

称号及び氏名	博士(理学) 中島 拓
学位授与の日付	平成20年3月31日
論文名	「ミリ波帯望遠鏡搭載用導波管型サイドバンド分離超伝導受信機システムの開発」
論文審査委員	主査 小川 英夫 副査 古我知 峯雄 副査 前川 寛和

## 論文要旨

### 1章 はじめに

#### 1-1. 電波天文学と電波望遠鏡

星間空間において、宇宙の基本的な構成要素である「星」がどのように生まれてくるのかを明らかにすることは、宇宙の生成史を理解する上で、基本的かつ重要なテーマである。近年、星は分子雲と呼ばれるガスと塵から成る希薄な星間物質中で生まれることが、明らかになりつつあるが、どのような種類の星が、どのような条件下で、どのような過程を経て生まれ、進化するののかについては、全てが明らかになったわけではない。これは、分子雲が極低温のために、可視光ではその内部を見通すことが出来ないという観測の困難さが一因となっている。しかし分子雲中では、様々な星間分子が作られることがわかっており、例えばその回転運動に伴って、分子種ごとに決まった振動数の電波(分子スペクトル;波長は数 cm 程度～数 mm 以下)を放射している。このセンチ波～ミリ波・サブミリ波という波長の長い電磁波を捉えるための観測装置が「電波望遠鏡」である。

#### 1-2. ヘテロダイン受信機システム

典型的な電波望遠鏡の構成を図1に示す。この中で、最も重要視されるのが「受信機」である。宇宙からの電波は非常に微弱であるため、増幅する必要があるが、受信機自身が持っている雑音(一般的に、温度に換算して“雑音温度”と呼ぶ)によって、望遠鏡の感度や観測の効率・精度が大きく左右されるからである。

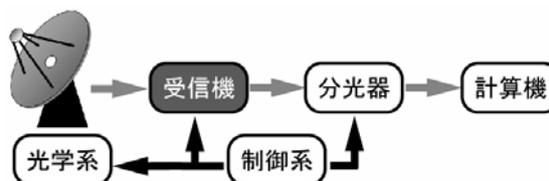


図1 電波望遠鏡の典型的な構成

宇宙からの微弱な電磁波をいかに良い感度で検出するかは、観測天文学の最も基本的で重要な

課題である。しかし、電波の中でも 100 GHz (波長 3 mm) 程度以上のミリ波～サブミリ波と呼ばれる周波数の高い領域については、電波を直接的に増幅できる良い増幅器がほとんど存在しない。そこで、天体からの信号  $f_R$  (radio frequency) に対し、少しだけ周波数の異なる局部発振信号  $f_{LO}$  (local oscillator frequency) を人工的に作って混ぜ、そこに含まれる差周波の成分である  $f_{IF}$  (intermediate frequency) を取り出すことで、高周波の信号を扱いやすい低い周波数に変換するというを行う。このような方式をヘテロダイン方式と呼び、このときに用いる周波数変換器 (周波数混合器) を「ミクサ (mixer)」と呼ぶ。量子限界程度の低雑音を達成するため、ミリ波・サブミリ波帯では、超伝導 SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) 素子を用いるのが一般的である。

## 2章 研究目的および内容

### 2-1. 研究目的

これまでの研究から、星を生み出す母胎は、サイズが 0.1 pc、質量が数 10 太陽質量程度、密度が  $10^{46} \text{ cm}^{-3}$  の高密度コアであり、さらに多数のコアがサイズ 1 pc、質量数 100 太陽質量程度の「クランプ」と呼ばれる構造に埋もれていることが分かっている。そして、このようなコアやクランプは、多くの場合、長さ 10 pc 程度のフィラメント状分子雲の内部に分布しており、それが  $\sim 100 \text{ pc}$  の分子雲を構成している。したがって、分子雲は少なくとも 0.1  $\sim$  100 pc に渡る階層構造を持ち、その最下層に近い構造が星を生み出すと考えられる。しかし、なぜコアやクランプといった構造 (サブ・ストラクチャ) がそもそも分子雲に存在するのか、という問題にはほとんど手がつけられていない。その理由は、これまで用いられている観測装置では、分子雲全体からコアに至る 3 桁の空間スケールに対し、 $10^{2-6} \text{ cm}^{-3}$  程度に渡る密度構造を均一に観測することが困難であることが挙げられる。

そこで本研究では、これらの問題を解明するための観測に適した新しい受信機システムの開発を行う。そして、この新たな受信機システムを国立天文台・野辺山宇宙電波観測所にある 60 cm 及び 45 m ミリ波望遠鏡に搭載することにより、近傍の分子雲に対し、多数の分子輝線を観測プローブとしたこれまでにない広域・高感度な観測を実行する。

### 2-2. 研究内容

本研究では、ミリ波帯の電波望遠鏡に搭載する新しい受信機システムの開発を行った。ミクサを用いてヘテロダイン受信を行う場合、IF 信号は LO 信号の周波数 ( $f_{LO}$ ) を中心に、高周波と低周波の二つの周波数帯が出力される。この IF 帯を「サイドバンド (側波帯)」と呼び、特に高周波側を Upper Side-Band (USB)、低周波側を Lower Side-Band (LSB) と呼ぶ (図 2)。

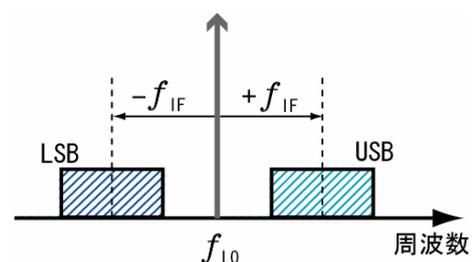


図2 LO 周波数とサイドバンドの関係

二つの IF 帯は、ミクサから全く同じ周波数成分として取り出される (これを DSB モードと呼ぶ) ため、星間分子スペクトル観測の際には、これらを分離する必要がある (これを SSB モードと呼ぶ)。一般的には、複数の光学素子を用いた干渉計方式のマーチン・パレット型の周波数フィルターが用いられているが、光学素子による電波の損失が大きい、アライメントの調整が必要、再現性・経時変化に難がある、

どちらか片方のサイドバンドを選択的にしか取り出せない、などの問題があった。

そこで私は、このようなフィルターを使わず、導波管回路のみによって二つのサイドバンドを分離し、同時に受信することができる新しい仕様の受信機システムの開発を行った。このような受信機システムは、サイドバンド分離 (2SB) 方式と呼ばれている (Claude et al. 2000)。これにより、電波の損失を低減できるだけでなく、周波数の異なる複数の分子スペクトルを同時に観測できるようになるため、従来の受信機システムに比べて、観測の効率を飛躍的に向上させることができる。

### 3章 研究成果

#### 3-1. 60 cm ミリ波サーベイ望遠鏡用 200 GHz 帯 2SB 受信機システムの開発

口径 60 cm のミリ波サーベイ望遠鏡 (図 3) は、東京大学と国立天文台が長野県野辺山に 1989 年に建設した設置型としては世界最小のミリ波望遠鏡である。私は今回、この望遠鏡の改修を行うことで、受信機の感度を大幅に向上させ、従来と比較して飛躍的に観測の効率を上げることに成功した。

今回の改修の最も重要な点は、新たに開発した 200 GHz 帯 (波長約 1.3 mm) の 2SB 受信機を搭載したことである。これによって、両サイドバンドを同時に受信できるようになり、広域に渡る一酸化炭素分子 ( $^{12}\text{CO}$ ) およびその同位体置換種のマルチライン同時観測に成功した。これは、世界でも初めての成果である (Nakajima et al. 2007)。

200 GHz 帯 2SB 受信機は、2SB ユニットと呼ばれる導波管回路を集積したコンポーネントと 2 個の DSB ミクサから成り (図 4)、これらは電磁界解析を用いて設計された (Asayama et al. 2004)。私は、このミクサマウントと、野辺山で製作した超伝導 SIS 素子 (Noguchi et al. 1995) を用いて、2SB ミクサの開発を行った。その結果開発に成功した受信機は、雑音温度が約 60 K、サイドバンド分離比が 10 dB 以上という世界最高水準の性能を達成した。さらに、この受信機を望遠鏡に搭載したところ、従来の SSB フィルターによる受信機システムと比較して、大気込みのシステム雑音温度は、およそ 3 分の 1 に低減したことが確認された。これは観測時間に換算すると、従来のわずか 9 分の 1 に短縮されたことに等しい。この受信機システムを用いて観測



図 3 60cm ミリ波サーベイ望遠鏡の外観

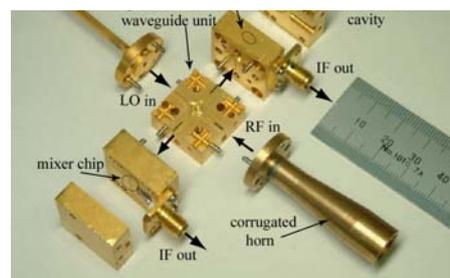


図 4 200 GHz 帯 2SB ミクサの構造

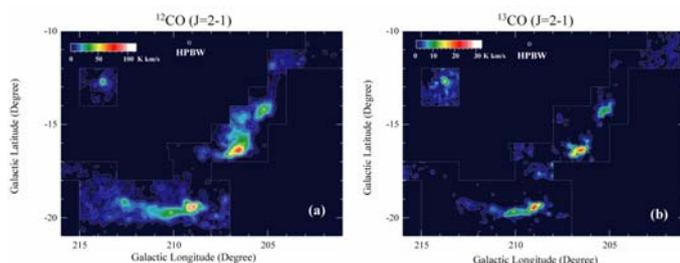


図 5 オリオン座巨大分子雲の $^{12}\text{CO}$  (左)、 $^{13}\text{CO}$  (右) 同時観測結果

されたオリオン領域の $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ と $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ 輝線の同時観測結果が図 5 である。二つの輝線で相対的な指向誤差が無いこと、大気や望遠鏡の状態が全く共通のデータが得られることも大きな利点であり、従来に比べて高い精度で輝線強度比などを見積も

ることが可能となった。

### 3-2. 45 m ミリ波望遠鏡用 100 GHz 帯両偏波・2SB 受信機システムの開発

さらに私は、100 GHz 帯で導波管型両偏波・両サイドバンド分離受信機を開発し、これを野辺山にある世界最大口径のミリ波望遠鏡である 45 m 望遠鏡（図 6）に搭載した。

この受信機は、偏波分離器と 2 個の 2SB ミクサから成っており、いずれも導波管回路で構成されている（図 7）。偏波とサイドバンドをそれぞれ分離することで、4~8 GHz の 4 つの IF 信号を同時に観測することが可能である。受信機の性能としては、観測周波数 80~120 GHz に対して、SSB 受信機雑音温度が 45~100 K、サイドバンド分離比は、同帯域で 10 dB 以上を達成した。さらにこの新しい受信機の仕様に適合した光学系と IF 系を新たに開発



図 6 45m 望遠鏡外観

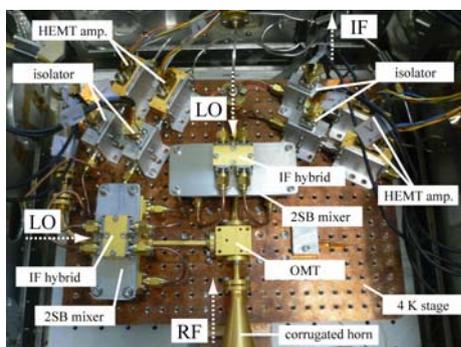


図 7 100GHz 帯受信機の様子

した。

新しい受信機は 2007 年 12 月初旬に実機に搭載され、両偏波・両サイドバンドを同時に受信することで、80~116 GHz という非常に広い周波数帯に渡ってオリオン KL 天体の分子輝線サーベイを短時間で達成した（図 8）。これは、100 GHz 帯で導波管型両偏波・両サイドバンド分離受信機を用いた結果としては、世界で初めての成果である（Nakajima et al. 2008）。

## 4 章 まとめ

本研究の成果は、以下の通りである。

1. ミリ波帯の望遠鏡に搭載する導波管型サイドバンド分離ミクサを開発するとともに、大阪府立大学の実験室においてミクサを高精度かつ効率的に評価できるシステムを確立した。
2. 200 GHz 帯 2SB ミクサを用いた受信機システムを開発し、野辺山にある 60 cm 望遠鏡に搭載した。そして、200 GHz 帯 2SB ミクサを使った観測としては、世界で初めて CO 輝線の広域マルチライン同時観測を行った。現在、60 cm 望遠鏡は、本格的な科学運用を行っている。

3. 100 GHz 帯の導波管型偏波分離器によって、直線偏波を分離し、両偏波それぞれに 2SB ミクサを用いることで、4 本の IF 帯を同時に観測

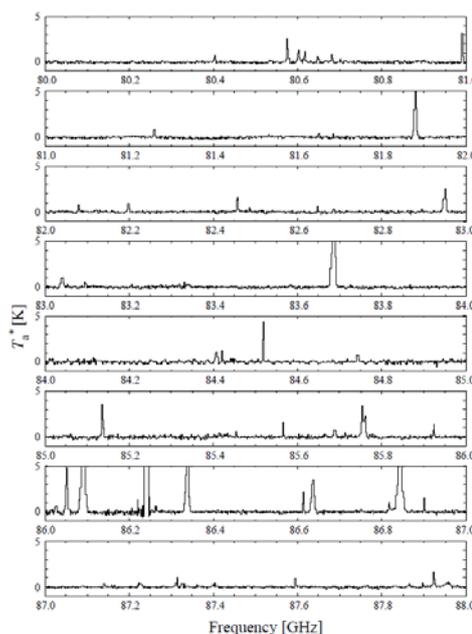


図 8 試験的なラインサーベイ観測の結果

可能な受信機を開発した。これを 45 m 望遠鏡に搭載し、複数の分子輝線の同時観測に成功した。100 GHz 帯の両偏波・両サイドバンド分離ミキサとして、世界で初めて本格的な観測を開始した。

## 審査結果の要旨

本論文は、ミリ波電波領域における天体からの微弱な電波観測を行う効率的な受信機を 60 cm および 45m電波望遠鏡のための開発を行い、観測効率を約一桁上げることに成功したものであり、その内容は以下の通りである。

電波天文学の対象は何万光年、何億光年の彼方の天体であり、検出すべき信号は極端に弱い。この微弱な信号を受信するために「電波望遠鏡」側の自己雑音をいかに下げるか、又天空からの信号成分をいかに多く受信を行うかが本質的な問題である。

高感度な電磁波検出を行う場合には、検出素子を極低温まで冷却することが本質的に重要である。特に超伝導素子は量子力学的に許される極限の高感度を実現できる可能性がある。現在までに超伝導トンネル接合の準粒子電流の非直線性を利用したミリ波ミキサの超低雑音かつ高能率が実証され、既に電波望遠鏡に搭載されている。

しかしながら、これまでの超伝導ミキサは片サイドのみの信号しか受信していなかった。今回はこの超伝導ミキサを導波管型ハイブリッドに組み込んで両サイド (2SB) バンドの信号を取り出回路を開発し、電波望遠鏡への搭載を行った。さらにこのミキサの中間周波出力帯域幅は 4GHz 幅で、従来のもより大幅に向上した。

この 200GHz 帯導波管型サイドバンド分離超伝導受信機を搭載した 60 cm 電波望遠鏡は、一桁近く観測時間を軽減することに成功した。さらに 100GHz 帯同受信機を搭載した 45m 電波望遠鏡は、観測時間、帯域幅等総合的にみて、これも一桁近く観測効率が上がった。このことは、10 年かかる観測が一年で終了することであり、天文学に与える影響は測りしれないものがある。今後これらの望遠鏡を使用した観測が大いに期待される。

これらの受信機の搭載は世界に先駆けて行われたもので、この分野で先鞭をつけたものとなっており、高く評価できる。さらにこの手法は、電波天文学に限らず分子分光学、プラズマ診断、リモートセンシング、通信工学等幅広い応用が期待できる。

本委員会は本論文を学位論文として十分な内容を有しているものと判断した。