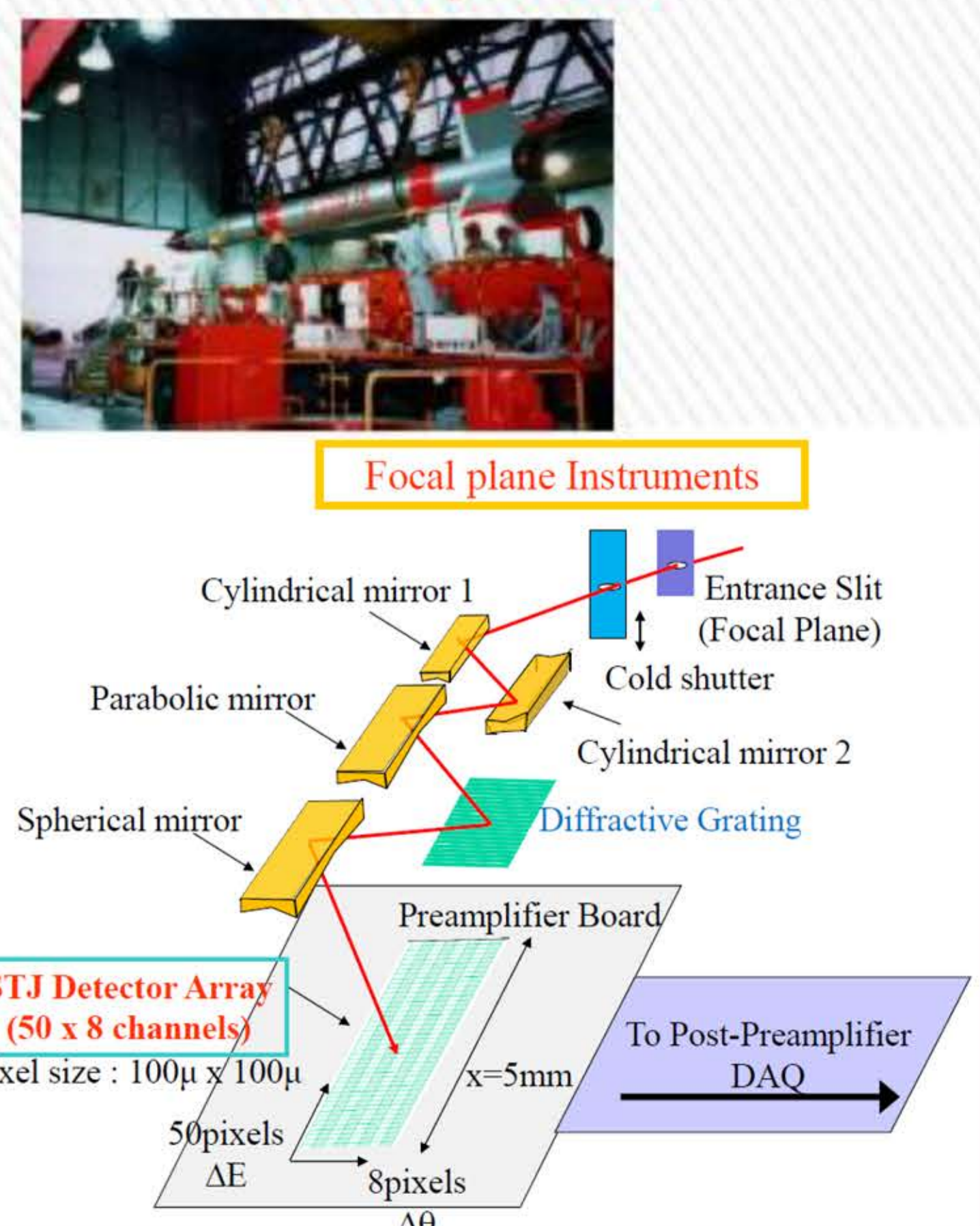
超伝導トンネル接合素子 (STJ) 赤外線検出器を搭載したロケット実験を2017年に行うことを計画している。この実験は200km以上の上空で5分間の宇宙赤外線観測を行い、ニュートリノ寿命下限を2桁改善する: $\tau(\nu_3) > 0(10^{14})$ 年。この実験は将来行う予定の宇宙背景ニュートリノ崩壊探索衛星実験の予備実験となる。

測定装置設計

エネルギーの25meVの一光子を2%のエネルギー分解能で測定するために以下のSTJ光子検出器を開発している。
• マルチピクセル Nb/Al-STJ (波長 $\lambda = 40 \sim 80 \mu\text{m}$ の一光子を回折格子と組み合わせて測定)
• ハフニウムを用いた STJ (Hf-STJ)

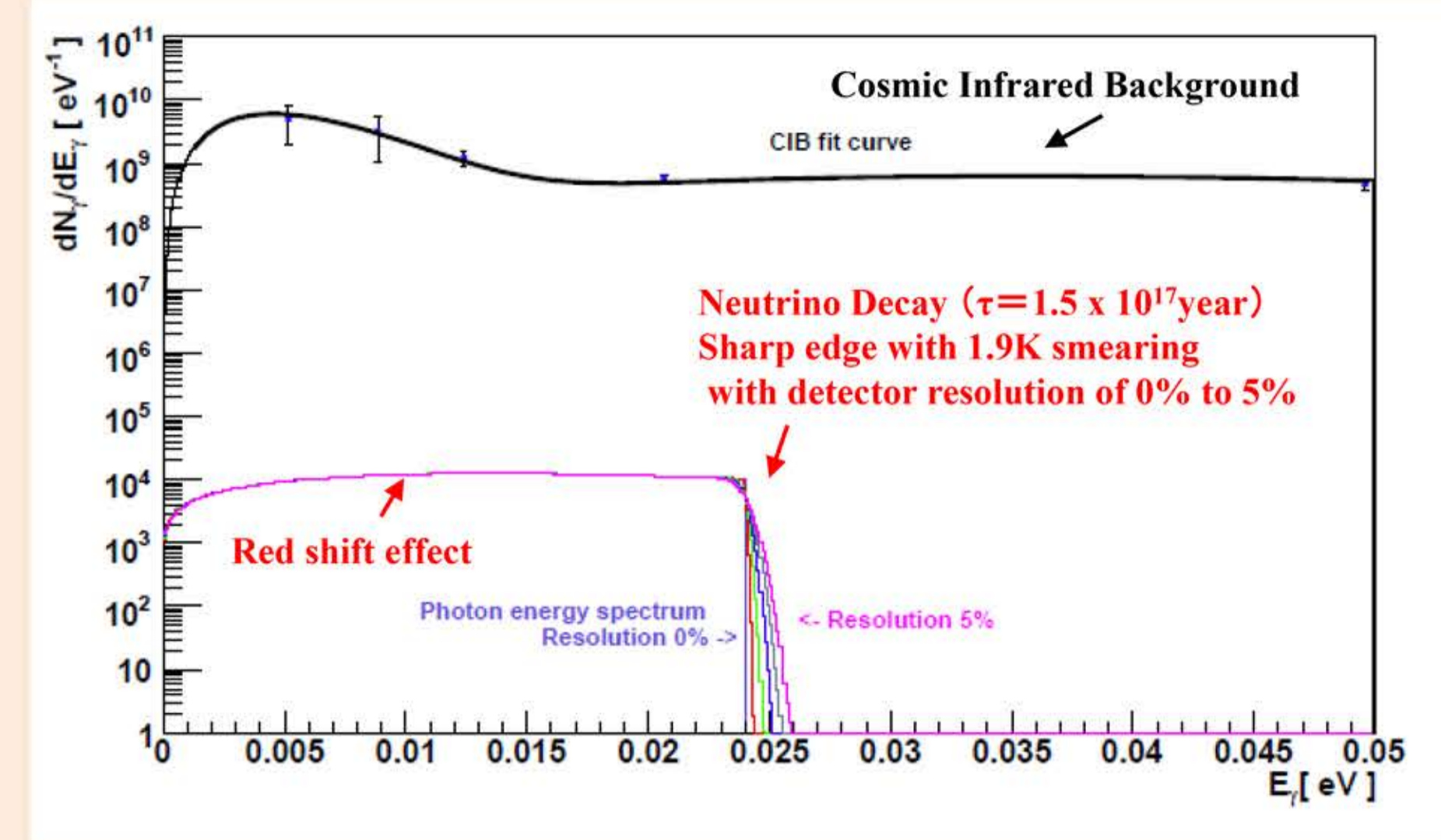
2019年に実験予定。200km以上の高度で5分間データ収集。ニュートリノ寿命下限を2ケタあげる ($\sim 10^{14}$ 年)。

JAXA Rocket CIB Experiment (Feb 2, 1992)



宇宙背景ニュートリノノ崩壊で生成する光子の検出可能性

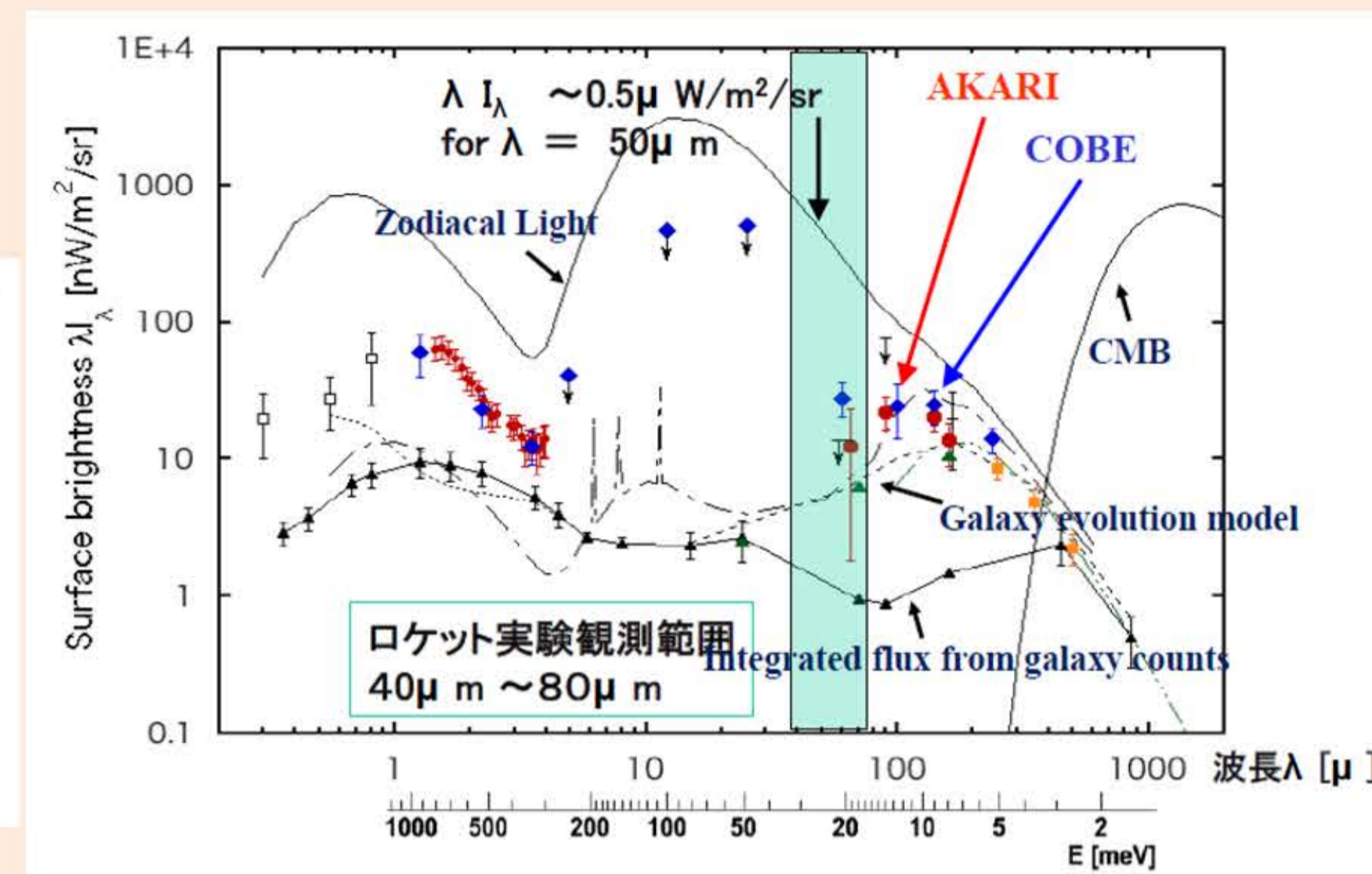
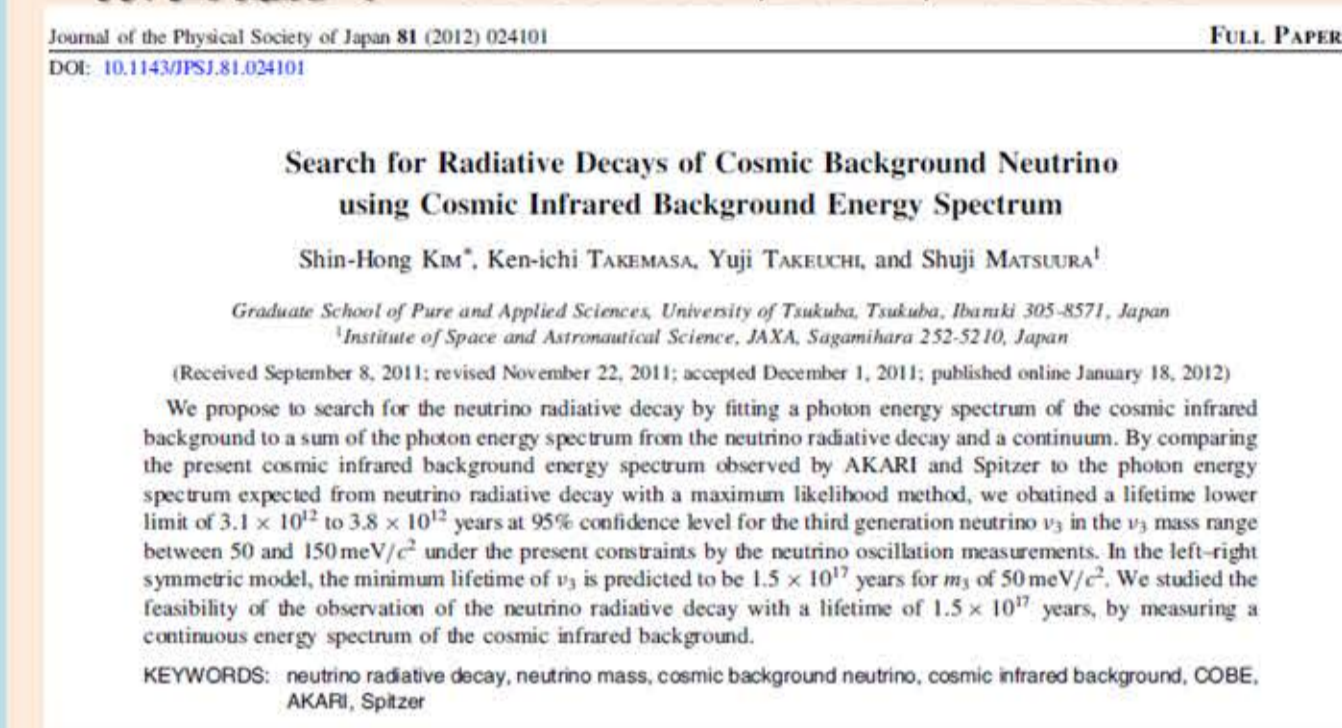
宇宙背景ニュートリノ (CvB) の崩壊で生成する光子のエネルギー分布には $E_\gamma = 25 \text{ meV}$ ($m_3 = 50 \text{ meV}$ を仮定) で鋭いカットオフができる。このカットオフは宇宙背景ニュートリノの温度分布 (平均 $T_\nu = 1.9 \text{ K}$) によってわずかに広がる。また低エネルギーの光子が宇宙膨張による赤方偏移の効果で生じる。この信号分布に対して宇宙赤外線背景放射 (CIB) は4~5桁多く存在する。我々はこの鋭いカットオフを高エネルギー分解能を有する超伝導赤外線検出器で探索する。



宇宙背景ニュートリノ崩壊探索衛星実験のシミュレーションを以下の条件で行った結果、 10^{17} 年の寿命のニュートリノ崩壊が観測可能であることがわかった。

- 黄道光のバックグラウンドがない。
- 100日間の測定。
- 直径20cmで視角0.1°の望遠鏡。
- 光子エネルギー分解能2%。

報告論文 JPSJ 81 (2012) 024101



↑ このJPSJ論文を引用

PHYSICAL REVIEW D 88, 013019 (2013)
Radiative decays of cosmic background neutrinos in extensions of the MSSM with a vectorlike lepton generation
Amin Aboubrhim,^{1,2,3,4} Tarek Ibrahim,^{1,2,3,4,5} and Pran Nath^{1,2,3,4,6}

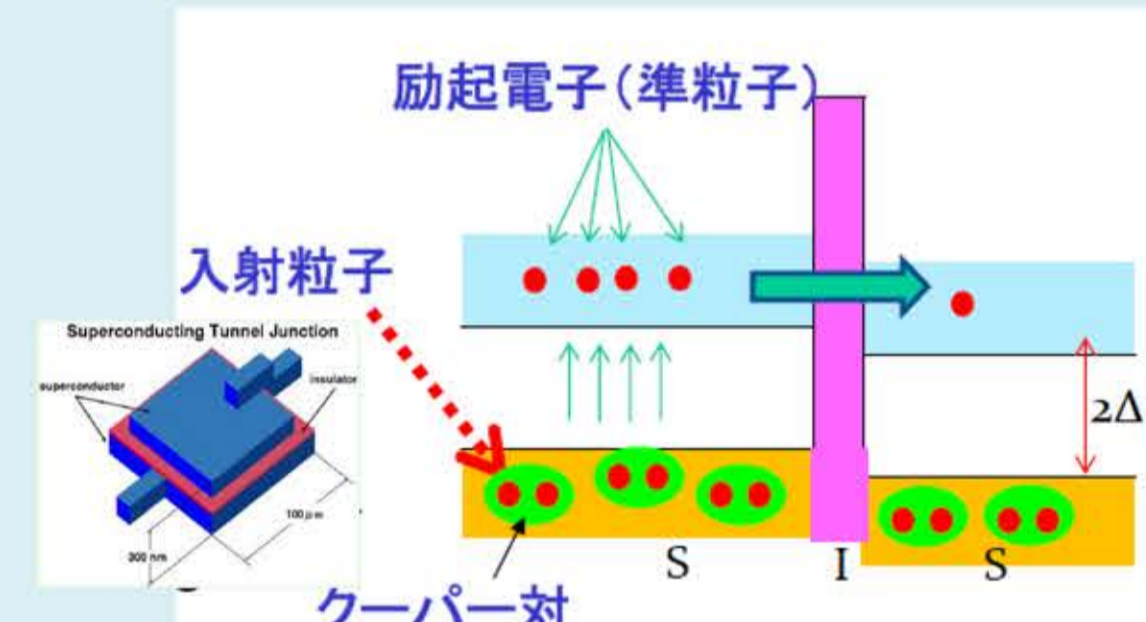
MSSM with a vectorlike lepton generation 模型
→ $\tau_\nu \sim 10^{12} \sim 10^{14}$ 年を予言

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

超伝導トンネル接合素子 (Superconducting Tunnel Junction: STJ) 光検出器の開発研究

STJ光検出器

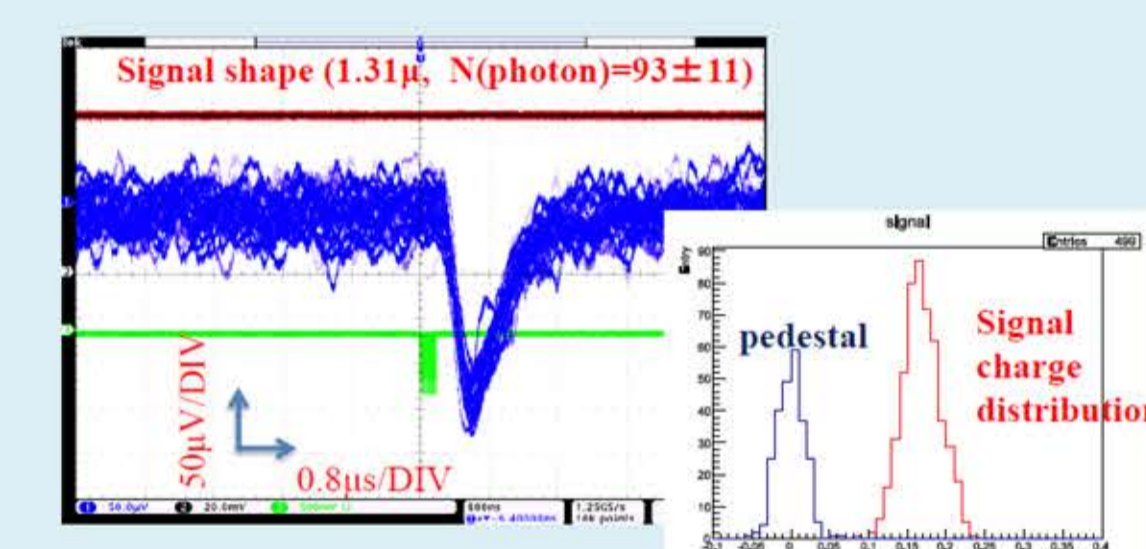
入射粒子によって、超伝導体のエネルギーギャップの上に励起された電子(準粒子)はトンネル効果で1~2 nm厚のトンネル障壁を通過。そのトンネル電流を測定することによって、個々の入射粒子のエネルギーを測定。エネルギーギャップが、通常の検出器(半導体検出器等)に比べて桁違いに小さいので遠赤外線光子検出に有効。



Nb/Al-STJ

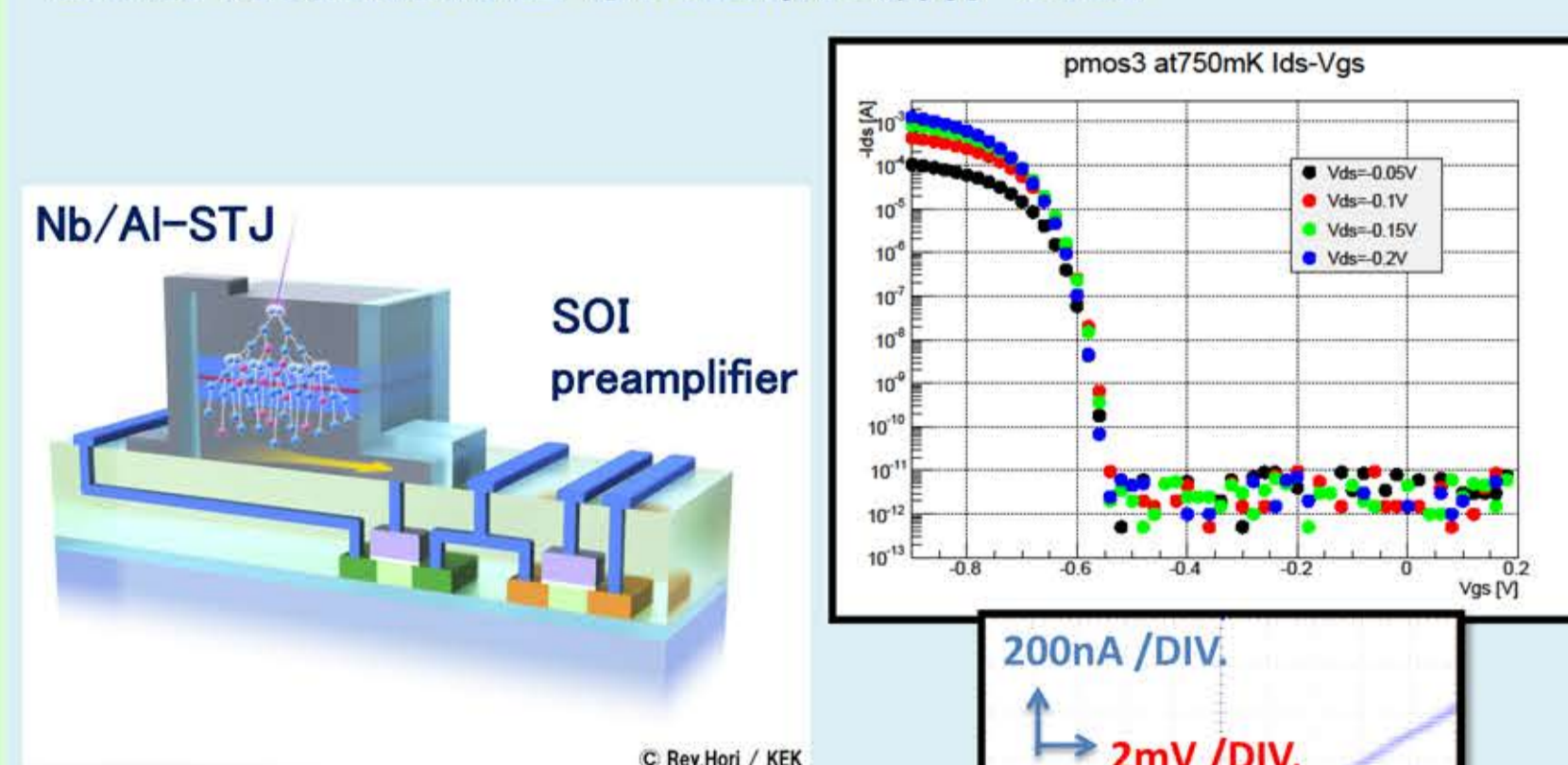
超伝導体としてNbとAlを重ね合わせたNb/Al-STJを開発している。開発目標は波長50μm程度の遠赤外線光を一光子検出することである。1.9KにおけるNb/Al-STJ (100μ x 100μ) の赤外線レーザー (1.31μm) に対する応答信号の時間幅はFWHM1μsecである。

ノイズはプリアンプのノイズなので、極低温で動作するSOIアンプのようなプリアンプを用いる必要がある。



SOI-STJ

SOI (Silicon-On-Insulator) プリアンプ基板上に直接Nb/Al-STJをプロセスしたSOI-STJ一体型検出器を作成した。極低温0.75KでNb/Al-STJ検出器とSOI MOSFETとともに正常に動作した。



After applying 150 Gauss to STJ.

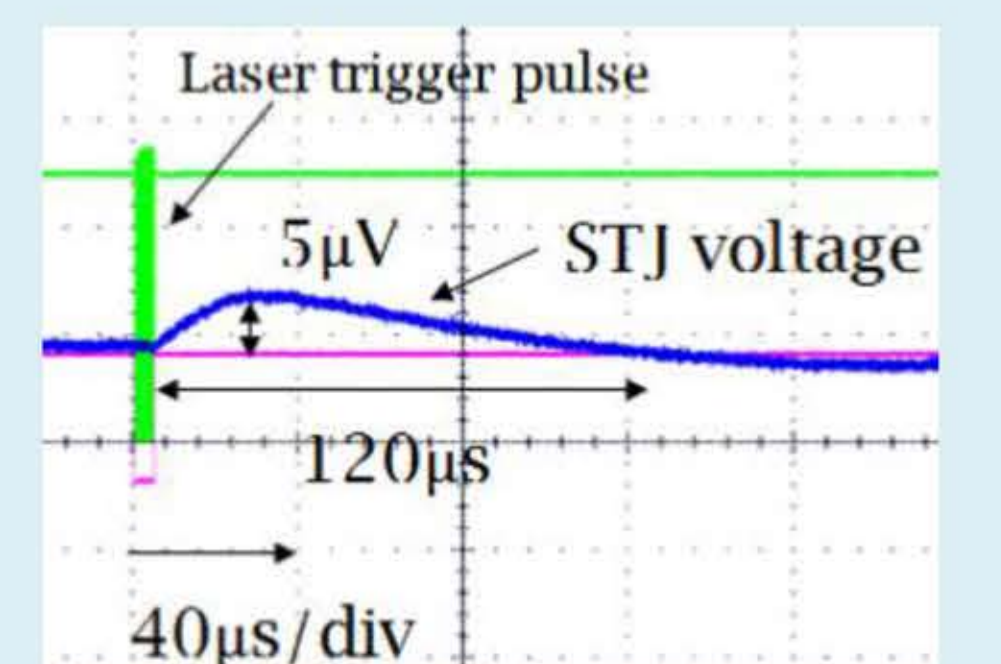
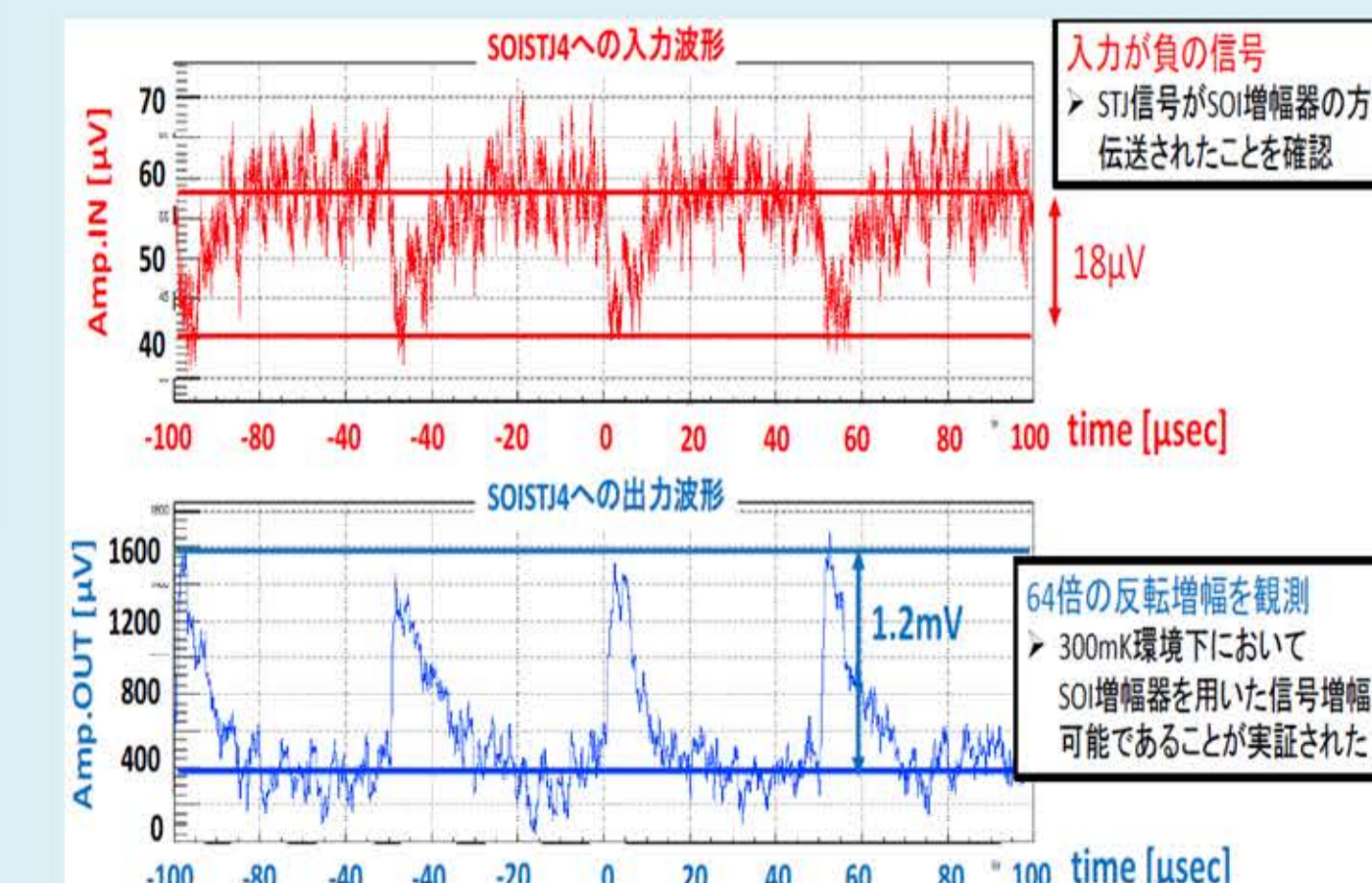
Hf-STJ

ハフニウムはエネルギーギャップが $\Delta_{Hf} = 20 \mu\text{eV}$ とNbの $\Delta_{Nb} = 1.55 \text{ meV}$ と比べて極めて小さいので、より低いエネルギーの光子を検出するのに有効である。ハフニウムを用いたHf-STJは、回折格子なしで、マイクロカメラとして $E_\gamma = 25 \text{ meV}$ の光子をエネルギー分解能2%で測定することができる。衛星実験ではHf-STJを用いる予定である。

右図に示すようにHf-STJで可視光レーザーパルスの信号を検出することに世界で初めて成功した。

極低温SOIプリアンプでのSTJ光応答信号の増幅

極低温SOIプリアンプを用いてNb/Al-STJの光応答信号を増幅することに成功。
レーザー: 波長465nm, 20kHz 温度: 370mK



まとめ

- 左右対称模型が正しければ、ニュートリノ寿命下限が 10^{17} 年程度となり、ニュートリノ崩壊 ($\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$) を検出することが可能であることを示した。
- 宇宙背景ニュートリノの崩壊で生成する遠赤外線光子を検出するために、STJ赤外線検出器を開発しており、この検出器を搭載した宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験 (COBAND実験) を準備中である。

Rate/50pixel-spectrometer = 15 kHz (300Hz/pixel)
Measurements for 200 s → 3M events /50pixel-spectrometer.
Using 8 x 50pixel-spectrometer, $\sigma/N=0.04\%$
 $2\sigma = 0.08\% \times 0.5 \mu\text{W}/\text{m}^2/\text{sr} = 0.4 \text{ nW}/\text{m}^2/\text{sr}$ (0.8% times present limit $50 \text{ nW}/\text{m}^2/\text{sr}$)