

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索COBAND実験

Cosmic Background Neutrino Decay search COBAND Experiment

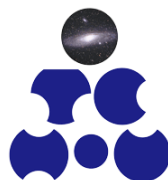
金 信弘
筑波大学数理物質系／宇宙史研究センター



COBAND Collaboration

金 信弘, 武内勇司, 飯田 崇史, 武政健一, 若狭玲那, 浅野千沙, 笠島 誠嘉 (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, 坂井 誠, 中村 昂弘, 西村 航 (福井大学),
美馬 寛 (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), Yong-Hamb Kim, Hyejin Lee (Institute for Basic Science CUP)

- 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

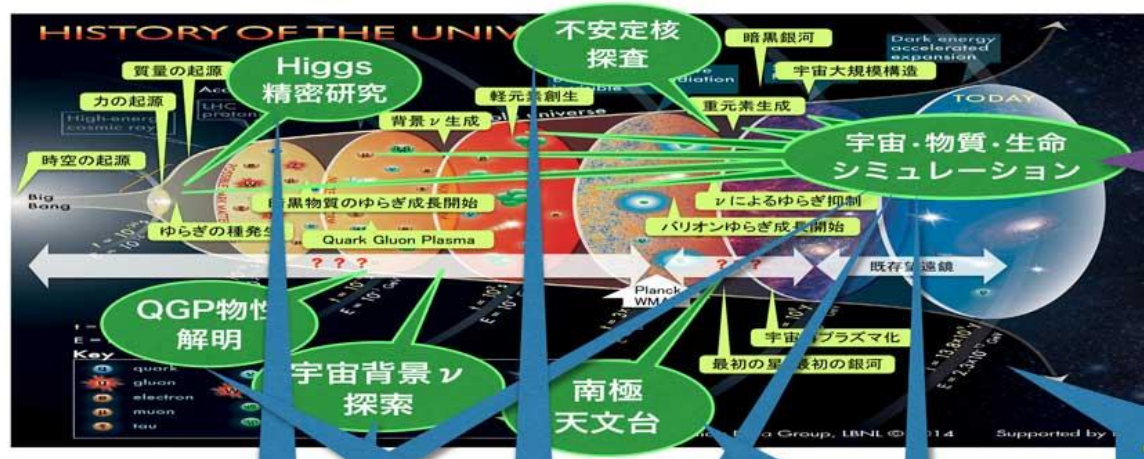


筑波大学

宇宙史研究センター

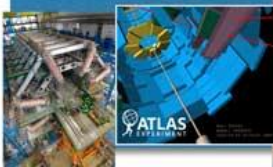
Tomonaga Center for the History of the Universe

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



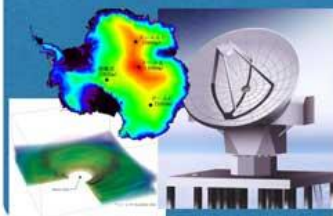
クォーク・ 核物質 研究部門

宇宙初期や中性子星内部のクォーク・グルーオン・プラズマを探求／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

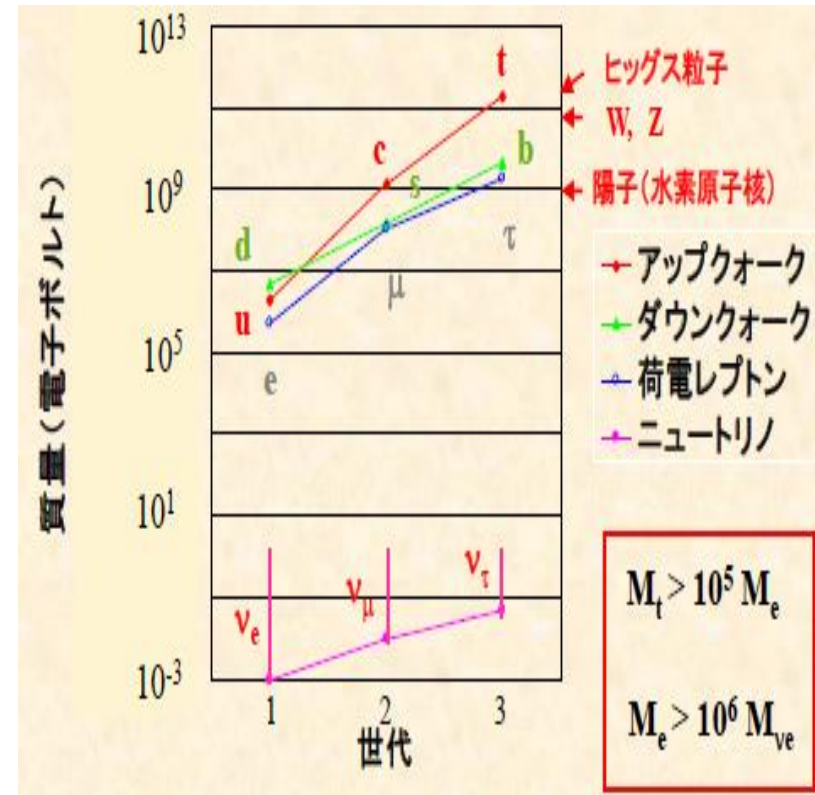
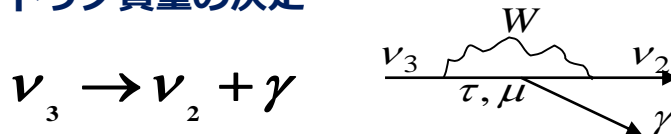
- 素粒子の質量がなぜ11桁以上違うのか？
- 同じ性質の（質量のみ異なる）粒子の繰り返し：
なぜ？

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 Δm^2 はニュートリノ振動実験により既知

本研究：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



- **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 = 3×10^{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

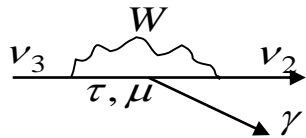
宇宙論で予言されるが未観測 \rightarrow その観測は宇宙論検証の意義を持つ

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

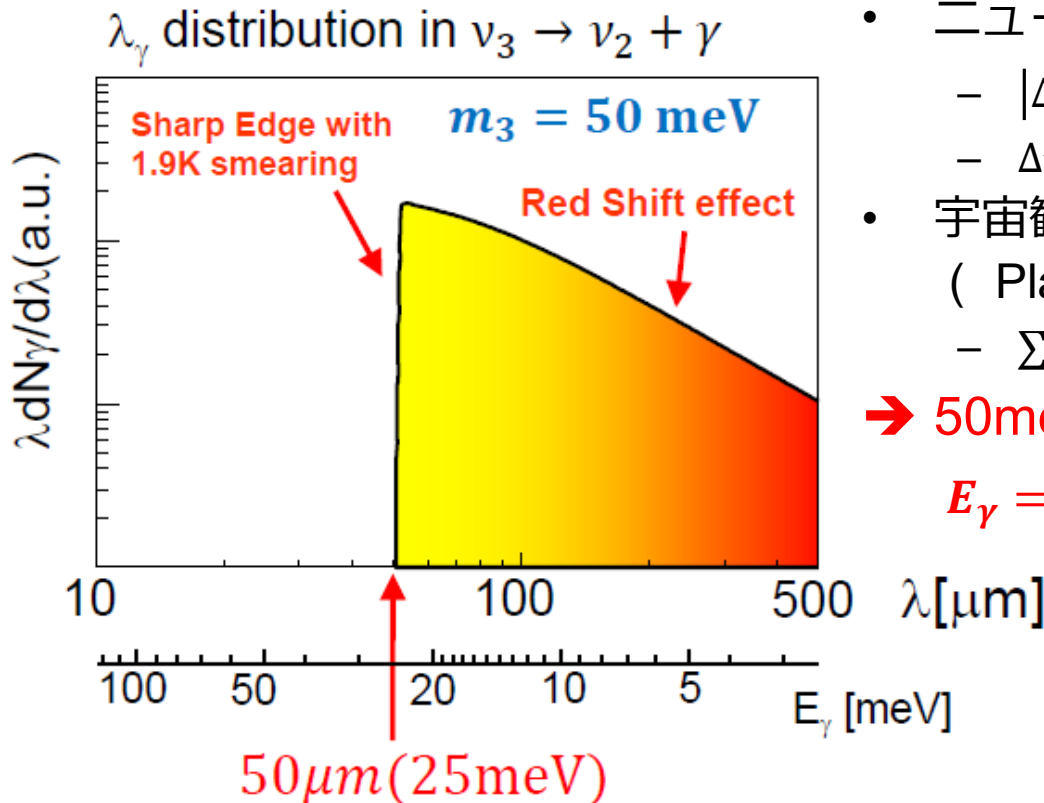
ニュートリノ崩壊で生成する光子のエネルギー分布

● 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)

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

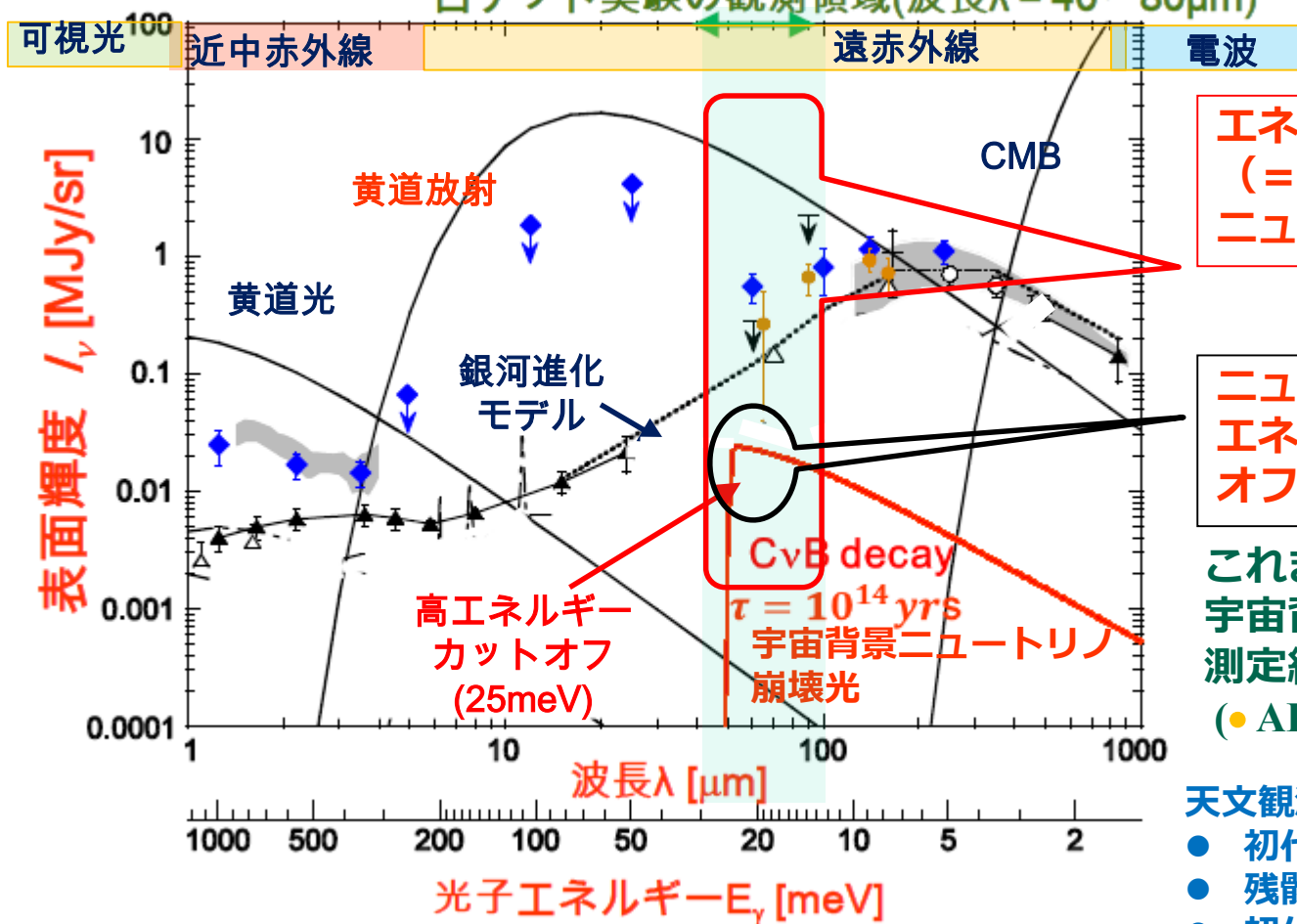
$$\rightarrow 50 \text{ meV} < m_3 < 87 \text{ meV}$$

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

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)

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 3×10^{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ロケット実験・衛星実験

ロケット実験計画: 2022年に高度200 km以上で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 3×10^{12} 年).

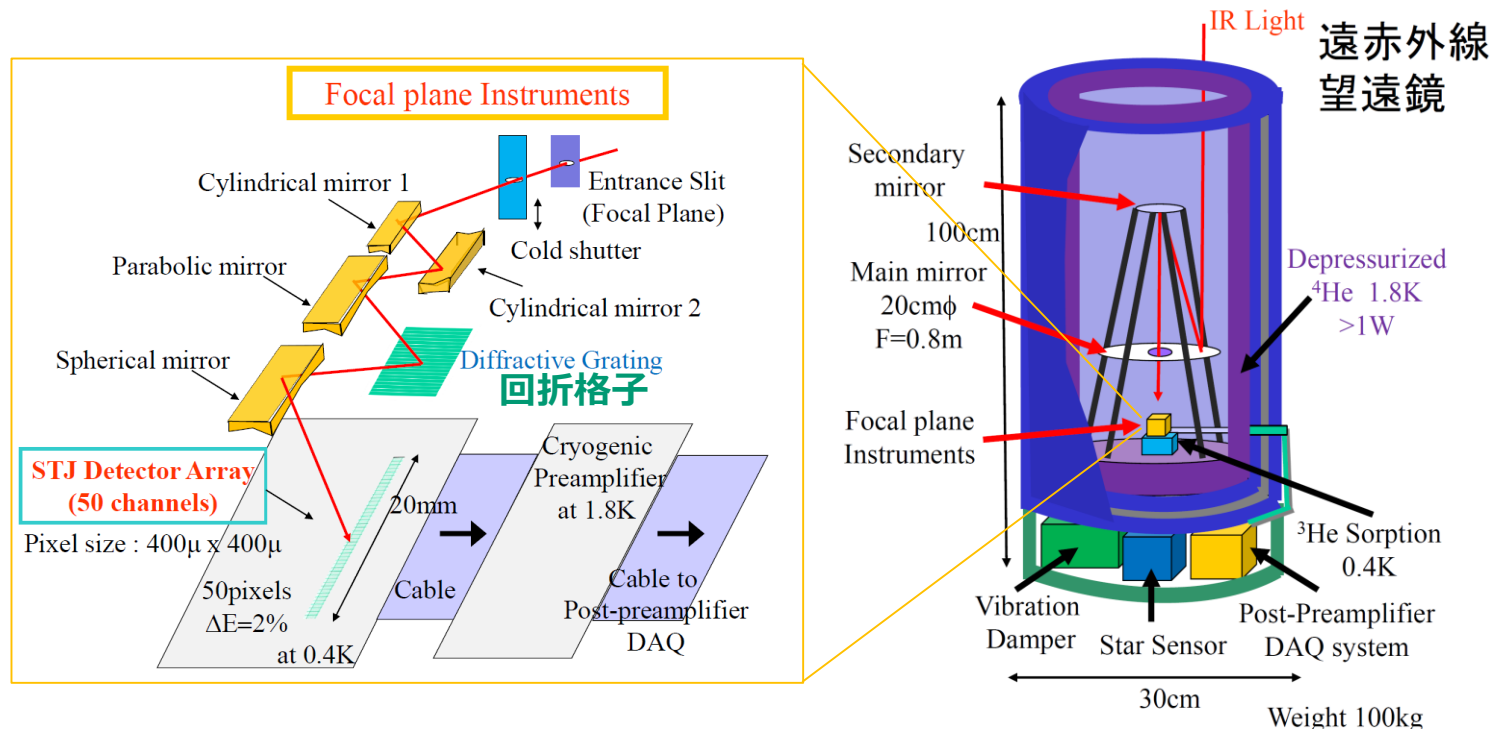
»超伝導トンネル接合素子 (STJ) 赤外線検出器を開発

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)



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

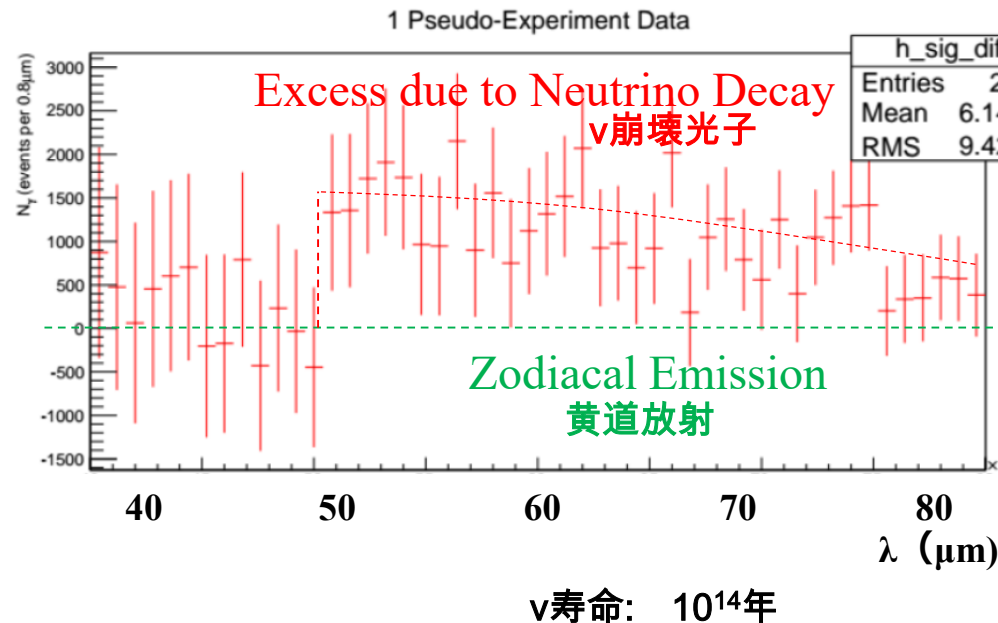
> Hf-STJ 赤外線検出器で衛星実験 (S. H. Kim et al. JPSJ 81,024101 (2012))

- $\Delta = 20 \mu\text{eV}$: 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。

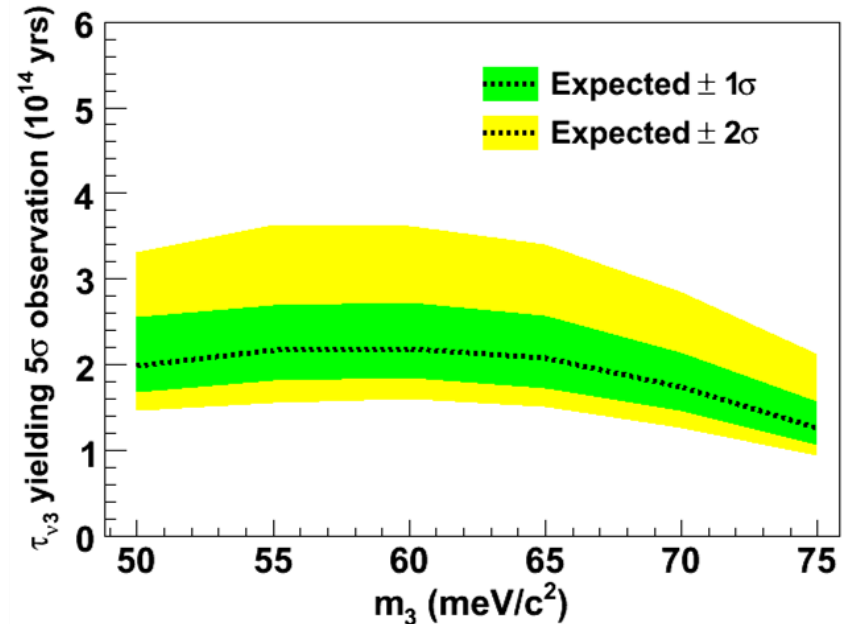
ロケット実験のニュートリノ崩壊検出感度

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験のパラメータ：

直径20cm，焦点距離80cmの主鏡，および50個の400 μ m角の検出器(検出効率20%)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。

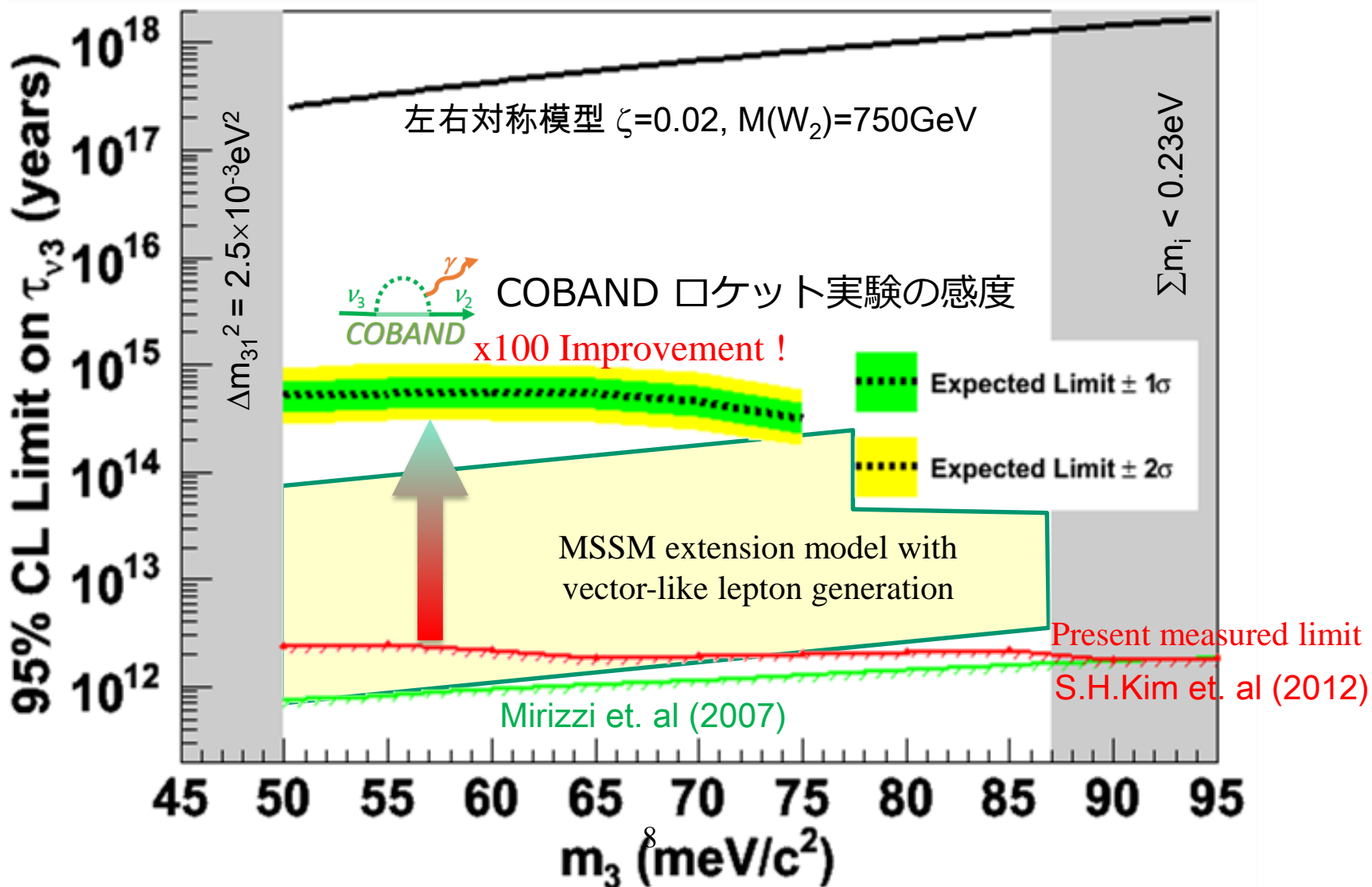


ニュートリノ寿命の感度 (5σ)
 ν s ニュートリノ質量 m_3



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

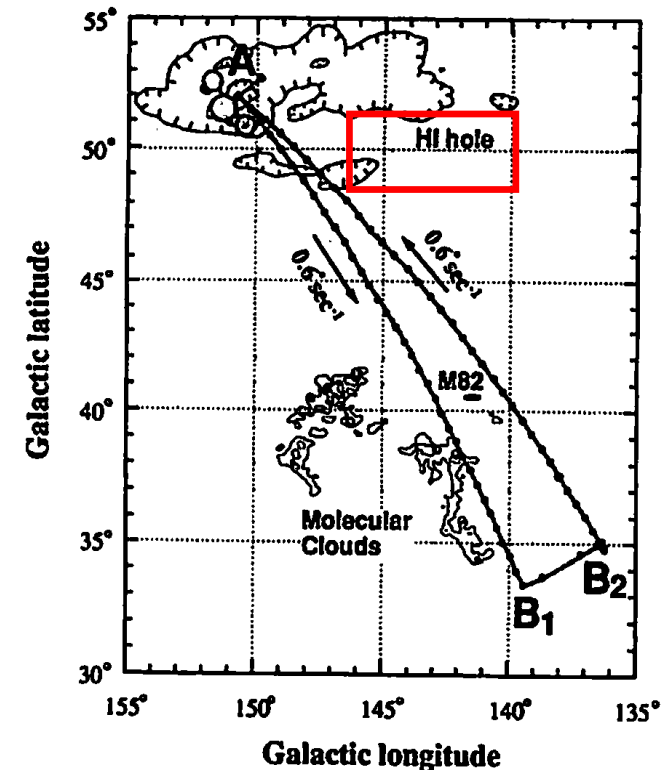
本実験は1992年2月2日午前1時に実施されたS520-15実験で測定したのと同じ方向からの宇宙赤外線を観測する。 絶対志向精度 1° 、志向安定性 $0.1^\circ/\text{min}$

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 $Az=145^\circ$
	-	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

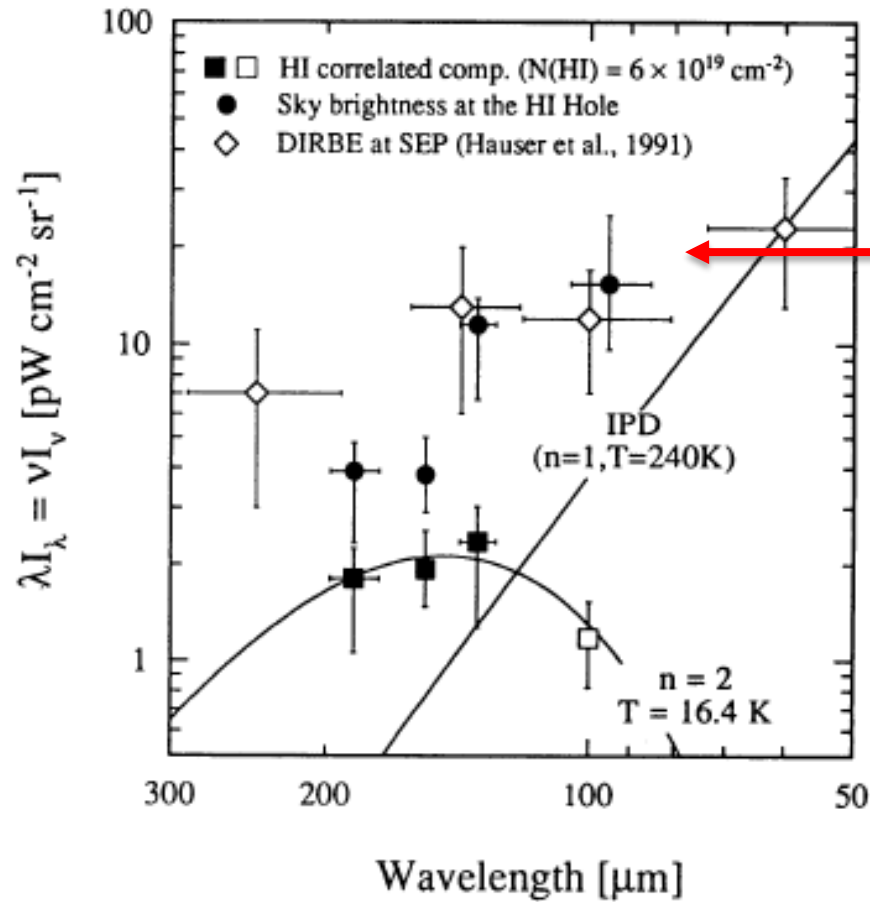
X	+	55秒	ロケットノーズコーンのカバーを除去 ポンピングラインのバルブを開ける。
	+	60秒	ロケットモーターを切り離す。
	+	61秒	ガスシェードを開ける。
	+	63秒	飛行姿勢コントロールを開始。
	+	90秒～	A点
	+	130秒	クライオスタットの蓋を開ける。(90秒間) 高度220km
	+	220秒～255秒	A点からB1点まで移動 (毎秒 0.6°)
	+	255秒～	B2点へ
	+	277秒～310秒	B2点からA点まで移動 (毎秒 0.6°) 高度338km
	+	310秒～430秒	A点 (120秒間)
	+	430秒～	地上へ向かう。(回復作業)
	+	480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° ）を經由して点Aへ戻ってきて、観測を行う。移動速度は毎秒 0.6° とする。

S520-15遠赤外線観測結果とCOBAND実験の測定範囲



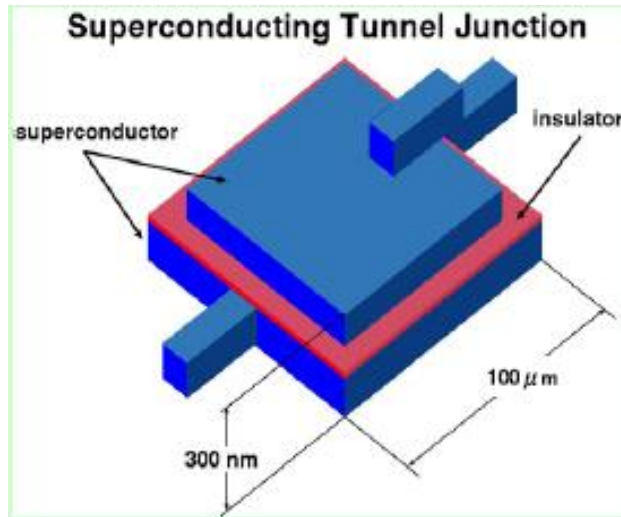
COBAND実験の測定範囲
40~80 μ (50点)

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

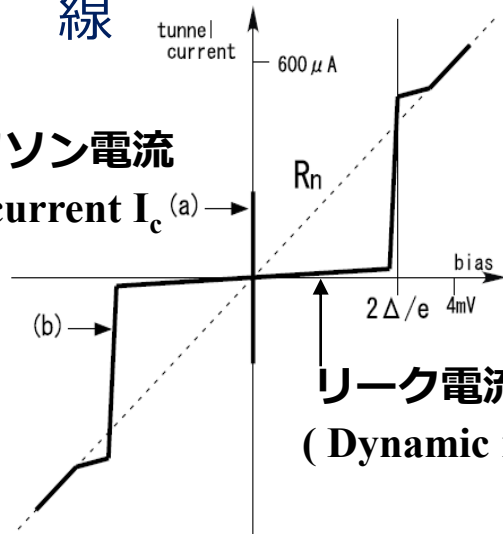


ジョセフソン接合で、準粒子はトンネル効果によって障壁を通過する。入射粒子によって励起された準粒子のトンネル電流を測定することによって、入射粒子のエネルギーを測定できる。

STJ I-V曲線

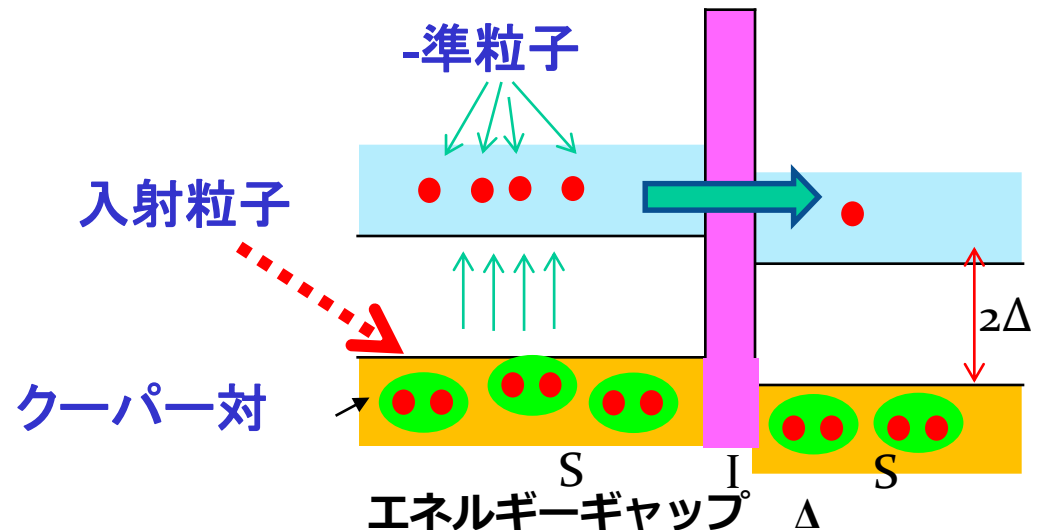
ジョセフソン電流

Critical current I_c (a) →



リーク電流

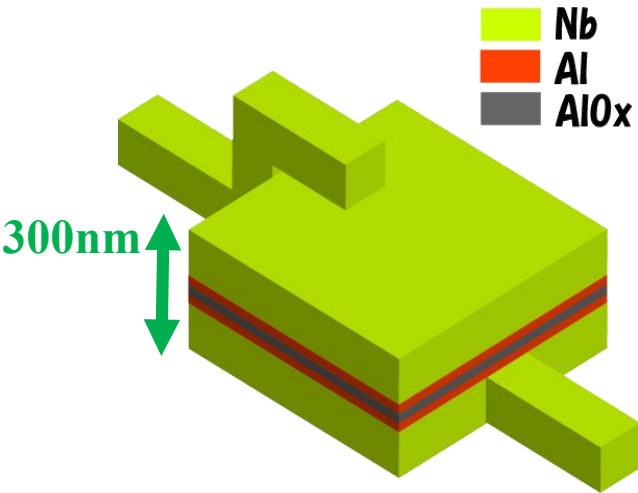
(Dynamic resistance R_d in $|V| < 2\Delta/e$)



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

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_{Al} : Alのトラッピングゲイン(~10)

E_0 : 入射光子エネルギー

Δ : 超伝導体のエネルギーギャップ

25meV の一光子に対して $N_q = 250\text{ e}$

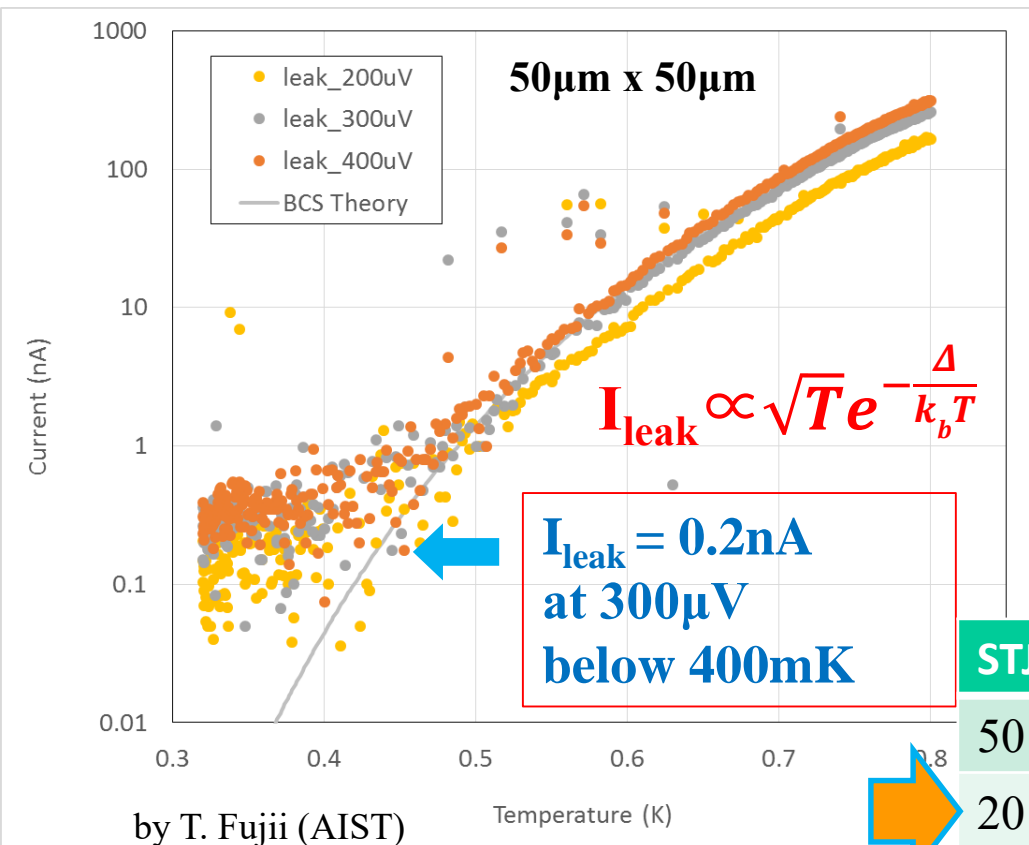
検出器に対する要求

- リーク電流 $I_{\text{leak}} < 0.1\text{nA}$: 20 μ 角のNb/Al-STJが要求を満たす。
- 10 μ s間に積分されるノイズ $< 30\text{e}$: 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_{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。

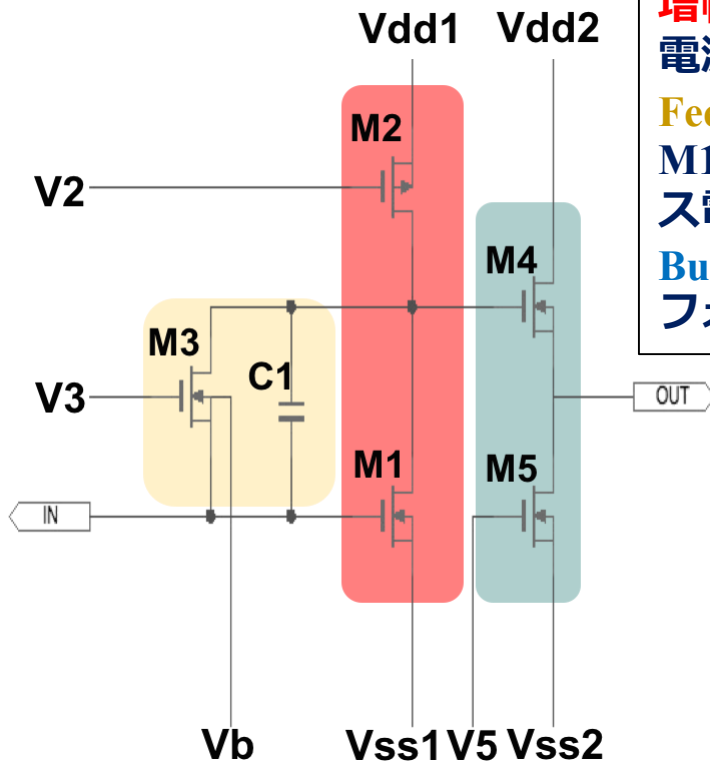
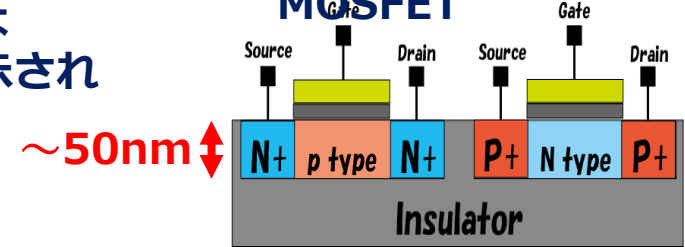
STJ size	# of samples	I_{leak} at 0.3mV
50 x 50 μm^2	18	224 \pm 29 pA
20 x 20 μm^2	7	39 \pm 13 pA
10 x 10 μm^2	20	14 \pm 7 pA

極低温SOI 増幅器

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 4th prototype)

FD-SOI - MOSFET



増幅部

電流源として、抵抗をSOIFET (M2)に置き換えた。

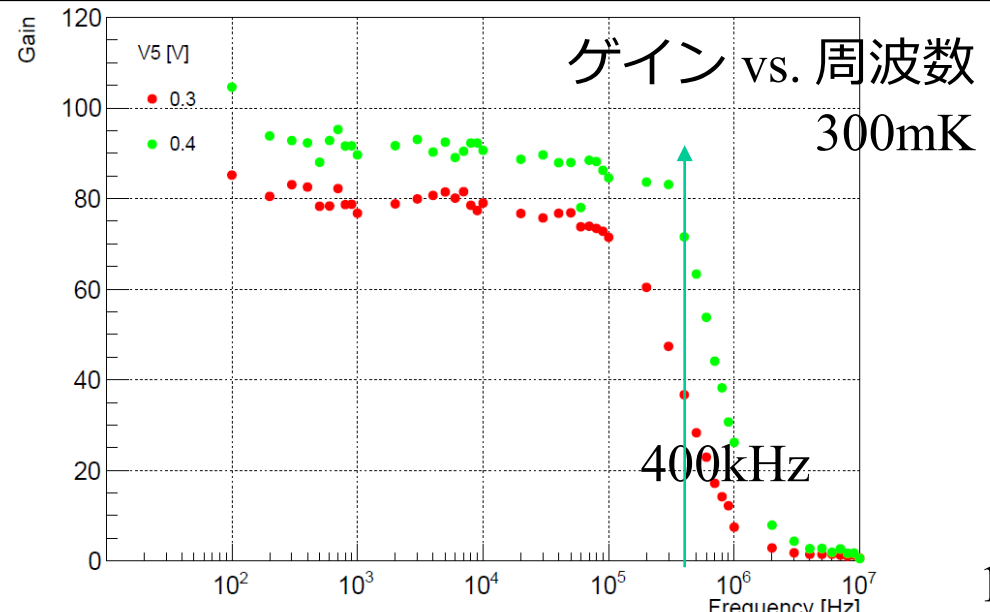
Feedback

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

フォロワーで出カインピーダンスを小さくする。

このSOI増幅器は LAPISセミコン
ダクター社製。

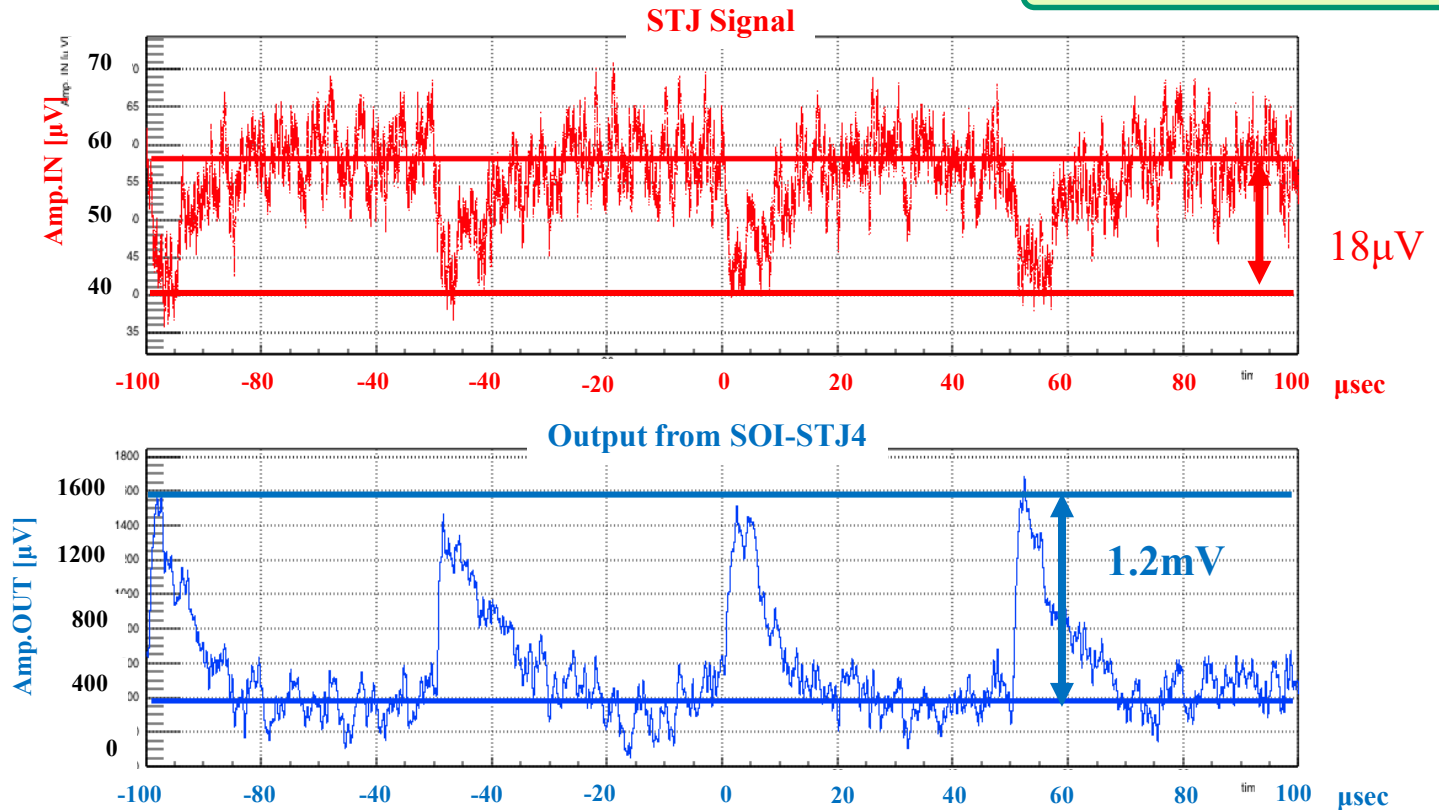
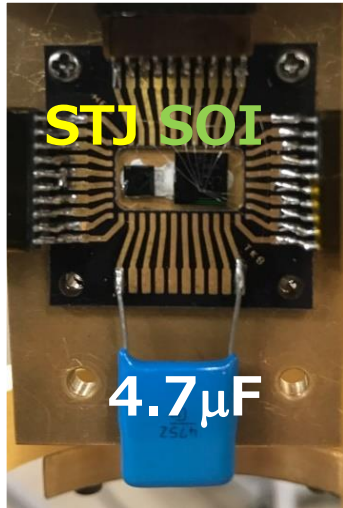


極低温SOI増幅器によるSTJ光応答信号の増幅

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倍電圧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

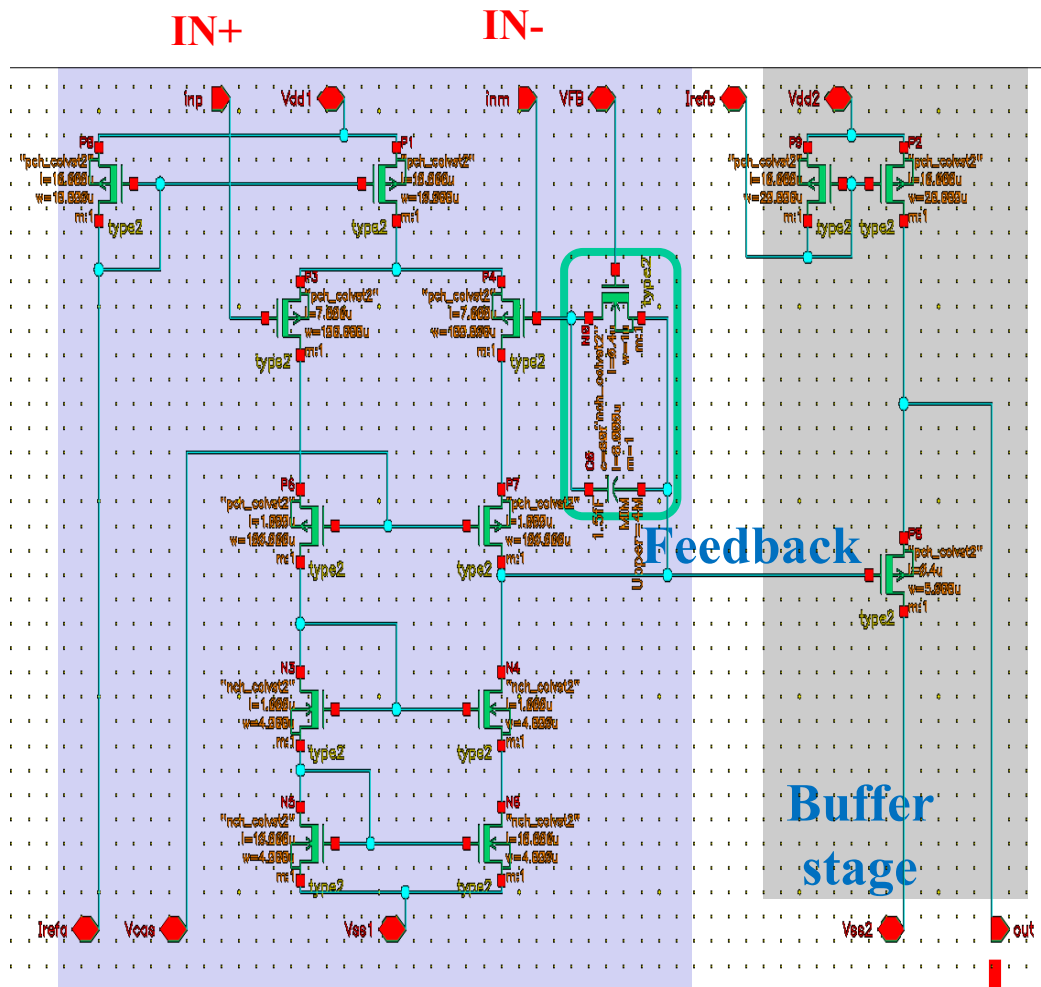


増幅ゲイン : 70

S/N : 2倍以上改善

STJ用電荷積分型増幅器

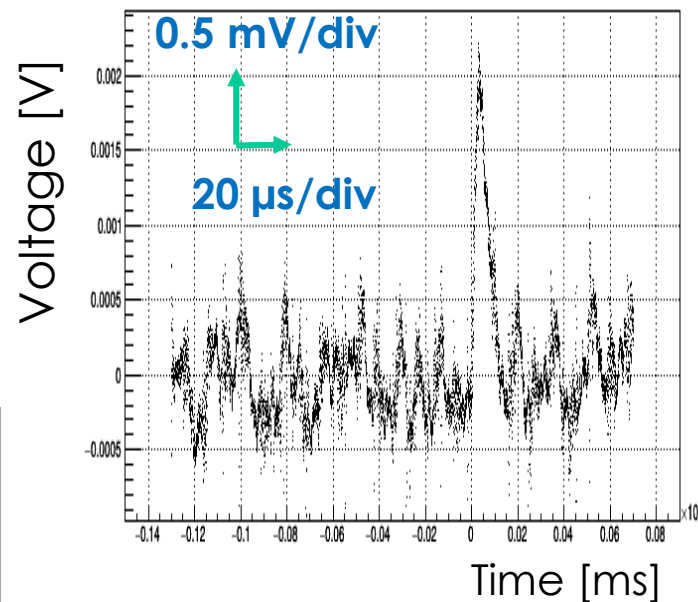
- 差分増幅オペアンプ 消費電力 $\sim 150\mu\text{W}$
- フィードバック $C(300\text{fF}) \times R(\text{FD-SOI MOSFET} \sim 50\text{M}\Omega) = 15\mu\text{s}$



Charge amplifier with
Telescopic cascode

OUT

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。

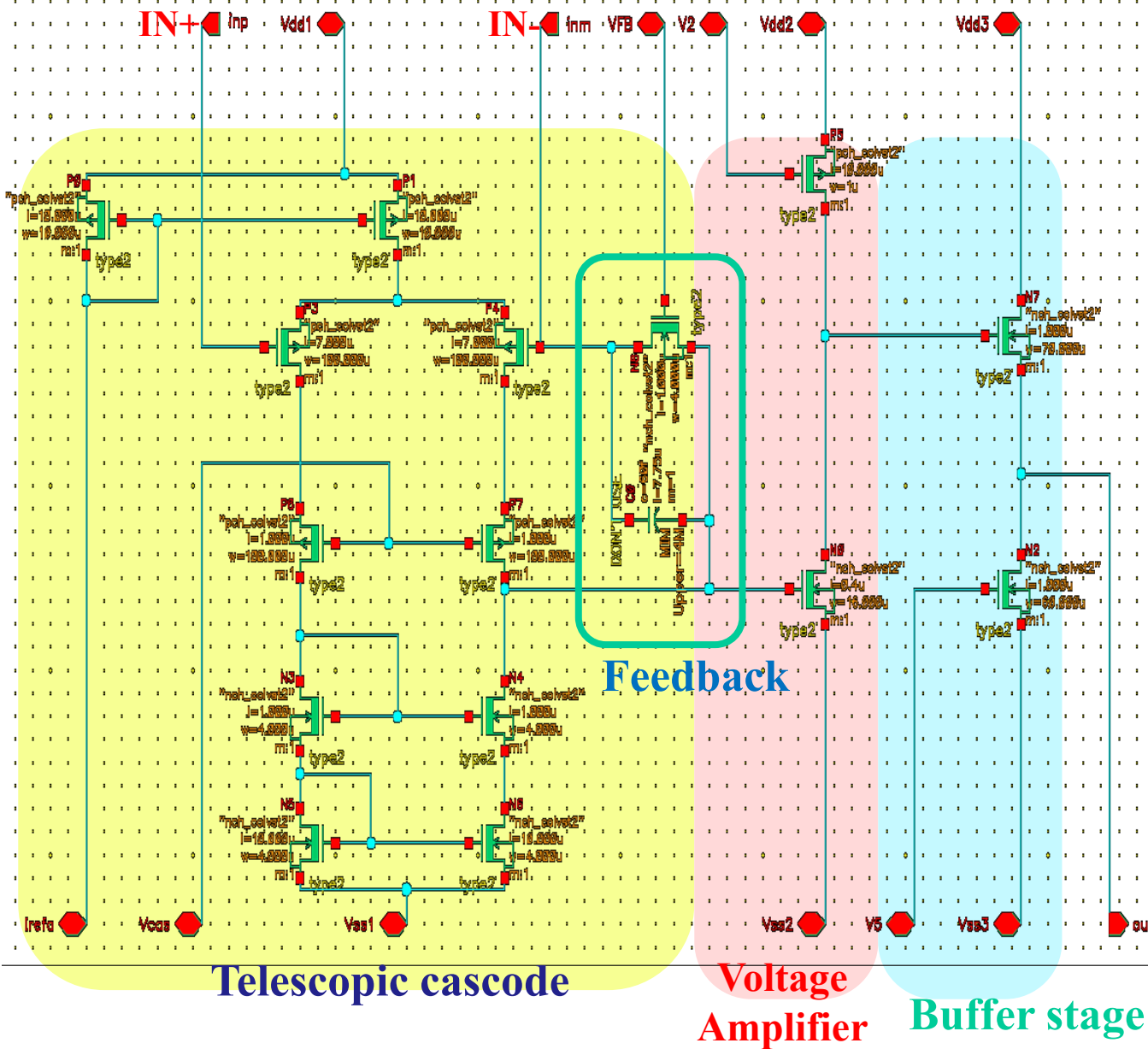
温度 350mK.

増幅率 $4.15 \pm 0.03 \text{ mV/fC}$

ENC $0.124 \pm 0.001 \text{ fC}$

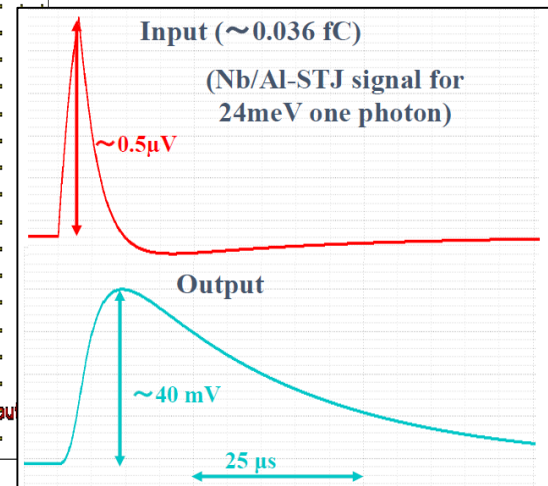
可視光1光子信号の電荷期待値 3.3fC

新STJ用電荷積分型增幅器



- フィードバックC
300fF → 60fF
- 80倍の電圧増幅部
- 増幅率~1.6V/fC
- 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

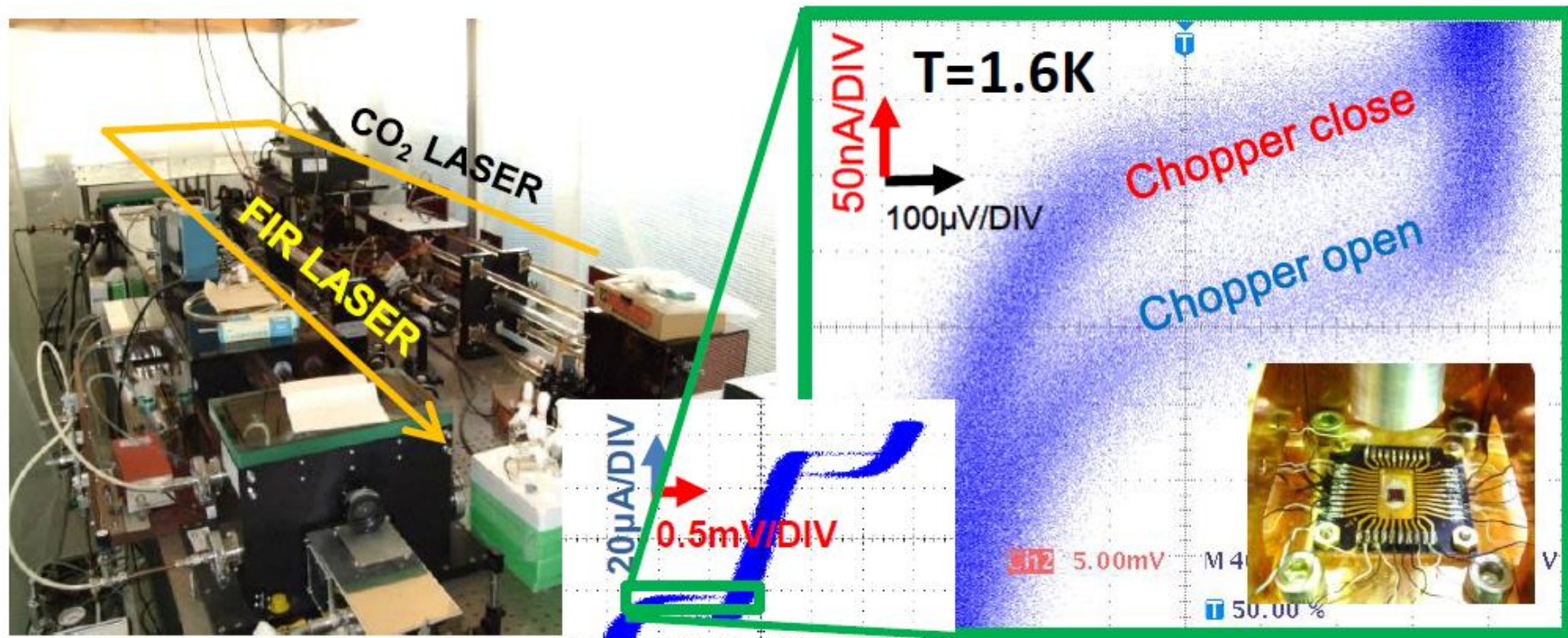


この極低温電荷積分型増幅器は筑波大で現在試験中。

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 ($\lambda=57.2\mu\text{m}$)

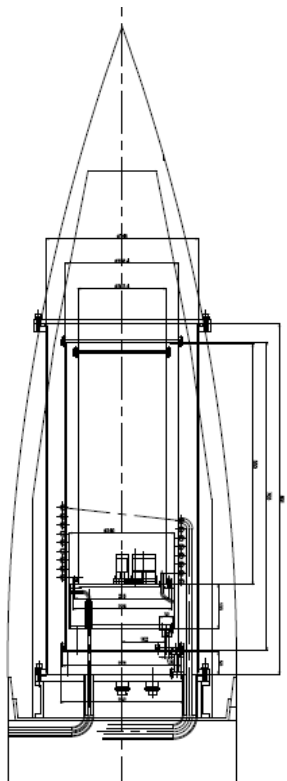
Nb/Al-STJ の遠赤外線レーザー応答



- 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.

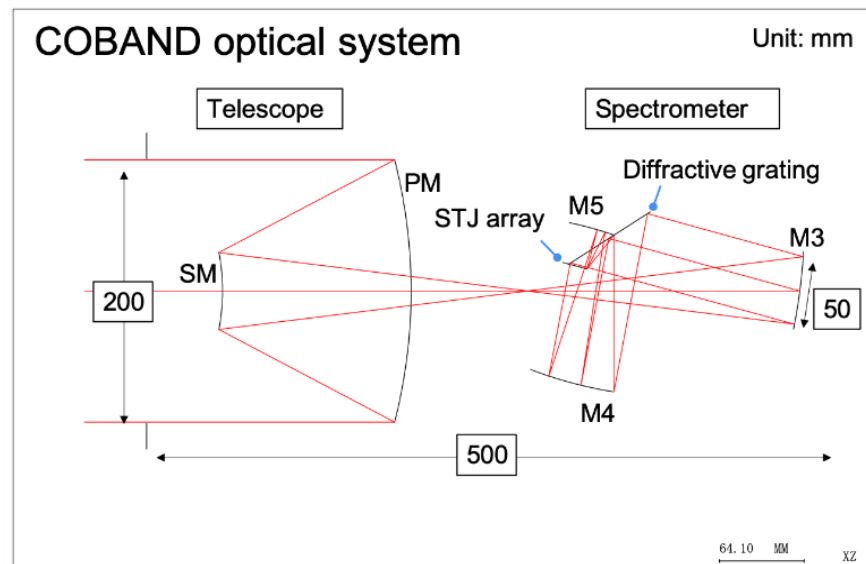
ロケット搭載用冷凍機・光学系

2017年4月に、ロケット搭載用冷凍機
プロトタイプを製作。 ^4He 減圧1.8K
冷凍機内 ^3He ソープション0.3K 冷凍
機 (現在は ^4He 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。



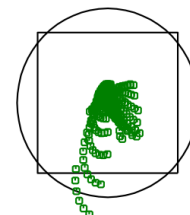
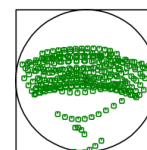
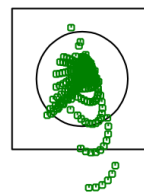
Imaging performance
(point spread function)

□ : STJ pixel size
○ : Diffraction ring

40 μm

60 μm

80 μm



シミュレーションによるSTJでの波長40 μm ,
60 μm , 80 μm の遠赤外光線の広がり
はピクセルサイズ400 μm 角に収まる。

COBAND実験のデータ収集(50channel FADC)

イベントレート： $\text{Rate}/50\text{pixel-spectrometer} = 120 \text{ kHz} \text{ (} 2.4\text{kHz/pixel)}$

データサイズ： 7ビットFADC (サンプリング $1\mu\text{s}$ 毎、最大 127counts)
10ビット時間 ($10\mu\text{s}$ 単位で最大10ms)

データ収集時間： 340sec

<データをコンパクト化しない場合>

- 毎秒 7ビットFADC $\times 10^6 \text{ Hz} \times 50\text{channels} = 0.35 \text{ Gbits/sec}$
- 全体340秒間 $0.35 \times 340 = 119 \text{ Gbits}$
- 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 (10ms 単位で最大650sec) と10 ビット時間 ($1\mu\text{s}$ 単位で最大10msec) 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, 3.5Mbps 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6Mbps) 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。

まとめ

1. 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索COBANDロケット実験を2022年に実施する提案を行った。
2. COBAND実験のために下記の測定器開発が進められている。
 - 多チャンネルNb/Al-STJ検出器
 - 極低温 (0.4K) SOIプリアンプと読み出しエレクトロニクス
 - データ収集・転送
 - 光学系・回折素子
 - ロケット搭載用冷凍機 (0.4K)

BACKUP

COBAND実験チーム

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索の研究体制

数理解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

韓国基礎科学研究所
Y.H.Kim
Hf-STJ検出器

KEK
新井、羽澄
エレクトロニクス

産総研
大久保
SOI-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

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

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

理研
美馬
STJ検出器

静岡大
川人
エレクトロニク
ス

2018年～ 韓国基礎科

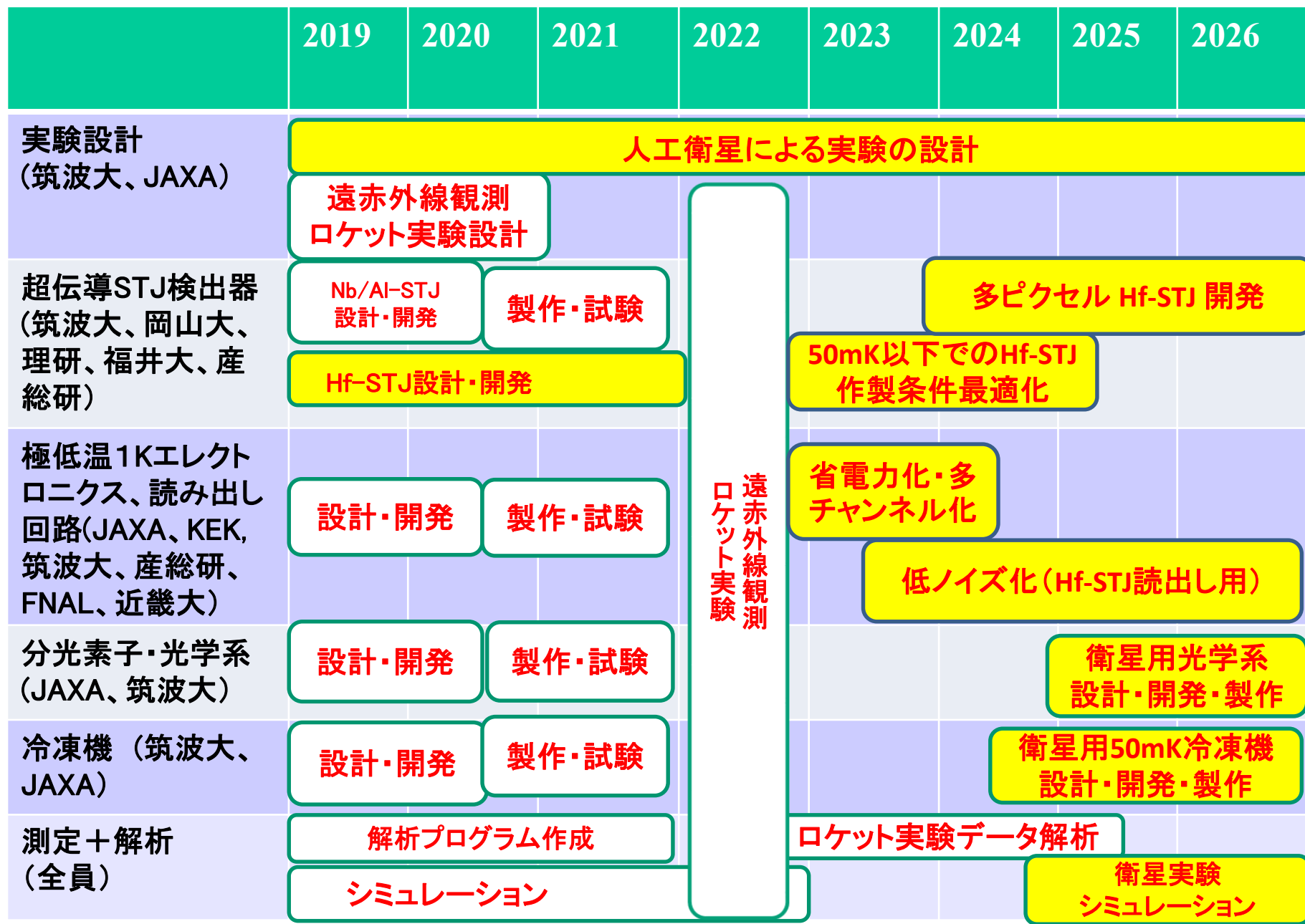
2015年～ 関学大、静岡大

2014年～ 産総研

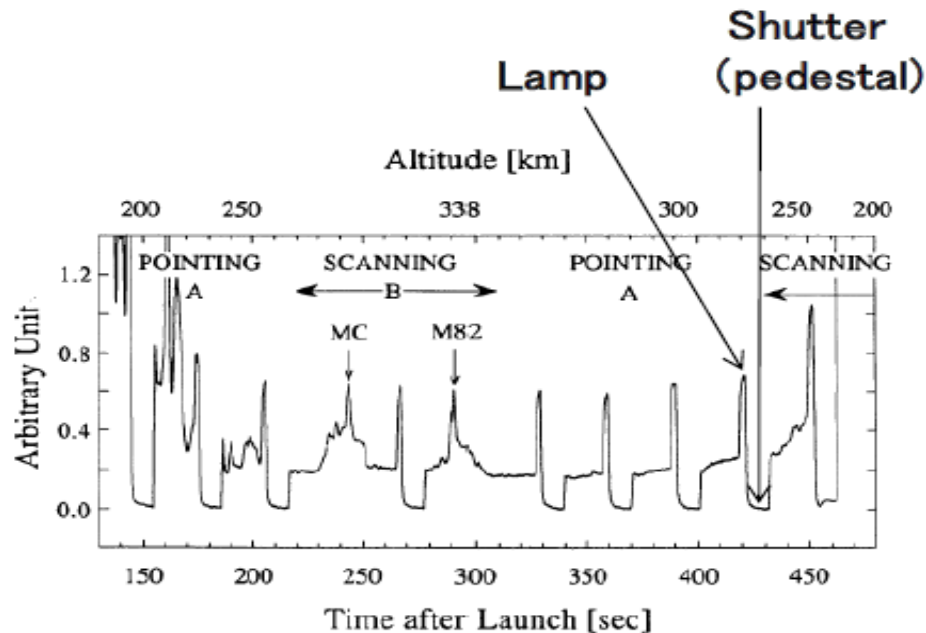
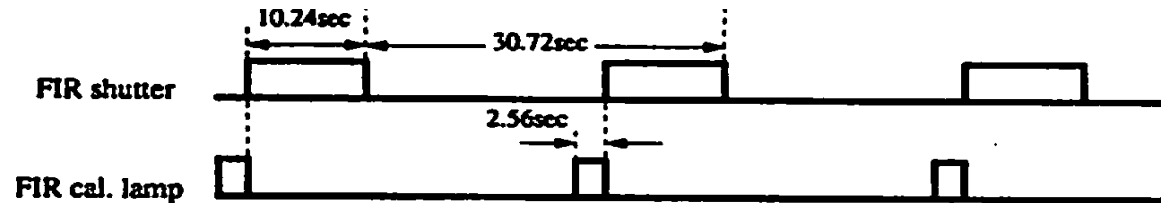
2011年～ FNAL、岡山大、福井大、近畿大

2007年～ 筑波大学、JAXA/ISAS、理研、KEK、ソウル大

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験計画



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。

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

Event rate: 2.4kHz/pixel X 50 pixel = 120 kHz

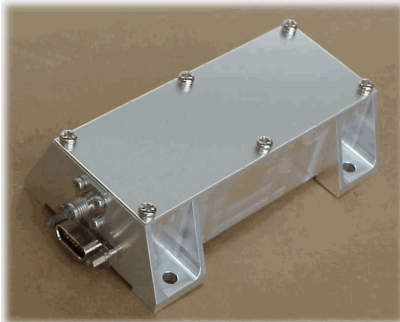
Data size: ADC 7 bit, 時間 10bit, pixel address 9bit



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。

委員会質問への回答 1

1)データ記録媒体の回収を希望しているが、本実験に対する必要性（必須か、あるいは可能ならば）を説明して欲しい。回収できない場合でも実験を実施する意思とあるとすれば、その場合にサイエンス価値はどの程度に留まるのか

A. コンパクト化無線データは、信号の大きさを積分値として記録したものであり、ノイズを落とすためのソフトウェア・フィルターをかけることができないので、信号とノイズの形がすべて記録できるデータ記録媒体を用いて、ノイズを落とすためのソフトウェア・フィルターをかけた場合に比べて、測定誤差が大きくなる。サイエンス価値に換算するのは、この時点では難しいのですが、誤差で2, 3割変わると予想される。すなわち、宇宙背景ニュートリノ崩壊感度が2, 3割悪化すると予想される。データ記録媒体を回収できない場合でも実験を実施したいと考えています。

2)目的から考えて、データは生データメディア回収とコンパクト化データ無線送信の併用が望ましいと考えられる。図10を見ると回収カプセルを搭載するスペースの余裕がないように見えますがスペースを割く対応はできますでしょうか。データ回収システムについてはS520-31号機で予定されているものを参考にされるといいと思います。

A. 図10の試作冷凍機は実機よりも長めに作成したもので、実機では、もう200mm程度短くなるので、回収カプセルを搭載するスペースを割くことができます。

3)S-520-31号機で使用予定の回収カプセルはノーズコーン内先端に搭載する想定になっています。望遠鏡を横向き等にすることは可能でしょうか。それが難しい場合はデータ回収は難しいかもしれない

A. 望遠鏡を横向きにする設計もこれまでにっており、可能です。

4)観測ロケットからの測定を希望する理由は何か。観測のプラットフォーム（人工衛星を除く）としては、地上観測、航空機搭載、気球搭載などがあるが、それらに比べて観測ロケットを選ぶ理由が知りたい。

A. 過去の宇宙遠赤外線観測の結果（S520-15）を見ますと、高度200km以下では大気からの遠赤外線が黄道放射に比べて10倍以上あり、そうすると宇宙背景ニュートリノ崩壊感度が30%程度になるので、高度200km以上での観測は不可欠です。以上の理由で、観測ロケットを選びます。

5)ロケットの姿勢制御（さらに測定中の姿勢変更）を希望しているが実現のためのハードルは高いと思われる。本実験を行うのに必要な姿勢要求（絶対精度、安定度）を示して欲しい。観測機器側で行うのならば、その方式と精度を示して欲しい。

A. 本実験の姿勢要求に関しては、測定方向に望遠鏡を向ける絶対指向精度は現行の1°程度でよいが、指向安定性は露出時間中に天体が視野角内にとどまれるよう0.1°/min以下が望ましい。観測機器側で姿勢制御を行うことを予定していません。

委員会質問への回答 2

6)追加で搭載を予定されている無線データ転送装置ですが、それなりの受信アンテナが必要になると思いますが、地上系の方もPI側で用意されるのでしょうか。

A. 地上系には、JAXA地上局に既存の50Mbps, S-bandの受信アンテナを使用することを希望します。

7)筑波大学宇宙史研究センターから強力な支援を受けているとありますが、概算費用のどれくらいがカバーされるのでしょうか。また、費用全体の予算調達の見通しを示して欲しい

A. 宇宙史研究センターからの支援は、助教・研究員・外国人招へい教授・併任教授の雇用などの人的な支援および旅費などが主であり、概算費用をカバーしていません。ただし、本提案がJAXAで承認されれば、宇宙史研究センターから本実験の概算要求を文科省に提出する可能性も出てきます。その予算がつかない場合にも、基盤s、新学術などの科学研究費予算によって概算費用を調達する予定です。

8)実施希望時期が非常に限られているが、その理由とフレキシビリティを教えてください。

A. 実施希望時期は2022年12月と書きましたが、これは厳密にこの月ということではありません。2022年11月～3月の冬季を希望します。冬季を希望するのは、S520-15で測定した測定点 (銀緯52°、銀径151°)と同じ測定点で観測を行うためです。

9)発射角EL=85度とあるのは高度要求からくるものか、ダウンレンジ要求からか（実際、EL=85度は実現できない）

A. EL=85°はS520-15と同じパラメータを用いましたが、S520-15と同じ測定点と高度250km以上が達成されるのであれば、このパラメータは変更して問題ありません。