

# Research Core for the History of the Universe (RCHOU) and Cosmic Background Neutrino Decay Search(COBAND)

Shinhong Kim (Leader of RCHOU and COBAND)

at Seoul National University  
Feb. 24, 2015

宇宙史国際研究拠点

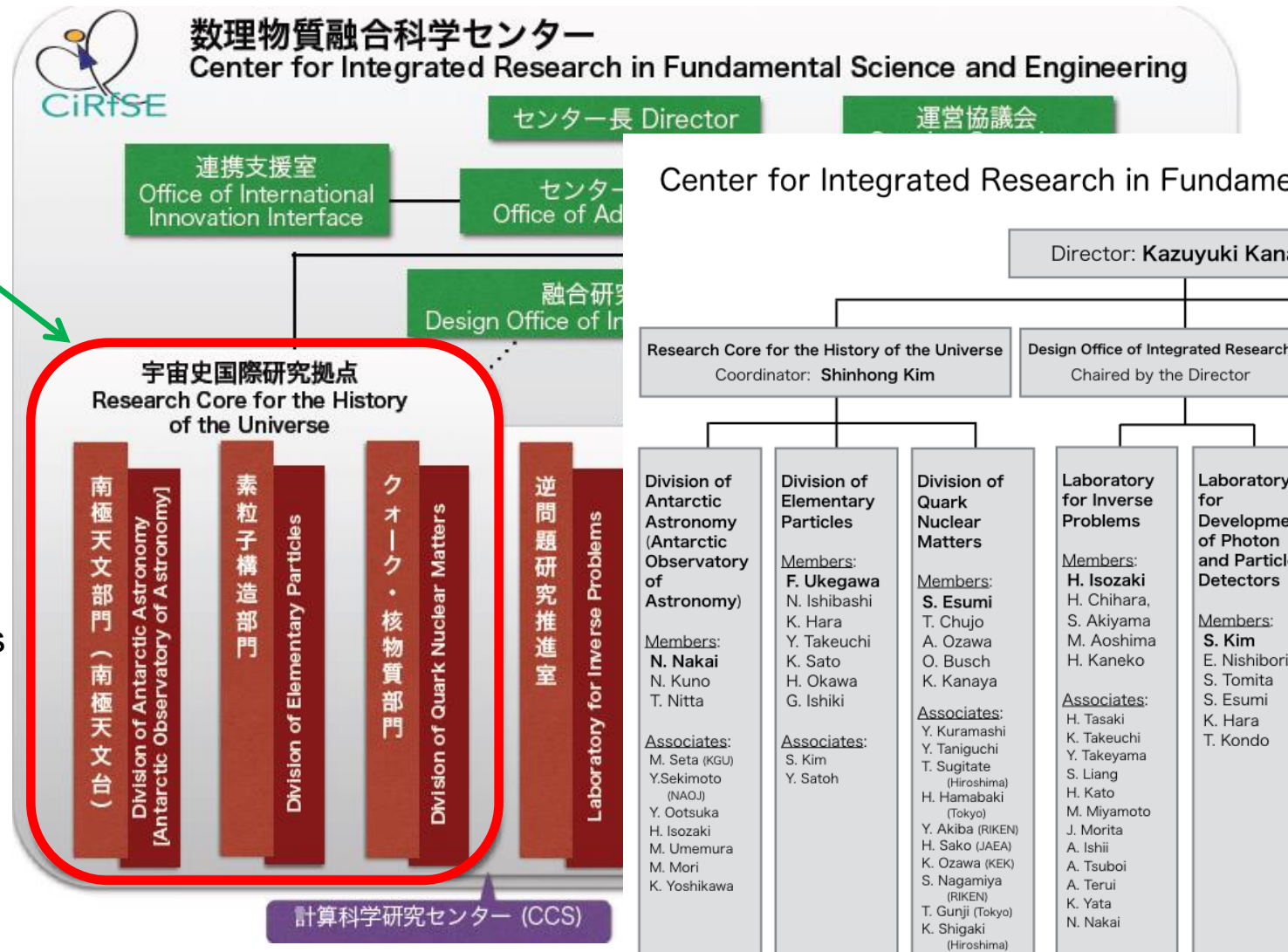
Research Core for the History of the Universe

数理物質融合科学センター

Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering, University of Tsukuba



# Research Core for the History of the Universe



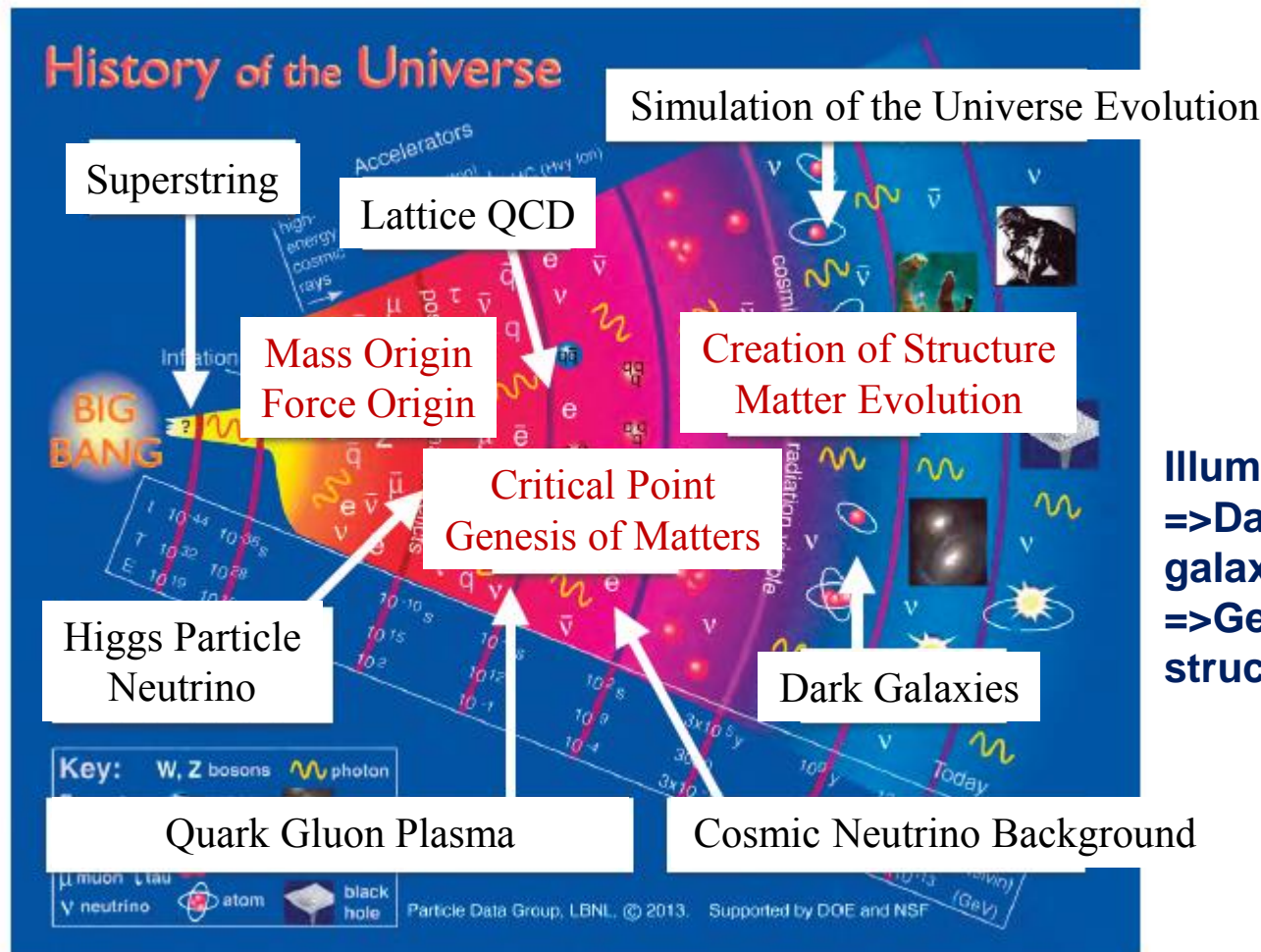
Three Divisions:

- Antarctic Astronomy
- Elementary Particles
- Quark and Nuclear matters

# 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



# 数理物質融合科学センター

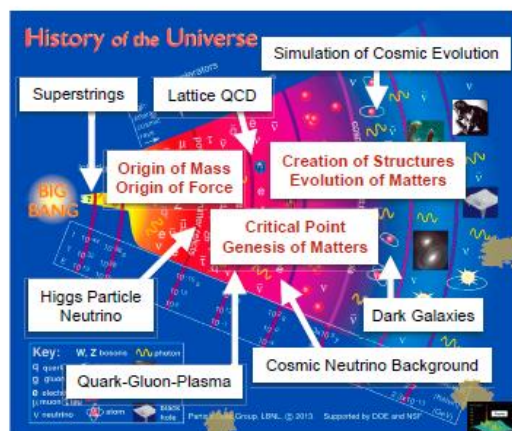


筑波大学  
University of Tsukuba

Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering, University of Tsukuba

## 宇宙史国際研究拠点

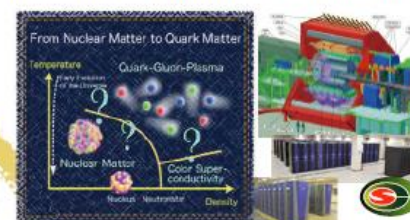
### Research Core for the History of the Universe



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

Coordinator: **Prof. Shinhong Kim**

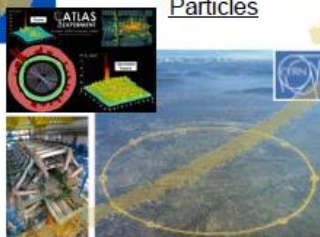
### Division of Quark Nuclear Matters



Principal Investigator: **Asso.Prof. Shinichi Esumi**

Clarification of the nature of the high-temperature quark-gluon-plasma state several  $\mu$  seconds after the Big Bang as well as the high-density nuclear matter in the core of neutron stars. Identification of the critical point expected at intermediate temperature and density.

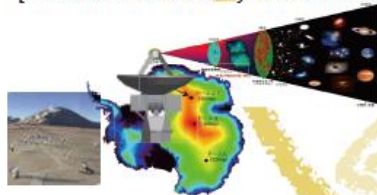
### Division of Elementary Particles



Principal Investigator: **Prof. Fumihiko Ukegawa**

Through experimental study of Higgs particle and neutrinos together with theoretical study of superstrings, understand the fundamental structure of particles and clarify the History of the Universe.

### Division of Antarctic Astronomy [Antarctic Observatory of Astronomy]



Principal Investigator: **Prof. Naomasa Nakai**

Clarification of the formation and evolution of the first galaxies and the Universe through deep space observation by the Antarctic Telescope and other Observatories.

"Consortium of Antarctic Astronomy"

"Consortium of the History of the Universe"

Development of data analysis methods in collaboration with Lab. for Inverse Problems

### Illuminate the "Darkness":

=> Dark Matter, Dark Energy, Dark Galaxies, ...

=> Genesis of matters, creation of structures, and their evolution.



# Schedule of Research Core for the History of the Universe

	初年度 2016	2年目 2017	3年目 2018	4年目 2019	5年目 2020	6年目 2021	
宇宙背景 ニュートリノ Cosmic Background neutrino	超伝導検出器開発・制作		ロケット実験	データ解析			
			超伝導検出器開発・制作			衛星実験・データ解析	
南極天文台 Antarctic Astronomy	電波カメラ開発		10m望遠鏡 制作・評価		輸送・建設	観測	
			超大規模電波カメラ開発		30m望遠鏡 設計・試作		
クォーク・ 核物質 Quark Gluon Plasma	PHENIX実験@BNL		データ解析				
	ALICE実験@CERN					実験@CERN	
ヒッグス 粒子 Higgs	13 TeV ATLAS実験@CERN						
						実験@CERN	
不安定 原子核 Unstable Nuclei	N ≈ 50 RIBF実験@RIKEN						
			稀少RIリング アップグレード		N ≈ 126 RIBF実験@RIKEN		
	宇宙モデルによるシミュレーション => 実験・観測との直接比較 => 宇宙論パラメータの精密決定						
宇宙・物質 シミュレーション			=> 暗黒物質、暗黒エネルギーの詳細説明 => 宇宙構造形成、銀河形成理論の確立				
	元素創生モデルによるシミュレーション => RIBF実験との直接比較						
					=> 南極天文台観測との直接比較		
		宇宙史 研究会	宇宙史 国際WS		宇宙史 研究会	宇宙史 国際シンポ	

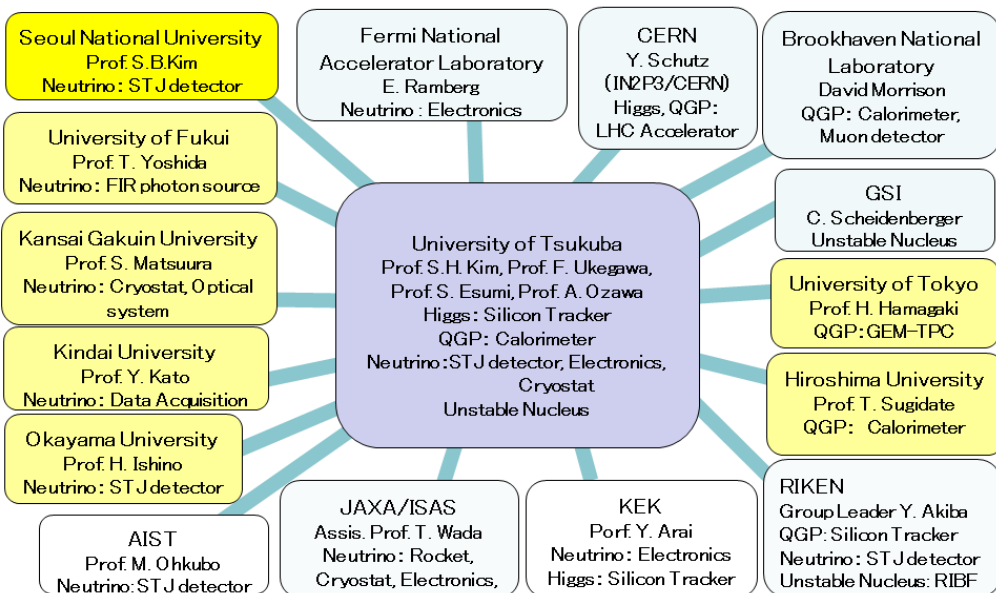
These five projects were approved as large research projects in Master Plan 2014 by Science Council of Japan.

# Consortiums in Research Core for the History of the Universe

Two consortiums in Research Core for the History of the Universe develop the studies on the History of the Universe under the following international collaboration.

## Consortium of the History of the Universe

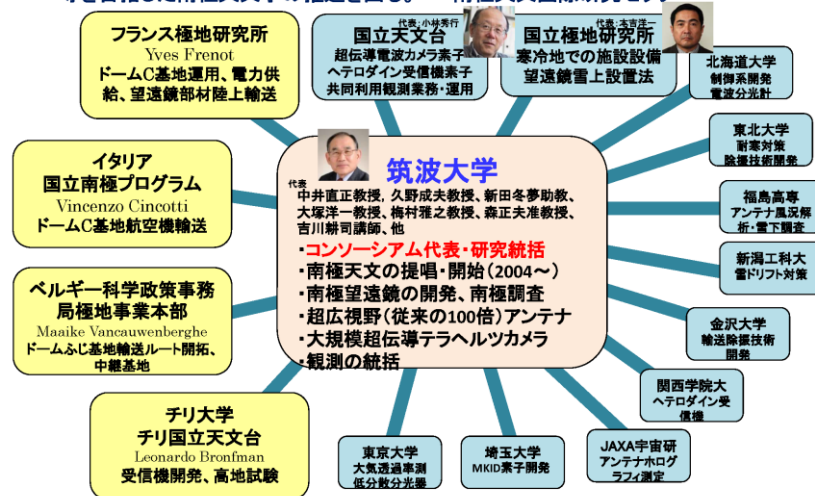
Research Core for the History of the Universe put forward the study on the History of the Universe based on the international consortium "Consortium of the History of the Universe".



## Consortium of the Antarctic Astronomy

### 南極天文コンソーシアム

筑波大学を中心とする全国大学・研究機関と海外研究所・大学が暗黒銀河の解明等を目指した南極天文学の推進を図る。→ 南極天文国際研究センター



# Workshop on the History of the Universe

**2015/9/30 International conference TGSW2015**

**Session of Universe Evolution and Matter Origin**

**Tsukuba Global Science Week 2015 (TGSW2015)**

**Universe Evolution and Matter Origin**

**Date: September 30<sup>th</sup>, 2015 9:00~17:30**

**Place: Tsukuba International Congress Center Room300**

**Number of Participants: 53 (10 foreign researchers including five invited speakers)**

The Research Core for the History of the Universe conducts research in the fields of elementary particles, nuclear physics and astrophysics, with the aim of understanding them from a unified view of the history of the universe. In this Session, invited speakers from abroad and internal researchers reviewed recent progress in respective research programs, and the prospects for the near future were discussed, helping to establish future directions of the Center.



**Program details are placed in the following URL:**

**<http://hep.px.tsukuba.ac.jp/CiRfSE/RCHOU/TGSW/2015/>**

**2014/9/29 International conference TGSW2014**

**Session of Universe Evolution and Matter Origin**

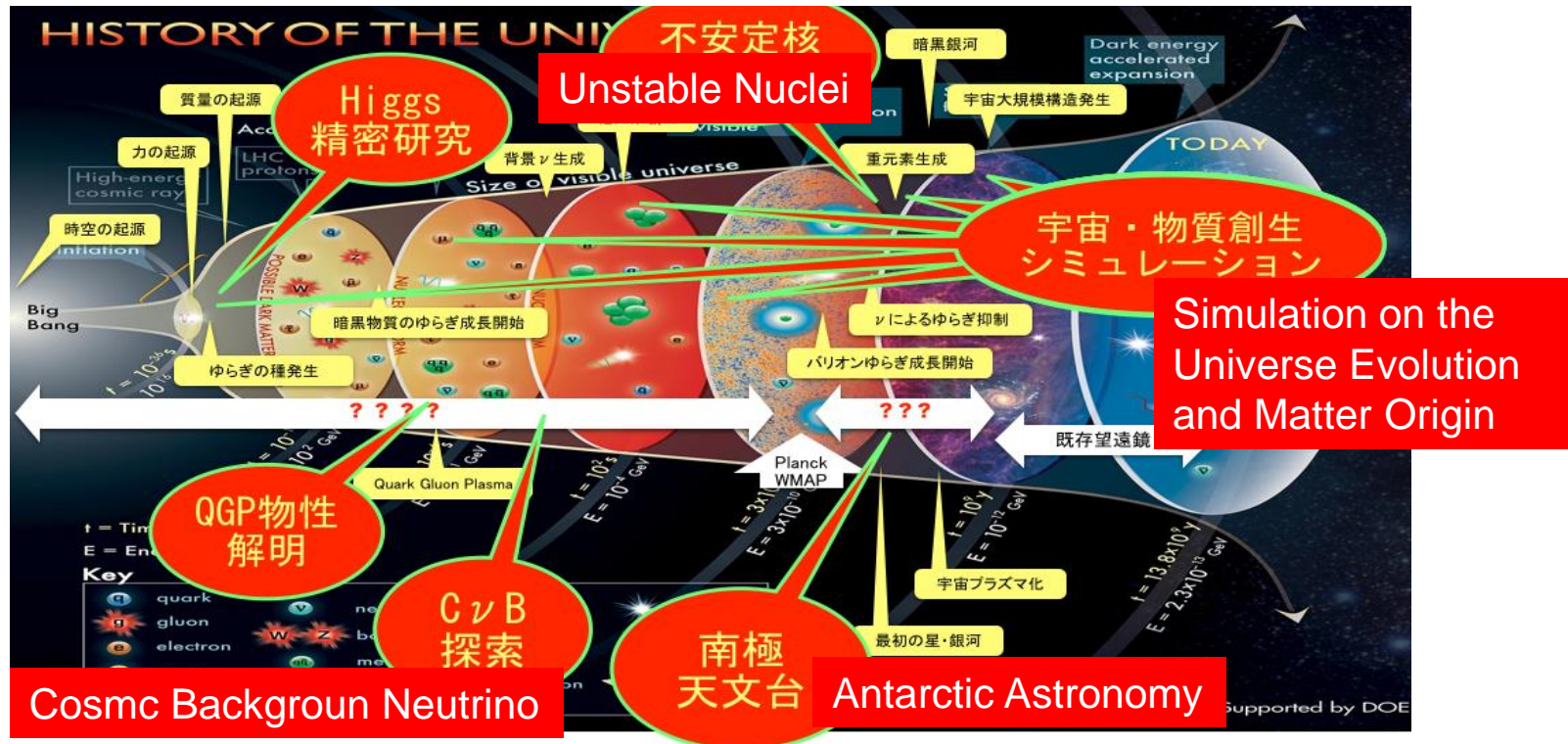


# 概算要求：宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成

Budget Request to MEXT:

International Research Center to illuminate the Darkness in the History of the Universe

Aiming at illuminating the Darkness in the History of the Universe



- ☑ 生命につながる元素の起源？
- ☑ 宇宙の構造の起源？ 力・物質・時空の起源？
- ☑ 実験的に未解明の領域(暗黒)が多く残されている。

- ☞ 最先端の宇宙観測、素粒子・原子核実験プロジェクトを有機的に融合
- ☞ 現象とメカニズムの同時解明
- ☞ 物質と生命の起源に迫る新領域の国際的研究ネットワークを形成

Five experiment projects and simulation studies which led by University of Tsukuba group are integrated and developed to illuminate the darkness such as dark galaxies, dark matter<sup>8</sup> and dark energy in the History of the Universe.

Approved for April 2016 to March 2022 (24,800kYen/year).  
Budget for Researchers of Research Unit and Crossover Appointment.

# International Research Center based on a core of University of Tsukuba

## - Experimental and Theoretical studies on the History of the Universe -

- ★ 筑波大学に、実験・観測・理論の高い研究力が集中。つくばのKEKやJAXA等も合わせ、宇宙史全分野にわたる最先端の研究力・融合に向けての実績がこれだけ集中した場所は少なく、国際連携拠点の構築基盤として最適。
- ★ 数理物質融合科学センター(CiRfSE) と計算科学研究センター(CCS)を核とし、そこで主導している**宇宙史コンソーシアム**、**南極天文コンソーシアム**、**計算基礎科学連携拠点**の国際共同研究ネットワークを筑波大学で接続・融合。
- ★ 混合給与(クロス・アポイントメント)制度を活用して、主要研究グループの分室を筑波大学に集中。これらの大融合拠点としての筑波大学のハブ機能を強化。

## Consortium of the Computational Fundamental Science



## Consortium of the History of the Universe

## Consortium of the Antarctic Astronomy



# Collaboration System with Research Units and Cross-Appointment Researchers

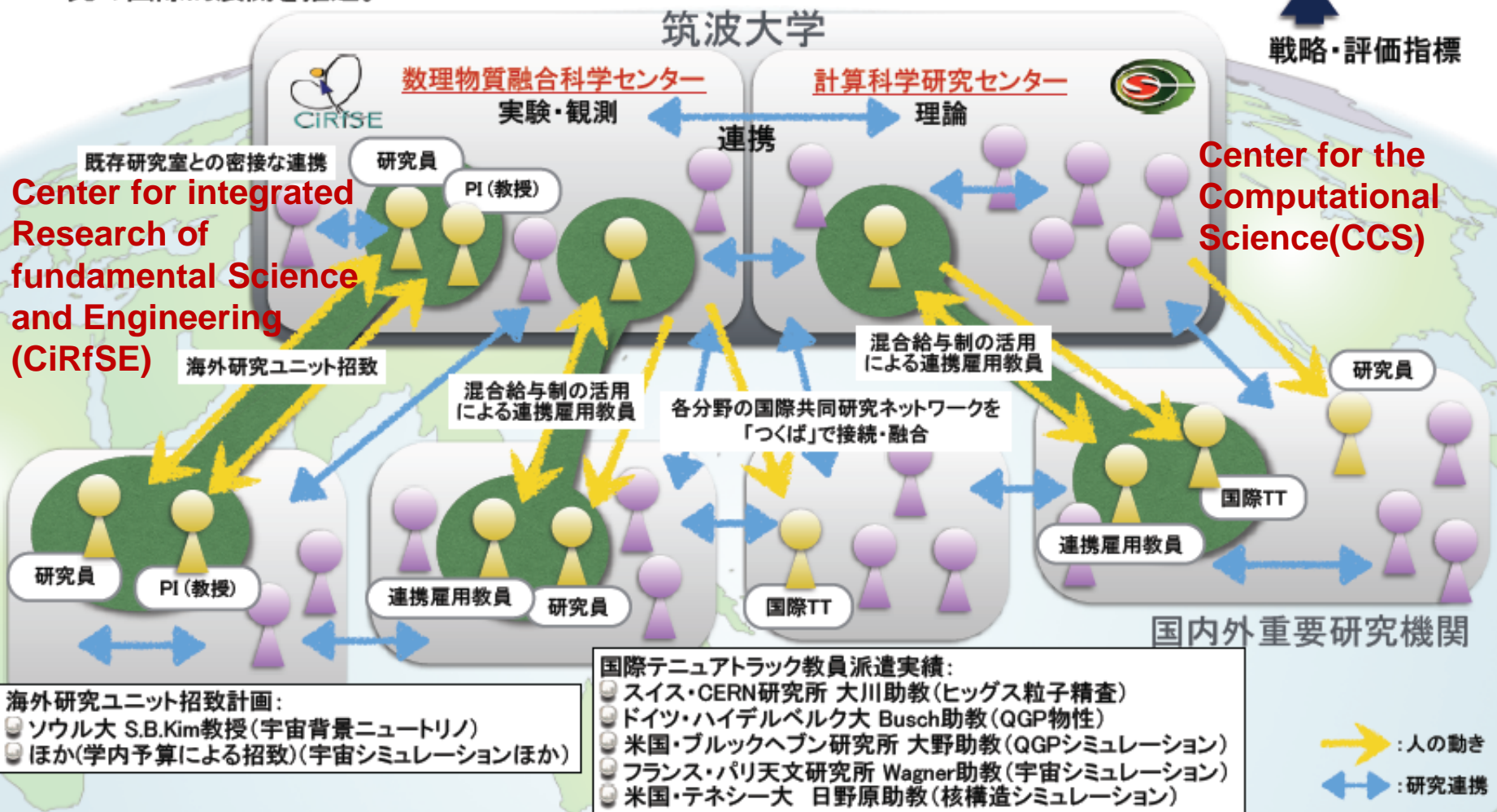
- ★ 海外研究ユニット招致(副PIつくば常駐、混合給与なども活用)と、国際テニュアトラック教員の活用・研究員の交換により、国際共同研究体制を強化。
- ★ 国際研究ネットワークと、海外に派遣した国際TT教員・研究員を通じて、融合研究の国際的展開を推進。



国内外の人材交流・  
共同研究のハブとなる。



戦略・評価指標





# **Cosmic Background Neutrino Decay Search (COBAND)**

# Division of Elementary Particles : Higgs and Neutrino

The origin of the mass and matter



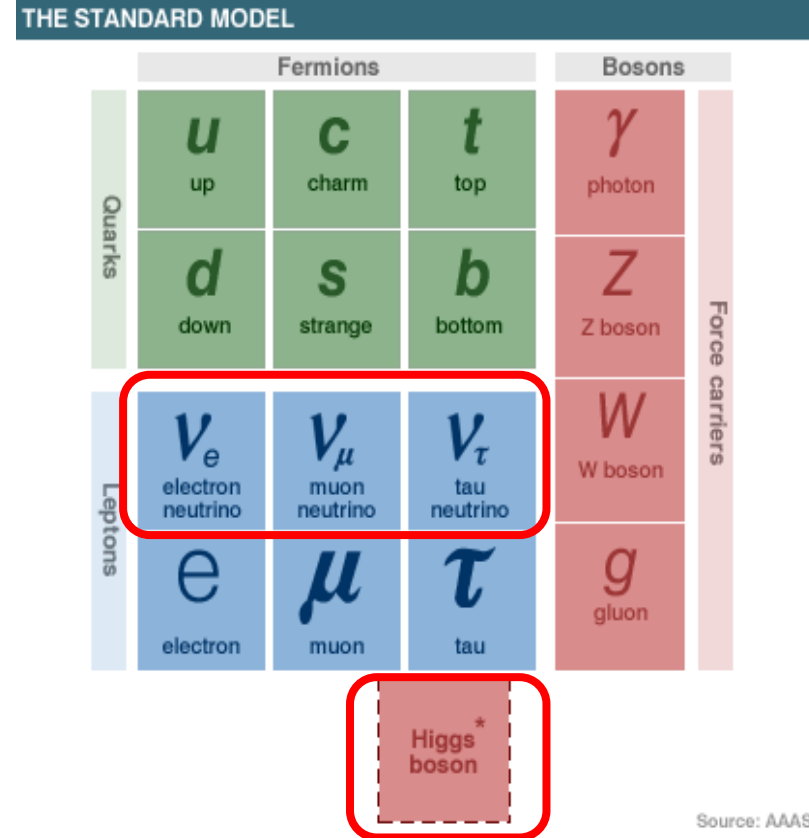
Studies on Neutrinos and Higgs.

Neutrino :

- Neutrino masses
- Cosmic background neutrino

Higgs :

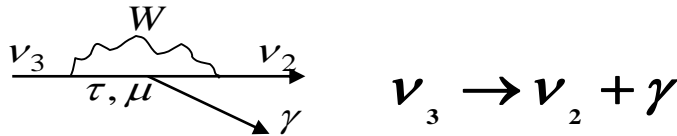
- Coupling to bosons and fermions
- Search for other Higgs such as heavy neutral Higgs and charged Higgs



Source: AAAS

# Motivation of Search for Cosmic Background Neutrino Decay

- Only neutrino mass is unknown in elementary particles. Detection of neutrino decay enables us to measure an independent quantity of  $\Delta m^2$  measured by neutrino oscillation experiments. Thus we can obtain neutrino mass itself from these two independent measurements.

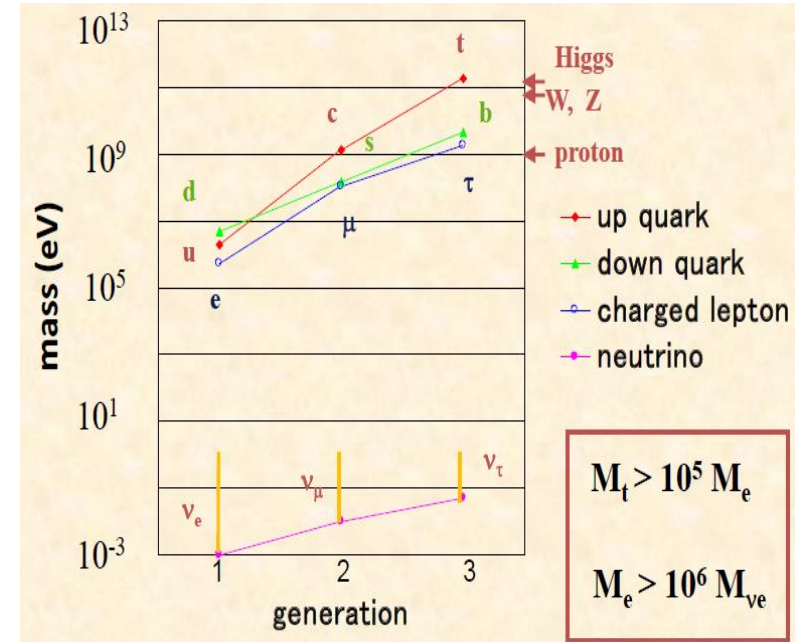


$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3} = \frac{\Delta m_{23}^2}{2m_3}$$

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

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

(Far - Infrared region  $\lambda = 50 \sim 125 \mu$ )

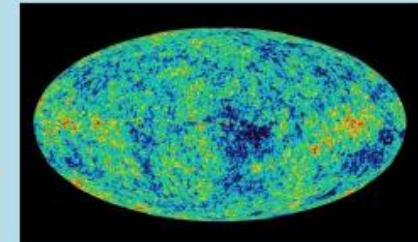
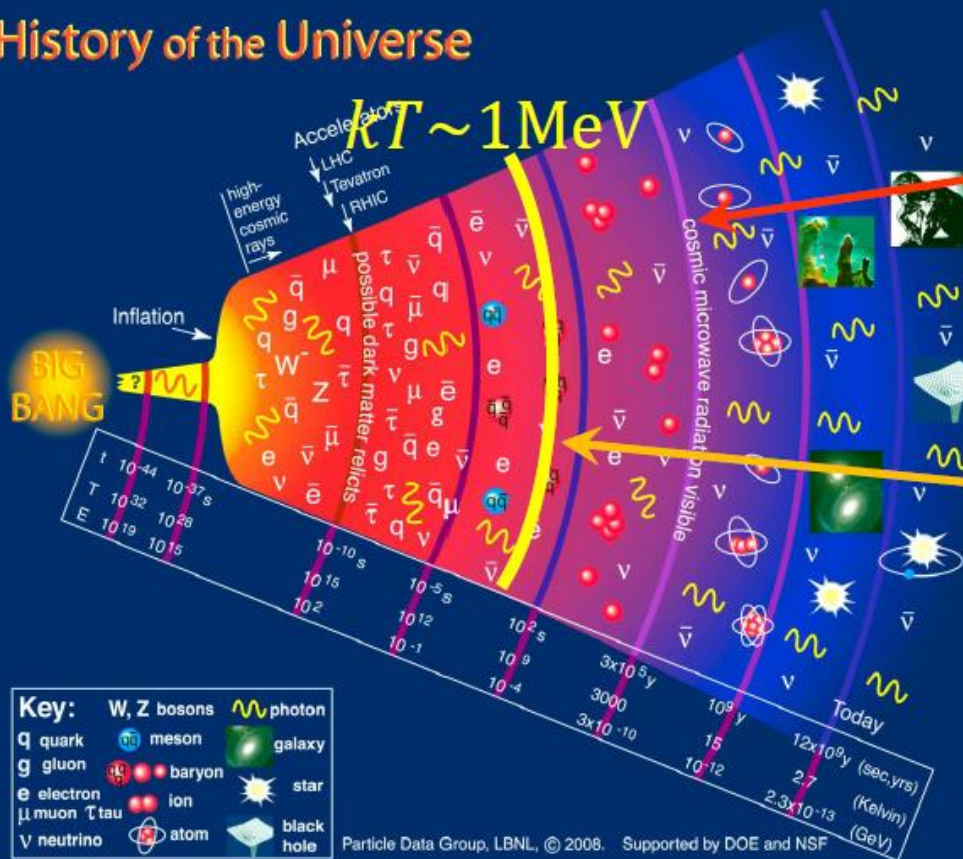


- As the neutrino lifetime is very long, we need use cosmic background neutrino to observe the neutrino decay. To observe this decay of the cosmic background neutrino means a discovery of the cosmic background neutrino predicted by cosmology.
- Left-Right symmetric model predicts the neutrino lifetime larger than  $10^{17}$  year while the standard model predicts  $2 \times 10^{43}$  year. Measured neutrino lifetime limit  $\tau > 3 \times 10^{12}$  year.



# Big-Bang Cosmology and Cosmic Background Neutrino (CvB)

## History of the Universe



**CMB**

$$n_\gamma = 411/\text{cm}^3$$

$$T_\gamma = 2.73 \text{ K}$$

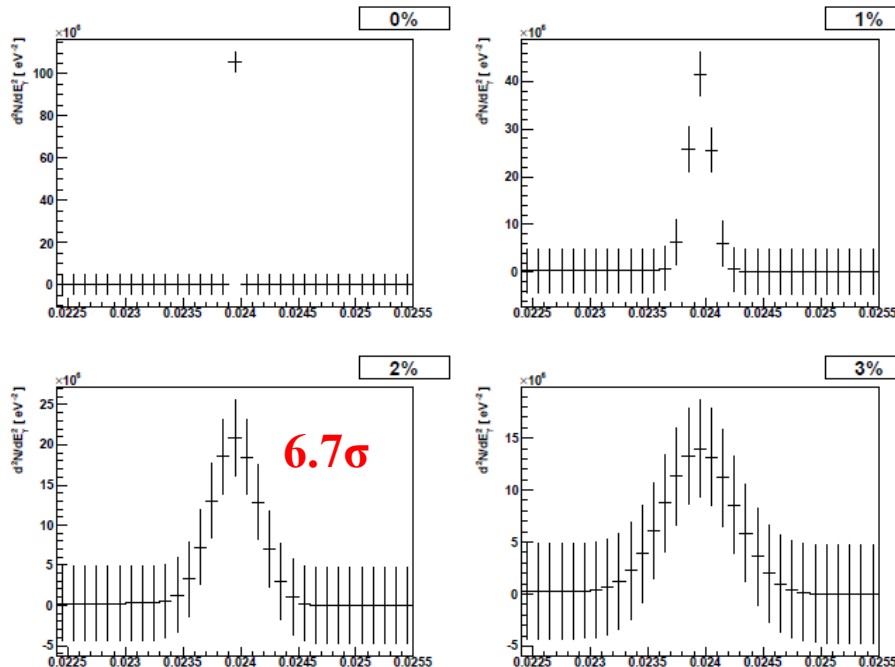
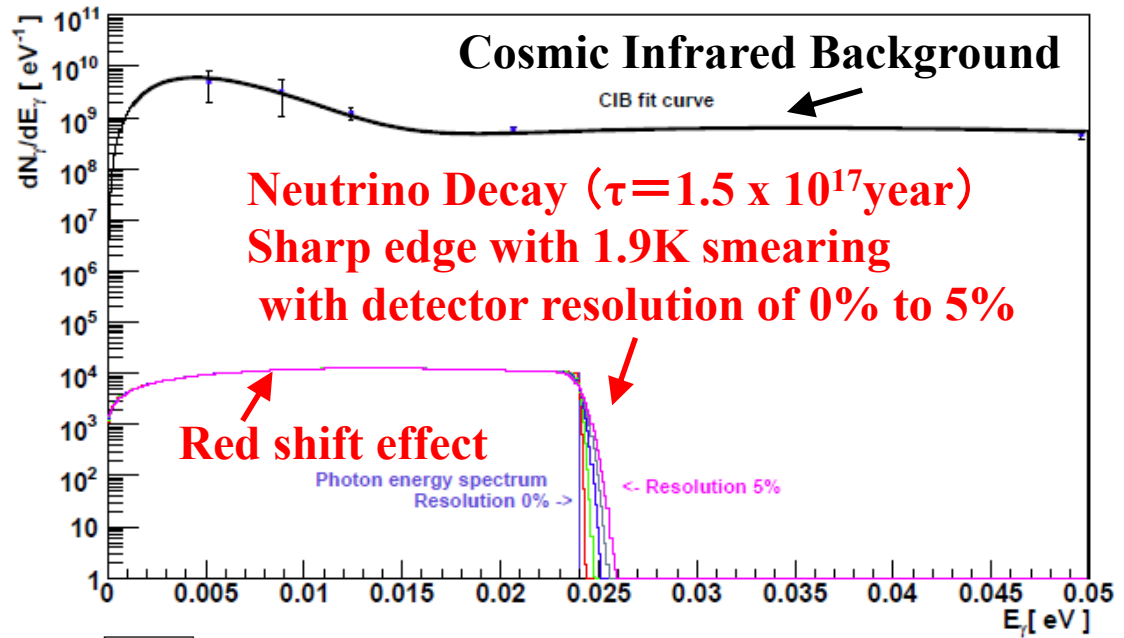
**CvB**

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

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

# Neutrino Decay Detection Sensitivity

100-day running with  
a telescope with 20cm diameter,  
a viewing angle of 0.1 degrees  
and 100% detection efficiency  
( Satellite Experiment )

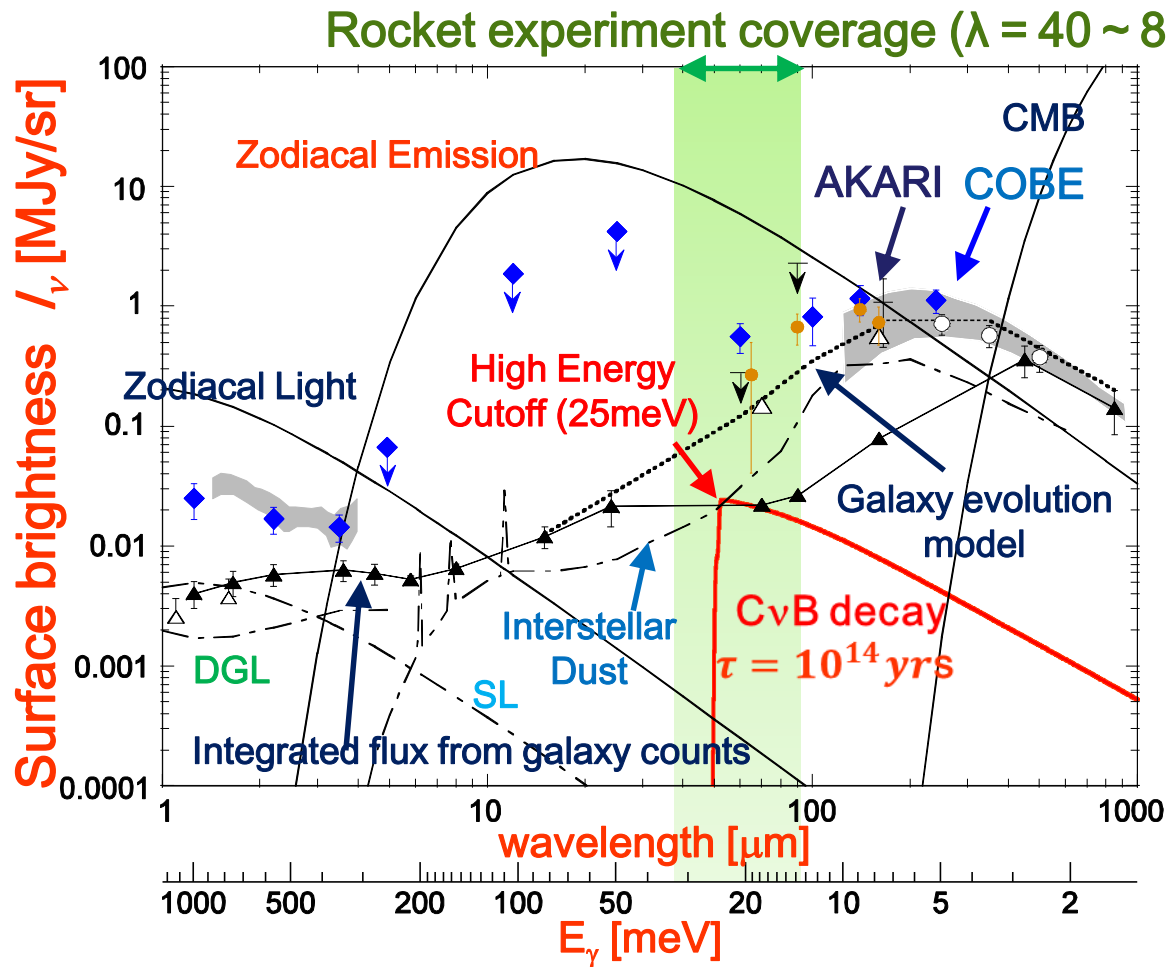


$dN/dE_\gamma$

$-d^2N_\gamma/dE_\gamma^2$

- Need the energy resolution better than 2%.
- Can observe the  $\nu_3$  decay with a mass of 50meV, and a lifetime of  $1.5 \times 10^{17}$  year at **6.7 $\sigma$** .

# Signal of Cosmic Background Neutrino Decay and its Backgrounds



CIB  
measurements  
(• AKARI,  
♦ COBE)

By measuring the energy spectrum of the Zodiacal Emission with the CvB decay continuously, we can see the CvB decay signal as a high energy cutoff.

## Requirements for the detector

- Continuous spectrum of photon energy around  $E_\gamma \sim 25 \text{ meV}$  ( $\lambda = 50\mu\text{m}$ )
- Energy measurement for single photon with better than 2% resolution for  $E_\gamma = 25 \text{ meV}$  to identify the sharp edge in the spectrum
- Rocket and/or satellite experiment with this detector



# JAXA Rocket Experiment for Neutrino Decay Search

Plan: 5minutes data acquisition at 200 km height in **2018**.

Improve the current limit of lifetime  $\tau(\nu_3)$  by two orders of magnitude ( $\sim 10^{14}$  years)

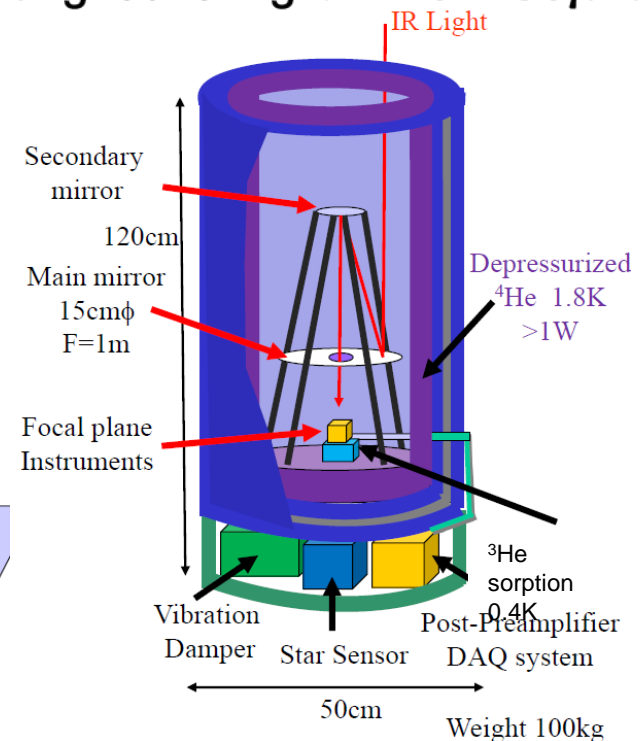
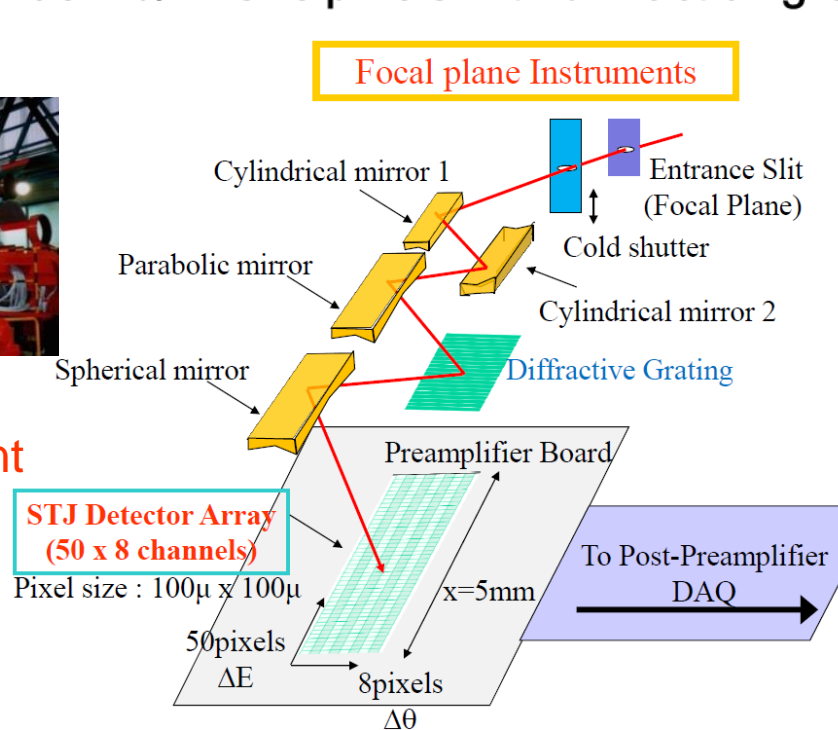
» Superconducting Tunneling Junction (STJ) detectors in development

> Array of 50 Nb/Al-STJ pixels with diffraction grating covering  $\lambda = 40 - 80\mu m$



JAXA Rocket  
CIB Experiment

(Feb 2, 1992)



**Satellite experiment after 2020  $\rightarrow$  sensitivity of  $\tau(\nu_3) \sim 10^{17}$  year**

> STJ using Hafnium: Hf-STJ for satellite experiment ( S. H. Kim et al. JPSJ 81,024101 (2012) )

- $\Delta = 20\mu eV$  : Superconducting gap energy for Hafnium
- $N_{q.p.} = 25meV/1.7\Delta = 735$  for 25meV photon:  $\Delta E/E < 2\%$  if Fano-factor is less than 0.3

# Sensitivity to neutrino decay

Parameters in the rocket experiment simulation

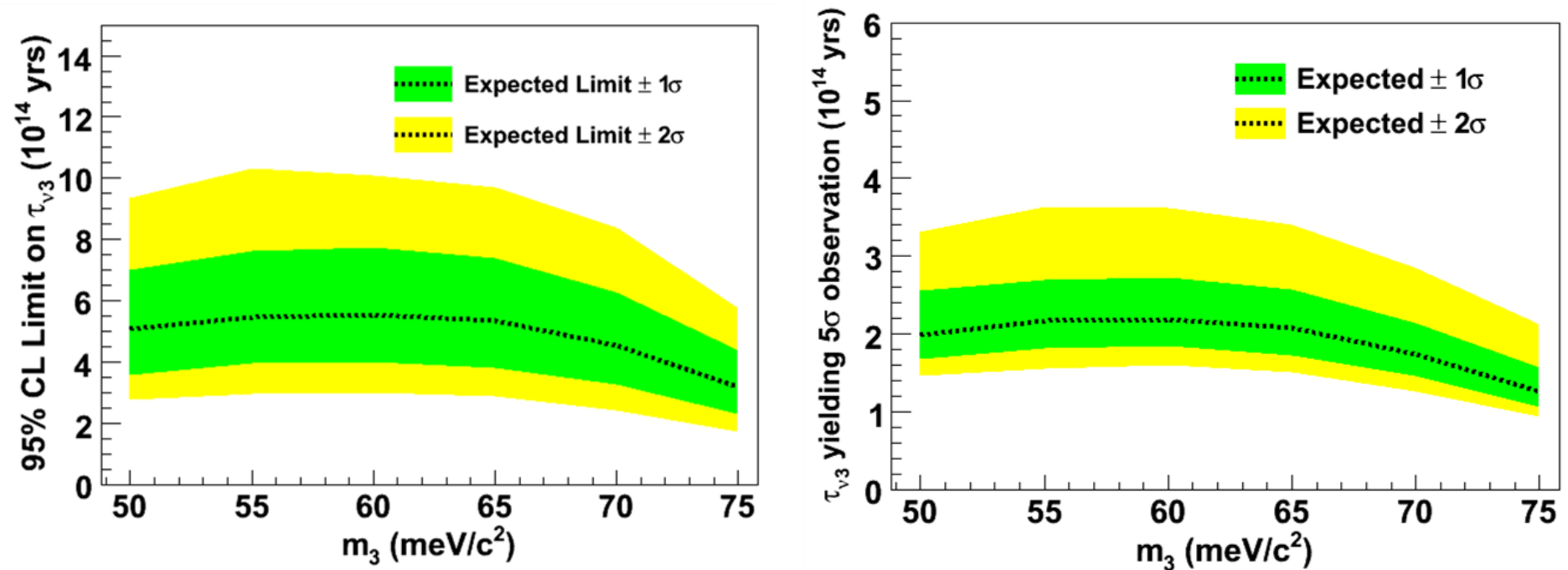
telescope dia.: 15cm

50-column ( $\lambda$ : 40 $\mu\text{m}$  – 80  $\mu\text{m}$ )  $\times$  8-row array

Viewing angle per single pixel: 100 $\mu\text{rad}$   $\times$  100 $\mu\text{rad}$

Measurement time: 200 sec.

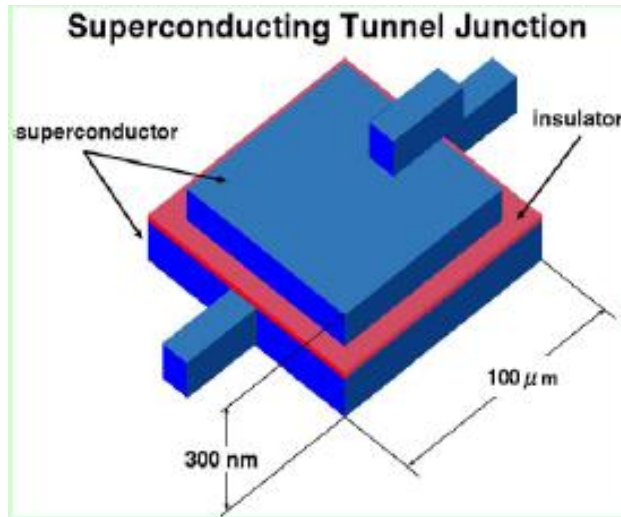
Photon detection efficiency: 100%



- Can set lower limit on  $\nu_3$  lifetime at  $4\text{--}6 \times 10^{14}$  yrs if no neutrino decay observed
- If  $\nu_3$  lifetime were  $2 \times 10^{14}$  yrs, the signal significance is at 5 $\sigma$  level

# STJ (Superconducting Tunnel Junction) Detector

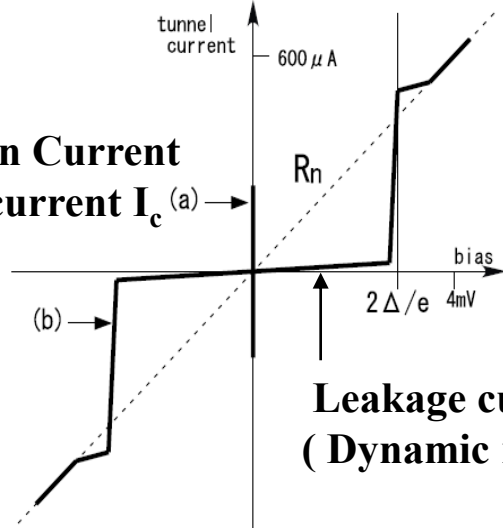
Superconductor / Insulator / Superconductor Josephson Junction



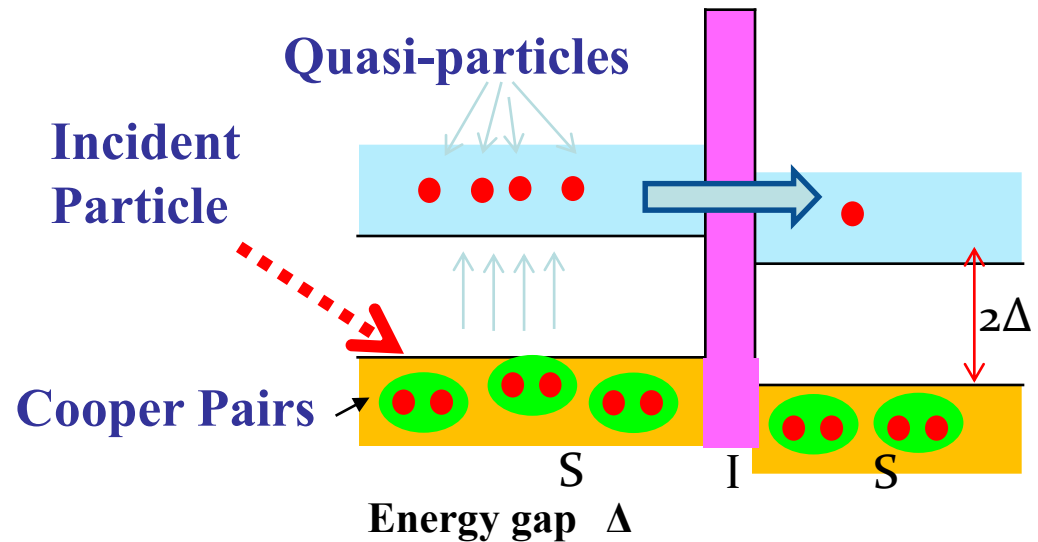
At the superconducting junction, quasi-particles over their energy gap go through tunnel barrier by a tunnel effect. By measuring the tunnel current of quasi-particles excited by an incident particle, we measure the energy of the particle.

current-voltage (I-V) curve for STJ

Josephson Current  
Critical current  $I_c$  (a) →



Leakage current  
(Dynamic resistance  $R_d$  in  $|V| < 2\Delta/e$ )



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

# 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

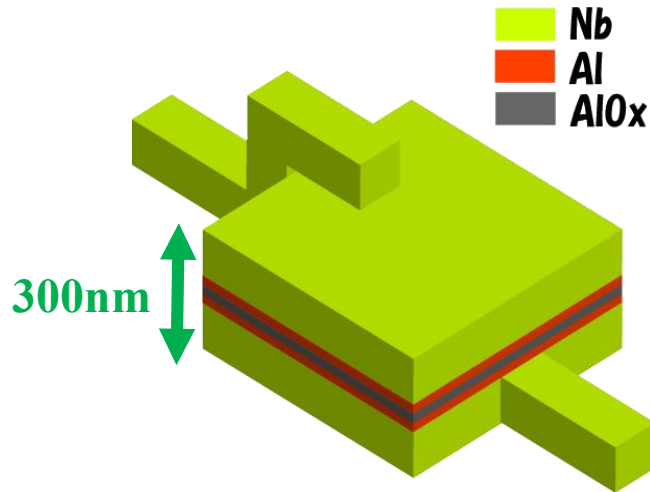
## Tc : Critical Temperature

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

We reported that Hf-STJ worked as a STJ in  
20 2011.



# Nb/Al-STJ Photon Detector



## Number of Quasi-particles in Nb/Al-STJ

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

$G_{Al}$  : Trapping Gain In Al (~10)

$E_0$  : Photon Energy

$\Delta$  : E-Gap in superconductor

### For 25meV single photon

$$N_q = 10 \frac{25 \text{ meV}}{1.7 * 1.550 \text{ meV}} = 95 \text{ e}$$

## Back tunneling Effect → Trapping Gain

Quasi-particles near the barrier can mediate Cooper pairs, resulting in true signal gain

- Bi-layer fabricated with superconductors of different gaps  $\Delta_{Nb} > \Delta_{Al}$  to enhance quasi-particle density near the barrier

- Nb/Al-STJ

Nb(200nm)/Al(10nm)/AlOx/Al(10nm)/Nb(100nm)

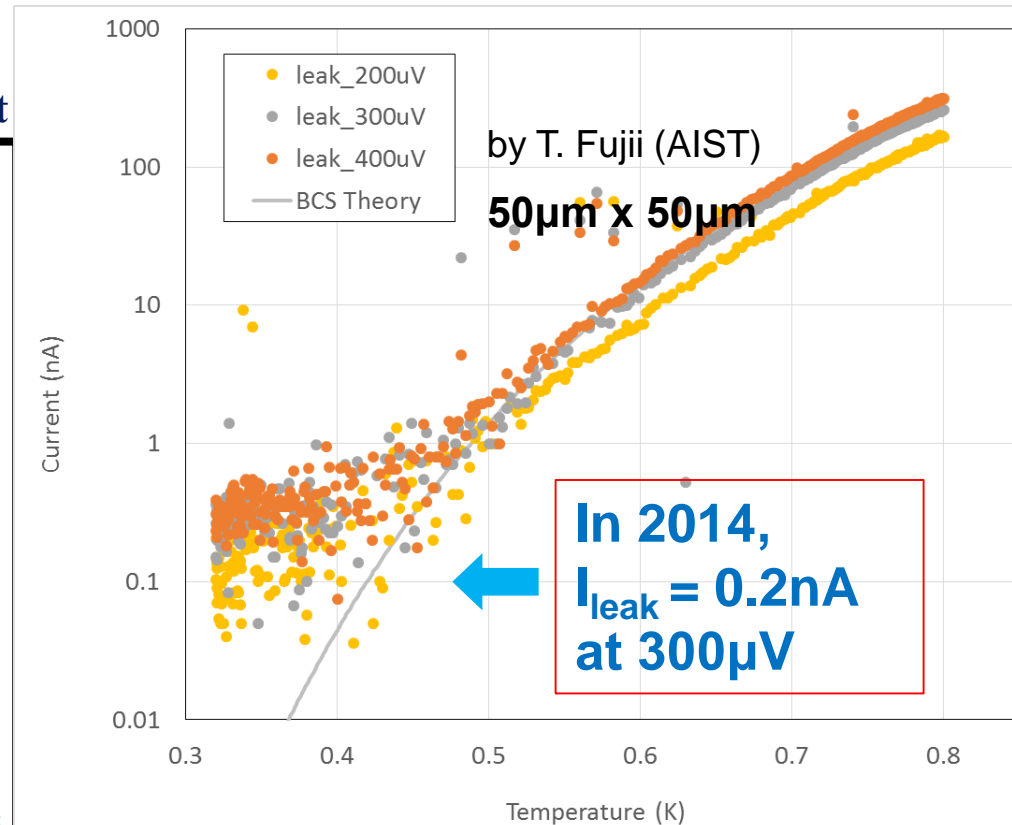
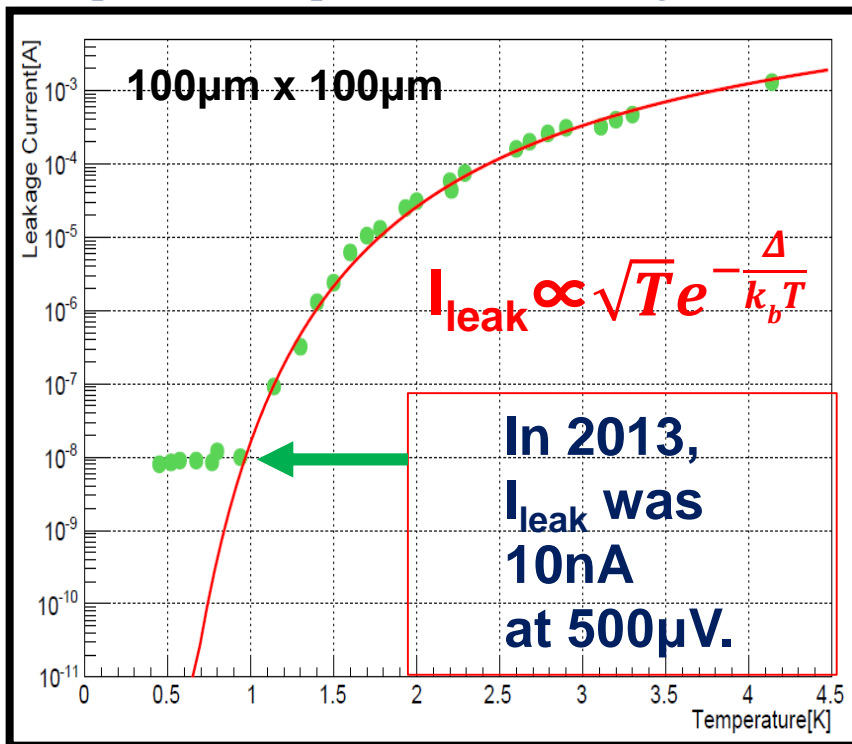
Gain: 2 ~ 200

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

# Requirement for Leakage Current of Nb–Al/STJ

- Leakage current  $I_{\text{leak}}$  should be below 0.1nA to detect a single far-infrared photon ( $\lambda = 40 - 80 \mu\text{m}$ ).

## Temperature Dependence of Leakage Current



In 2014, AIST group joined us and produced Nb/Al-STJ with AIST CRAVITY processing system.

Leakage current has satisfied our requirement of 0.1nA.



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	<b>39<math>\pm</math>13 pA</b>
10 x 10 $\mu\text{m}^2$	20	<b>14<math>\pm</math>7 pA</b>

# Response of Nb/Al-STJ Detector to Laser Light

## Nb/Al-STJ

Goal: detection of a single far-infrared photon in the energy range of 15 – 30 meV ( $\lambda = 40 - 80 \mu\text{m}$ ) for the rocket experiment for neutrino decay search.

- Refrigerator of setup

<sup>3</sup>He sorption refrigerator without refrigerant(0.3K)

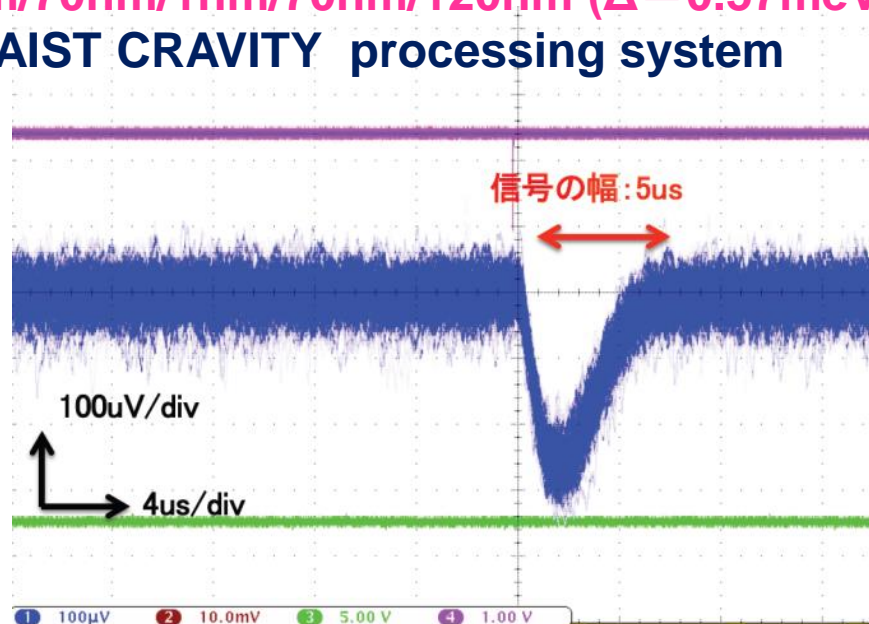
- rapid test cycle ( 2days )
- short preparation period (1day)

- Structure of Nb/Al-STJ

Nb/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al/Nb layer thickness

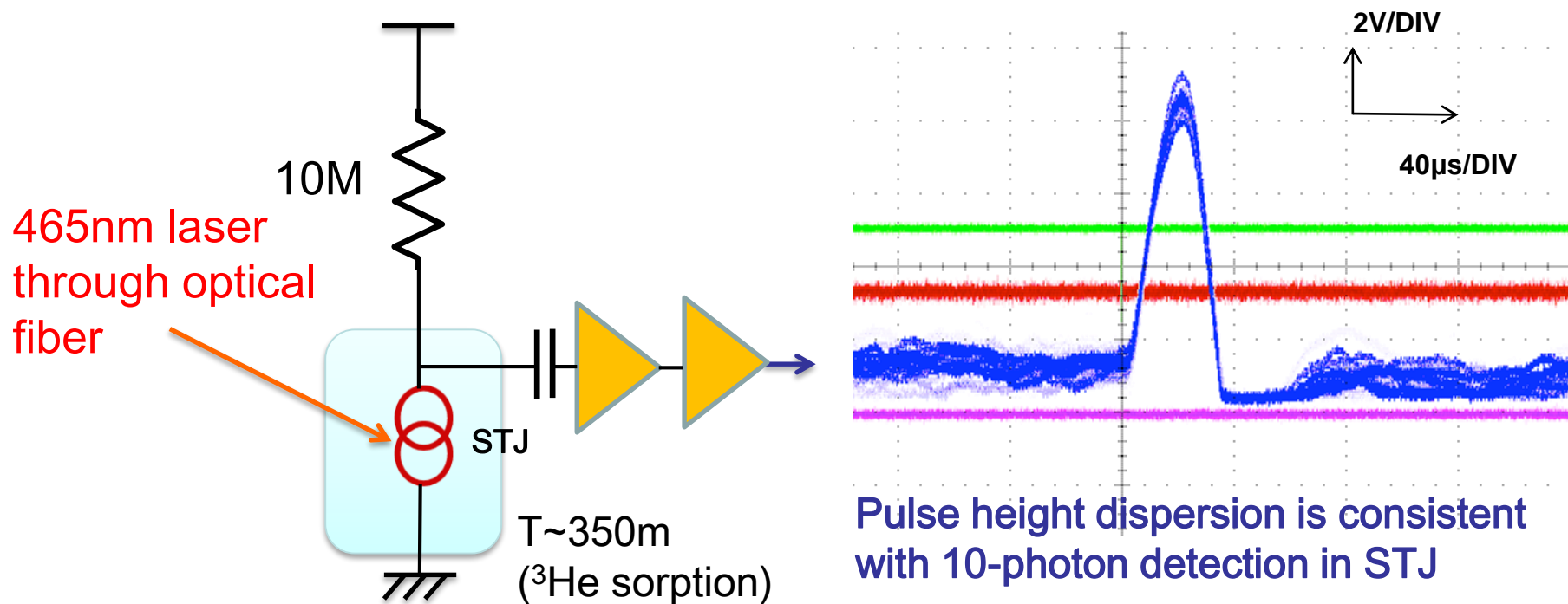
100nm/70nm/1nm/70nm/120nm ( $\Delta = 0.57 \text{ meV}$  )

made with AIST CRAVITY processing system





# Response of Nb/Al-STJ Detector to Laser Light



A response from Nb/Al-STJs to NIR-VIS photons at single-photon level was observed with a charge-sensitive amplifier at the room temperature

- Response time of STJ:  $O(1\mu\text{s})$

Due to the readout noise, a FIR single-photon detection is not achieved yet

→ Need ultra-low noise readout system for STJ signal

→ Developing a cryogenic pre-amplifier close to STJ

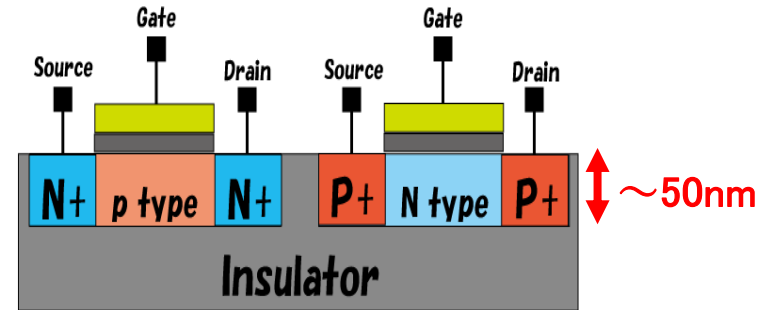
# R&D of SOI-STJ Detector

FD-SOI (Silicon-On-Insulator) device was proved to operate at 4K by a JAXA/KEK group (AIPC 1185,286–289(200 FD-SOI 9)). It has the following characteristics:

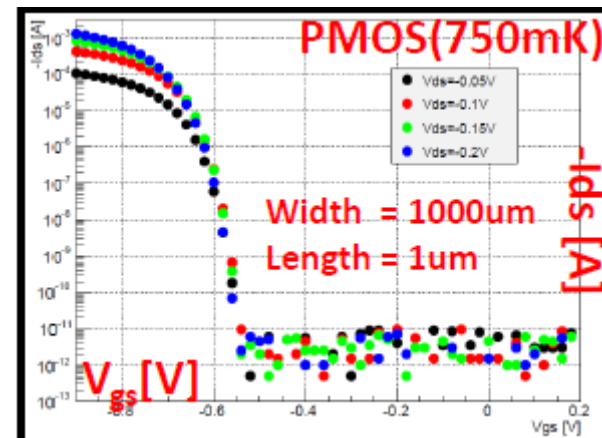
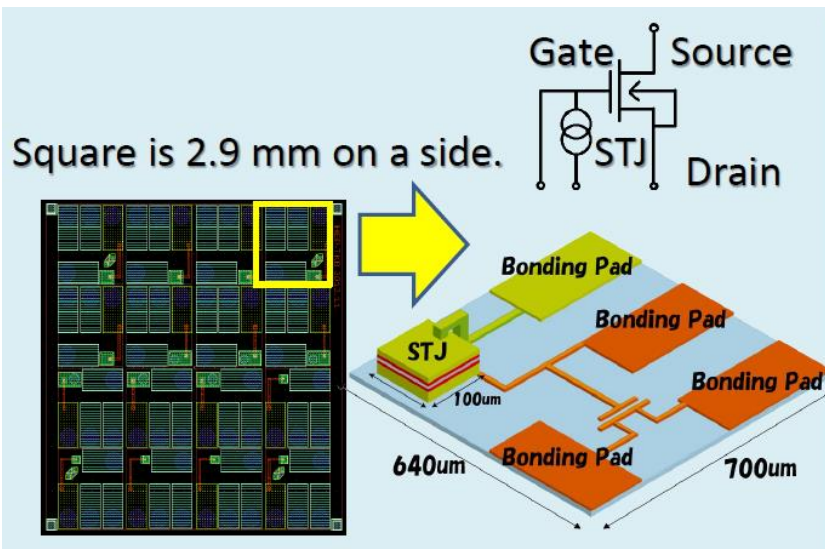
low-power consumption, high speed, easy large scale integration and suppression of charge-up by high mobility carrier due to thin depletion layer( $\sim 50\text{nm}$ ).

To improve the **signal-to-noise ratio** and to make **multi-pixel device** easily, we made a SOI-STJ detector where we processed Nb/Al-STJ on a SOI transistor board.

## FD-SOI –MOSFET



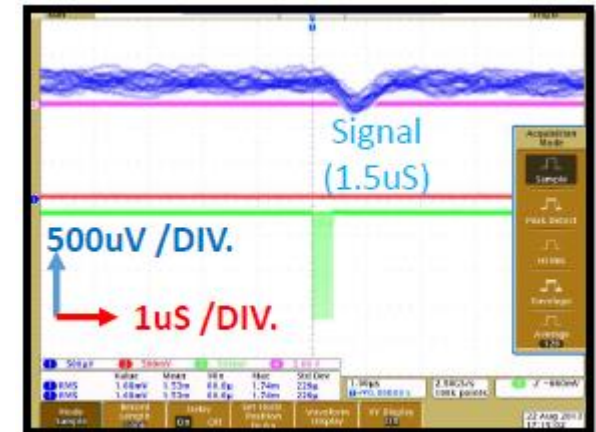
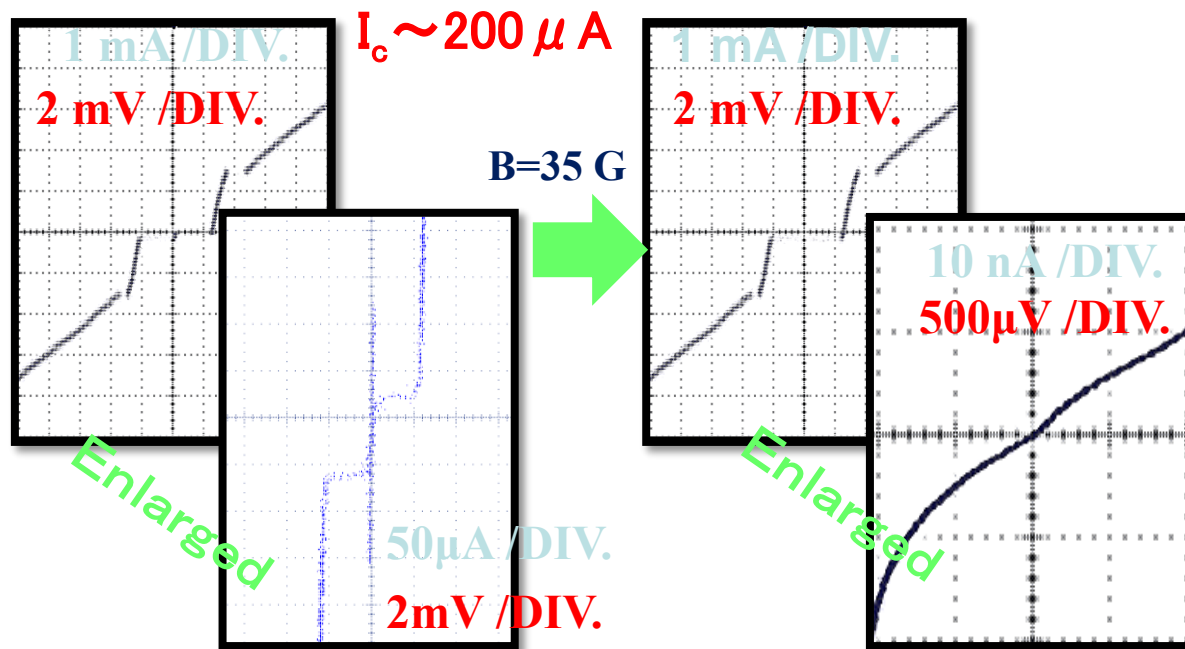
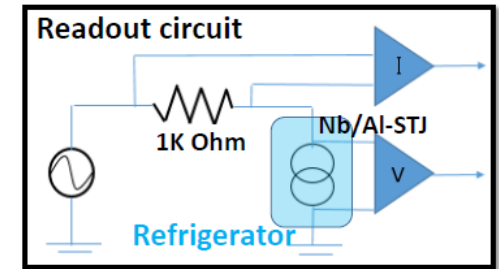
We confirmed that both Nb/Al-STJ detector and SOI MOSFET worked normally at 750mK.



# Performance of Nb/Al-STJ in SOI-STJ Detector

We measured the I-V curve of the Nb/Al-STJ ( $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  junction) processed on the SOI wafer at **700mK** with a dilution refrigerator.

## □ I-V curve of Josephson Junction



- Quality Factor ( $R_{\text{dynamic}}/R_{\text{normal}}$ )
- On Si wafer :  $5 \times 10^5$
- On SOI wafer :  $3 \times 10^5$

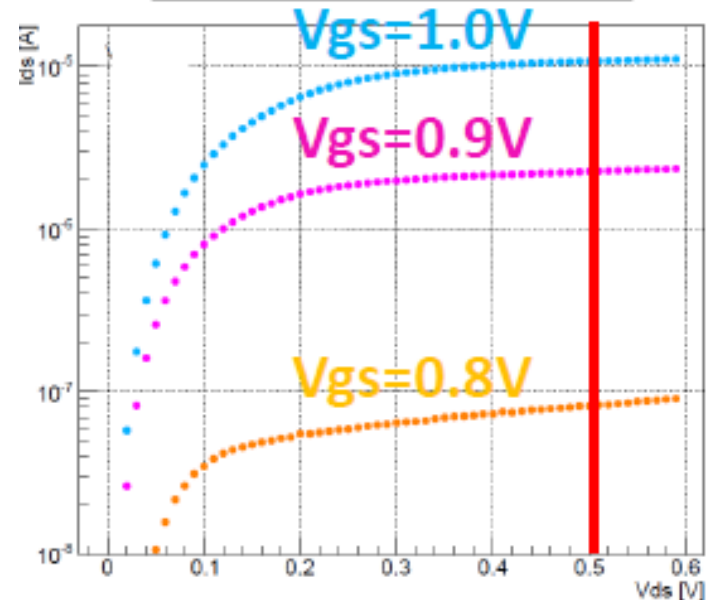
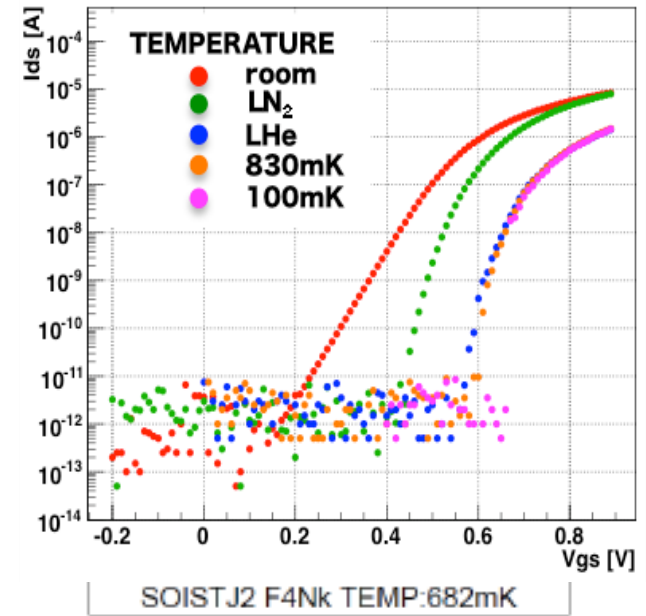


# Performance of SOIFET in SOI-STJ Detector

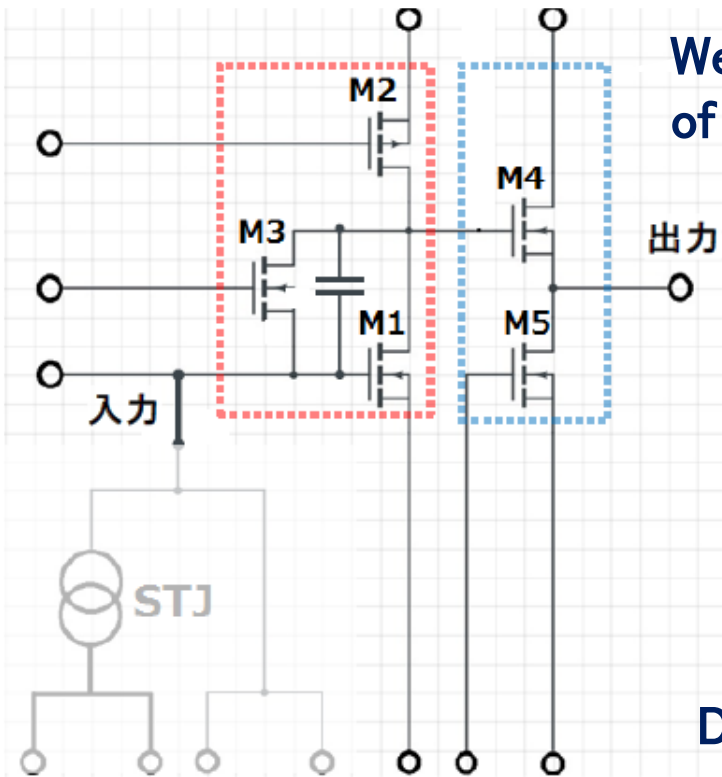
- Temperature dependence  
I-V curves at various temperatures.  
SOIFET can be operated at 100mK.

- Power consumption ( at 680mK )  
Bias voltage of SOIFET in saturation region (red line) : 0.5 V  
Current ( $I_{ds}$ ) of FET in saturation region  
at  $V_{gs} = 0.8V$  : 0.09  $\mu A$

Power consumption = **0.5 V**  $\times$  **0.09  $\mu A$**   
= 45 nW/FET for  $W/L=1.42\mu m/0.42\mu m$



# New SOI-STJ R&D



We updated the SOI-STJ design for the amplification of the Nb/Al-STJ signal.

1. Replace the resistance to SOIFET that we use as a current source (M2).
2. Use the feedback between the drain and the gate to apply a stable bias voltage (M3).
3. Add the follower to reduce the output impedance (M4 and M5).

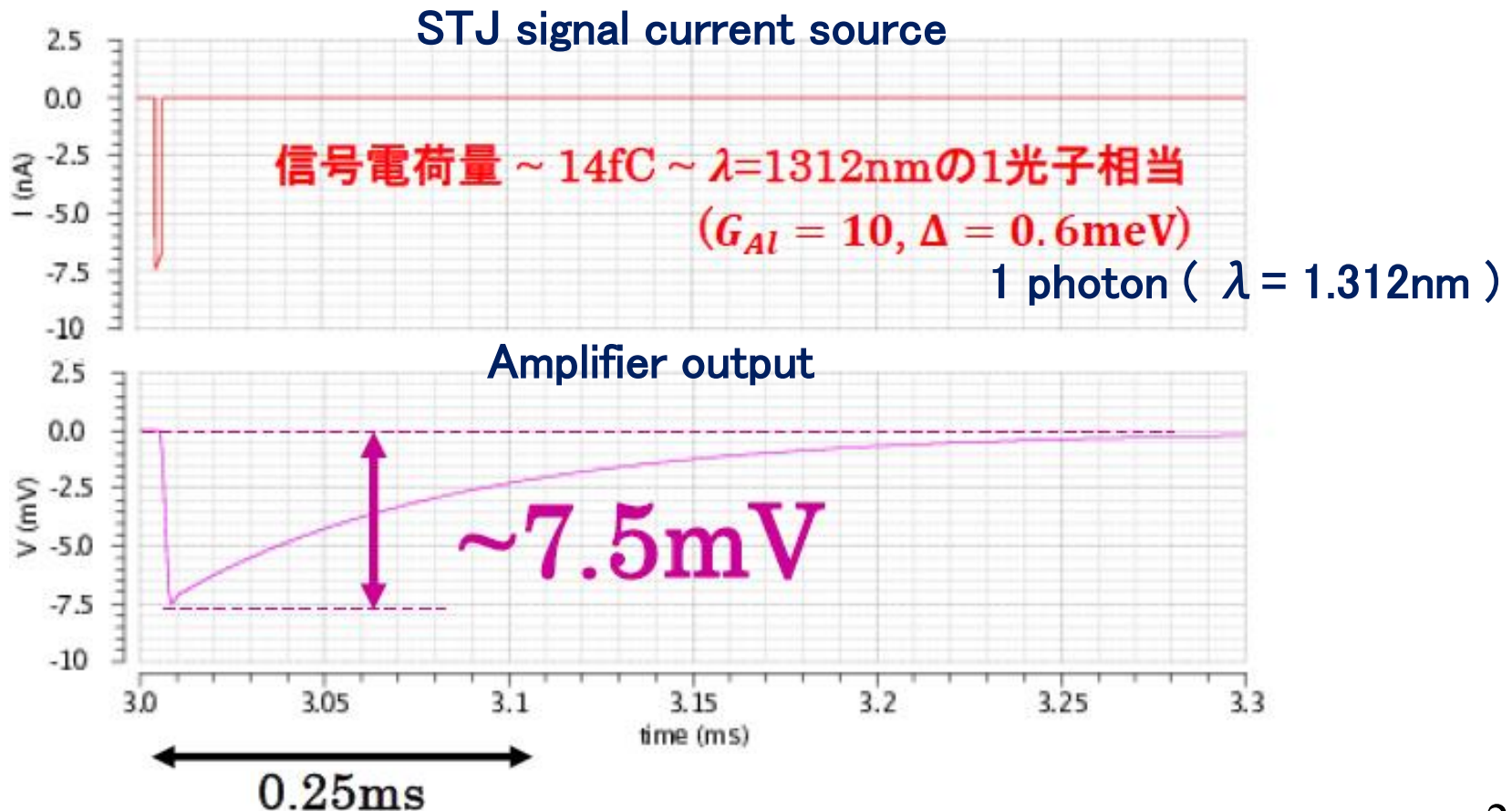
Designed the ratio (W/L) to set the operation power consumption below  $120 \mu\text{W}$ .

AIST group joined us on the SOI-STJ R&D and is processing the STJ on the SOI amplifier board made by LAPIS semiconductor.

**SOI transistor worked normally at 300mK.**

# Simulation of SOI preamplifier

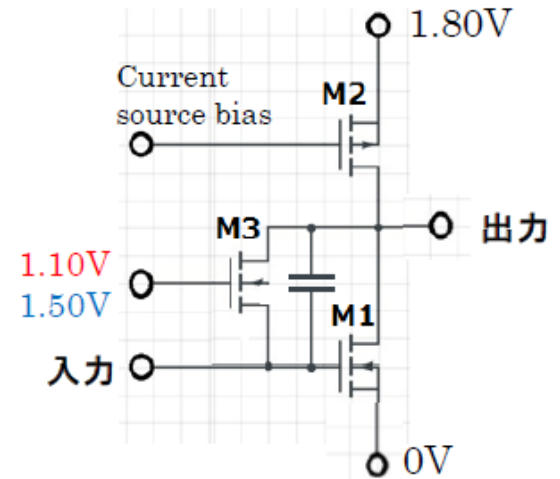
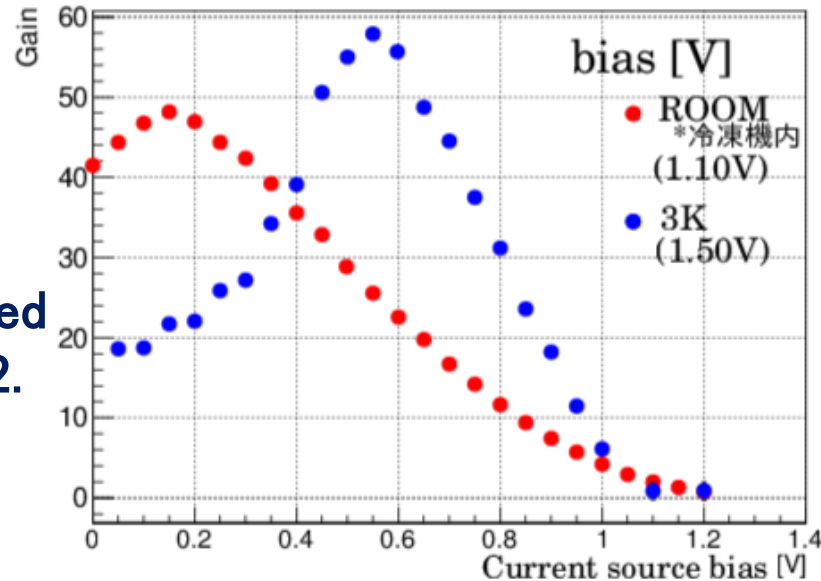
Condition: Leak current 0.5nA at 0.5mV  
STJ capacitance 250pF  
STJ bias voltage 0.5mV



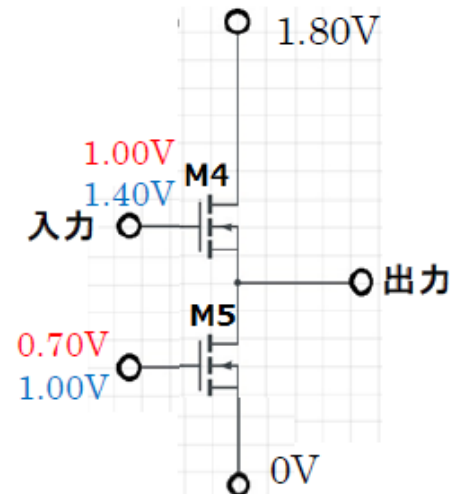
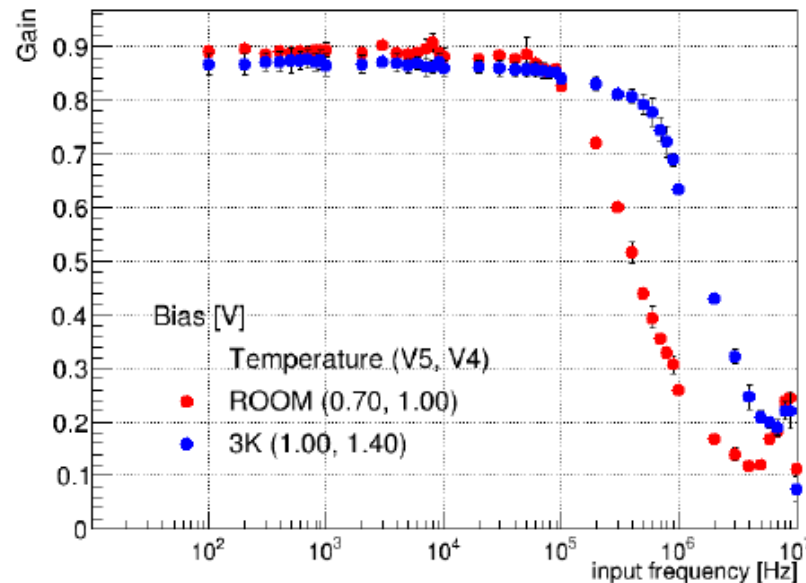


# Test Results of the cryogenic SOI preamplifier

Amplifier gains are around 50 both at room temperature and 3K with adjusted bias voltages of M2.



Bandwidth of buffer is enough high for the amplifier of STJ signal (up to 200kHz) both at room temperature and 3K.



# Test Results of the cryogenic SOI preamplifier

The cryogenic SOI preamplifier has worked at 370mK with a gain of 30 and power consumption of  $100 \mu\text{W}$ .

Test of Nb/Al-STJ  
with this cryogenic  
SOI preamplifier will  
be started in March.

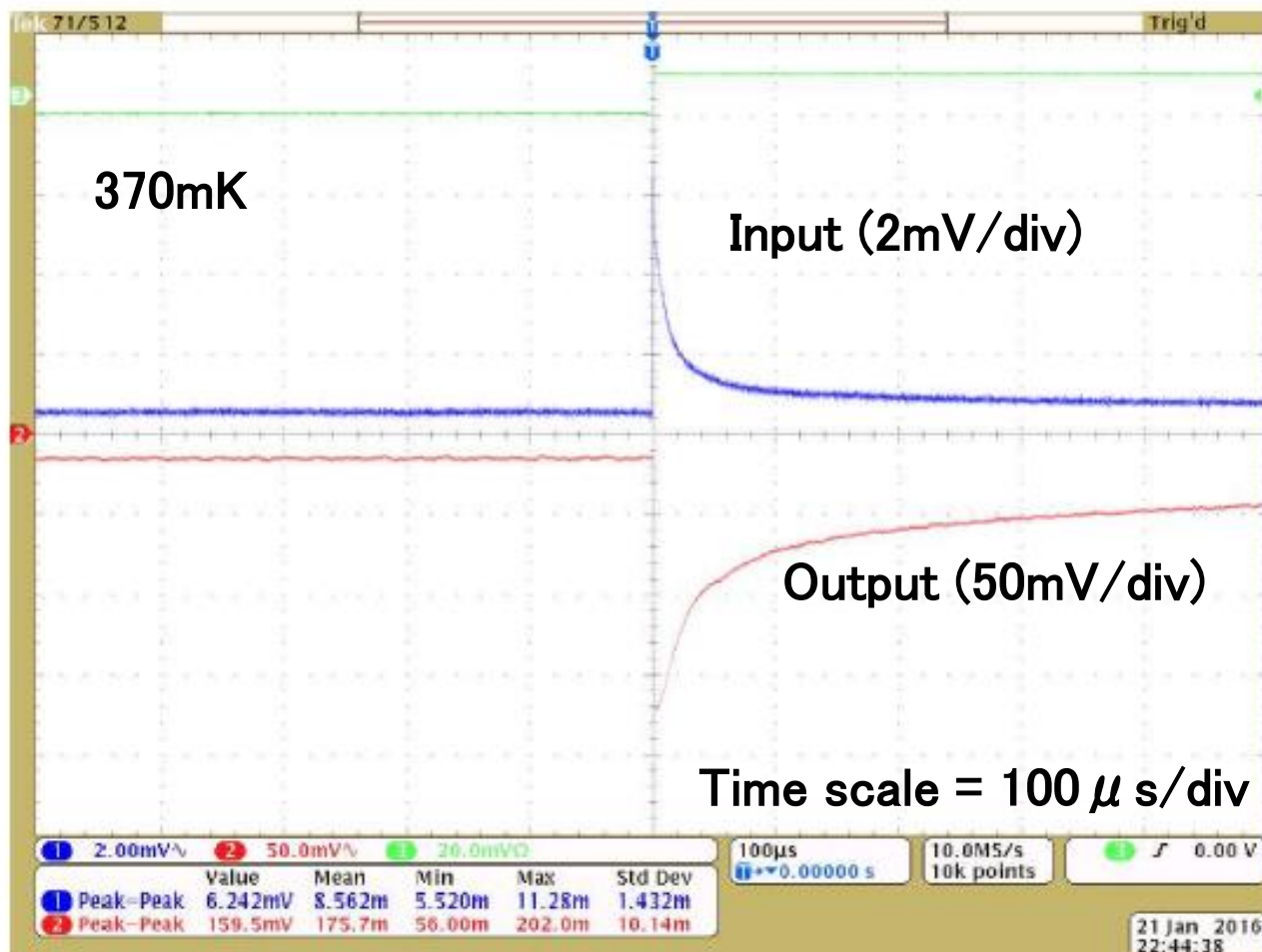


図 5.79: SOI-STJ4 A パルス応答 入力矩形波 (緑), 入力信号 (青) と出力信号 (赤) (300mK,  $V_{DD2} = 1.10\text{V}$ ,  $V_5 = 0.10\text{V}$ )

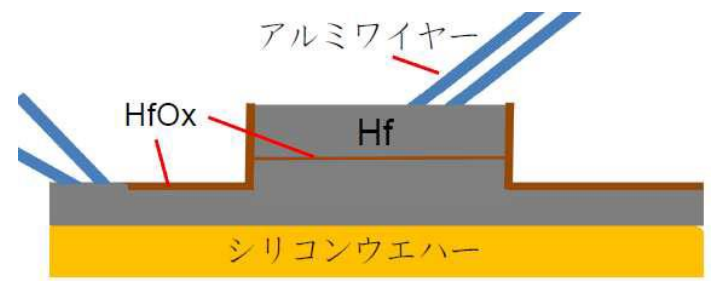
# R&D of Superconducting Tunnel Junction (STJ) Detector

## Hf-STJ

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

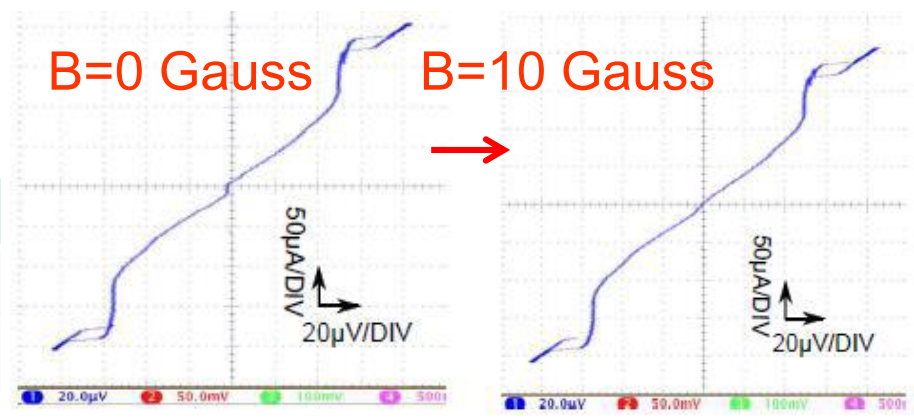
Micro-calorimeter: Hf-STJ can generate enough statistics of quasi-particles from cooper pair breakings to achieve 2% energy resolution for photon with  $E_\gamma = 25 \text{ meV}$ .

Direct wire bonding on Hf layer



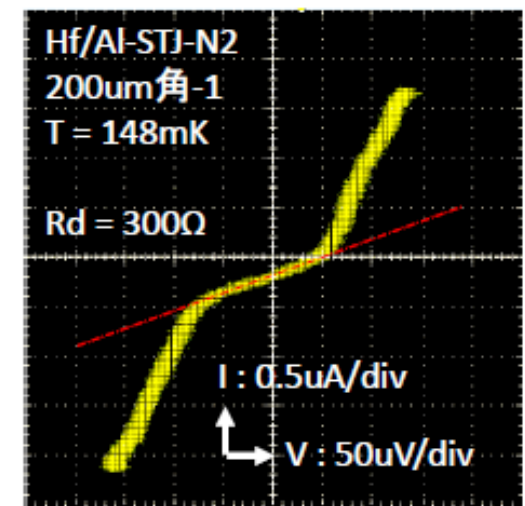
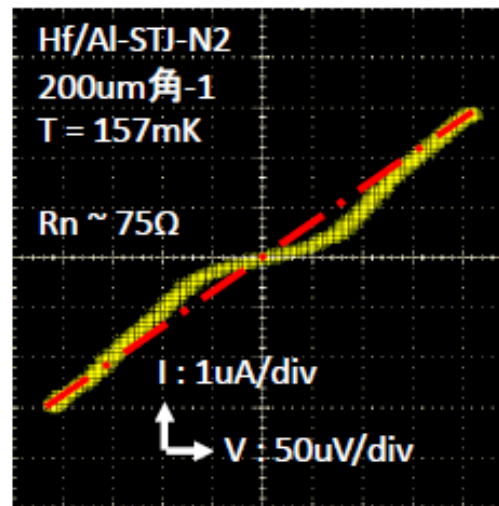
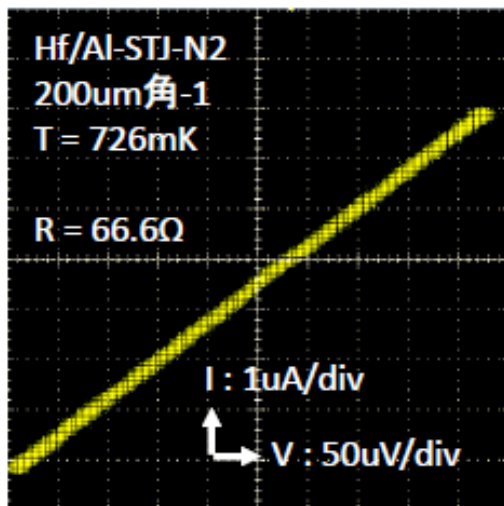
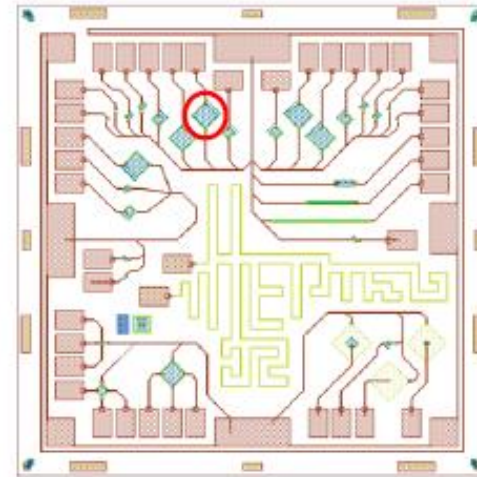
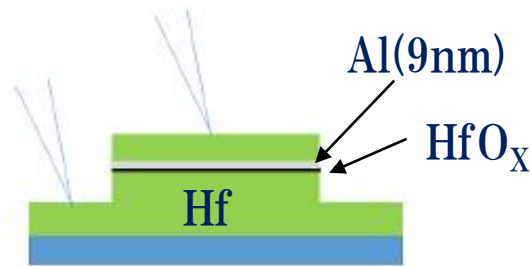
I-V curve of Hf-STJ ( $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ )  
•  $T \sim 40 \text{ mK}$ ,  $I_c = 10 \mu\text{A}$ ,  $R_d = 0.6 \Omega$

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



# Latest Results of Hf-STJ R&D

January 2016, 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





# Dynamic Resistances of Hf-STJ

Dynamic resistance was improved from  $0.2\Omega$  to  $300\Omega$ .

	サイズ	状態	Rd	$\Delta?$
Hf/Al-STJ-N1	200 $\mu\text{m}$ 角	超伝導	—	—
Hf/Al-STJ-N2	200 $\mu\text{m}$ 角	STJ ?	300	31ueV
	200 $\mu\text{m}$ 角	STJ ?	150	35ueV
	200 $\mu\text{m}$ 角	STJ ?	83.3	37.5ueV

Rd

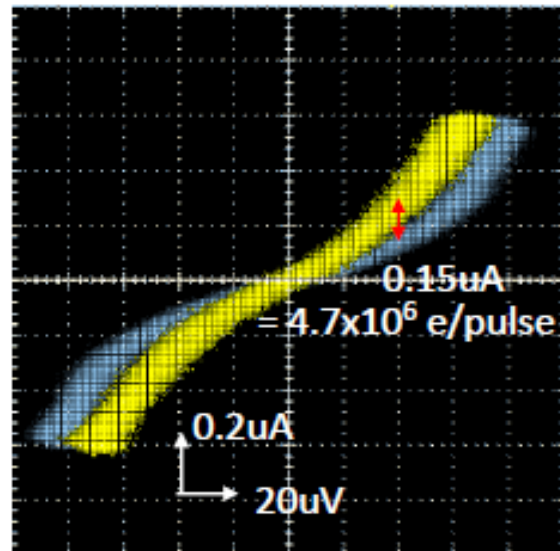
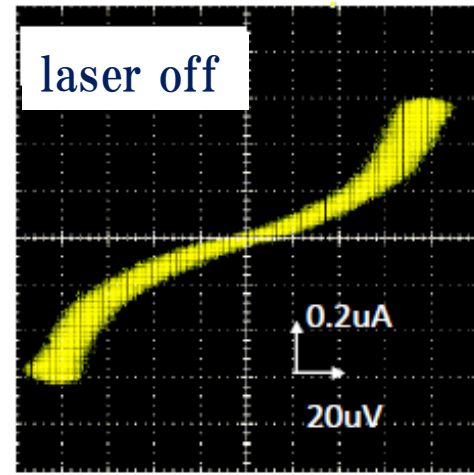
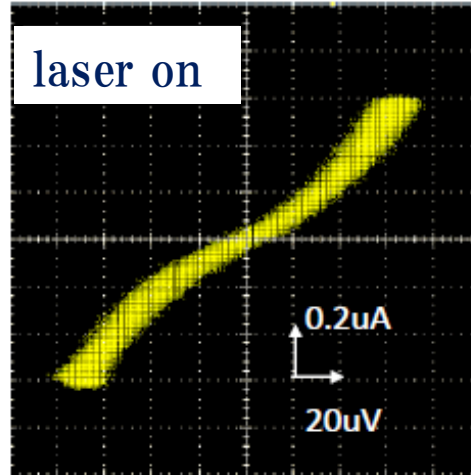
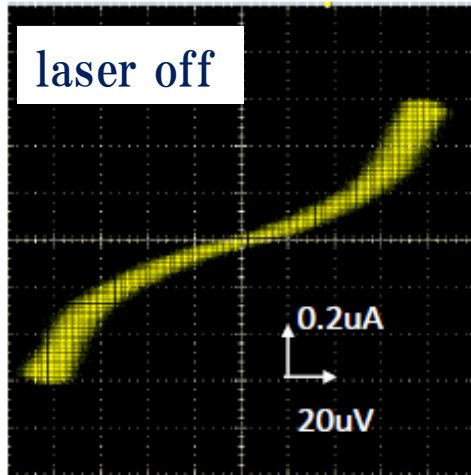
酸化条件 / 素子サイズ	200 $\mu\text{m}$ × 200 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$ × 100 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$ × 50 $\mu\text{m}$
20Torr, 1H	Rd = 0.23 $\Omega$	Rd = 0.48 $\Omega$	—
30Torr, 1H	Rd = 0.20 $\Omega$	Rd = 0.85 $\Omega$	Rd = 4 $\Omega$

# Response of Hf-STJ to Laser Light

Near-infrared laser ( $\lambda = 1.312 \mu\text{m}$ )

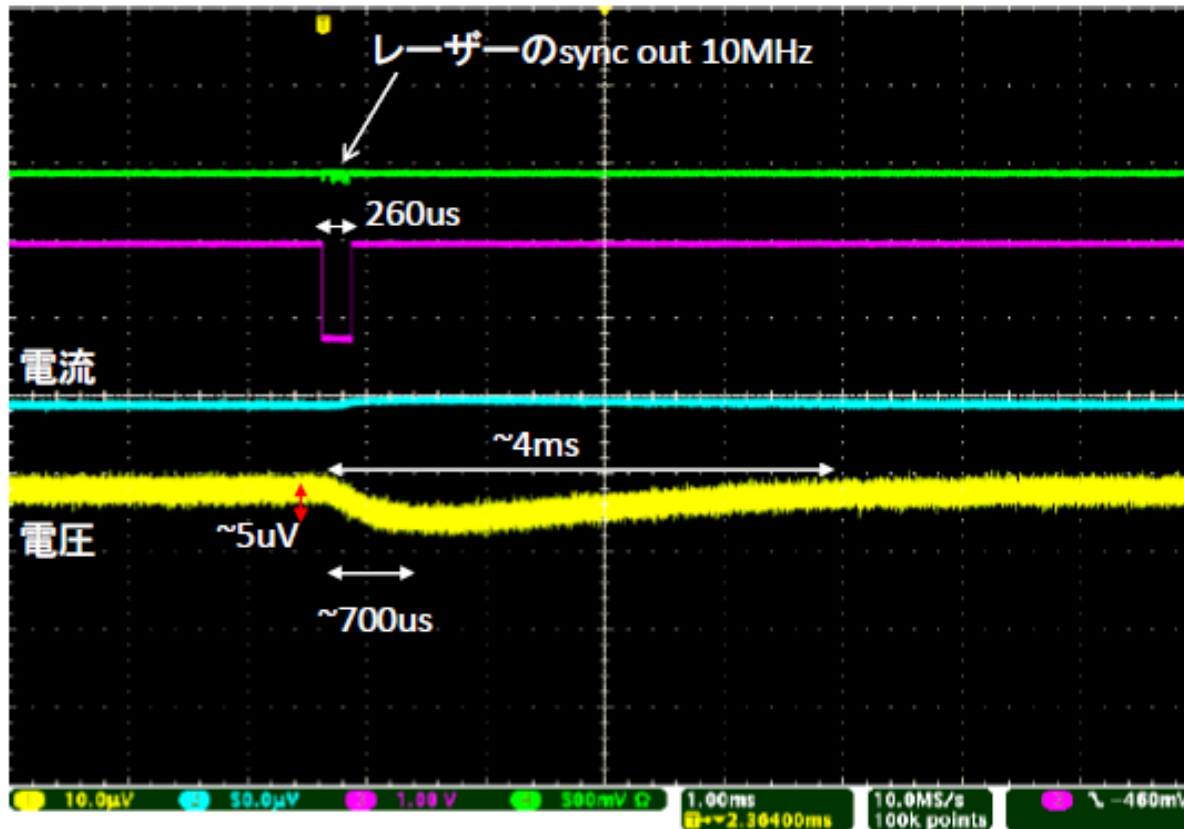
0.945 eV photon

20 MHz (DC-like)



# Response of Hf-STJ to Laser Pulse Light

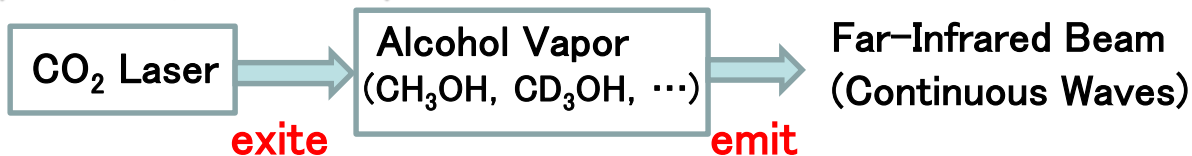
Visible light laser ( $\lambda = 465\text{nm}$ )    1Hz duration     $260\mu\text{s}$  pulse width



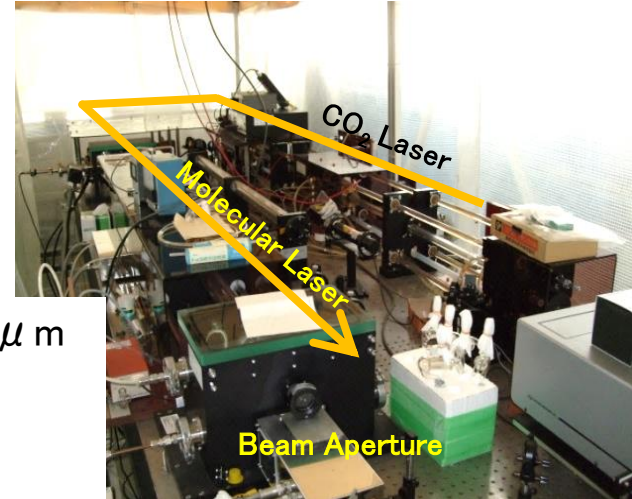
Response speed (4ms) is much slower than expected one ( around  $100\mu\text{s}$ ).

# Far-Infrared Molecular Laser

(U. Fukui/Chubu U.)



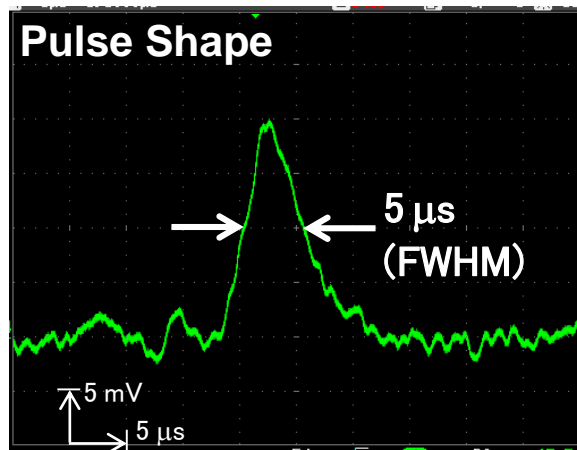
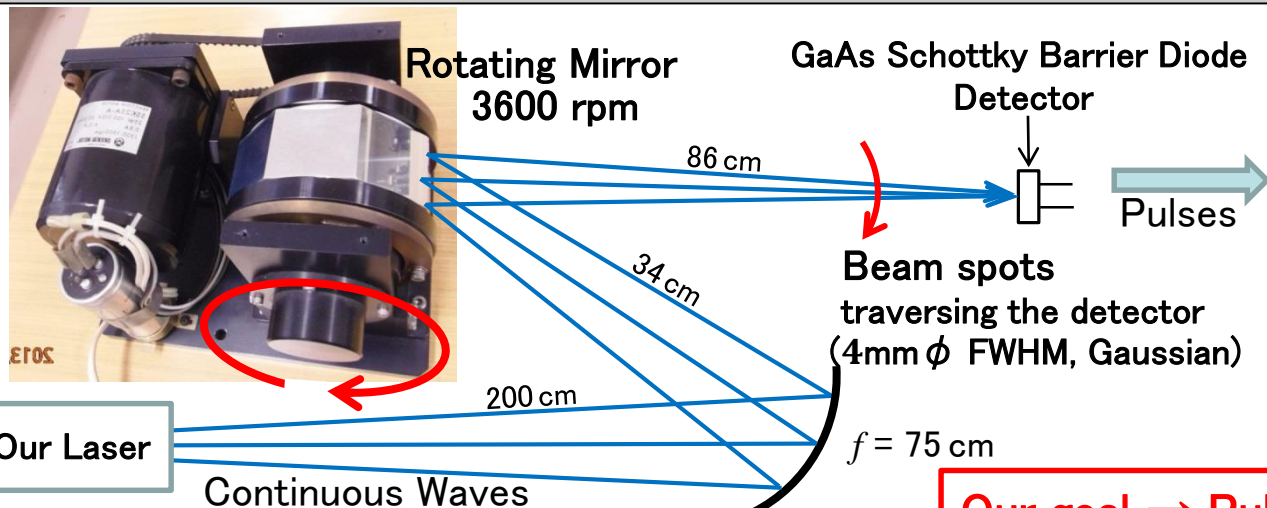
- can emit any one of ~70 monochromatic lines btwn  $\lambda = 40 - 500 \mu\text{m}$  (31–2.5meV) by selecting an alcohol and a CO<sub>2</sub> laser frequency.
- Beam diameter : 7mm ( $1/e^2$ ), Beam divergence : 20mrad ( $1/e^2$ ), Power : 1mW – 1W depending on the wavelength.



The monochromatic lines we confirmed so far :

$\lambda = 43.7 \mu\text{m}$  (28 meV),  $52.9 \mu\text{m}$  (23 meV),  $86.4 \mu\text{m}$  (14 meV),  $118.8 \mu\text{m}$  (10 meV),  $453.4 \mu\text{m}$  (2.7meV), ...

Conversion of continuous waves to pulses by rotating mirrors (to evaluate the STJ with pulses)



$\lambda = 118.8 \mu\text{m}$  (10 meV)  
Alcohol : CH<sub>3</sub>OH  
CO<sub>2</sub> laser frequency : 9P(36)

Our goal → Pulse width  $\leq 1 \mu\text{s}$  along:

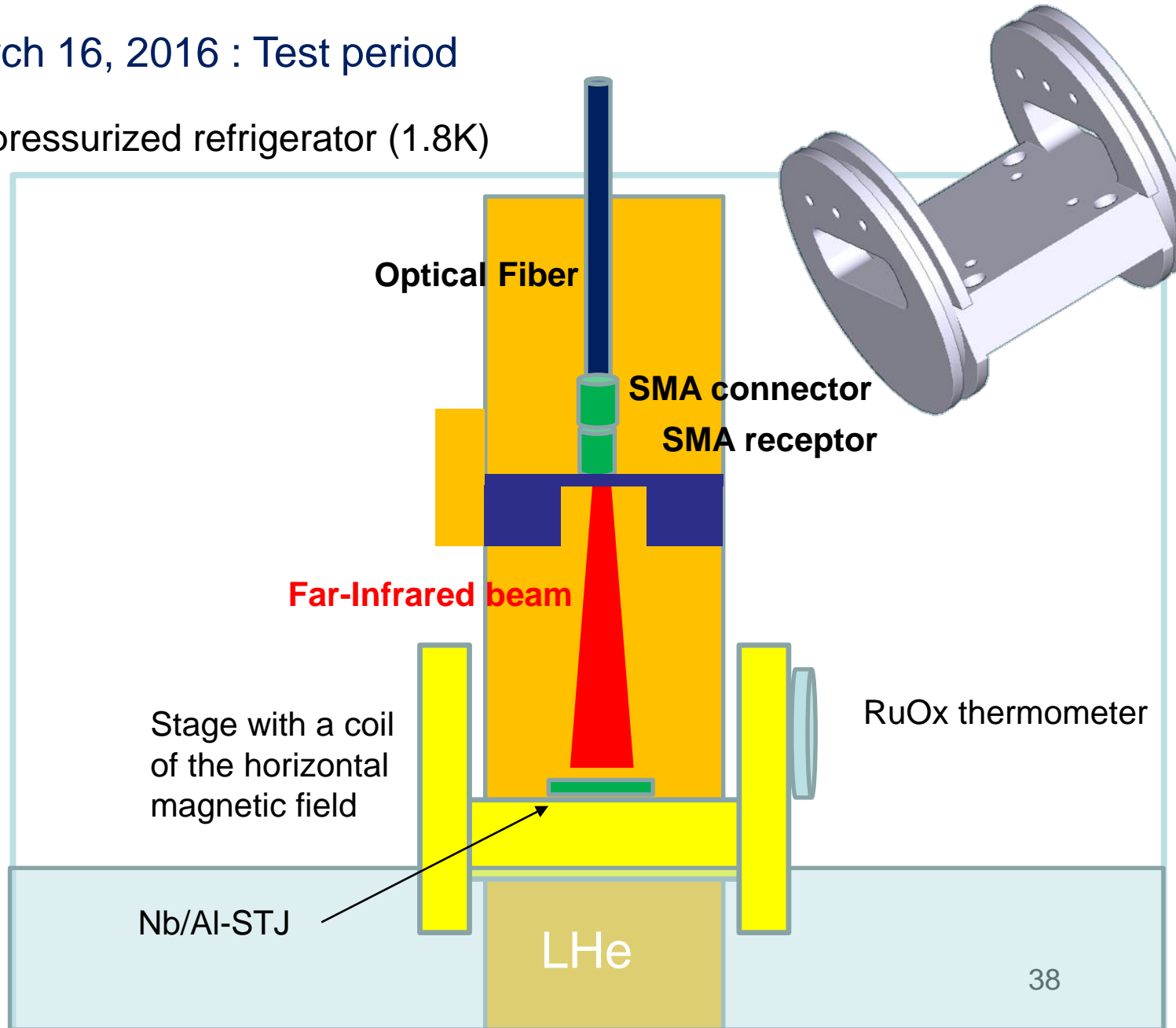
- improving the beam focusing system,
- longer distance from Rotating Mirror to Detector.



# Test with Far-Infrared beam at Fukui University

March 9, – March 16, 2016 : Test period

$^4\text{He}$  depressurized refrigerator (1.8K)



# Data transfer system from rocket to earth station

## Data size

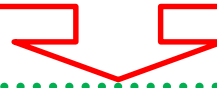
# of STJ sensor: 50 pixel X 8 row = 400 pixel  
Event rate: 300 Hz/pixel X 400 pixel = 120 kHz  
Data size: ADC 7 bit, time info. 10bit,  
pixel address 9bit



## Requirement of transfer rate

➡ more than 3.12 Mbps

Rocket has one transmitter (1.6 Mbps, S-band) as the standard telemetry system .  
But it has to transfer all data (including the rocket and all component information).

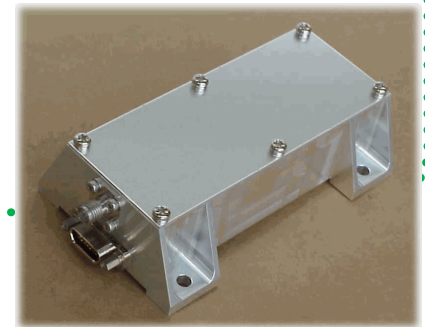


## We plan to be equipped with one optional transmitter having enough transfer rate

- Rocket can be equipped with two transmitter component (some rocket exp. had two components)
- Addnics corp. can make the high rate transmitter system (5 Mbps is OK)
- Using two transmitter can be a robust system
- Earth station has a sufficient ability of receiving data (50 Mbps, S-band)

## Plan :

- ✓ define the design of high rate transmitter with company
- ✓ define the data format



2.2 GHz transmitter for rocket by  
Addnics  
(from addnics HP)

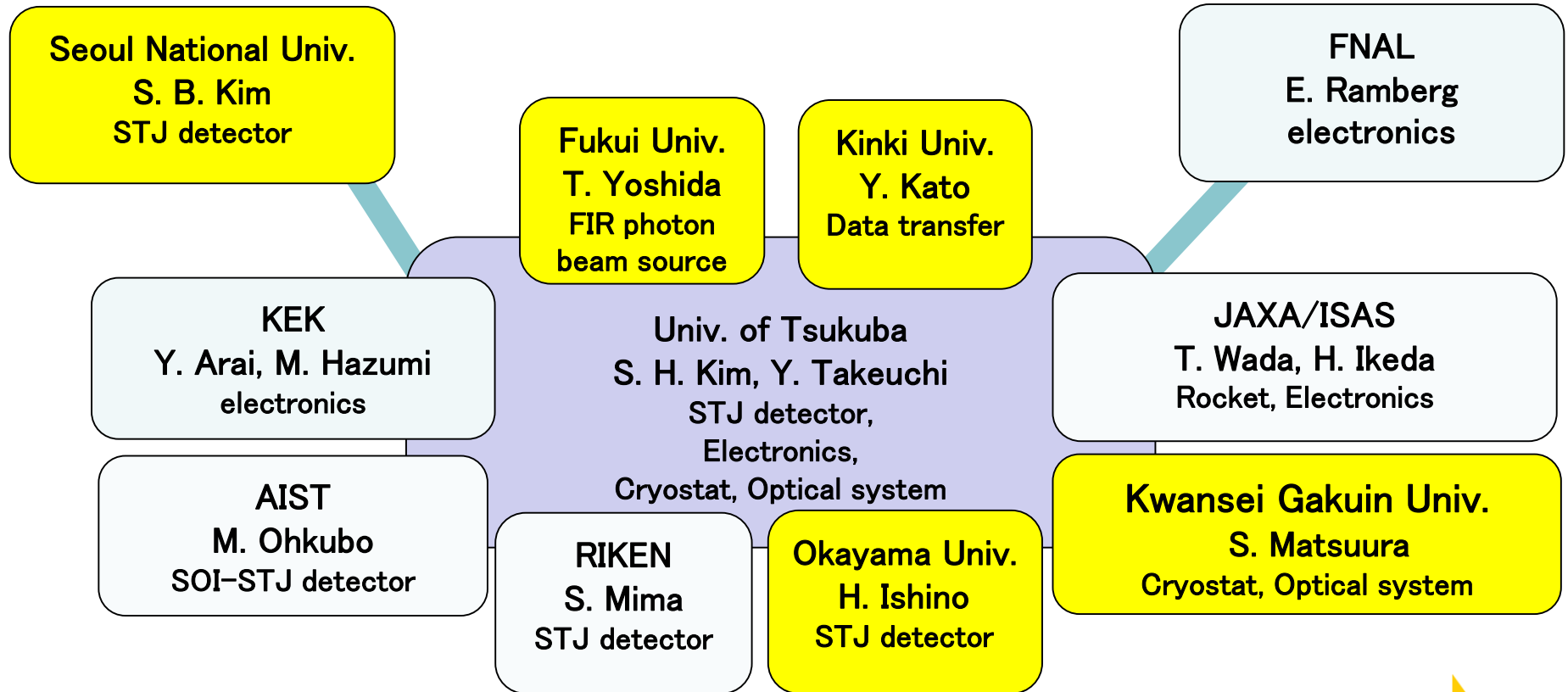
# Schedule

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Experiment Design	Experiment design with Satellite such as SPICA					
	Experiment design with FIR Rocket					
Superconducting Tunnel Junction (STJ ) Detector	R&D of Nb/Al-STJ	Production				
	Design and R&D of Hf-STJ			(for Satellite Experiment)		
Preamplifier at 1K and Post-Preamp (Fermilab, JAXA, KEK,AIST,Tsukuba)	Design and R&D	Production			Design, R&D, Production	
Dispersive Element, Optics	Design and R&D	Production			Design, R&D, Production	
Cryostat	Design and R&D	Production			Design, R&D, Production	
Measurements + Analysis		Analysis Program				
	Simulation		40		Analysis	

Far-Infrared Observatory Rocket Experiment

# Collaboration of Cosmic Background Neutrino Decay Search

A part of the consortium of the History of the Universe



2015~ Kwansei Gakuin Univ.  
2014~ AIST  
2011~ FNAL, Okayama Univ., Fukui Univ., Kinki Univ.  
2007~ Univ. of Tsukuba, JAXA/ISAS, RIKEN, KEK, Seoul National Univ.



# Summary

- Research Core for the History at Universe (RCHOU) of Tsukuba was founded in 2014 and have integrated and developed studies on the History of the Universe.
- For the cosmic background neutrino decay search which is one of the research project of RCHOU, we are working on the R&D of STJ detectors and the design of the rocket experiment.
  - Determination of the neutrino mass
    - origin of elementary particle mass spectra
  - Discovery of the cosmic background neutrino
    - new probe of the very early universe
- New far-infrared photon detector is being developed:
  - One photon detection in the far-infrared range
  - applicable to the other fields such as X-ray energy measurement with higher energy resolution.

BACKUP

# Laboratory for Development of Photon and Particle Detectors

**Mission:** This laboratory works as a base of development of the photon and particle detectors in the Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering, to study and develop the photon and particle detectors commonly employed for studies in the two Research Cores, and pushes forwards the integrated research of the detector development in collaboration with other Tsukuba research institutions.

## Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering

Research Core for the History  
of the Universe

Design Office of  
Integrated Research

Research Core for  
Developing Energy and  
Environment-Friendly Materials

### Laboratory for Development of Photon and Particle Detectors

Members: S.H. Kim (Leader.), S. Esumi, K. Hara,  
T. Kondo, E. Nishibori, S. Tomita

Supeconducting Detector, SOI Technology, Particle Detectors with MPPC  
photo-sensor, other New Technologies

Founded on 2015/10/19

Base at University of  
Tsukuba of  
TIA-ACCELERATE  
Photon and Particle  
Sensing Square ( for  
Photon and Particle  
Detector Development)

Collaboration with other  
Institutions at Tsukuba

TIA-ACCELERATE  
Initiative for Photon and Particle  
Detector Application to Industry

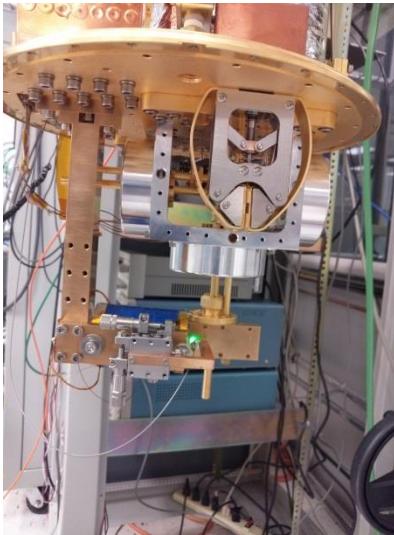
KEK Detector Technology Project  
AIST CRAVITY Facility

# Combined test of STJ and cold-amplifier at Fermilab

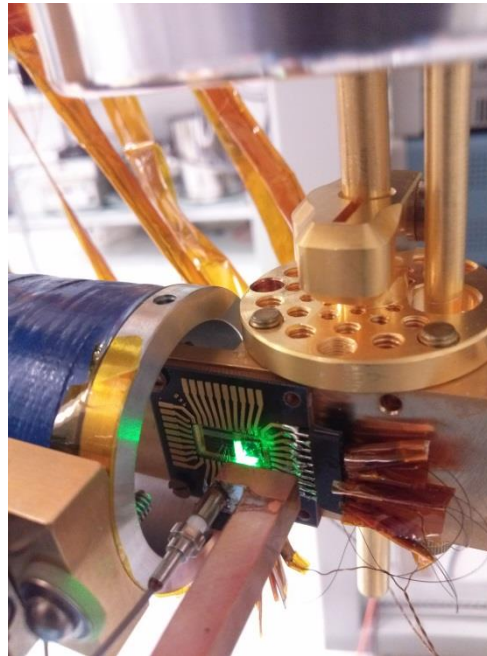
## Combined test of the Nb/Al-STJ and the cold preamplifier at Fermilab

August 26 , 2014 ~ September 12 ( 6 US members + 6 Japan members ) :

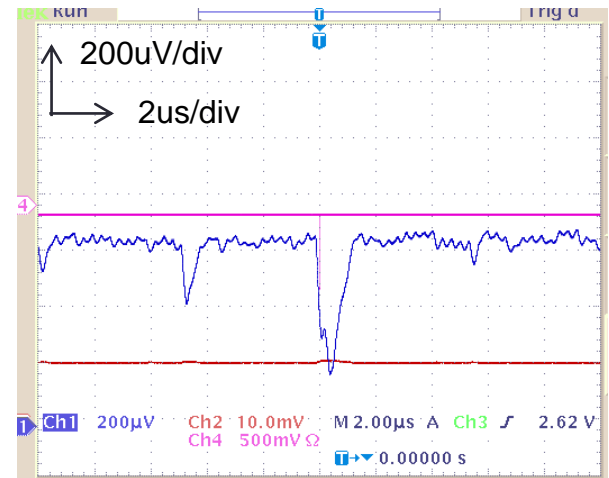
Test was done with an ADR at MilliKelvin Facility at Fermilab



**ADR at MilliKelvin Facility at Fermilab**



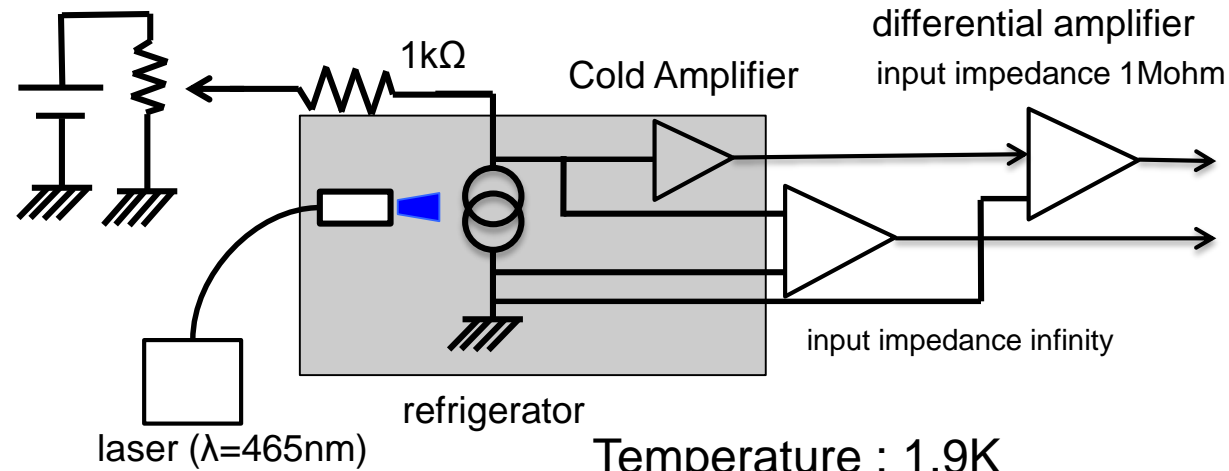
**Laser light spot was used for the alignment of light fiber.**



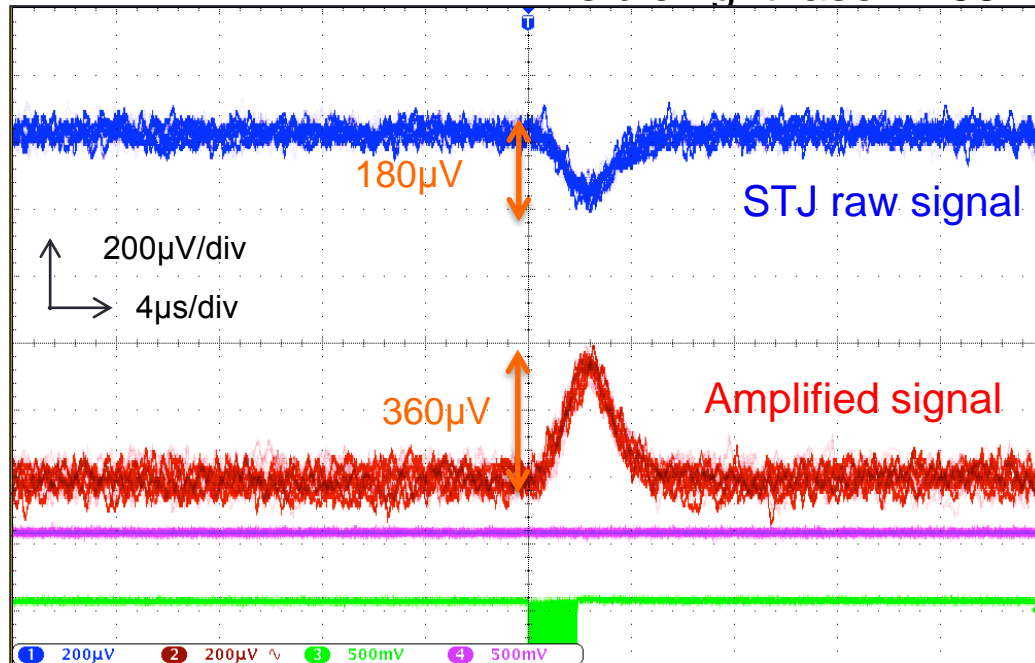
We obtained the response to the laser light (465nm) with the newly designed Al/Nb-STJ (20um x 20um) . No cold-amplifier this time.



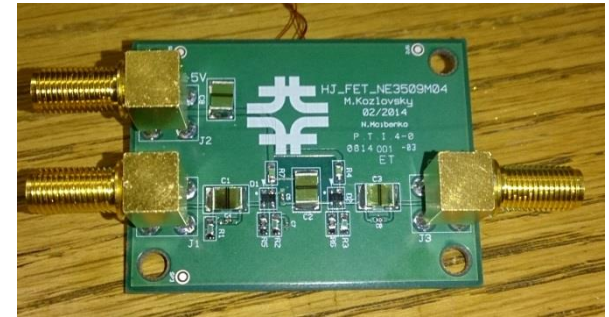
# STJ signal amplified with a cold HEMT amplifier made by Fermilab group



Temperature : 1.9K  
Visible light laser 465nm



Cold amplifier made by Fermilab group



STJ signal was amplified with this cold amplifier.  
Developing higher gain amplifier.

Fermilab group also joined the R&D of the SOI cold amplifier.

# 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索

- 素粒子の質量がなぜ11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？

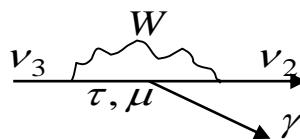
## ニュートリノ質量の理解が先決

- 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

## 本事業：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

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

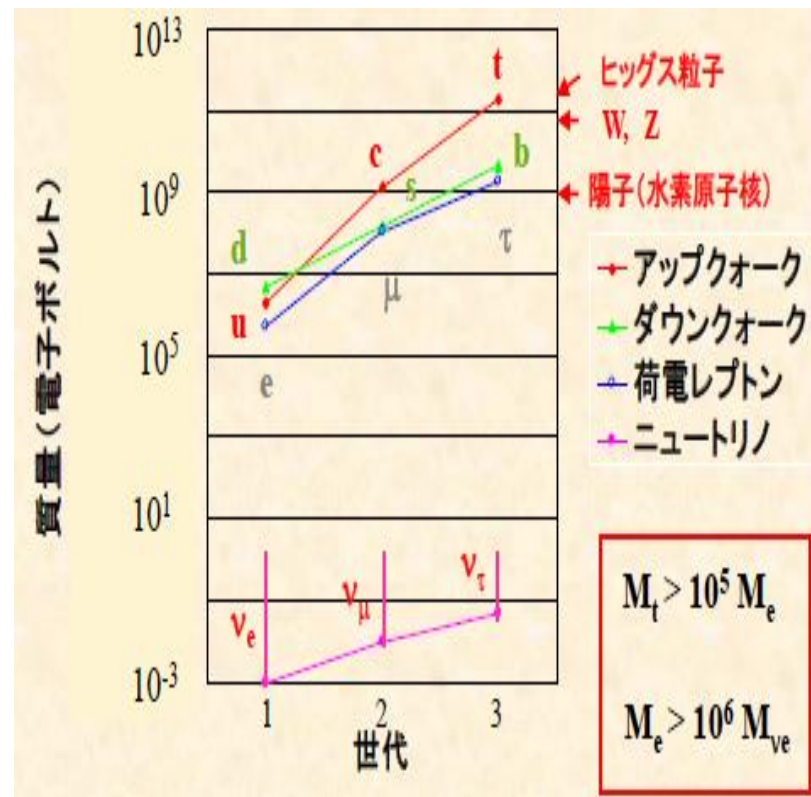


- **ニュートリノ**：寿命が長く、まれにしか崩壊しない。現在の寿命の下限 =  $10^{12}$ 年  
 探索には大量のニュートリノが必要  
 加速器で作るのは不十分  
 宇宙に大量に存在するはずの **宇宙背景ニュートリノ** が唯一の解

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  
 ノーベル賞級の発見



# 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験・衛星実験

ロケット実験計画: 2018年に高度200 kmで5分間データ収集

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).

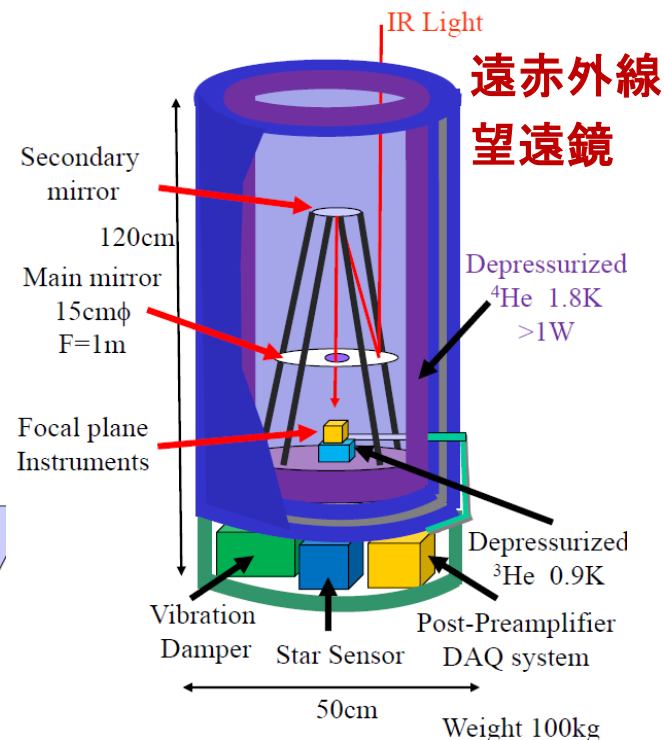
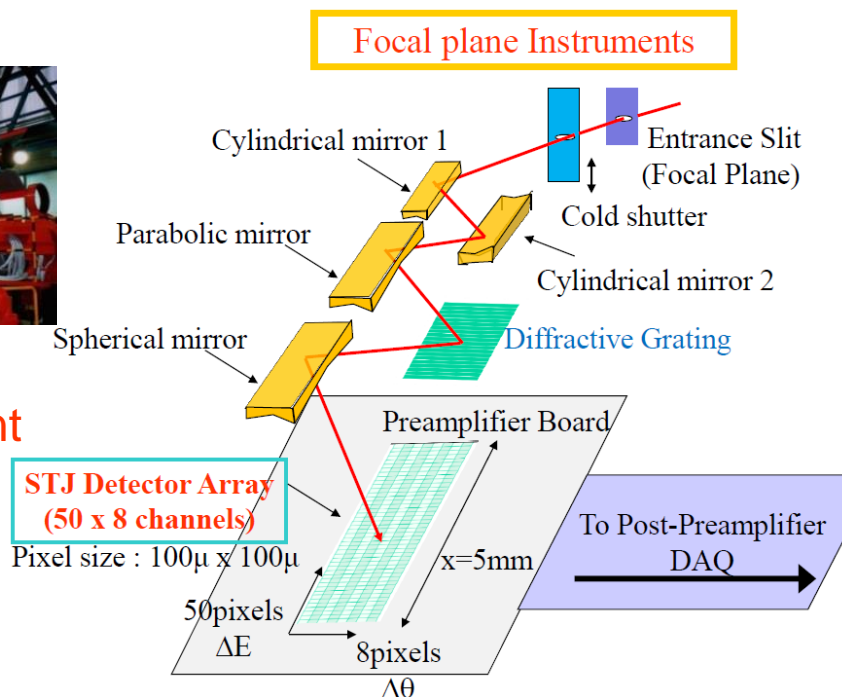
»超伝導トンネル接合素子 (STJ) 赤外線検出器を開発

50 Nb/Al-STJ ピクセルアレイと回折素子で遠赤外線エネルギー測定



JAXA Rocket  
CIB Experiment

(Feb 2, 1992)



2020以降に衛星実験 → 寿命  $\tau(\nu_3) \sim 10^{17}$  年なら観測可能

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

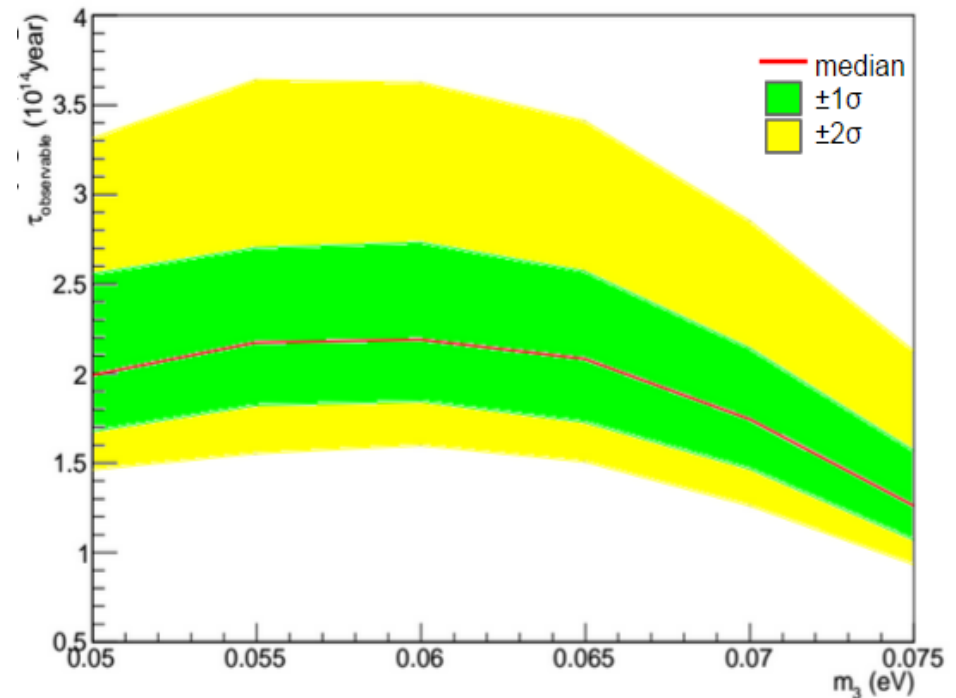
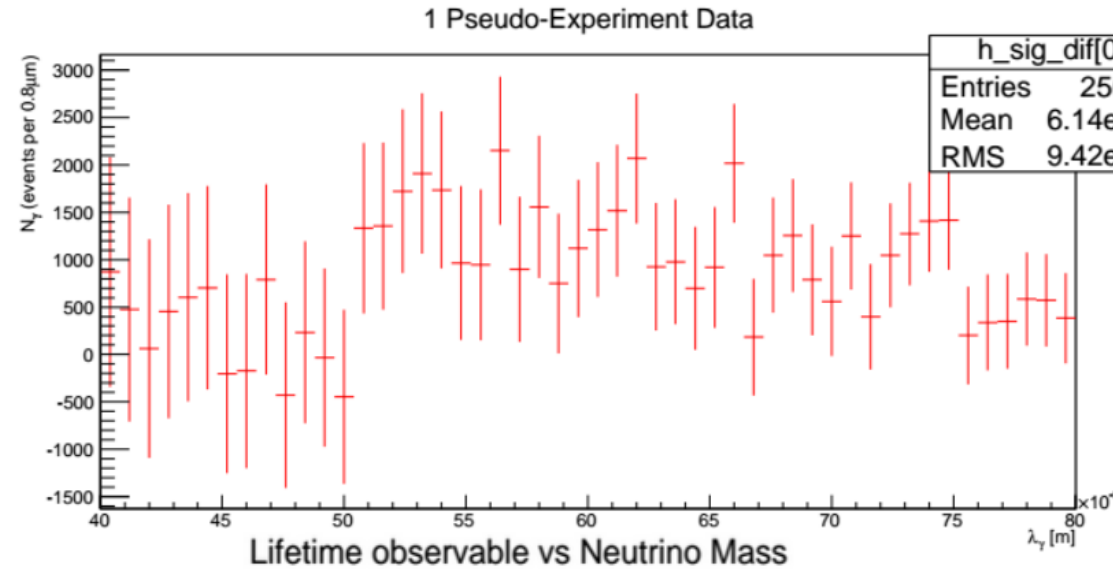
- $\Delta = 20 \mu\text{eV}$ : ハフニウムの超伝導エネルギーギャップが小さいので、回折格子なしでエネルギー測定。

# 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験感度の評価

ロケット実験のシミュレーション:  
望遠鏡の口径15cm, 視野 $0.006^\circ$ , 200秒間  
データ収集, 検出効率100%.  
ニュートリノ質量は $m_3=50\text{meV}$ . ニュートリノ  
寿命が $10^{14}$ 年.  
バックグラウンドは黄道放射で, 模型曲線.

1回の実験シミュレーション(pseudo-experiment)の結果例(右上図).  
黄道放射+ニュートリノ崩壊信号で最適化を行った後に, 黄道放射曲線を差し引いた事象数を光子波長に対してプロットしたもの.

上記の実験シミュレーションを一つの寿命(10点), 一つの $m_3$ に対して1000回行って, 有意度 $5\sigma$ で発見可能なニュートリノ崩壊の寿命を $m_3$ に対してプロットしたもの(右下図).

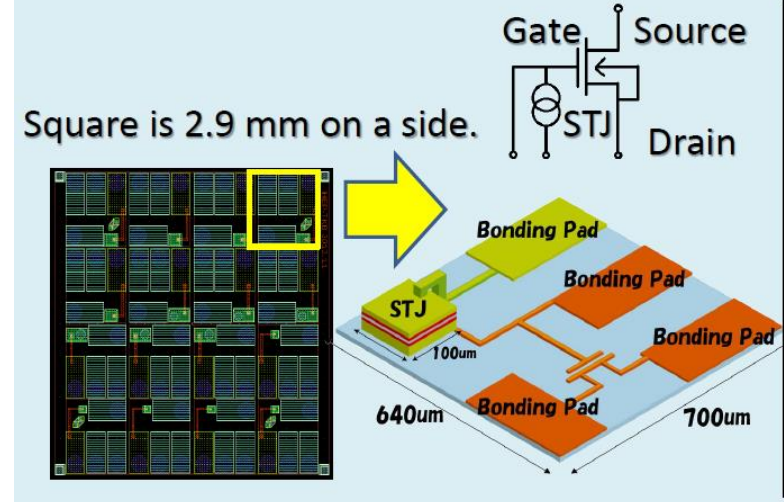




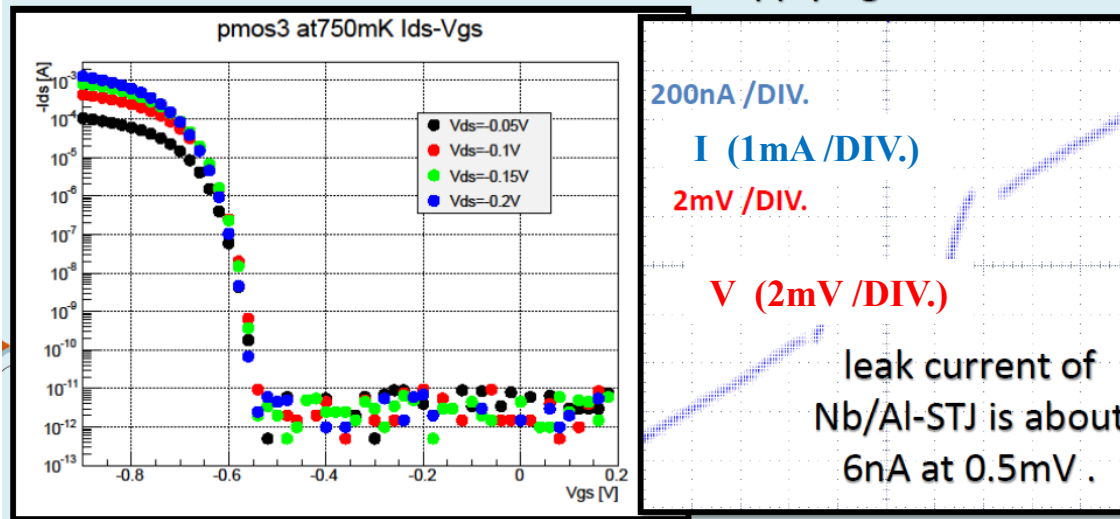
# 新型超伝導検出器SOI-STJの開発

SOI (Silicon-On-Insulator) 前置増幅器：  
極低温 1 Kで動作する低ノイズ前置増幅器。

Nb/Al-STJ(Superconducting Tunnel Junction)を SOIトランジスタの基板上に一体型で作成した。Nb/Al-STJ 赤外線検出器とSOIトランジスタが共に750mKで正常に動作した。



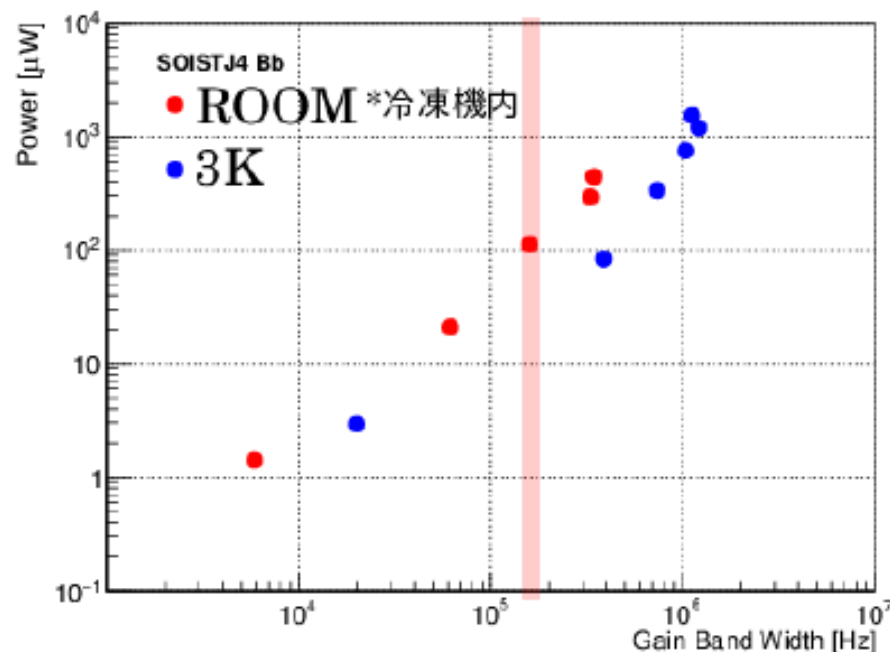
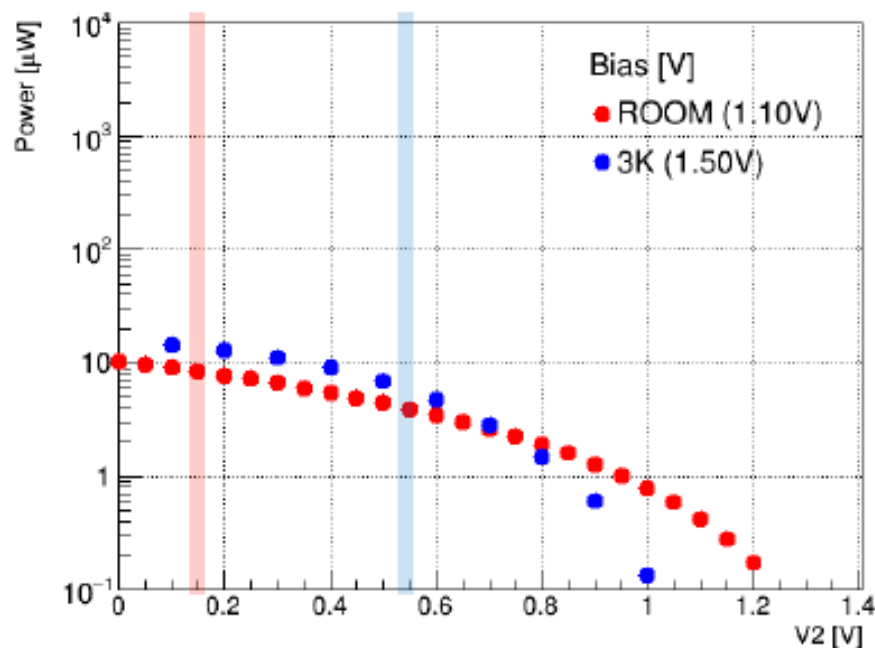
After applying 150 Gauss to STJ.



**産学連携：** 筑波大・K E Kグループが設計したSOI前置増幅器基板をLAPISセミコンダクター社が製作、産総研が基板上にSTJをプロセスする。試作機の試験を筑波大で行っている。

現在、ノイズを低減する改善を順調に進めており、今後2年間で開発を終了して実際の測定装置の製作に着手する。製作開始の2年後の2018年に完成した測定装置をロケットに搭載して、ロケット実験を実施。

# Power Consumption of the Cryogenic SOI Preamplifier



室温シミュレーション時の性能を冷凍機内でも実現できるか？

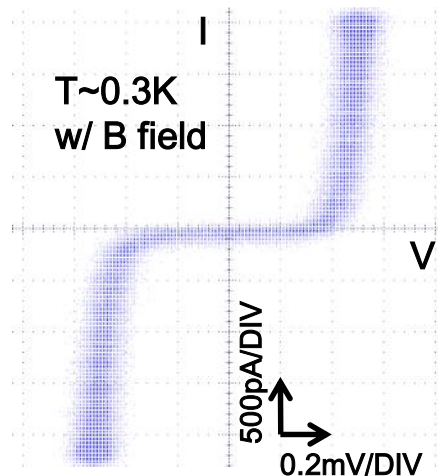
- 増幅段: 利得  $\sim 60$  倍 (3K) の時、 $\leq 10 \mu\text{W}$
- バッファ段: 周波数応答  $\sim 200 \text{kHz}$  (3K) の時、数十  $\mu\text{W}$

➡ 1素子ならば 350mK 下 (冷却能力  $100 \mu\text{W}$ ) で、シミュレーション時と同性能で駆動可能

## ■ ニュートリノ崩壊の観測に向けた超伝導接合素子 STJ を用いた光検出器の開発

- 遠赤外線の単一光子測定を目標 (エネルギー分解能 数%)
- STJ 検出器にて原理的に実現可能 → 実証・製作へ (産総研と共同)
- 極低温下の小信号の読み出し(低ノイズ化)が課題 → SOI 技術の導入

### Nb/Al-STJ(産総研 CRAVITY) の電流-電圧特性

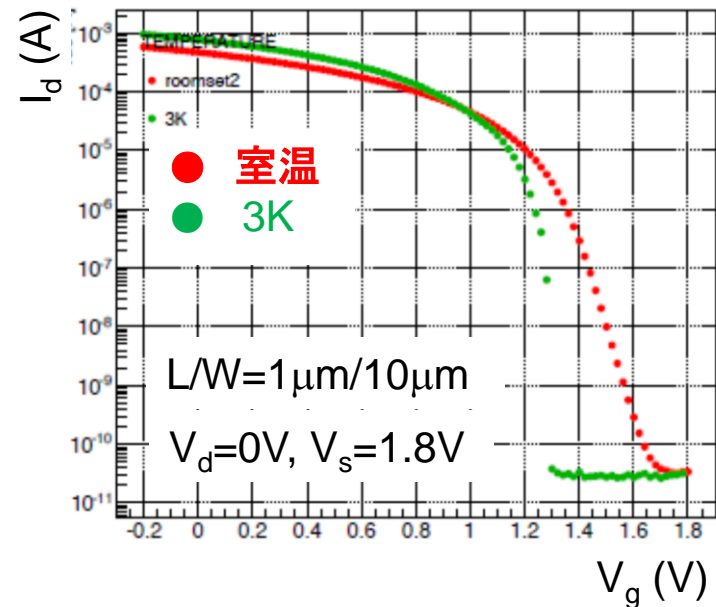


低漏れ電流 200pA@V=0.4mV を達成  
単一光子測定ではさらに有利に

他に, STJ 素子の静電容量の測定など

### SOIプロセスによる P-MOS FET の電流-電圧特性

電荷積分型増幅器の要素



3 K でトランジスタとして動作  
特性は室温から変化 → 理解・simulation

# 宇宙史国際研究拠点の研究成果発表のまとめ(H26年度)

論文 184件

国際会議報告 29件

国内研究会報告 75件

(部門別)

## 南極天文部門

論文数 18

国際会議報告数(国内研究会報告数) 1 ( 43)

## 素粒子構造部門

論文数 93

国際会議報告数(国内研究会報告数) 13 ( 23)

## クォーク核物質部門

論文数 73

国際会議報告数(国内研究会報告数) 15 ( 9)

# 拠点の計画と体制

- 光量子計測器開発推進室・逆問題推進室との連携
- 宇宙史コンソーシアム
- 宇宙史ワークショップ
- 年次計画
- 外部資金
- 概算要求



# 光量子計測器開発推進室

センター共有の光量子計測機器開発基盤+つくば地区連携大学拠点

筑波大およびつくば研究機関における理工学分野の密接な連携により、計測器開発に関する情報共有、計測器開発の融合共同研究、新しい計測器のアイデアの創出、計測器技術の産業社会応用を推進する。

## 数理物質融合科学センター

宇宙史国際研究拠点

融合研究企画室

環境エネルギー材料研究拠点

### 光量子計測器開発推進室

開発室員：金(室長)、富田、江角、原、西堀、近藤

超伝導検出器の開発, SOIピクセル検出器の開発, MPPC読み出しミュー粒子検出器等+公募プロジェクト

2015/10/19 発足

TIA-ACCELERATEの光量子センシングスクエア(光量子計測技術開発を目的とする)における筑波大学の活動拠点。

つくばの他機関との連携

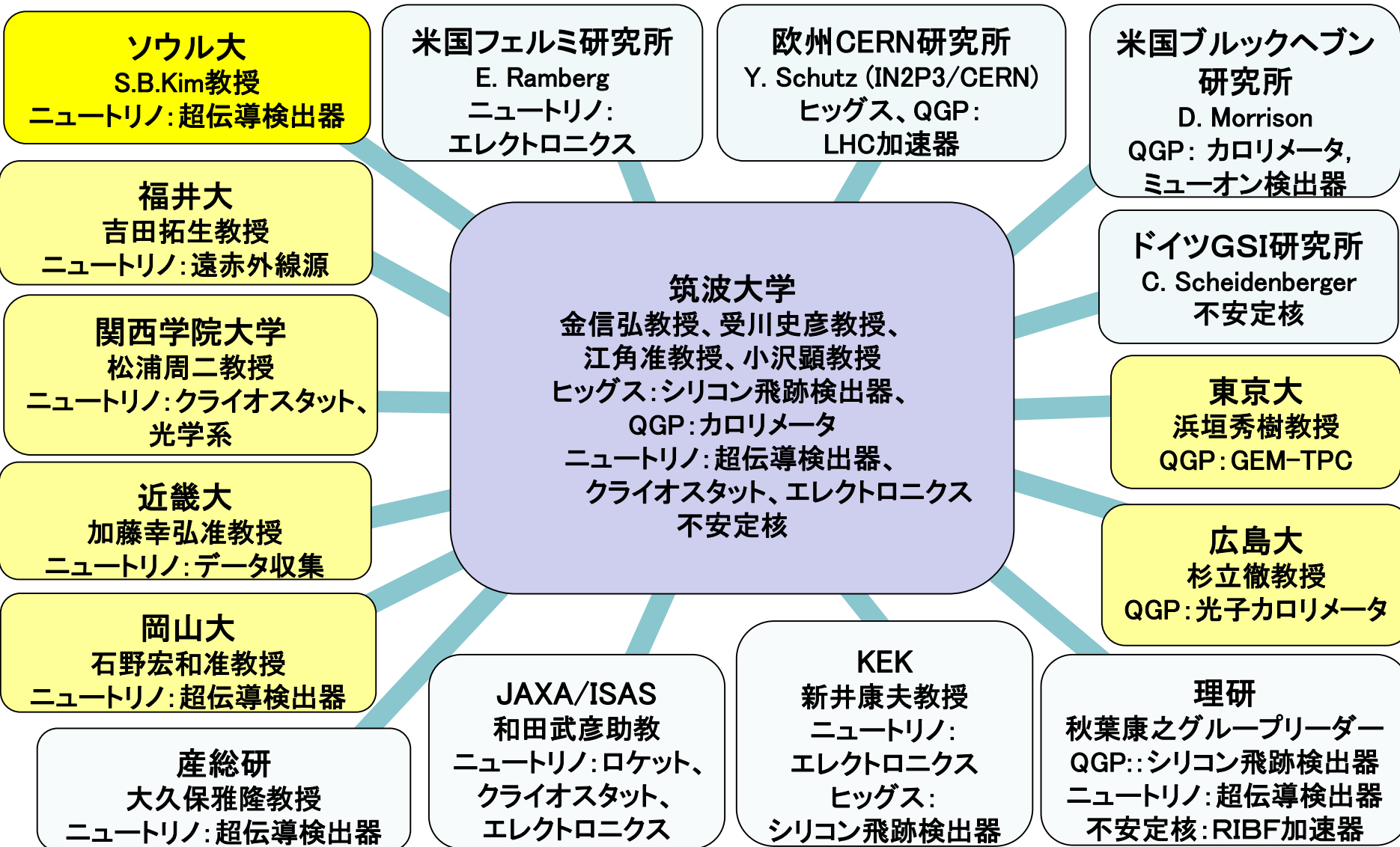
TIA-ACCELERATE  
光量子産業応用イニシアチブ

KEK 測定器開発室  
産総研 CRAVITY施設

宇宙史研究のための実験・観測に用いる計測器技術に関する情報共有を密にしながら、先端検出器の開発を推進。南極望遠鏡や素粒子原子核実験・理論の大規模データ解析と逆問題推進室の連携も同様に推進する。

# 宇宙史コンソーシアム

筑波大を中心とするオールジャパンチームと海外研究所・大学が宇宙史の統一的理解を目指した素粒子・原子核・宇宙物理学の融合研究を推進。→ 宇宙史国際研究セクター



# 宇宙史ワークショップ

## 2015/9/30 国際会議TGSW2015 宇宙進化・物質起源セッション

国際会議 Tsukuba Global Science Week 2015 (TGSW2015)

宇宙進化・物質起源(Universe Evolution and Matter Origin)セッション

日時: 9月30日 9時～17時30分:

場所: つくば国際会議場3階会議室300

参加者: 53名 (約10名の外国 人研究者(招待講演者5名)を含む)

このセッションは、筑波大学数理物質融合科学センター宇宙史国際研究拠点が目指す、素粒子・原子核・宇宙物理学の融合による宇宙史の統一的理解を飛躍的に推進させるために、多数の海外研究者を含めて宇宙史研究の情報交換と議論を行うことを目的として開催されました。

宇宙史コンソーシアムのソウル大学代表者等5名が招待講演者として参加。



プログラム等の詳細は宇宙史国際研究拠点ページをご覧ください。

<http://hep.px.tsukuba.ac.jp/CiRfSE/RCHOU/TGSW/2015/>



# 宇宙史国際研究拠点(朝永センター)研究年次計画

	初年度 2016	2年目 2017	3年目 2018	4年目 2019	5年目 2020	6年目 2021	
宇宙背景 ニュートリノ	超伝導検出器開発・制作		ロケット実験	データ解析			
			超伝導検出器開発・制作			衛星実験・データ解析	
南極天文台	電波カメラ開発		10m望遠鏡 制作・評価		輸送・建設	観測	
			超大規模電波カメラ開発		30m望遠鏡 設計・試作		
クォーク・ 核物質	PHENIX実験@BNL		データ解析				
	ALICE実験@CERN					実験@CERN	
ヒッグス 粒子	13 TeV ATLAS実験@CERN					実験@CERN	
不安定 原子核	N ≈ 50 RIBF実験@RIKEN						
			稀少RIリング アップグレード		N ≈ 126 RIBF実験@RIKEN		
宇宙・物質 シミュレーション	宇宙モデルによるシミュレーション => 実験・観測との直接比較 => 宇宙論パラメータの精密決定						
	=> 暗黒物質、暗黒エネルギーの詳細説明 => 宇宙構造形成、銀河形成理論の確立						
	元素創生モデルによるシミュレーション => RIBF実験との直接比較						
							=> 南極天文台観測との直接比較
		宇宙史 研究会	宇宙史 国際WS		宇宙史 研究会	宇宙史 国際シンポ	

これら5実験は日本学術会議マスタープラン2014大型研究計画として採択。

# 大型科研費・外部資金の獲得状況と計画

## 素粒子

### ニュートリノ

新学術領域「ニュートリノ」計画研究（代表 金）H25～H29 7800万円

基盤(S)「宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験」(代表 金) H28～ 2億円

### ヒッグス

新学術領域「ヒッグス」計画研究（分担 受川）H23～H27 5000万円

新学術領域「ATLAS実験」H28～ 2500万円

## 原子核

### QGP

日米科学技術協力事業「PHENIX実験」（代表 江角）H23～ 1億円

基盤(B)「グルオン衝撃波の探索」(代表 三明) H25～H28 1430万円

基盤(B)「ALICE実験前方光子検出器」(代表 中條) H25～H27 1911万円

日独共同研究「アリス実験における遷移放射検出器を用いた粒子識別とジェット物理」

(代表:江角)平成28年度～平成30年度

基盤(S)「ALICE実験-前方光子測定による高グルーオン密度物質と高温クォーク物質の解明」

(代表 中條)H28～

頭脳循環「ALICE実験遂行」(東大CNS、広島大、筑波大、代表:中條) 平成28年度～

基盤(A)「RHIC加速器のビームエネルギー走査によるクォーク物質相図の臨界点探索」

(代表:江角)平成28年度～平成32年度

基盤(A)「Parton fragmentation and jet structure in the QGP」

(代表:Busch)平成28年度～平成30年度

## 宇宙観測

### 南極望遠鏡

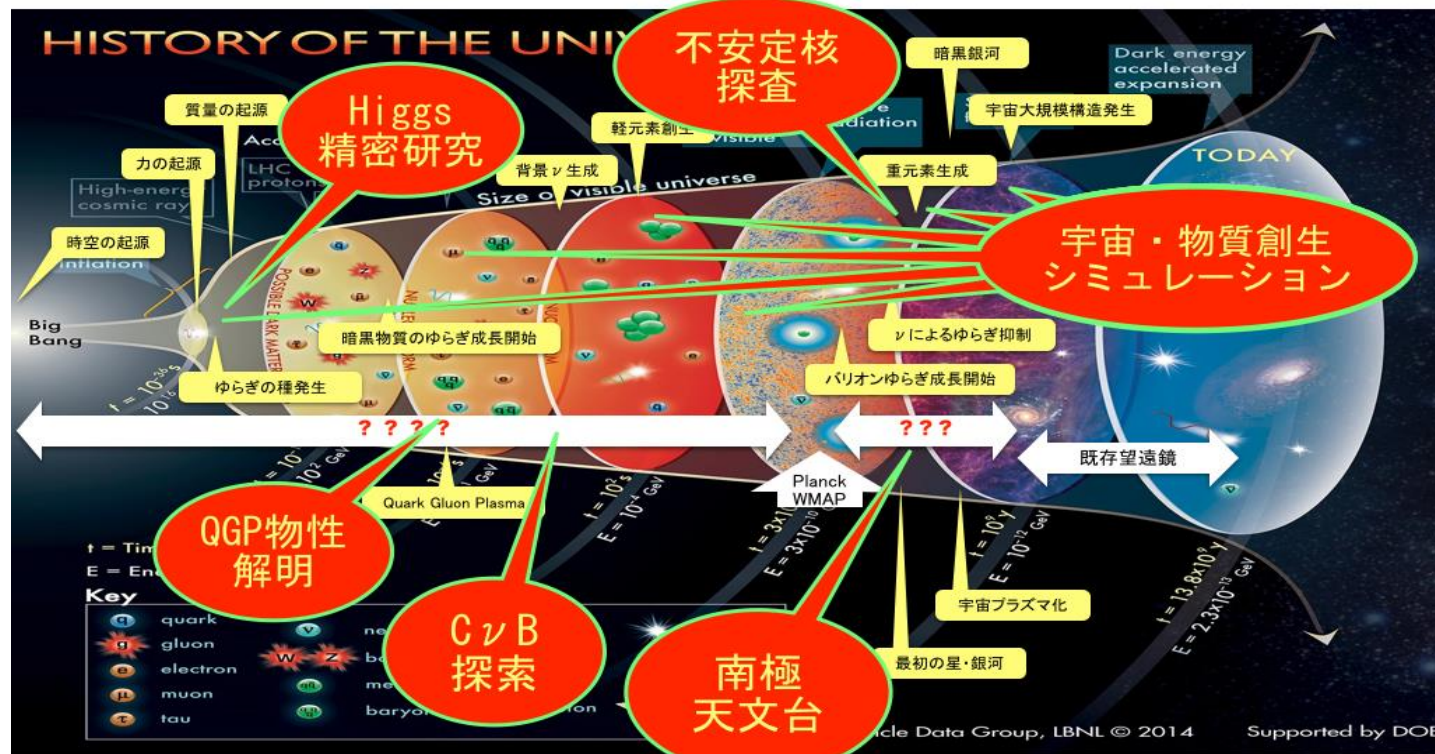
基盤(A)「大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天観測」(代表 中井)H26～H30 3250万円



# 概算要求：宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成

平成28年度 教育研究活動(プロジェクト等)に係る事業費要求(新規事業)

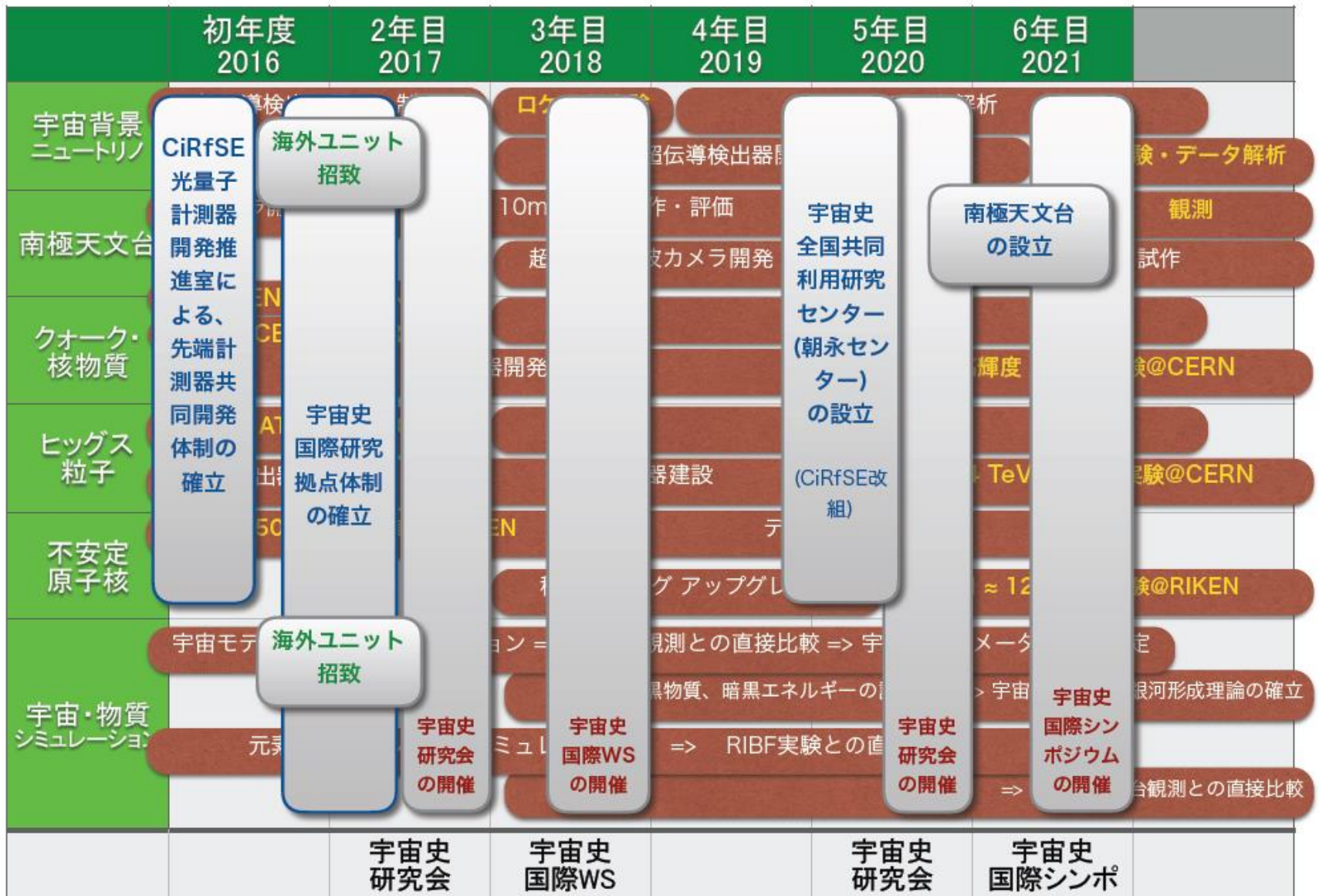
## 宇宙史の暗黒部分とその解明に向けて

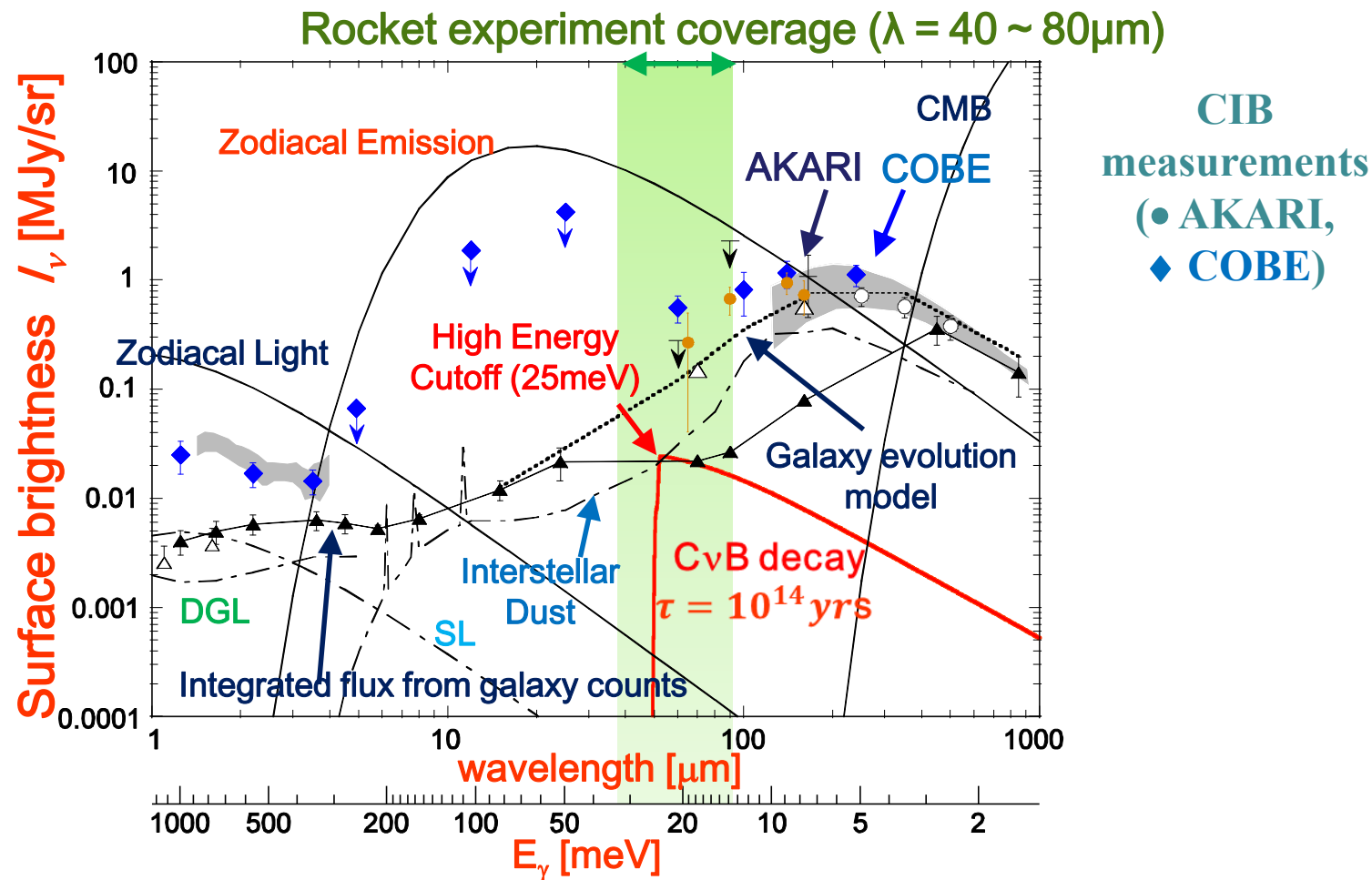


- ☑ 生命につながる元素の起源？
- ☑ 宇宙の構造の起源？ 力・物質・時空の起源？
- ☑ 実験的に未解明の領域(暗黒)が多く残されている。
- 最先端の宇宙観測、素粒子・原子核実験プロジェクトを有機的に融合
- 現象とメカニズムの同時解明
- 物質と生命の起源に迫る新領域の国際的研究ネットワークを形成

宇宙史の暗黒部分の解明に向けて、筑波大学が主導する5つの大型実験プロジェクトとシミュレーション研究を融合。

# 年次計画





Source: S. Matsuura Astrophys. J. 737 (2011) 2