

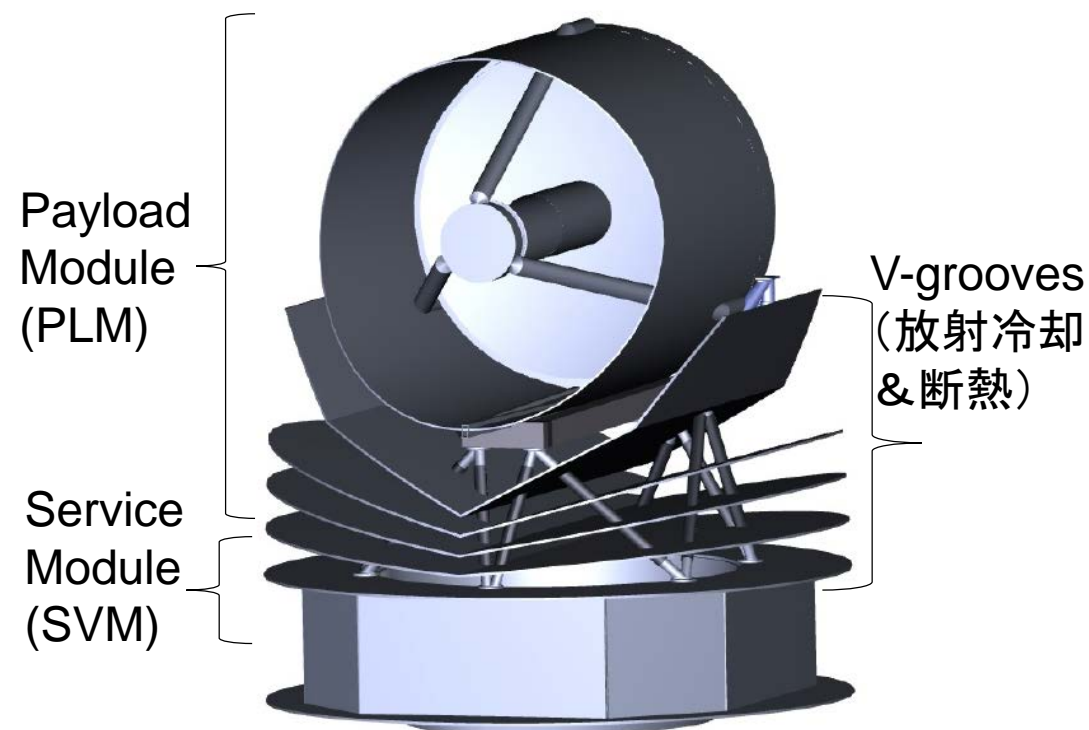
SPICA の遠中間赤外線 検出器

和田武彦、鈴木仁研 (ISAS/JAXA)

内容

- 次世代赤外線天文衛星SPICA
- 赤外線検出器
- SPICAの中間赤外線検出器
 - Si:Sb BIB 1024x1024
 - Si:As BIB 1024x1024
 - 熱設計
- SPICAの遠赤外線検出器(鈴木さん)

次世代赤外線天文衛星SPICA



- 外寸: $\Phi 4500$ mm x 5285 mm
- 質量: 2614 kg (dry, nominal),
 - 3450 kg (wet, with margin)

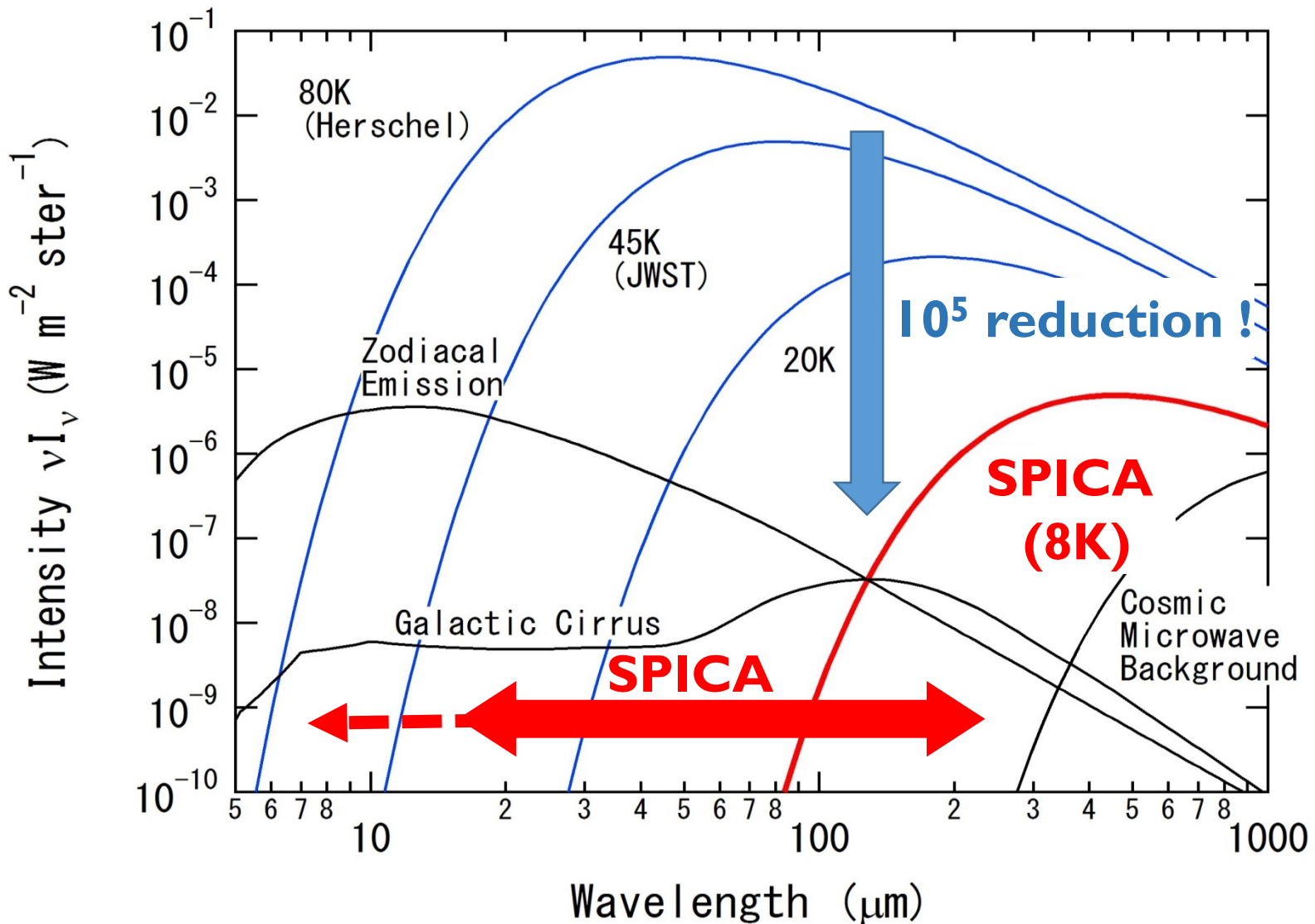
- 大口径: 2.5m
- 冷却望遠鏡: 8K
- 波長17-210 μ mの
- 遠中間赤外線で分光観測

- 放射と冷凍機による冷却
- 冷媒、真空容器が不要

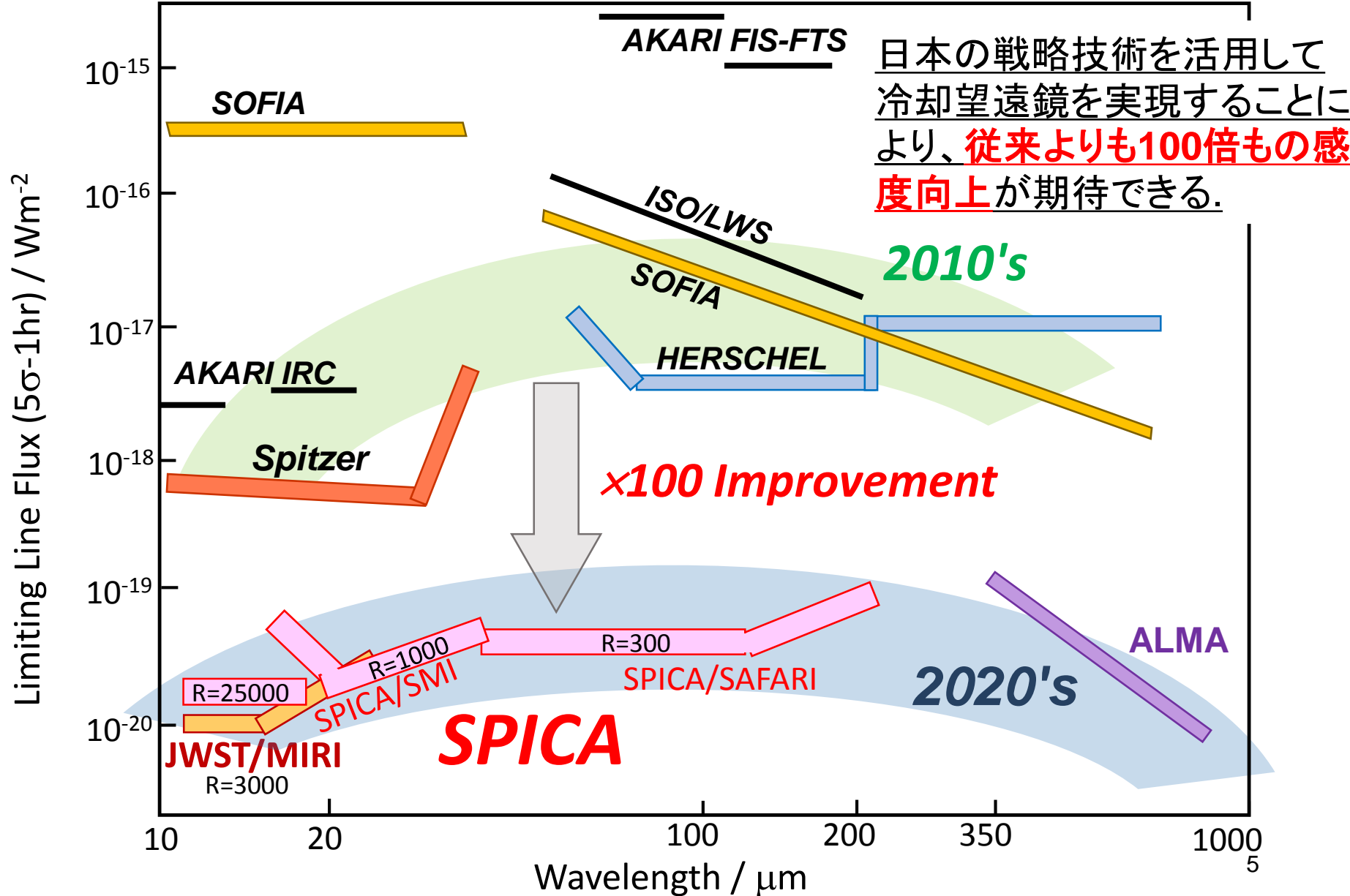
- JAXA H3ロケット
- L2に設置(地球から150万km)
- 2027-2028年打上
- 日欧共同ミッション

- ESA CDF study (2014)
- JAXA戦略的中型ミッション: MDR合格 (2015)
- ESA CV M5応募 (2016)

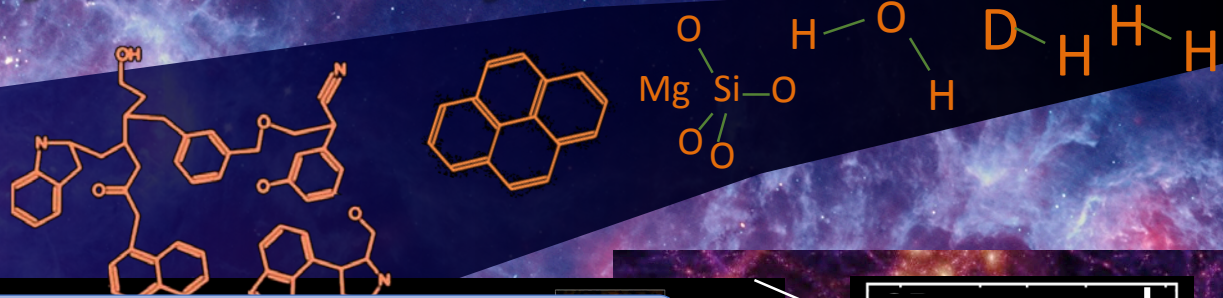
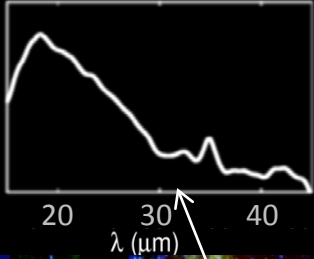
冷却により背景熱雑音を低減



遠中間赤外線で圧倒的な高感度

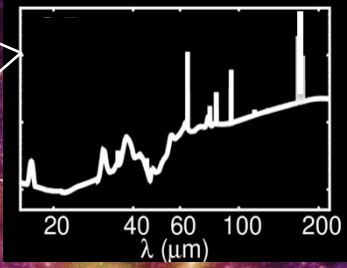


Enrichment of the Universe with metal and dust leading to the formation of habitable world



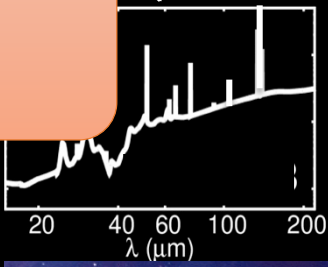
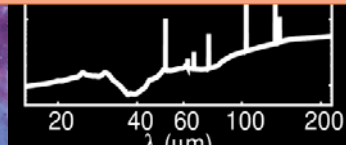
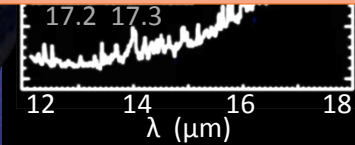
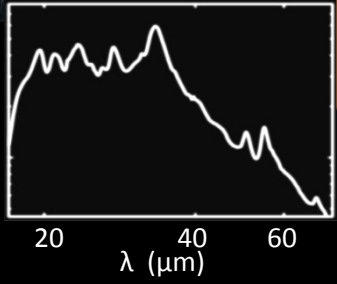
◆ Evolution of galaxies

◆ Formation of planetary systems



IR spectroscopy

1. Dust bands (organic matter, mineral, ice)
2. Extinction-free metal lines
3. Molecular hydrogen lines



SPICA観測装置

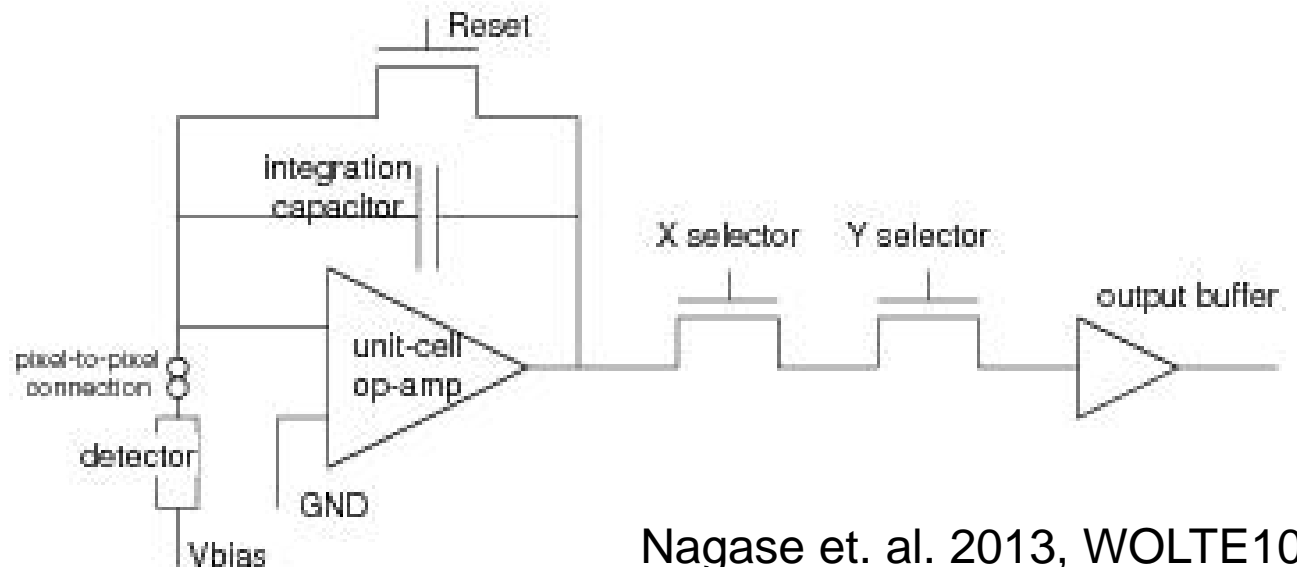
- 遠赤外線観測装置(SAFARI)
 - 波長34-210 μm
 - 波長分解能 $R=300$ の分光器
 - スペクトル線観測限界 $5 \times 10^{-20} \text{W/m}^2$ (5σ 1時間)
 - 赤方偏移 $z=3/115$ 億年前の銀河を10時間で分光観測
 - 超伝導転移端検出器(TES)
- 中間赤外線観測装置(SMI)
 - 波長17-36 μm 低分散分光器(LRS)
 - 連続波観測限界 $30 \mu\text{Jy}$ (5σ 1時間)
 - 赤方偏移 $z=3/115$ 億年前の銀河を1時間で分光観測
 - 波長18-36 μm 中分散分光器(MRS)
 - 波長12-18 μm 高分散分光器(MRS)
 - スペクトル線観測限界 $5 \times 10^{-20} \text{W/m}^2$ (5σ 1時間)
 - 赤方偏移 $z=3/115$ 億年前の銀河を10時間で分光観測
 - BIB型光伝導検出器
 - 波長12-17 μm ではSi:As BIB 1024x1024を使用
 - 波長17-36 μm ではSi:Sb BIB 1024x1024を使用

SPICA観測装置

- 遠赤外線観測装置(SAFARI)
 - 波長34-210 μm
 - 波長分解能 $R=300$ の分光器
 - スペクトル線観測限界 $5 \times 10^{-20} \text{W/m}^2$ (5σ 1時間)
 - 赤方偏移 $z=3/115$ 億年前の銀河を10時間で分光観測
 - 超伝導転移端検出器(TES)
- 中間赤外線観測装置(SMI)
 - 波長17-36 μm 低分散分光器(LRS)
 - 連続波観測限界 $30 \mu\text{Jy}$ (5σ 1時間)
 - 赤方偏移 $z=3/115$ 億年前の銀河を1時間で分光観測
 - 波長18-36 μm 中分散分光器(MRS)
 - 波長12-18 μm 高分散分光器(MRS)
 - スペクトル線観測限界 $5 \times 10^{-20} \text{W/m}^2$ (5σ 1時間)
 - 赤方偏移 $z=3/115$ 億年前の銀河を10時間で分光観測
 - BIB型光伝導検出器
 - 波長12-17 μm ではSi:As BIB 1024x1024を使用
 - 波長17-36 μm ではSi:Sb BIB 1024x1024を使用

赤外線画像センサー

- 光検知器
- 読み出し回路
 - 信号処理(積分等)
 - 画素選択回路



光検知

- coherent detection
 - 振幅と位相の両方検出(波として検出)
 - 超高速動作が必要
 - 直接検出 ~ GHz
 - Heterodyne ~ THz
 - 電波干渉計(ALMA) ~1 THz
 - 量子カスケードレーザー ~ 10THz
- incoherent detection
 - 振幅のみを検出
 - 熱型
 - 高感度な温度計と熱容量の小さな吸収体
 - **Transition Edge Sensor(TES)**
 - 量子型
 - 超伝導準粒子 (STJ, KIDS)
 - 量子井戸型
 - 半導体量子型
 - **BIB型光伝導検出器**



TI ADC12J4000

半導体量子型検出器

- X線から遠赤外線まで幅広く使われている。

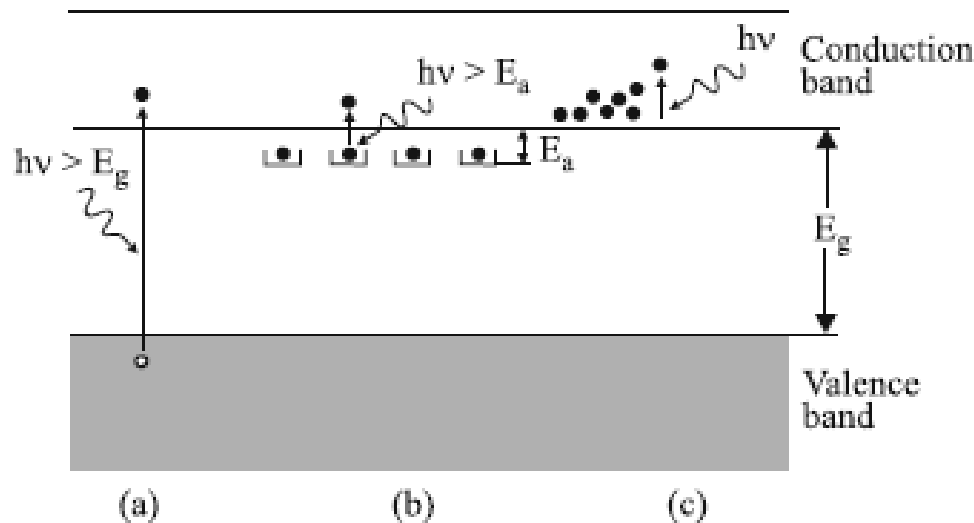
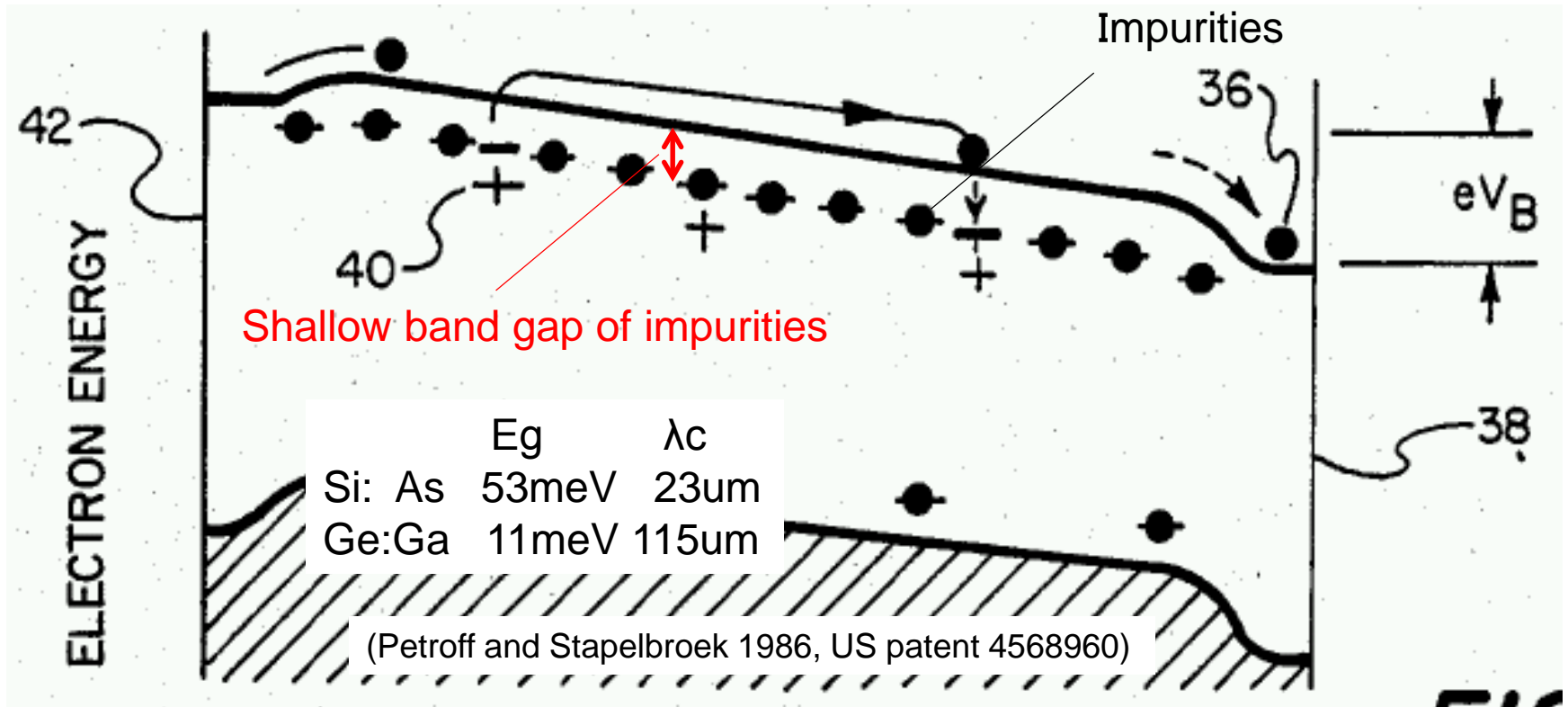


Fig. 18. Fundamental optical excitation processes in semiconductors: (a) intrinsic absorption, (b) extrinsic absorption, (c) free carrier absorption.

Rogalski and Sizov 2011, Opto-electron. Rev. 19, 346-404

- TESに対する優位性
 - 不要な電磁波に感度を持たない(熱型は何でも感じる)
 - 冷却が楽(遠赤外線でも2KでOK、TESは100mK以下に冷却)

外因性光伝導素子



- hopping電流による暗電流増加を避けるため不純物濃度を濃くできない
 - 量子効率の低下
 - 緩和が光電流(暗電流)によって行われる
 - 感度の不安定性
- Si系では20um

Blocked impurity band (BIB) detector

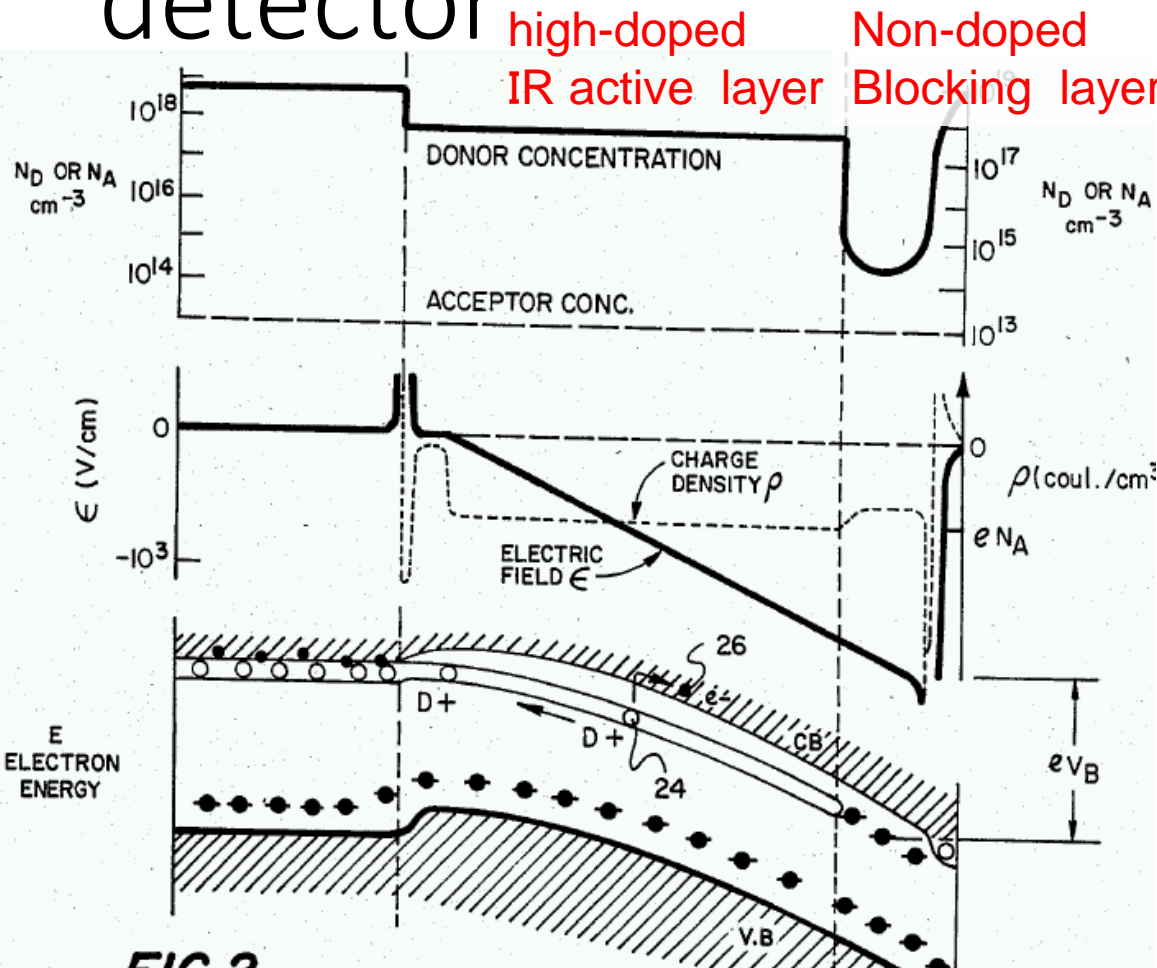


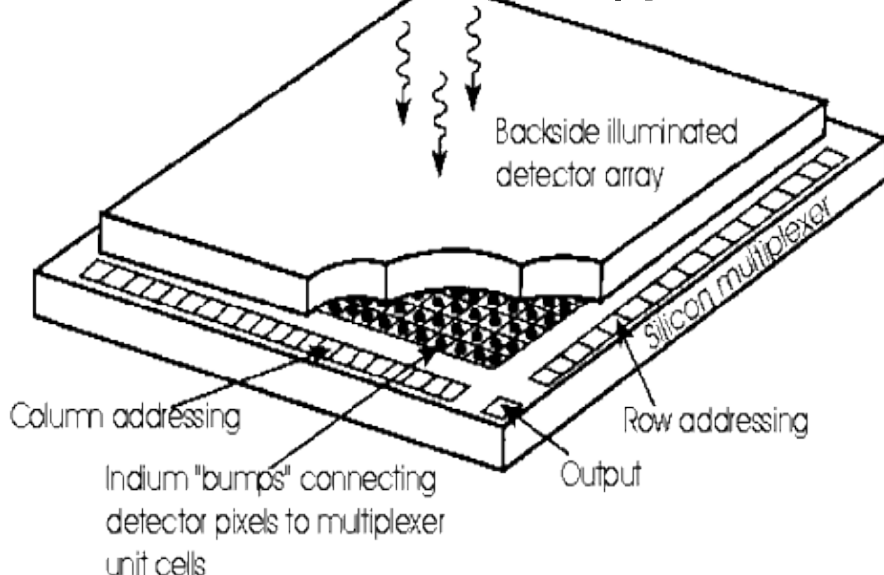
FIG.2.

(Petroff and Stapelbroek 1986, US patent 4568960)

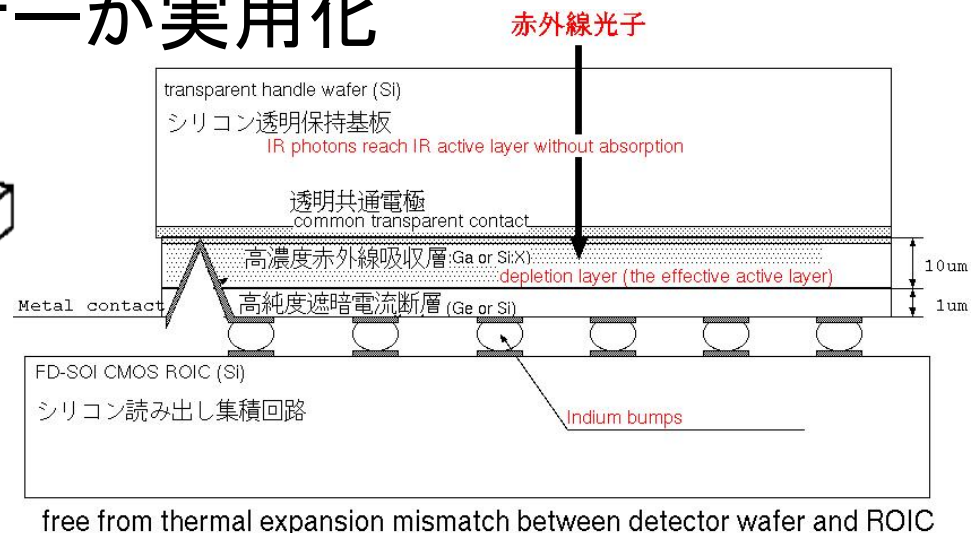
- 不純物濃度を濃く
 - 感度の向上
- 不純物バンドの形成
 - 緩和が不純物バンドで起こる
 - 感度が安定
 - Band gapが狭くなる
 - 長波長化
- 高純度層を配置
 - トンネル暗電流を抑制

中間赤外線画像センサー

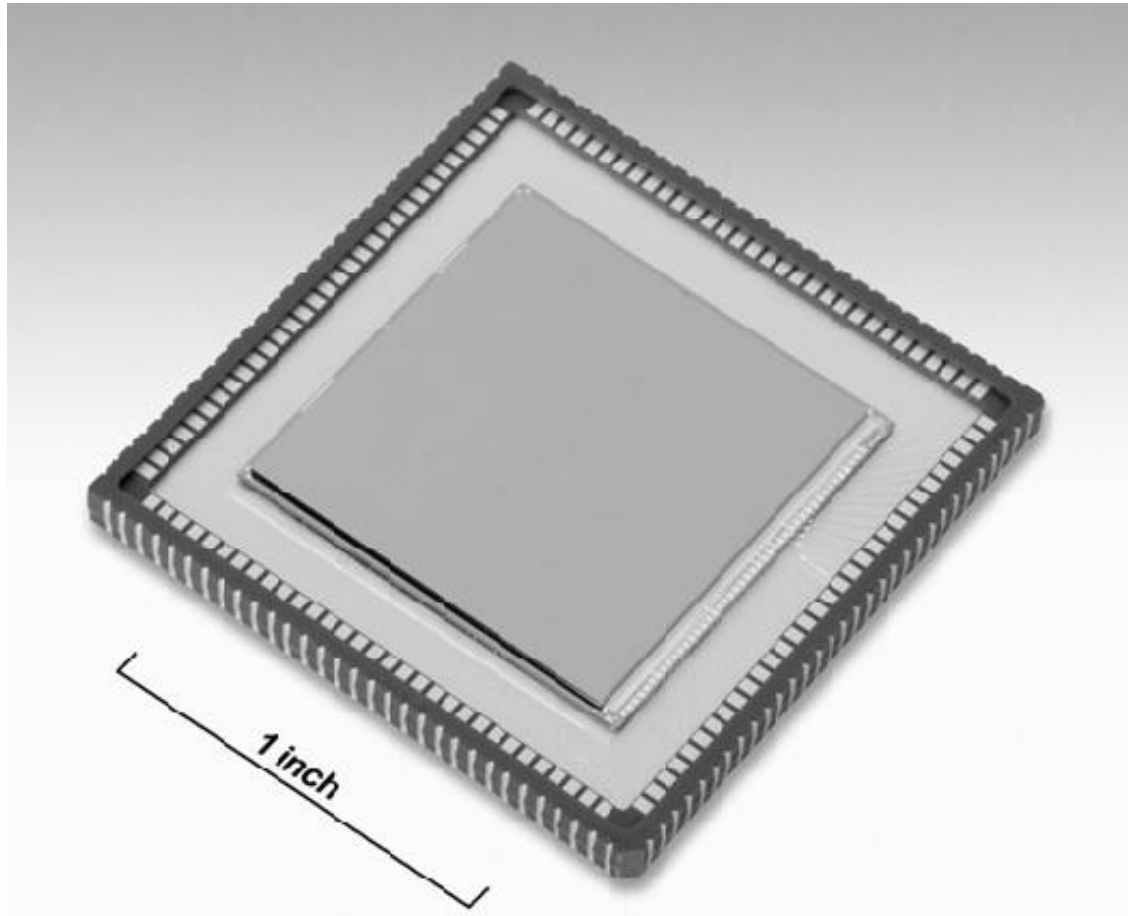
- 検知部にSi:As/Si:Sb BIB検出器
- 読み出し回路部にSi 読み出し集積回路 (ROIC)
 - 動作温度(4-6K)は通常のCMOSの動作限界に近い
 - FD-SOI CMOSなら4Kでも動作 (Wada et al. 2012, J. Low. Temp. Phys. 167, 602)
- 1Kx1K 画素画像センサーが実用化



(HST/NICMOS Instrument handbook)



(Wada et al. 2016, JLTP, accepted)



(Love et al., 2006, SPIE 6276, 62761Y)

(宇宙用)BIB型赤外線検出器の 発達

		2006/2003	2009	2018	2027
メーカー		AKARI/Spitzer	WISE	JWST	SPICA
Raytheon	Si:As	256x256	--	1024x1024	
	ROIC	CRC744	--	SBRC375	
DRS	Si:As	128x128	1024x1024	--	1024x1024
	Si:Sb	128x128	--	--	1024x1024
	ROIC	LF128	LF1024	--	LF1024

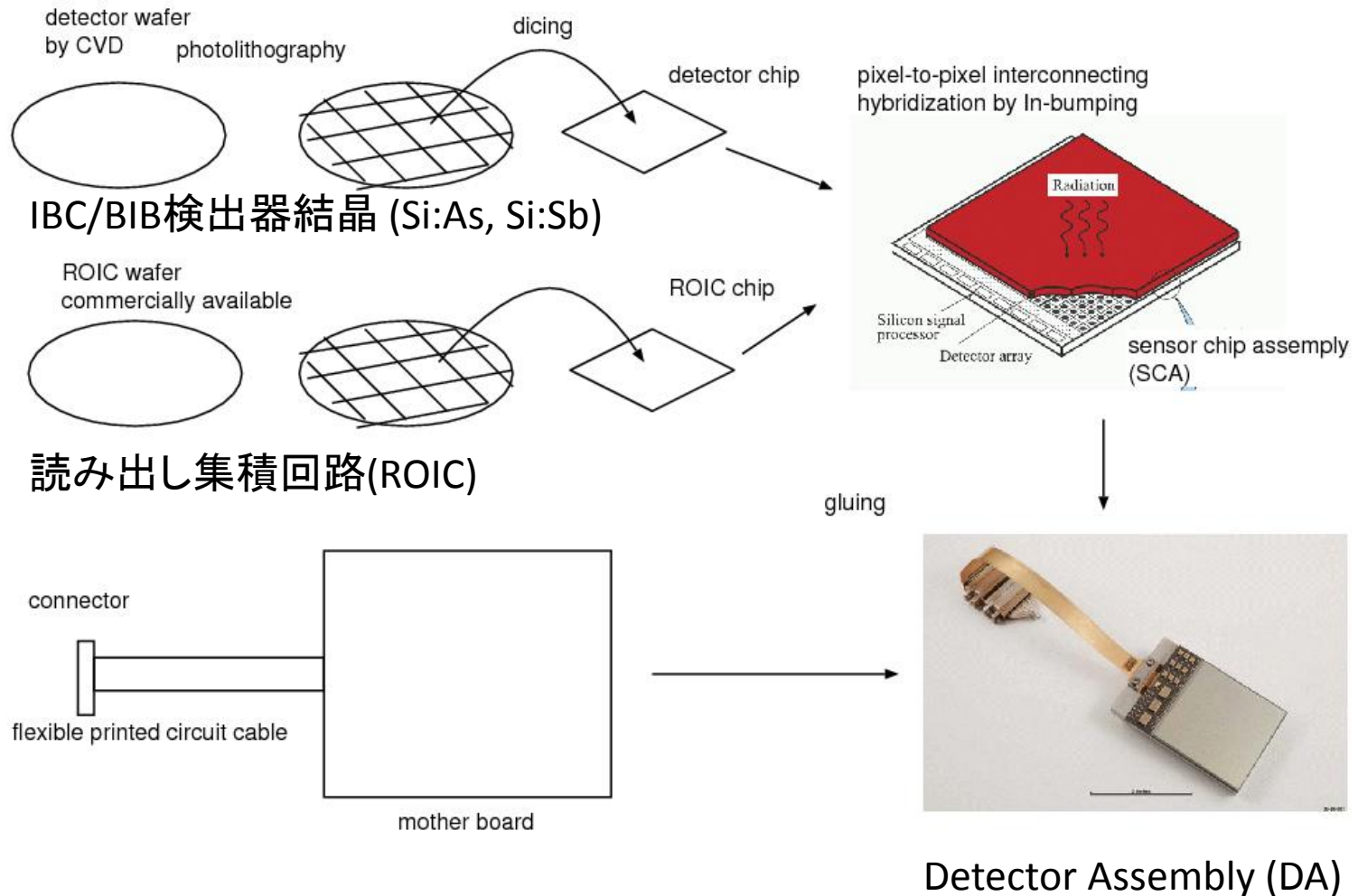
SPICA用中間赤外線検出器

- 広い視野、広帯域分光、高分散分光
 - 画素が多いこと
- 超低背景放射環境を活かす
 - 暗電流が少ないこと
 - 読み出し雑音が小さいこと
- 12-18 μm : Si:As IBC 1Kx1K
 - JWST/MIRI検出器
- 18-36 μm : Si:Sb BIB 1Kx1K
 - Spitzer/IRSのSi:Sb 128x128とWISEのSi:As 1024x1024をベースに開発

検出器仕様

	12-18um	18-36um
supplier	Raytheon	DRS
format	1024x1024	1024x1024
detector	Si:As IBC	Si:Sb BIB
wavelength	1-26um	1-36um
QE(average)	>40 % (goal >80%)	>50%
Read noise(CDS)	40 e	100 e
Dark current	<0.2 e/s/pix (<0.03 e/s/pix goal)	<2 e/s/pix (<0.2 e/s/pix for 1024x900) (<0.1 e/s/pix goal)
Pixel size	25um	18um
Operating temperature	6K	4K

中間赤外線検出器開発

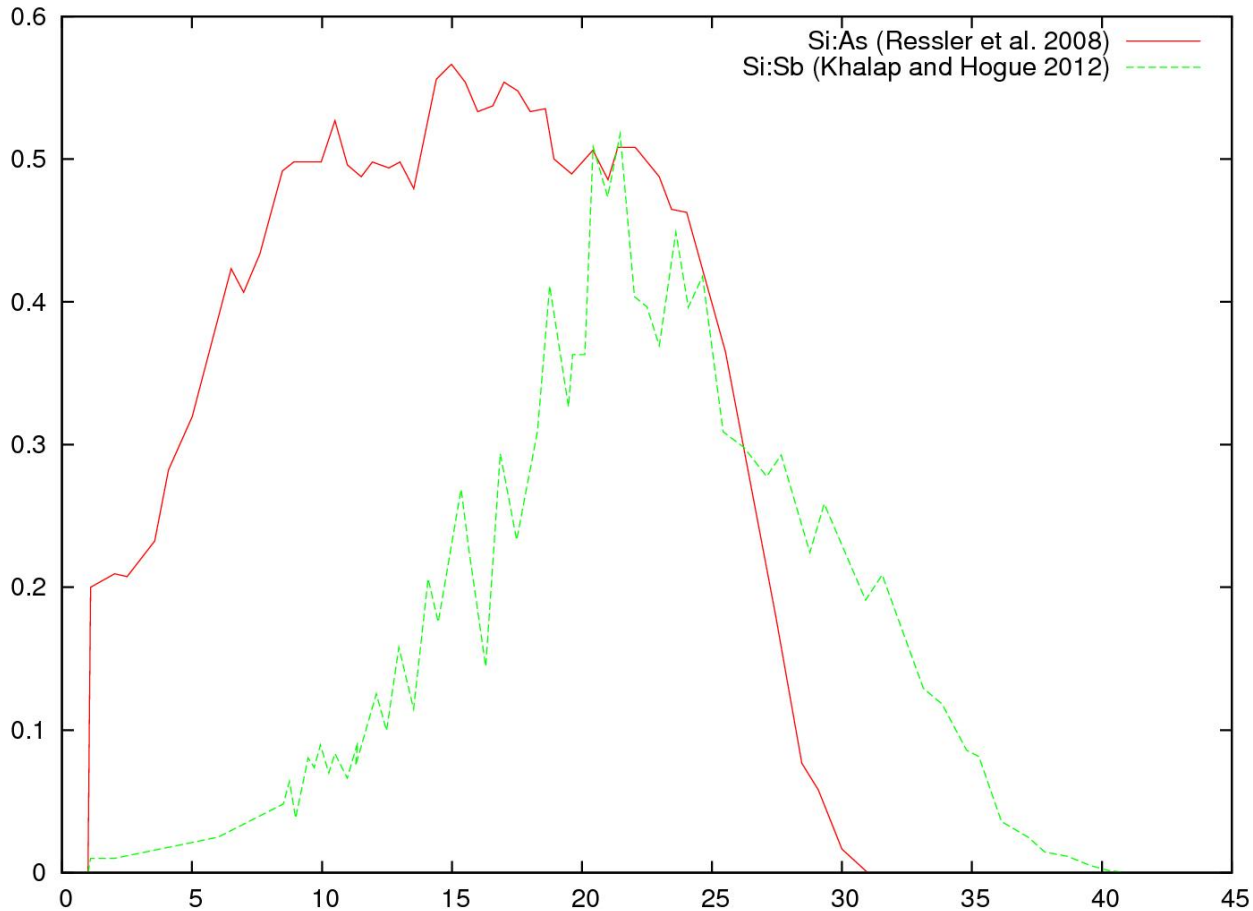


Si:Sb 1Kx1Kの開発

- Spitzer/IRS Si:Sb検出器とWISE 1Kx1K ROICを組み合わせて実現する。
- 暗電流が大きい(2 e/s)。この低減が課題。
- FY2010年より開発を開始
- ROIC由来の暗電流を測定し十分小さい(<0.2e/s)であることを確認した。
- Si:Sb結晶を新規に作成し、Si:Sb検出器由来の暗電流が小さい(<0.2e/s)ことを確認。

(Khalap et al., 2012, SPIE 8512, 851200)

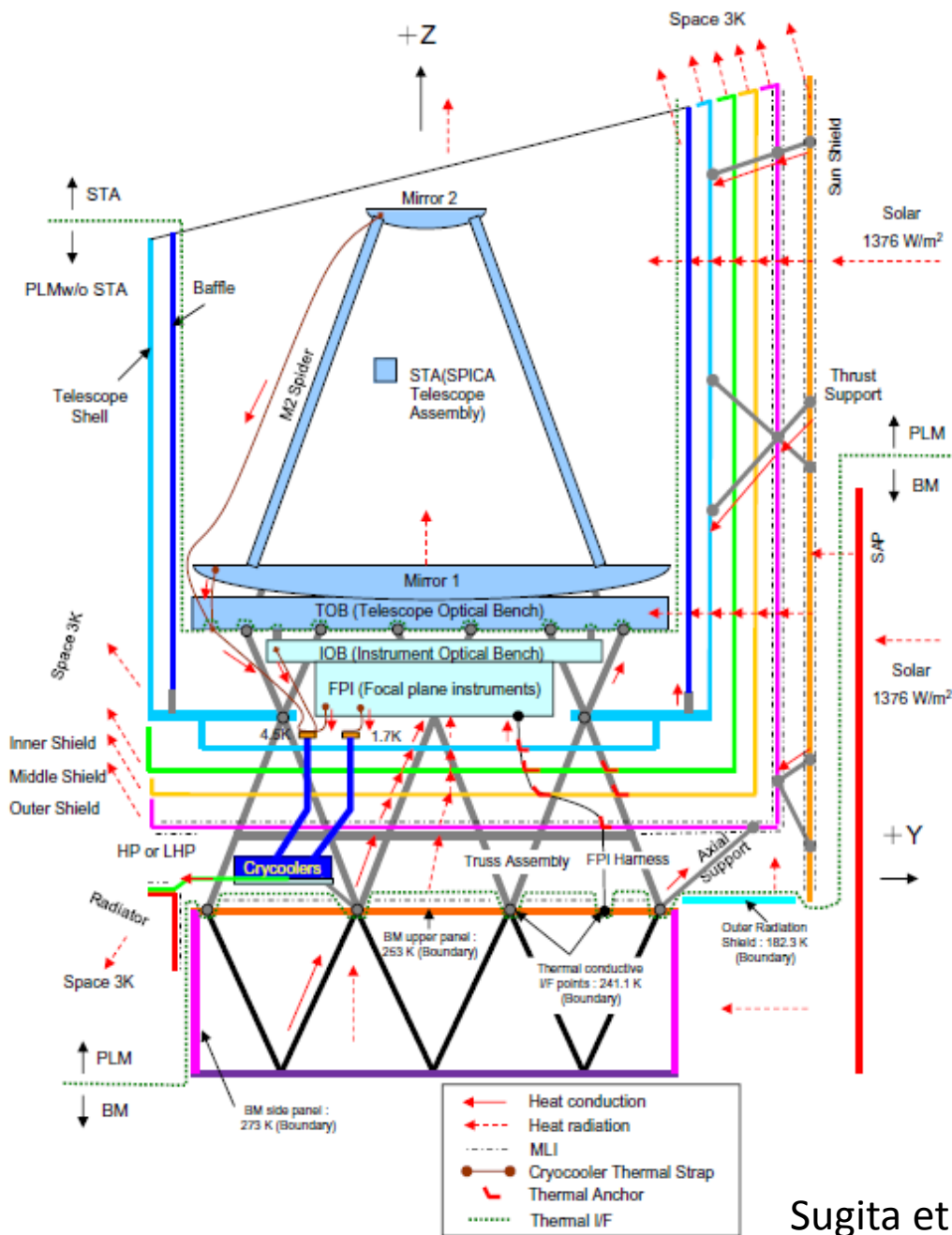
Si:As, Si:Sbの量子効率



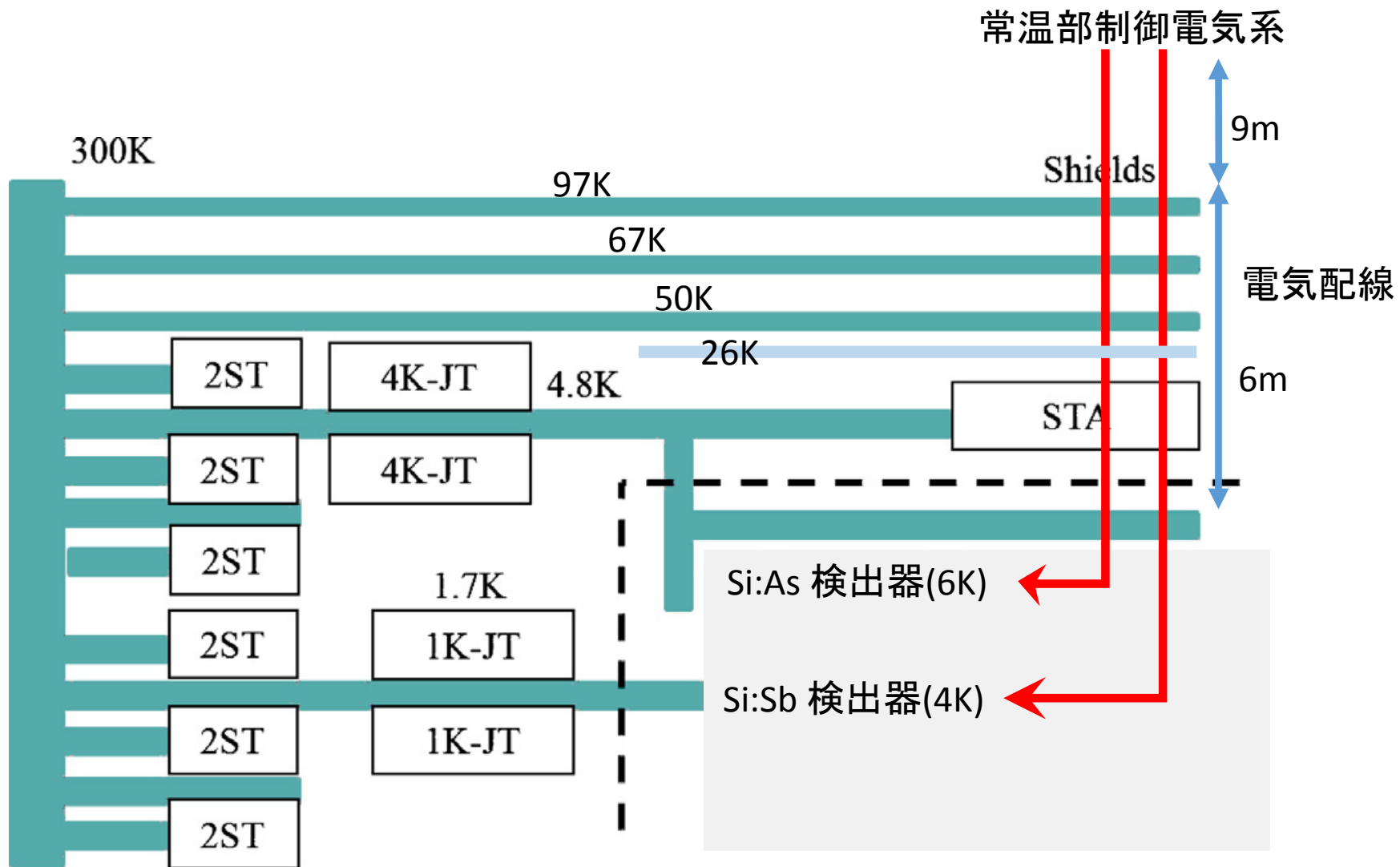
Si:Sbの長波長端での量子効率が小さいが、SOFIA/FOCASTと同様な手法(AR, 検出器構造の改良)で向上が可能

熱設計

- 肝は冷却 “cooling power is everything!”
- 熱流入、発熱が大きいと冷えない
 - 冷媒冷却ならミッション寿命が減るだけ
 - 冷凍機冷却だとミッションが破綻
- 15mW at 4K, 5mW at 1.7K for **all** FPI
- 入熱を減らす：電気配線
- 発熱を減らす：寄生電気容量の削減
- 検出器熱アニーリング運用



Sugita et. al., Cryogenics 50, 566 (2010)



SMI検出器系の熱設計

- 熱伝導割り当て 0.7mW at 4.5K
- 運用時発熱の割り当て 8mW at 4.5K
- 熱アニーリング運用にて1.7K冷凍機への熱流量が2mWを超えないこと

熱伝導設計(電気配線)

- テフロン被覆電線について熱伝導方程式を解いた。
- 全配線(検出器、FW、温度計他) 699本を考慮
- 現実的な配線ルートを考慮して長さを仮定
- 直径0.05mmリン青銅線を2本束ねたものを使うことで、熱伝導を0.60mW(仕様0.7mW)に抑えつつ、電気抵抗を121ohm(仕様250ohm)に抑えることができた。

Wada et al., SPIE 8442, 84423V (2012)

電線： 製造メーカー・商社さん紹介できます。

熱設計結果(電気配線)

Stage1 (low T)	Stage2 (highT)	T1 [K]	T2 [K]	L_el [m]	L_th [m]	wire	F_heat mW	Res ohm	Cap pF
DET	FPI	1.7	4.5	0.1	0.1	PBW2	0.08	2.52	3
FPI	IOB	4.5	4.5	2.0	2.0	CUW3	0	5.7	62.1
IOB	TOB	4.5	4.5	1.35	1.35	CUW3	0	3.85	41.9
TOB	TS	4.5	30	1.4	1.4	PBW2	0.61	35.3	42.0
TS	IS	30	56.4	1.0	0.416	PBW2	4.24	25.2	30.0
IS	MS	56.4	88.0	0.2	0.105	PBW2	25.06	5.04	6.0
MS	OS	88.0	136.0	0.2	0.105	PBW2	47.37	5.04	6.0
OS	MT	136.0	241.4	1.5	0.88	PBW2	15.70	37.8	45.0
MT	PLBM	241.4	253.0	5.6	5.6	AGW26	90.00	0.6	415
PLBM	FPIE	253.0	253.0	2.0	2.0	AGW26	0	0.2	148

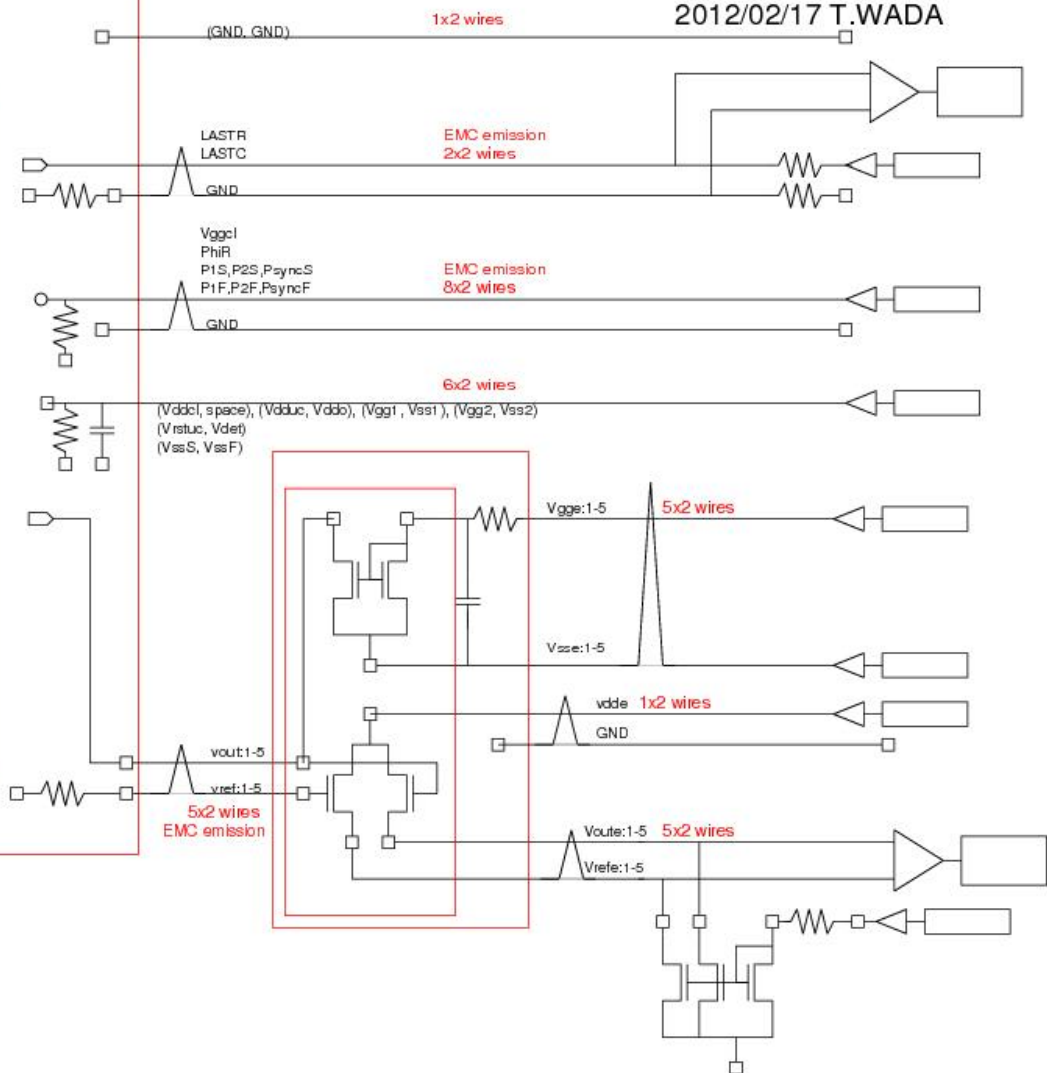
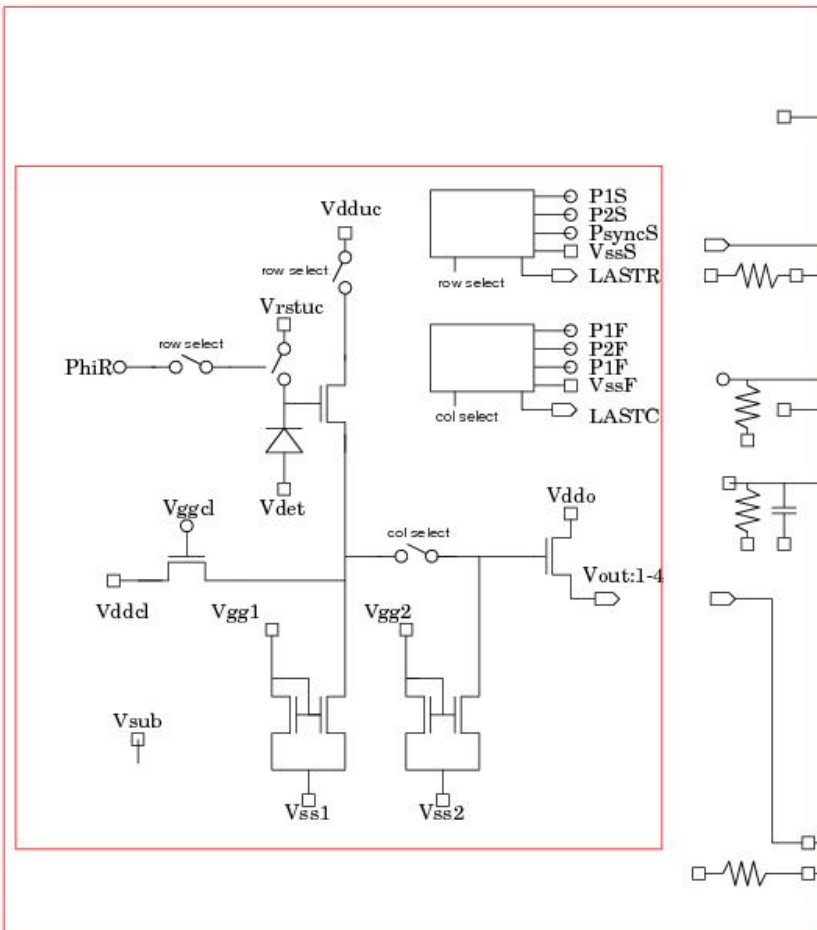
F_heatは699本分

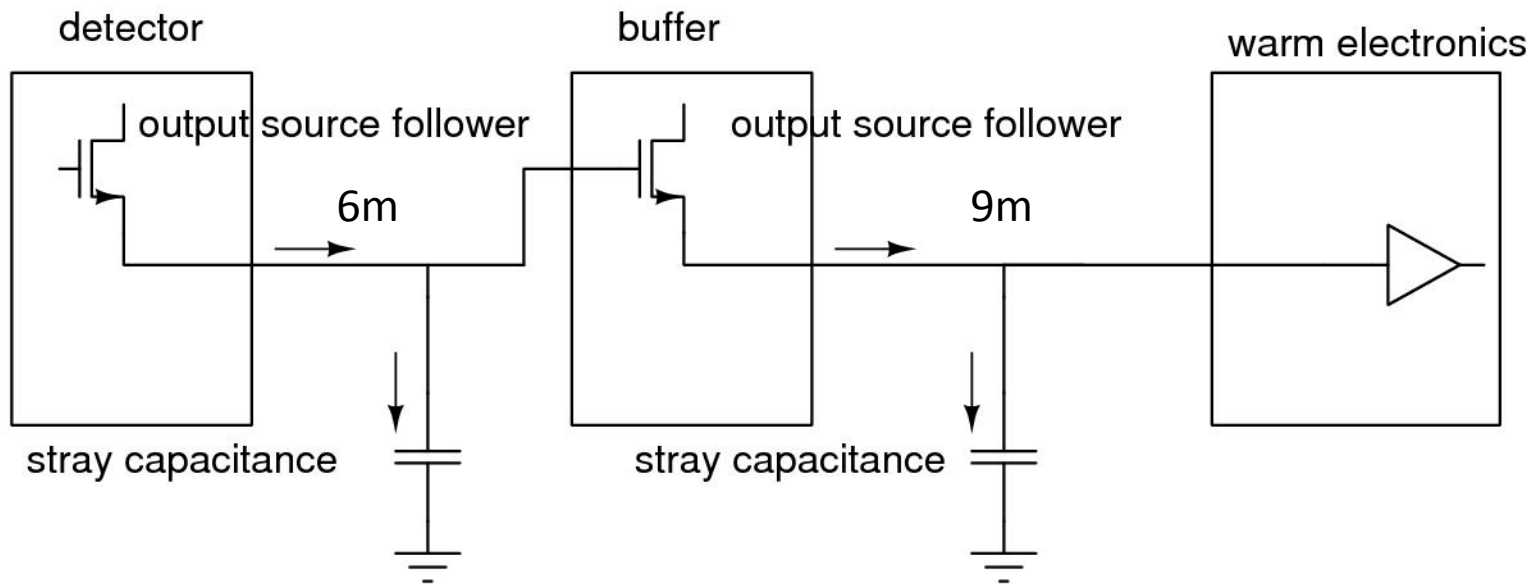
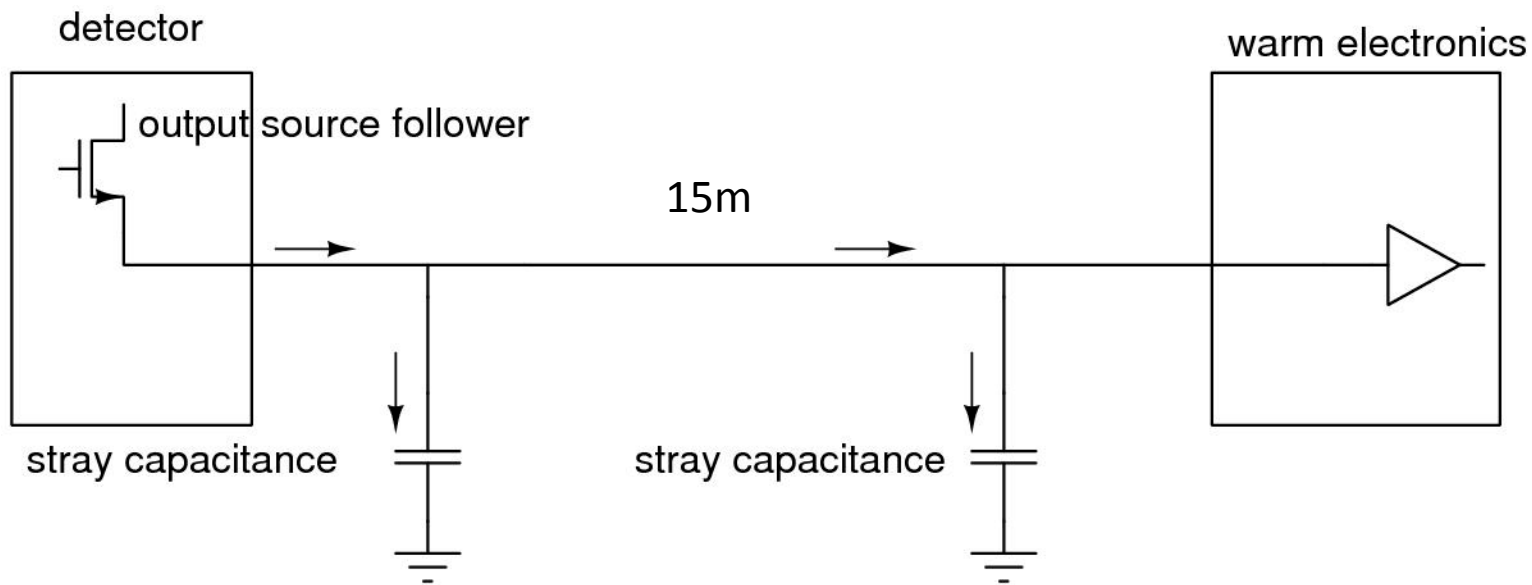
発熱設計(検出器発熱)

- 低温部(4.5K)での発熱は検出器が支配的。
- 配線寄生容量の駆動にほとんどが費やされている(容量 \times 周波数)。
- 容量の削減
 - 電線芯線直径の削減(直径 $100\mu\text{m} \Rightarrow 50\mu\text{m}$)
 - 信号線の這いまわしを工夫して配線長を節約。
 - 中間温度ステージ(130K)にバッファアンプを設け、4.5Kステージが駆動する長さを節約。

$1*2+2*2+8*2+12+0$ $+5*2=44$, 22 pairs for det<=>buffer
 15 pairs emit EMC
 $1*2+2*2+8*2+12+5*2+1*2+5*2=56$, 28 pairs for bufferr<=>warm
 15 pairs emit EMC

Readout and buffering
 the Si:As 2Kx2K SPICA
 schematic diagram
 PLAN-B
 2012/02/17 T.WADA





熱設計結果(検出器発熱)

Detector	Power in detector (mW)			Power in buffer (mW)			Frame rate (Hz)
	Unit cell	output	total	load	output	Total	
1Kx1K	0.86	0.96	1.82	1.34	6.08	7.42	0.95

熱設計(熱アニーリング)

- 軌道上運用中は、cosmic rayにさらされる。
- Hittingを受けたpixelは特性が悪化(暗電流増大)する。
- 一度、高温(20K)にすると特性が回復することが知られている。(熱アニーリング)

熱設計(熱アニーリング)

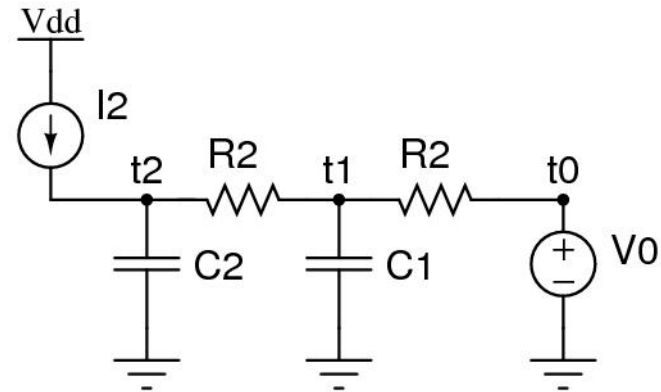
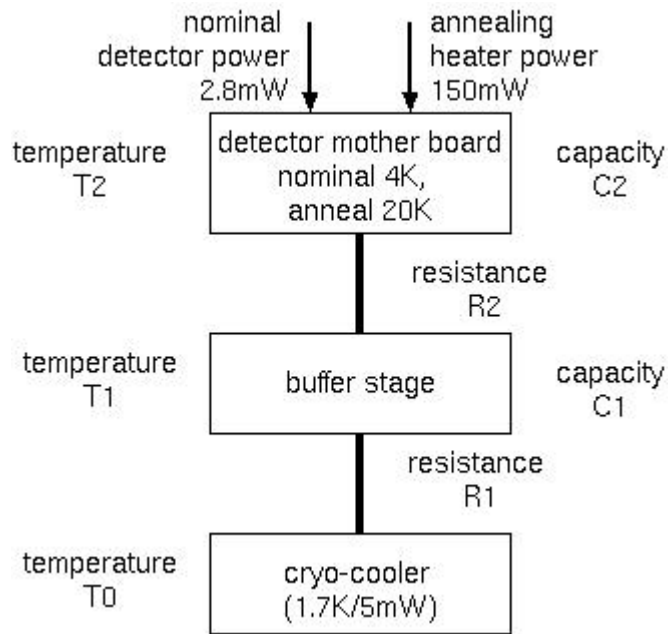
- 定常観測時には十分に検出器が冷却(4K for Si:Sb)される必要がある。
 - 冷凍機との間の熱抵抗を小さく!
- 冷凍機の特性から、cooling powerを超える熱流入は許されない。
 - アニーリング実現のためには、冷凍機との間の熱抵抗は大きく!
- 定常解は存在しない。
- 非定常解を探した。

熱モデル

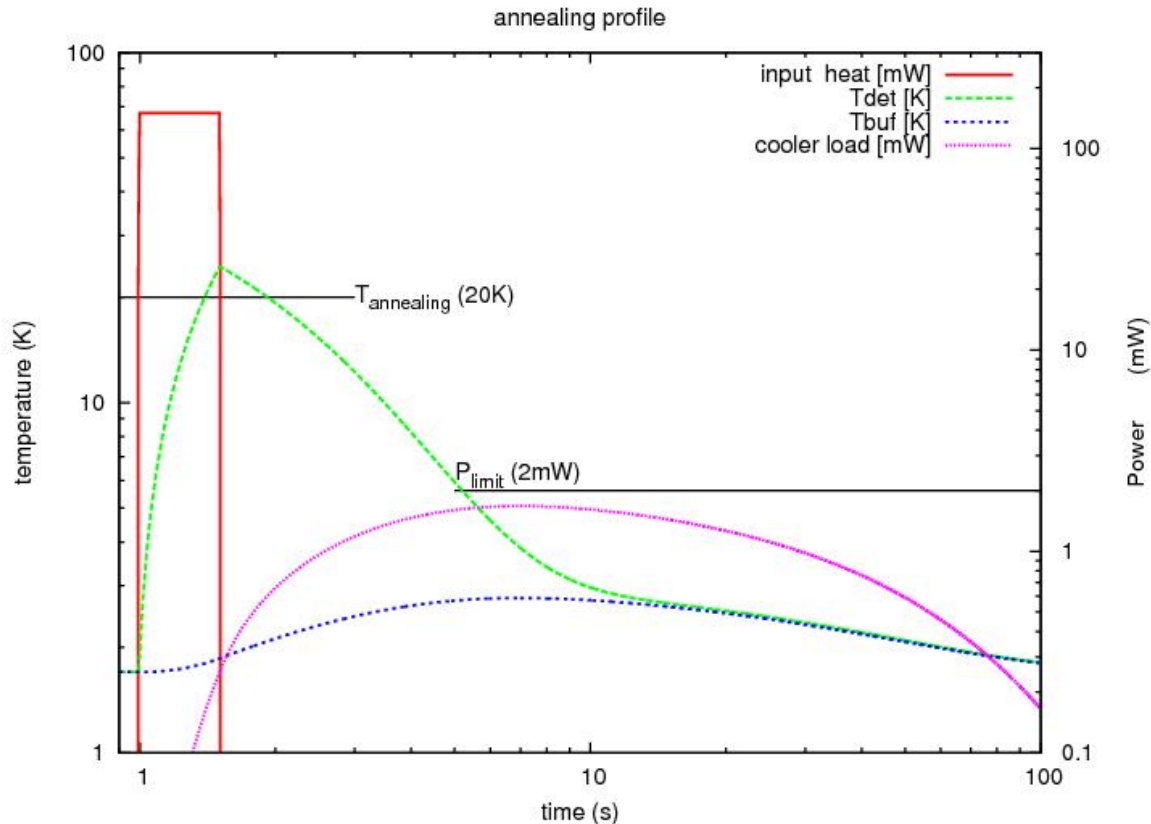
- 検出器(+マザーボード)と冷凍機の間に熱容量バッファを設ける。
- 定常観測状態で検出器が冷えるように熱抵抗を決定
- アニール時はパルス熱入力を与えることで短時間検出器温度を上昇させる。
- 冷凍機に流れ込む熱流量が設計値を超えないよう、バッファの熱容量を決定。

熱モデル(アニーリング)

- 検出器マザーボード
25x35x1.5mm Al2O3



熱設計結果(アニーリング)



- 入力熱パルス (150mW, 0.5秒)
- バッファ熱容量を検出器部の20倍に設定
- 冷凍機負荷ピークを1.68mWに抑えられる(割り当て2mW)

まとめ

- SPICAの特徴 冷却宇宙望遠鏡 超低背景放射環境をフルに活かすため、多画素、高効率、低暗電流、低雑音検出器が必要
- 12-18um Si:As 1Kx1K は既開発(JWST/MIRI)
- 18-36um Si:Sb 1Kx1Kを開発中
- 無冷媒、放射・冷凍機冷却のため、熱制約条件がシビア
- 配線、検出器運用方向を最適化することで熱設計解が見つかった。
- 同時に「熱アニーリング」を実現する解もつかった。

Wada et al., SPIE 8442, 84423V (2012)

宣伝

- 新学術領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」(平成25～29年度) <http://soipix.jp/b02.html>
- Ge遠赤外線BIB検出器開発に関しては、
<http://www.ir.isas.jaxa.jp/~wada/PUB/BIB/>
- FD-SOI CMOS 極低温読出集積回路に関しては、
<http://www.ir.isas.jaxa.jp/~wada/PUB/CRE/>
- 単一材料多層干渉光学フィルターに関しては、
<http://www.ir.isas.jaxa.jp/~wada/PUB/SWS/>