

遠赤外線天文学における観測装置と検出器

花岡 美咲 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

遠赤外線検出器は、光検出の原理から熱型検出器と量子型検出器に大別される。現在まで活躍してきた遠赤外線検出器は、熱型検出器のボロメータと量子型検出器の Ge:Ga フォトコンダクターである。ボロメータは入射光子の持つエネルギーによる温度変化を利用し、フォトコンダクターは束縛電子が励起されたことによる電流量の変化を利用して光を検出するという違いがある。また、ボロメータは 1 K 以下の温度に冷却する必要があるが、検出できる波長帯が広く、一方で、フォトコンダクターは数 K 程度の冷却温度で運用できるが、検出できる波長帯が狭いという特徴がある。将来の検出器として、Blocked Impurity Band 型 Ge:Ga 検出器の開発が行われている。これら検出器のもつ特徴を理解し、その長所と短所を整理することは、装置開発や観測データの解析を行う際に重要である。ここでは、遠赤外線天文学における観測装置と検出器について、その種類と特徴を紹介する。

1 遠赤外線天文観測と観測装置

一般に、赤外線は 1–300 μm に渡る波長の電波を指し、その中で遠赤外線は 50–300 μm に分類される。宇宙からの遠赤外線放射は、主にダストからの熱放射と、星間ガスからの微細構造線によるものである。星形成領域では、大質量星からの紫外線をダストが吸収し、10–100 K 程度の熱放射として再放射される。また、光解離領域の主な冷却線である微細構造線は、微細構造での禁制遷移により放射され、電子や原子の密度を決定するために重要な役割を果たす。遠赤外線の光は、星間ダストによる減光を受けにくいいため、ダストやガスの多く存在する星雲内や星間物質の物理状態や化学組成を探るために重要である。

遠赤外線は大気による吸収のため、地上望遠鏡による観測は困難である。よって、遠赤外線天文観測には人工衛星や航空機、気球といった飛行体を利用する。また、望遠鏡からの熱放射が背景光となるため、高感度の観測をするためには、望遠鏡を含めた観測装置全体を極低温に冷却する必要がある。航空機や気球は、大気中の水蒸気や酸素が凍りついてしまうため、装置全体を冷却することはできないが、人工衛星は真空中にあるため、装置全体を極低温に冷却することが可能である。その他、大気の揺らぎなどの影響もないため、赤外線天文観測には人工衛星の

利用が望まれる。

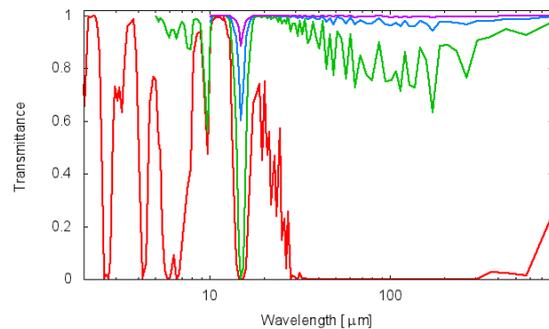


図 1: 大気透過率の波長依存性 (Traub & Stier 1976)。赤線は高度 4.2 km、緑線は高度 14 km、青線は高度 28 km、紫線は高度 41 km における大気透過率を示す。

これまで、1983 年に打ち上げられた IRAS に始まり、2013 年に運用が終了した Herschel まで、遠赤外線観測装置を搭載した多くの人工衛星が活躍してきた。これらの衛星は液体ヘリウムを搭載しており、冷媒が枯渇するまでの間、遠赤外線観測を行っていた。人工衛星を用いた観測は、冷媒や冷凍機の必要性から衛星が大型化するため、大型衛星ミッションとして計画されるのが主である。そのため、運用に多額

の費用と長期の開発期間が必要となる。遠赤外線観測を行う将来の赤外線天文衛星としては、2020 年代に打ち上げ予定の SPICA が計画されている。

天文観測に用いられた航空機としては、Kuiper や SOFIA が挙げられる。大気の薄い高度 10 km 程度の上空を飛行することで、大気による光の吸収を極力、減らして観測している。航空機による観測の特徴として、同じ観測装置で何度も観測を行うことができることと、観測装置が組み換え可能であることが挙げられる。そのため、長期運用や一つの観測装置に特化した観測が可能である。

気球を用いた観測では、航空機よりもさらに上空の高度 20–50 km 程度の成層圏で天文観測を行うことが可能である。また、費用は人工衛星や航空機よりも安価であり、観測装置の開発から打ち上げまでにかかる期間が短いという特徴がある。そのため、人工衛星に搭載予定の観測装置の実証実験としても活用されている。数日間の連続飛行が可能であるため、航空機よりも長時間の継続観測を行うことができる。

2 従来の遠赤外線検出器

遠赤外線検出器は、光検出原理の違いから熱型検出器と量子型検出器に大別される。

熱型検出器は、入射光子の持つエネルギーによる温度変化を利用して光を検出する。従来では熱エネルギーを抵抗の変化として検出するボロメータが使われてきた。ボロメータは、抵抗値の温度依存性を持つ検出素子を導線で浮かせることで、基板と検出素子を熱的に分離させている。入射光子は、検出素子の表面に塗布された吸収体で吸収され、光エネルギーから得た熱により検出素子の抵抗値が変動する。効率よく検出素子を冷却できるように、検出素子の熱は導線を通じて熱浴に排熱されるという構造をしている (図 2)。ボロメータの特徴としては、感度に波長依存性がなく、検出できる波長域が広いことが挙げられる。そのため、分光器を用いて一台の検出器で広い波長領域をカバーすることが可能となる。しかし、ピクセルごとに断熱のための空間が必要となり、ピクセルサイズの小型化が難しいため、大規模アレイ化が困難という課題を抱えている。代表例とし

ては、Herschel の PACS Photometer の Si ボロメータが挙げられる (Poglitsch, A., et al. 2010)。

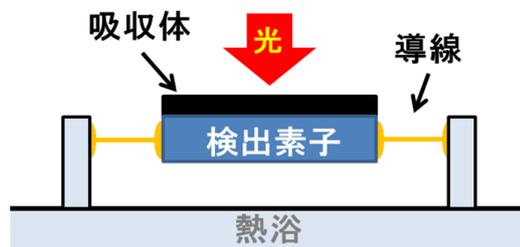


図 2: ボロメータの構造

量子型検出器は、半導体中の束縛電子が光励起されることによる電流量の変化を利用して光を検出する。図 3 のバンドダイアグラムに示すように、価電子帯の電子が不純物準位に励起されることで、価電子帯にホールが発生する。検出素子に電場を加えることでホールを取り出し、電流量の変化として光を検出する。

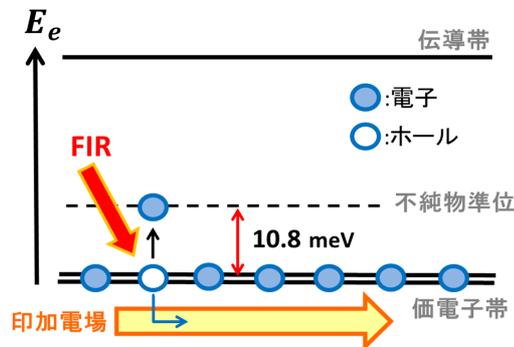


図 3: Ge:Ga のバンドダイアグラム

今日まで活躍してきた主な遠赤外線検出器は、量子型検出器の Ge:Ga フォトコンダクターである。この検出器は、半導体の Ge に Ga をドーピングした不純物半導体である。Ge:Ga の価電子帯と不純物準位のエネルギー差は $110 \mu\text{m}$ の光エネルギーに相当し、 $50\text{--}110 \mu\text{m}$ までの光を検出できる。また、不純物半導体を加圧することにより、価電子帯の上端の縮退が解けるため、価電子帯と不純物準位のエネルギー差を縮めることができる。従来の検出器ではこれを利用して、

半導体素子を大型の加圧機構を用いて加圧することで、110–180 μm の光を検出していた (図 4)。フォトコンダクターはボロメータとは対照的に、感度に波長依存性があり、検出できる波長帯が限られている。そのため、非圧縮型と圧縮型の Ge:Ga フォトコンダクターを併用することで、検出波長領域を広げて使われることが多い。しかし、圧縮型の検出器では、大型の加圧機構を用いてピクセルごとに半導体素子を加圧しているため、光感度の個体差が生じるという問題を抱えている。また、大型の加圧機構により、大規模アレイ化が困難となる。代表例としては、赤外線天文衛星 AKARI に搭載されていた非圧縮型と圧縮型 Ge:Ga フォトコンダクターが挙げられる (Verdugo, E., et al. 2007)。

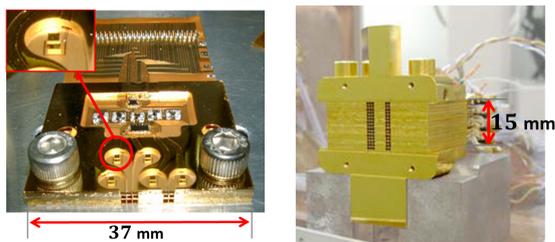


図 4: AKARI の Ge:Ga フォトコンダクター (左図) と加圧機構 (右図)

3 新しい遠赤外線検出器

新しい検出器として、次世代の赤外線天文衛星 SPICA に搭載される予定の超伝導ボロメータや、Blocked Impurity Band (BIB) 型 Ge:Ga 検出器の開発が行われている。

超伝導ボロメータは、超伝導金属が転移温度付近になると抵抗が大きく変わる性質を利用して、高感度に光を検出することができる。一方で、1 K 以下の転移温度まで検出器全体を冷却するため、観測装置の温度制御が難しい。SPICA に搭載予定の超伝導型ボロメータは、波長 34–210 μm に高い感度を持つ (Suzuki., et al. 2014)。従来では、波長 30–60 μm に高い感度を持つ検出器は実現されておらず、遠・中間赤外線検出器として新規性が高い。

BIB 型 Ge:Ga 検出器は、従来のフォトコンダクターに用いられてきた Ge:Ga の Ga 濃度を約 100 倍

増加させることで、不純物準位をバンド化させ、価電子帯の電子の励起に必要なエネルギーを小さくしている。よって、加圧機構の必要なく、長波長に感度を伸長させることが可能となり、大規模アレイ化の実現が期待される。また、不純物準位がバンド化したことで、光により励起された電子もキャリアとして光電流を担うことができるようになる。一方で、不純物準位のバンド化により、不純物バンド内に暗電流が発生するため、高純度の Ge を接合することにより、暗電流をブロックする構造となっている。

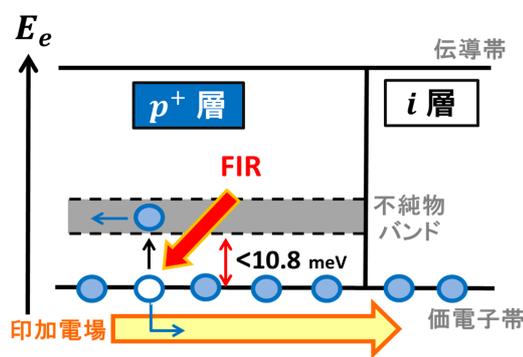


図 5: BIB 型 Ge:Ga 検出器の光検出原理

BIB 型検出器は、中間赤外線の波長域では既に実用化されているが、遠赤外線では開発の遅れから、まだ実用化されていない。実現を困難にさせている要因として、高濃度 Ge:Ga と高純度 Ge の接合界面での Ga 拡散がある。従来の異種半導体による二層構造の作製技術では、熱を利用するため Ga が高純度 Ge に熱拡散し、暗電流をブロックするための急峻な濃度勾配を実現することが困難であった。しかし近年では、真空常温下において、原子ビームを半導体の表面に照射することで酸化膜や吸着層を除去し、表面を活性化させた異種の半導体を接合させるという、表面活性化常温ウエハ接合技術が発達した (Takagi & Maeda 2006)。この接合技術により、常温下における接合が可能となり、現在では遠赤外線 BIB 型 Ge:Ga 検出器の開発が行われている。

4 BIB 型 Ge:Ga 検出器の開発

現在、名古屋大学では、表面活性化常温ウエハ接合技術を用いて BIB 型 Ge:Ga 素子を作製し、単素子での評価を行っている。高濃度 Ge:Ga の Ga 濃度を $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ とした BIB 型 Ge:Ga 素子と、AKARI に搭載された非圧縮型 Ge:Ga フォトコンダクターと同等の素子について光特性を評価した。真空冷却装置であるクライオスタットにより素子を極低温まで冷却し、フーリエ分光器を用いた波長感度測定と、クライオスタットの内部黒体光源を用いた光感度測定を行った (図 6)。

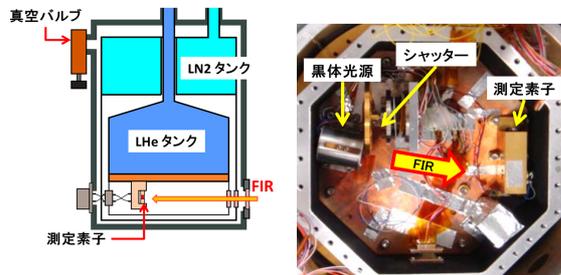


図 6: 波長感度測定に用いるクライオスタットの構造 (左図) と光感度の測定に用いるクライオスタットの内部構造 (右図)

波長感度測定の結果より、高濃度 Ge:Ga 層の Ga 濃度を $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ とすることで、波長 $240 \mu\text{m}$ までの遠赤外線を検出することが確認された (図 7)。

表 1: 波長感度取得の際のパラメータ

	バイアス電圧	温度
BIB 型 Ge:Ga	250 mV	2.3 K
非圧縮型 Ge:Ga	25 mV	2.8 K

また、光感度測定より、BIB 型 Ge:Ga 素子の方が従来の非圧縮 Ge:Ga フォトコンダクターよりも光感度が約 20 倍高いという結果が得られた (表 2)。これらの結果より、今回作製した BIB 型 Ge:Ga 素子は波長 $200 \mu\text{m}$ 以上に感度を持ち、従来の非圧縮型 Ge:Ga フォトコンダクターよりも高感度な検出素子であることが示された。今後は、BIB 型 Ge:Ga アレ

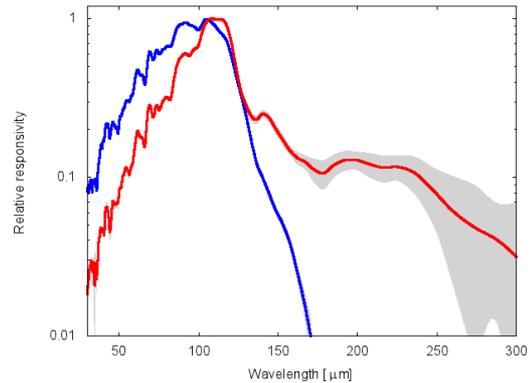


図 7: 各素子の波長感度を示す。縦軸は感度をピークで規格化しており、横軸は波長 [μm] を示す。赤線が BIB 型 Ge:Ga 素子、青線が非圧縮型 Ge:Ga フォトコンダクターの波長感度、灰色は各素子の 100 回測定の標準偏差を示す。

表 2: 1.8 K における各素子の光感度

	バイアス電圧	光感度
BIB 型 Ge:Ga	100 mV	7.0 A/W
非圧縮型 Ge:Ga	100 mV	0.37 A/W

イ素子を作製し、高感度な大規模アレイ検出器の実現を目指して研究を進めていく。

Reference

- Traub,W.A., & Stier,M.T. 1976, *Appl. Opt.*, 15, 364
- Rieke,G.H., "Detection of Light - From the Ultraviolet to the Submillimeter - 2nd edition", (CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2003)
- Poglitsch,A., et al. 2010, *A&A*, 518, L2
- Verdugo,E.,et al. 2007,"AKARI FIS Data User Manual version 3"
- Suzuki,T.,et al. 2014, *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, vol. 4, issue 2, 171-178
- Takagi,H., & Maeda,R. 2006, *J. Cryst. Growth*, 292, 429
- Kaneda,H.,et al. 2011, *JaJAP*, 50, 066503