

アルマ望遠鏡用ミリ波帯超伝導受信機の開発

国立天文台チリ観測所 浅山 信一郎

1. はじめに

アルマ望遠鏡(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)は、日本を含む東アジア、北米、欧州による国際協力により南米チリ共和国のアタカマ高地(標高約5,000メートル)に建設された電波干渉計です。66台のパラボラアンテナを広い場所に並べ、それらを結合して連動させることで1つの巨大な電波望遠鏡を作りだしています。



図1. アルマ望遠鏡サイト

©Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO

天文学においては、新しい観測装置や技術革新による望遠鏡性能の向上が行われるごとに画期的な発見が行われてきた歴史があります。これまでの電波望遠鏡に比べて圧倒的に高い解像度(視力)と感度を持つアルマ望遠鏡により、これまでは観測することができなかった天体や、これまで謎とされてきたさまざまな宇宙の神秘がどんどん明らかになっています。

著者は大阪府立大学博士後期課程で、アルマ望遠鏡用ミリ波帯超伝導受信機の開発研究を行い、その後国立天文台にてアルマ望遠鏡の観測バンドのひとつ(バンド4)の受信機開発に携わりました。

本稿では、アルマの圧倒的な感度を実現している受信機技術について、著者の開発した受信機の紹介と共に説明したいと思います。

2. アルマ受信機

宇宙の星、星雲、銀河などはあらゆる種類の光(電磁波)を出しています。電磁波は波のようなもので、人の目に見える光である「可視光」に対して波の山と谷の間隔が長いのが電波や赤外線、短いのが紫外線やエックス線です。アルマ望遠鏡は、電波の中でも「ミリ波」「サブミリ波」と呼ばれる種類の電波を観測します。ミリ波やサブミリ波で観測することで、可視光を観測するだけでは分からない天体現象を捉え、宇宙全体の解明につなげることが出来るのです。

宇宙からやってくる電波は、非常に微弱です。皆さんが使っている携帯電話1台をもし月に置いた場合、そこから出る電波は、もっとも強力な電波を出す天体とほぼ同じくらいの強度になるのです。そのため、アルマ望遠鏡では、宇宙からの微弱な信号を効率よく受信し伝送することを可能にするために、超伝導技術などを利用した受信機が搭載されています。超伝導現象の実現には、その物質を極低温状態に安定し

て冷やすことが必要になるため、アルマの受信機はマイナス269℃まで冷やされています。また受信機を冷やすことで、受信機そのものから発生するじやまな電波(ノイズ)を抑えることもできます。

宇宙からの微弱な電波はパラボラアンテナで集められ、電波光学系を通り、円錐状のホーンからマイナス269℃に冷却された受信機に入ります。受信機内に入った電波は金属製のパイプ(導波管)を通して超伝導の薄膜集積回路に入力信号として入ります。超伝導薄膜回路を通った信号は、その先にある超伝導トンネル障壁(バリア)部で検出されます(図2)。口径12mアンテナで集められ受信機に送られた電波は、受信機の深部に誘導され、超伝導素子という長さ数ミリの部品に到達し、さらに数ナノメートルの厚みしかないトンネル障壁に到達して初めて、遙か遠い宇宙からやってきた電波が「受信された」こととなります。

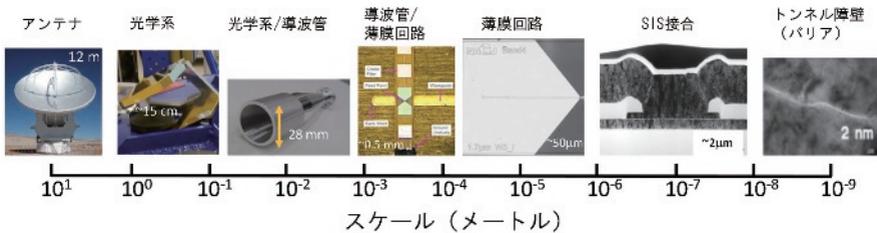


図2. 電波望遠鏡における電波の伝送

アルマの受信機は、アンテナの「首」の部分に搭載されています。電波望遠鏡を人間の目に例えると、パラボラアンテナは水晶体に、受信機は網膜細胞に相当します。アルマのそれぞれのアンテナには、30~950ギガヘルツまでの帯域をカバーする10個の受信機が搭載されるようになっていています。各受信機はカートリッジと呼ばれる直径170もしくは140ミリメートルの筒に納まるように設計され、10本のカートリッジは直径1メートル程度のクライオスタットにまとめて収容されます。クライオスタットは大型の魔法瓶のようなもので、機械式の冷凍機を用いて極低温状態を保つようになっています。カートリッジ方式を採用してインターフェイスを共通化することにより、複数のグループが受信機開発を独立に行えるようになっており、また修理やメンテナンスを効率的

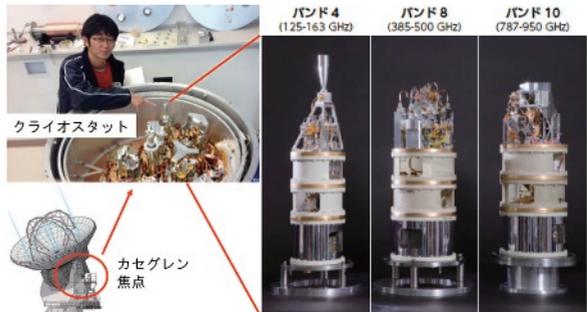


図3. アルマ受信機 ©国立天文台

に行えるというメリットもあります。アルマの受信機はバンドごとに日米欧各国で分担して開発されました。日本はバンド4(受信周波数125~163ギガヘルツ)、バンド8(385~500ギガヘルツ)、バンド10(787~950ギガヘルツ)の3種類を分担し、国立天文台先端技術センターが中心となって開発・量産を行いました。

3. ヘテロダイン受信方式とサイドバンド分離ミキサ

アルマの観測するミリ波、サブミリ波帯では信号の増幅は難しく伝送損失も大きいいため、ヘテロダイン受信という方式が用いられます。この方式は、観測信号(f_{RF} :以下RF信号)と局部発振信号(f_{LO} :以下LO信号)をミク

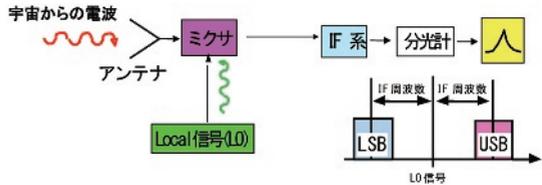


図4. ヘテロダイン受信方式

サと呼ばれる周波数混合器に入力して、二つの信号の差を中間周波数信号($|f_{RF} - f_{LO}|$:以下IF信号)として受信する方式です。LO周波数に対して周波数が高い側をUpper Side Band (USB)、低い側をLower Side Band (LSB)と呼びます(図4参照)。ヘテロダイン受信方式では、ミキサで混合すると入力RF信号とLO信号の差の周波数がIF信号として生成されますが、例えばLO周波数より6ギガヘルツ高い入力電波もLO周波数より6ギガヘルツ低い入力電波も、どちらも6ギガヘルツのIF信号になってしまいます。そのためUSBとLSBの信号を分離する「仕掛け」が必要になります。アルマではこの分離のために、電波の波としての性質を利用したサイドバンド分離ミキサを採用しています。

サイドバンド分離ミキサは、図5に示すように90°ハイブリッドと呼ばれる分波器で入力RF信号の位相を90°ずらして2つのミキサに入力し、IF信号でも同様に位相をずらして足し合わせます。そうすると、一方の出力では2つのミキサからの信号がUSBは逆相で打ち消しあい、LSB信号だけが出力されます。そして他方の出力には、その逆の関係で、USBのIFだけが出力されるという巧妙な仕掛けを行うことで、両サイドバンドの信号を分離することができます。

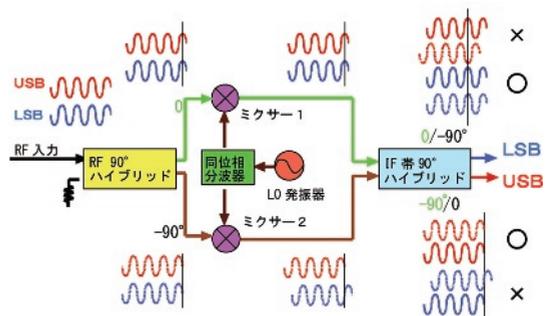


図5. サイドバンド分離ミキサの原理。(注)バンド9、10では技術的に難しいため採用されていない。

4. 超伝導ミキサ

受信機の感度はミキサの感度でほぼ決まるため、電波天文学用の受信機開発では、低雑音ミキサの開発が非常に重要になります。超伝導技術を用いた SISミキサは物理理論から導かれる限界の「量子雑音」に迫る究極の高感度を達成できるため、高感度の電磁波受信機として電波天文望遠鏡に搭載され、実用化されてきました。SISは「超伝導体(Superconductor)－絶縁体(Insulator)－超伝導体」の頭文字を取ったもので、二つの超伝導電極の間に非常に薄い絶縁体(厚さ約1nm)を挟んだサンドイッチ構造をしています。本来絶縁体には電気は流れませんが、絶縁体をきわめて薄くすると量子力学的効果によるトンネル電流が流れます。このトンネル電流が、SIS素子に入射する電波の強度と周波数の関数となるため、SISは高感度な電波受信機として使われています。

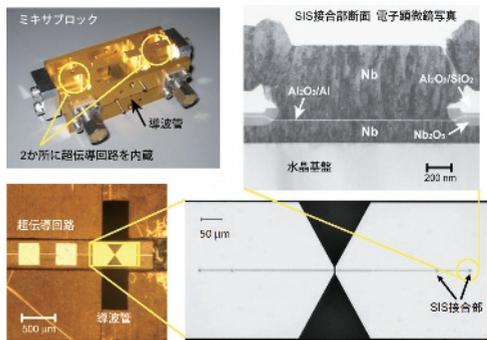


図6. アルマバンド4SISミキサ写真 ©NAOJ

図6は著者が設計開発した超伝導ミキサです。超伝導薄膜回路の損失が大きいと電波が弱められ、感度が落ちてしまうので、効率よく信号を伝える伝送路を持ち、かつ低雑音の超伝導集積回路を設計実現しています。

5. アルマバンド4受信機

アルマバンド4受信機は、125～163ギガヘルツをカバーしています。アルマ望遠鏡の受信機は、超伝導素材の開発や微細金属加工など様々な最先端テクノロジーの結晶です。冷却システム/光学系/LO系は、米欧のパートナーと協力して開発を行いました。アルマバンド4受信機は直径140ミリメートルのカートリッジと呼ばれる筒に納まるように設計されています。カートリッジは温度の異なる円板状温度ステージから構成されています。カートリッジの最下層は常温なので、各ステージに温度の階層を作り、階層間は熱の伝導が少ない材料を使うなどして超伝導ミキサへの熱の流入を最小にしています。受

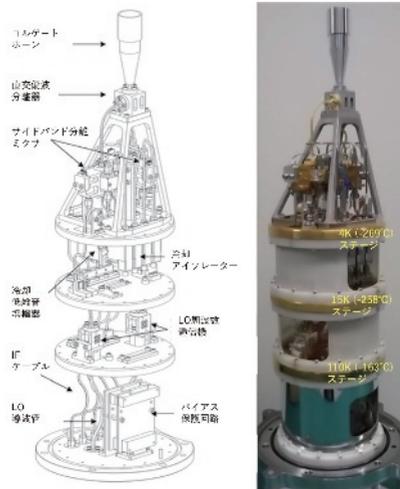


図7. アルマバンド4受信機

信機の大部分はノイズを抑えるために極低温に冷やす必要があるため、ほとんどの部品が最上部のマイナス269°Cに冷やされたステージ上に取り付けられています。アルマ望遠鏡はチリの高地で66台のアンテナを30年以上にわたり運用する予定のため、機械的調整機構がなく保守の容易な装置を作る必要がありました。また熱設計や機械設計等でアルマの仕様を満たすために、最先端の受信機技術や工夫が随所に施されています。

6. 受信機開発と国際協力

著者は大学院修士時代に名古屋大学で電波天文学を専攻し星形成の研究に取り組んでいましたが、既存の宇宙観を一新することができる観測装置の開発に魅力を感じ、電波天文学用超高感度超伝導受信機の第一人者である小川英夫教授に師事するために、大阪府立大学に大学院博士課程から転入しました。私が研究室に入学したときには、小川教授も着任して間もない時期で、研究室を立ち上げている最中でした。実験室も整備されておらず、また開発のお金も十分でなかったため、自分で設計を行ったミクサを自ら工作機械を操り作製したこともありました(図8)。とはいえ博士課程の学生としてほとんどゼロに近いところから、主体的に研究室の立ち上げに参加できたことは非常に重要な経験でした。また研究室の皆で協力し合い研究開発を進めていくという非常に重要な経験ができました。研究室のみんなで昼夜を問わず実験や議論を行ったことは、今でも思い出されます。



図8. ミクサ自作の様子

著者は超伝導受信機の研究で学位を取得した後国立天文台に採用され、アルマ望遠鏡で日本が担当する受信機のひとつであるバンド4受信機開発チームのリーダーを務めました。アルマ望遠鏡の受信機は、それまでに実現していなかった高性能をめざして新規に開発され、困難も非常に多くありました。またアルマ望遠鏡は国際プロジェクトのため、海外の他のバンドの受信機開発者たちとの情報交換や連携は欠かせませんでした。海外のグループと英語で開発を進めていくことは大変でしたが、世界の最前線で開発を進めている充実感は言葉では表せないものがありました。

私はバンド4受信機の開発が一段落してから、2009年8月からアルマ望遠鏡の立ち上げのためにチリに赴任しました。世界各国

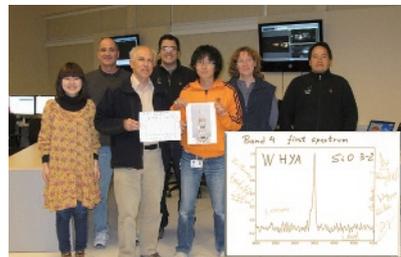


図9. バンド4受信機の天体信号初受信を喜ぶ著者と関係者

から集まった国際チームの中で働くのは初めての経験で、最初は言葉や働き方のスタイルの違い等で苦労しましたが、半年ぐらいで主体性を発揮できるようになりました。私はバンド4受信機のアンテナ搭載試験観測を主導し、2010年6月22日に初めて天体からの信号を取得しました(図9)。自分が開発を担当した受信機での天体信号の初受信を自ら行えたことは、感無量でした。

7. 最後に

本稿では、アルマ望遠鏡の受信機の紹介と、著者が関わった受信機技術開発における、まだ世の中に存在しない装置を生み出すために、苦労したこと、また国際開発における研究開発の難しさややりがいなどを紹介しました。

私は大学院生として、アルマ用の世界最高性能の受信機開発に関わることから始まり、受信機ひとつを任せられるという幸運に恵まれました。アルマでは、2020～2030年頃にかけて機能を大幅にアップグレードすることを目指し、どのような装置が必要か、国際的な議論が始まっています。私と同じように、若い世代の方が、次世代のアルマの受信機開発等で活躍することがあればと思います。

最後になりますが、大阪府立大学が主導したアルマバンド4受信機の試作機は、大阪市立科学館の常設展示となっております。来館の皆様にもぜひともご覧になっていただければ幸いです。



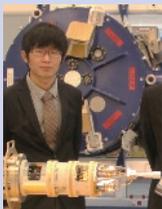
図10. アルマバンド4受信機の試作機
@大阪市立科学館

8. 参考情報

アルマ望遠鏡とその成果について詳しく知りたい方は、国立天文台のアルマ望遠鏡のウェブサイトをぜひともご覧になってください。

アルマ望遠鏡 - 国立天文台: <https://alma-telescope.jp/>

著者紹介 浅山 信一郎(あさやま しんいちろう)



国立天文台/総合研究大学院大学准教授。2019年1月から国立天文台チリ所長を務める。専門は電波天文学および超伝導ミリ波冷却受信機開発。チリを起点として世界中を飛び回り、国際協力によるアルマ望遠鏡の運用と、将来の性能向上のための研究開発を行っている。