



Title	宇宙遠赤外線望遠鏡と低温技術
Author(s)	芝井, 広
Citation	大阪大学低温センターだより. 2016, 164-165, p. 1-4
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/57837
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

宇宙遠赤外線望遠鏡と低温技術

理学研究科 芝井 広 (内線172-5501)

E-mail:shibai@ess.sci.osaka-u.ac.jp

1. 宇宙赤外線の観測

ご存知のように、普段我々の身の回りにあるものは300 K 前後の温度であり、波長10 ミクロンを中心とした赤外線で熱放射している。一方、宇宙誕生時の「ビッグバン」の証拠である宇宙背景放射は、2.725 K のプランク関数（ピーク波長1 mm 前後）に極めて近いことがわかっている（Mather *et al.* 1990, 1999 ノーベル物理学賞）。この極低温の宇宙背景放射の「前景」として、恒星や惑星の母胎である暗黒星雲（約10 K）、生まれつつある恒星や惑星系（数1000 K）とその周辺に漂う星の材料（数100 K）、超新星残骸などの高温ガス（数100万 K）が見えており、それぞれの温度に対応する電磁波を最も強く放射している。古典的な天文学は可視光のみで発達してきたが、20 世紀後半以降の技術の進展とともに、可視光以外の電磁波も用いられるようになり、宇宙の諸現象とそれらを支配する物理（+化学）法則が明らかになってきた。

なかでも赤外線（天文学では波長1-300 ミクロンを総称）は、恒星や惑星系の誕生現場が数10 K から数100 K であるために特に強く放射され、「天体誕生機構・現象」の解明に最重要の役割を果たしてきた。ただし地球大気が波長帯によっては赤外線に対して不透明であるため、より高山へ、より寒冷地へ、大気圏外へと、赤外線望遠鏡が設置あるいは打ち上げられてきた（図1、日本赤外線学会誌、第19巻、2010年）。また、宇宙からの微弱な赤外線を検出するためには赤外線センサーの冷却は必須であるが、さらに「望遠鏡」自体が放射する熱赤外線が主要雑音源となるため、望遠鏡全体を極低温に冷却することに大きい努力が払われてきた。これらの例を以下に紹介する。

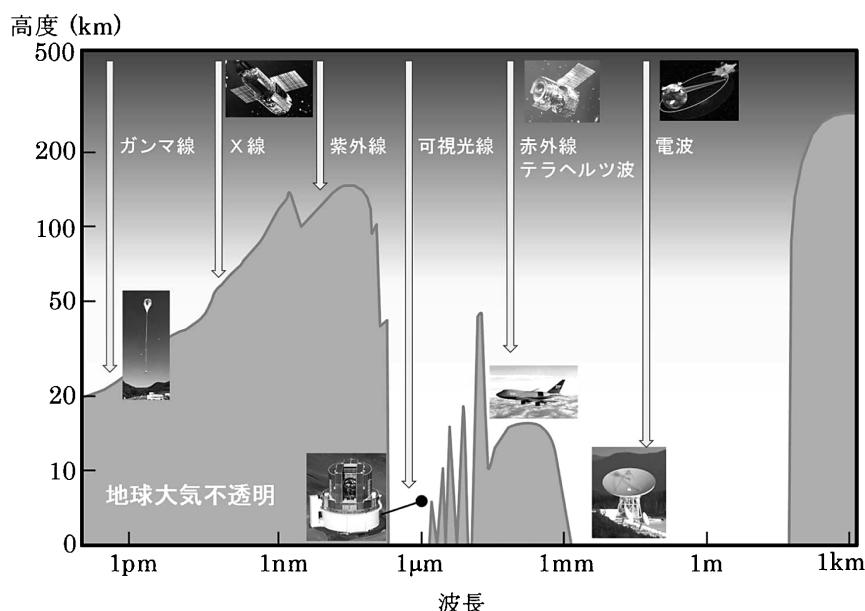


図1. さまざまな電磁波に対する地球大気の透過率と観測手段

2. 赤外線センサーの冷却

可視光の撮像素子と同様、最も代表的な赤外線センサーは半導体のバンドギャップを用いている（量子型検出器の代表例）。しかしながら赤外線は一光子あたりのエネルギーが可視光よりずっと小さいために、小さいバンドギャップが必要である。

例として、私の研究グループが開発してきた「圧縮型Ge:Ga」素子は、Gaを少量ドープしたGe単結晶を用いる。Gaによる不純物準位は約0.01 eVであるが、これをさらに一軸方向に加圧（約500 N/mm²）して縮退を解き、0.005 eV程度のエネルギーギャップを得る。これによって、波長100～200 ミクロンの遠赤外線光子をキャリアに変換することができ、弱いバイアス電界を与えることで「センサー」の素子として用いることが可能になる。問題は、この0.005 eVのバンドギャップで熱励起（熱電流）が起きないような低温に冷却する必要があることである。宇宙観測に使用するためには、2 K程度までの冷却（つまり超流動ヘリウム）が必要である。

さらに、たとえば天体の遠赤外線画像を効率的に得るために、「撮像」機能が必要である。ところが、2 Kのような極低温では普通のエレクトロニクスは一切動作しない。そこで我々は、2 Kで動作するMOSFETを開発し、極低温TIA（Trans-Impedance Amplifier）回路を構成した。図2が新たに作成した75ピクセルのアレイセンサーの撮像部である。いわば1階あたり15戸の5階建て集合住宅のようになっていて、前面に結ばれた遠赤外線の天体像が入射口から、内部のキャビティ内に設置されたGe:Ga素子に送られる。各素子はMOSFETの差動回路でインピーダンス変換され、後段のオペアンプとの組み合わせでTIA回路になる。この構造全体が2 Kに冷却されるため、構造物や加圧用の皿ばねもすべてインコネルを材料とし、遠赤外線の反射面にはすべて金メッキを施してある。後段の回路は80 Kに保持される必要があるので、そこからの熱流入を極力抑えるために、極薄のポリイミド樹脂フィルム上に薄い銅パターン（距離を延ばすために蛇行信号パターンを採用）を形成して信号線とした。このような構成により、雑音等価信号パワー（Noise Equivalent Power: NEP）で $10^{-17} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 、遠赤外線光子数で1000個程度の量を検出できる性能を達成した。また後述する日本初の赤外線望遠鏡衛星「あかり」（2006年打ち上げ）では、2 Kで動作するオペアンプICを設計、製作に成功した（Nagata, et al., 2004）。これは当時、世界的に初めての、「極低温ASIC」であった。

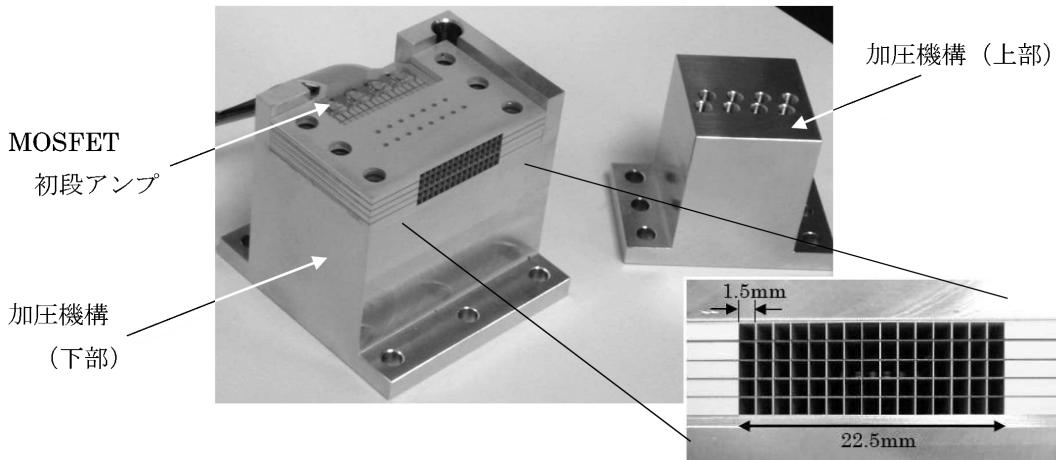


図2. 圧縮型Ge:Ga アレイセンサー（15×5 ピクセル）

我が国はもとより欧米でも、さらなる高感度化を目的として、TES (Transition Edge Sensor) や MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) のセンサーが開発されつつあり、「遠赤外線の一光子検出」という夢のような技術の実現が目前に迫っている。ただしこれらはいずれも 100 mK 程度以下の冷却が必要である。ロケットで宇宙空間に打ち上げる望遠鏡に搭載するためには、寿命が有限の冷媒を用いなくてすむような宇宙用サブ K 冷却技術の確立が必要である。

3. 宇宙望遠鏡衛星の冷却

前述のように、折角センサーが高感度（低雑音）化できても、望遠鏡の鏡やレンズが（常温ならば）強い赤外線を放射する。これは観測したい天体に比べて圧倒的に強い。さらには地球大気も完全には透明でないために、強い赤外線を放射する。この二つを克服するために、「大気圏外の宇宙空間に、極低温冷却された望遠鏡」が打ち上げられてきた（表1）。

図3が2006年に打ち上げられた、わが国初の本格的宇宙赤外線望遠鏡衛星「あかり」の構造模式図である。それ以前の欧米の宇宙赤外線望遠鏡は数100リットルから2000リットルの超流動ヘリウムを搭載していた。言わば「巨大なヘリウムコンテナ」つまり頑丈な真空容器をロケットで打ち上げるようなものであり、打ち上げ能力の大きいロケットが必要であった。日本のロケットでは打ち上げ能力が足らないため、我々のグループは独自に宇宙用 Stirling 冷凍機を開発し成功した。この太陽電池の電力で作動する Stirling 冷凍機を補助冷却として用いることで、必要なヘリウム量を大幅に減らすことができ、クライオスタットも比較的小型にすることができた。

「あかり」衛星は約1年半の観測を終え、図4のような全天の高感度な多色遠赤外線画像を作成することができた。これによって例えば、宇宙空間に浮遊する固体微粒子（惑星の原材料）の温度と分布濃度が直接測定できるなど、重要な研究成果が得られた。

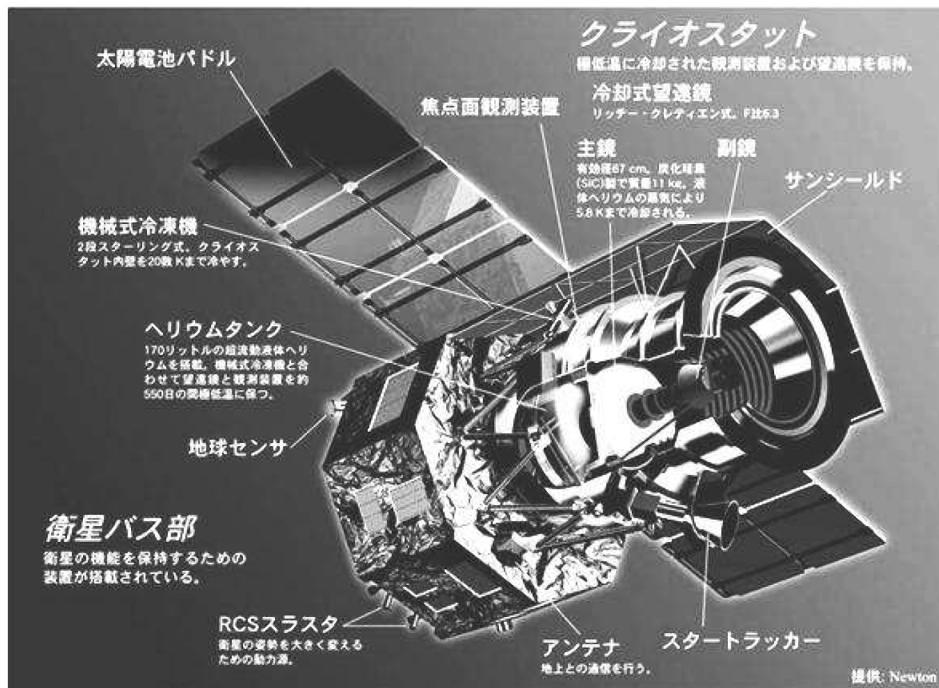


図3.「あかり」衛星（2006 年打ち上げ）の構造模式図

この成果を踏まえて、我々は冷媒を全く使わない、つまり冷凍機のみで望遠鏡を極低温に維持する方式の大型望遠鏡「SPICA」計画を推進している (Nakagawa. *et al.*, 2014)。2段直列の Stirling 冷凍機に³He ガスを用いた J-T 冷却を追加して、望遠鏡を8 Kまで、中間赤外線センサーを2 Kまで冷却し、さらに Sorption Cooler と ADR Cooler を直列に用いて遠赤外線センサーを0.05 Kまで冷却する計画である。既に基礎開発によって技術が実証されており、実際の宇宙機搭載設計を行っている段階である。2027-28年に打ち上げて3年以上の観測運用を目指している。

4. 最後に

このように、宇宙赤外線観測と低温技術はとても深い関係にある。また遠赤外線センサーは低温物性研究の成果が応用されたものである。今後もこれらの研究や技術が高度化し、太陽系外惑星での生命現象の発見や、宇宙誕生機構の解明などにつながることが期待される。

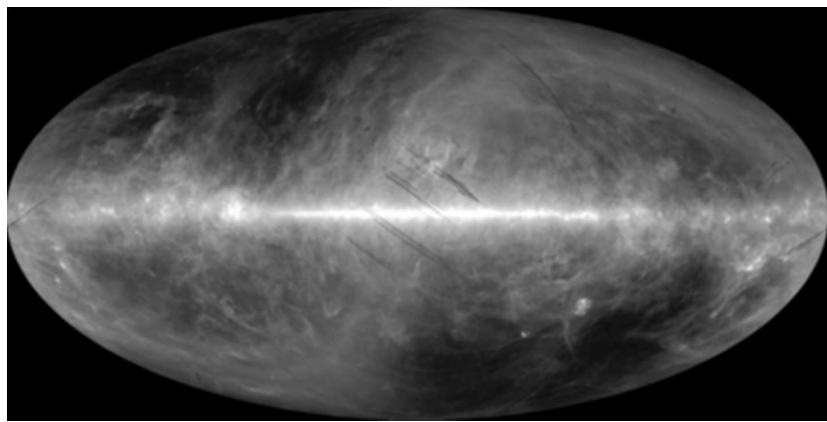


図4. 「あかり」が作成した全天球の遠赤外線画像 (Doi, *et al.*, 2015)

表1. 宇宙赤外線観測用の望遠鏡衛星

打ち上げ年	名称 (国)	望遠鏡		
		口径	温度	冷却方法
1983年	IRAS (米蘭英)	57 cm	2 K	SHe (720 l)
1995年	IRTS (日)	15 cm	2 K	SHe (150 l)
1995年	ISO (欧)	60 cm	2 K	SHe (2300 l)
2003年	Spitzer (米)	85 cm	5 K	SHe (360 l) + 放射冷却
2006年	あかり (日)	70 cm	6 K	SHe (170 l) + Stirling 冷却
2009年	Herschel (欧)	3.5 m	80 K	放射冷却 + SHe (2300 l)
2019年頃	James Web 宇宙望遠鏡 (米)	6.5 m	45 K	放射冷却
2027年頃	SPICA (日欧)	2.5 m	8 K	Stirling + JT + 放射冷却

<主要参考文献>

- 日本赤外線学会誌、特集「日本の宇宙科学・」天文学における赤外線技術」、19卷、2010年
 Doi, *et al.*, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, id.5022, (2015)
 Mather, *et al.*, Astrophys. J. (Letters), 354, L37-L40, (1990)
 Mather, *et al.*, Astrophys. J. 512, 511-520, (1999)
 Nagata, *et al.*, IEEE Transactions on Electron Devices, 51, 270-278, (2004)
 Nakagawa, *et al.*, Proceedings of the SPIE, 9143, id. 91431I, (2014)