

平成 22 年度 基礎天文学観測

「電波干渉計による 像合成の基礎」

実習の手引き

[2010/5/1 改訂]

河野孝太郎

東京大学 天文学教育研究センター



[空白のページ]

1. 野辺山ミリ波干渉計の構成

野辺山ミリ波干渉計は、10m のアンテナ 6 台を組み合わせた、結合素子型の、電波干渉計（ただし、2010 年 5 月現在、可動アンテナは 5 台のみ）である。

*** 干渉計を構成する主な装置 ***

- アンテナ
- 受信機
- 信号伝送系
- 分光相関器
- データ記録装置

【アンテナ】

宇宙からの電波を集光するところ。結合素子型干渉計の場合、観測視野は、干渉計を構成するアンテナの口径で決まる（ $\sim 1.2 \lambda/D$ ）。

Q：野辺山ミリ波干渉計で波長 2.6mm の観測をする場合、視野の大きさは？

【受信機】

集光した電磁波を「検出」する装置を一般に受信機と言うが、ミリ波サブミリ波帯の場合、受信機とは、しばしば「ミキサー」のことを指す。ミキサーとは、周波数混合器ともいい、高い周波数を低い周波数に変換するデバイスのこと。

Q：何故ミキサーか？→ 雑音の低い、よい増幅器がないから。

もし、非常に高性能な（装置自体が付加してしまう雑音の少ない）増幅器があれば、まず、天体からの微弱な信号を、十分な強度まで増幅してから処理するほうが簡単な筈。ただ、現在は、100GHz 帯のよい増幅器はまだ一般的ではない（近年の急速なデバイス技術の発達で、HEMT と呼ばれる高周波数用トランジスタ（の一種）が 100GHz 帯でも利用可能になりつつあるが）。かわりに、ミキサーを使って、周波数を、扱い安い周波数まで低く変換する。今回の観測実習の場合、観測周波数は、115.271GHz 付近である。これに、109.271GHz の信号を人工的に生成し、観測したい信号と一緒にミキサーに入力する。ミキサーは、その差周波である、6.0 GHz の信号を出力する。観測周波数帯のことを、RF 帯信号（Radio Frequency）と呼ぶ。人工的に混ぜ込む信号のことを、LO 信号（Local Oscillator）と呼ぶ。また、周波数変換後の、低い周波数に変換されたものを、IF 信号（Intermediate Frequency）と呼ぶ。

周波数変換とヘテロダイン受信について:

非線型性を持つデバイスの電流・電圧特性は、一般に

$$I = a_1 \cdot V + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot V^3 + \dots$$

と表される。このようなデバイスに、

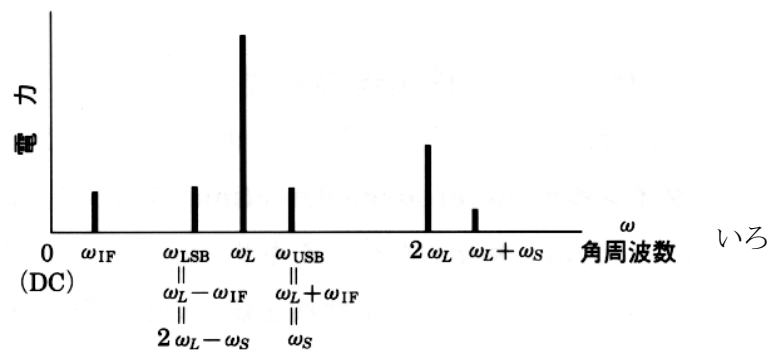
$$V_{RF} = A_{RF} \sin(2\pi f_{RF}t + \phi_{RF}), \text{ および}$$

$$V_{LO} = A_{LO} \sin(2\pi f_{LO}t + \phi_{LO})$$

なる 2 つの異なる周波数を持つ信号を加えると、 f_{RF} および f_{LO} の (あるいはその正数倍の) 差や和などの組み合わせからなる、いろいろな信号成分が現れる。都合のよい周波数の組み合わせのみを、フィルターによって取り出すことにより、周波数を上げたり下げたりすることができる。これが周波数混合(ミキシング; 周波数変換)の原理である。LO 周波数と RF 周波数の差周波を取り出すのが基本だが、 n 次の高調波(ハーモニクス)との差をとる(n 次のハーモニック・ミキシング)こともある。

このように、周波数混合を伴う受信方式をヘテロダイン方式と呼ぶ。

図1: ミキサー出力に含まれる、いろいろな周波数成分



一つの LO 周波数に対して、同じ IF 周波数を与える RF 周波数は 2 つある ($f_{LO} \pm f_{IF}$)。今回の実習に則していえば、IF 周波数を 6.0GHz に設定しているので、109.271GHz の LO 周波数に対して、115.271GHz と、あと 103.271GHz がそれにあたる。LO 周波数に対して、高い周波数側の RF 周波数のことを、upper side band (USB; 上側波帯)、低い周波数側の RF 周波数のことを、lower side band (LSB; 下側波帯) と呼ぶ。

USB 側、LSB 側、いずれの周波数も、同じ IF 周波数に変換されて出てくるので、言いかえれば、IF 信号には、115.271GHz 帯の信号と 103.271GHz 帯の信号、両方が混ざってしまう。このように、USB 側と LSB 側の信号をごちゃまぜにして同時に受信する方式を、double side band 受信 (DSB 受信) と呼ぶ。これに対して、何らかの方法で、2 つのサイドバンドのうち、片方だけ取り出して受信する方式を、single side band (SSB) 方式と呼ぶ。野辺山ミリ波干渉計では、受信機は DSB 方式であるが、位相スイッチングにより、USB と DSB を分離して、両方とも取り出して出力している。

【信号伝送系】

IF 信号を各アンテナから相関器まで伝送しているところ(各アンテナから干渉計観測棟への信号)、および、各アンテナに配っている基準信号を伝送しているところ(干渉計観測棟から、各アンテナへの信号)。前者は、6.0GHz 帯の電気信号を、各アンテナ内で光信号に変換して、地下トンネルに敷設した光ファイバー経由で干渉計観測棟まで伝送している。後者も同様に光ファイバーで伝送しているが、送っているのはもっと低い周波数(1696 MHz など)。

【分光相関器】

2つのアンテナからの信号を掛け算して時間平均を取り、visibility という測定量として出力するのが相関器。さらに、分光(周波数方向に分ける)機能も持っている。先に相関(cross correlationあるいはX)を取ってから分光(Fourier 変換)するタイプをXF型分光相関器、一方、先に分光してから、相関を取るタイプをFX型分光相関器という。後者は、日本の近田義広先生により発案されたもの。野辺山ミリ波干渉計では、UWBC という分光相関器がXF型、あと、新FXというその名もズバリのFX型、2つの分光相関器を持っている。

【データ記録系】

出力された visibility (干渉計の直接的な測定量)を、HDD に書き出している。野辺山ミリ波干渉計では、観測した天体ごとにファイルを作っている。さらに、一つの天体でも、USB と DSB、それぞれのデータを持っているので、通常、1天体あたり、2つの生データ・ファイルが生成されている。

2. 観測準備

大まかな流れ：

- (1) 観測天体を選ぶ。【今回は、Maffei 2 を観測する。】観測視野中心の座標をどこにとるか、決める。今回は、銀河の中心座標を視野中心とする。が、一般に、銀河の「中心」とは一体どこなのか？というのは、自明ではない。可視光で決めた中心座標（可視光でみて、一番明るく見える場所）というは、しばしば銀河の質量中心とは、ずれていることがある。（何故か？）
- (2) その天体の近くにある、較正用天体（reference calibrator とか visibility calibrator などと呼ぶ）を探す。スミソニアン天文台 Submillimeter array (SMA) が作成している calibrator list (<http://sma1.sma.hawaii.edu/callist/callist.html>) などが参考になる。
- (3) 目的天体の観測時間中、あるいはその前後に、観測可能な、非常に明るい連続波源を探す。これは、観測装置の、周波数特性（band pass characteristics）を測定するための観測に必要である（band pass calibration 用の天体、という意味で、band pass calibrator と呼ぶ）。
- (4) 周波数設定を決める。分光計の中心周波数を何 GHz にするか？ → 観測したい天体の後退速度/赤方偏移と、観測したい輝線の静止周波数から計算する。分光相関器の帯域幅をどうするか（UWBC は、いくつかの帯域幅を選択することができる）？ → 観測したい天体の線幅を考えて、何 km/s 分をカバーすればよいか、また、どの程度の速度分解能が達成したいか、を検討する（必要な科学的目的に則して）。
- (5) 以上の検討結果をもとに、ウェブ上のツール（web noisy）を使って、観測指示書を作成。

http://mt02u.nro.nao.ac.jp/nma/wwwnoisy/wwwnoisy_top.html

※ 計算機情報 ※

使用する計算機アカウント（user ID）：

f0546kk （パスワード： ） ←これは今回の実習者が共通で使う。

観測指示書や観測データを置いて実際に作業する directory（Project ID）：

h22a 岡田一志

h22b 高橋亘

h22c 前田和宏

h22g 主に河野が使用

ポイント：

- ・干渉計で測定しているのは **visibility**。
 - ・ **visibility** は複素量。振幅と位相、という 2 つの情報を持つ。
 - ・振幅は天体の強度の情報を、位相は天体の位置の情報を持っている。
 - ・さらに、野辺山ミリ波干渉計では、分光もしているので、 **visibility** は周波数の情報もある。
- すなわち、 **visibility** は、周波数ごとに、位相と振幅のデータがある。

・装置や大気の特徴の時間変動に起因する、 **visibility** の (みかけの) 変動を知り、補正するための天体 → **reference calibrator (visibility calibrator)**。位置と強度が既知の、点状電波源を観測する。位置と強度が既知の点状電波源であれば、 **visibility** は本来こうなるはず、という情報がわかる (振幅は天体の強度、位相は 0 度、これが、全てのベースライン長で一定)。従って、この **reference calibrator** を観測していると、「本来、こうなるべき」という **visibility** と、この **reference calibrator** の観測が示す **visibility** との差から、装置や大気起源の変動分 (補正すべき量) が推定できる。

・装置の特性に起因する周波数特性を知り、補正するための天体 → **bandpass calibrator**。これも、この周波数では、こういう周波数特性をしている、という天体 (通常、明るさが観測帯域内で一定と仮定してよい連続波源) を観測し、実際に観測された周波数応答と比較して、そのズレが装置に起因するものだとして、補正をかける。

・野辺山ミリ波干渉計では、4 秒ごと or 8 秒ごと or 16 秒ごとに **visibility** を積分・出力している。これを、観測時間中、ずっと記録していく。

3. 観測

観測開始予定 10 分前（でも実習ではもっと余裕をもって）になったら、干渉計観測棟へ行く。

観測開始時の、おおまかな流れ：

- (1) 前の観測が終了したら or 観測開始時刻になったら、まず、観測開始時に想定される方向へ、望遠鏡を向けておく。
- (2) 制御用計算機から、観測周波数と、使用する分光相関器の設定を、各装置に指令する。
- (3) 受信機の調節（チューニングと呼ぶ）を行う。チューニングは、以下の 3 ステップに分かれる。
 - [a] LO 信号の設定。野辺山ミリ波干渉計では、Gunn 発振器と呼ばれる発振器で LO 信号を生成している。さらに、Phase lock loop (PLL) と呼ばれる回路で、Gunn 発振器が出力する周波数がふらつかないようにフィードバック制御をかけるようにしている。このフィードバック制御が正しく動作している状態（PLL がかかっている状態）にするのがこのステップの目的。
 - [b] LO 信号入力レベルの調節。SIS ミキサーに LO 信号を入力して、RF 信号と混ぜて IF 信号を得るわけであるが、入力する信号電力を加減して、最も「性能がよいところ」＝付加してしまう「雑音」が最も少ないところ、に最適化する。
 - [c] IF 電力レベルの調節。6.0GHz 帯に変換された信号（IF 信号）を、光信号に変換して、伝送するが、この際、適切な電力レベル（この場合、電気・光変換器の「線形性」が保たれているレベル）にする必要がある。
- (4) チューニングが終わったら、観測指示書を実行開始する。もし、当初予定より早く終わった時間がかかって想定開始時刻を過ぎていたりしたら、あらためて指示書を作成しなおせばよい。
- (5) Quick look で、取得された visibility を準実時間で確認することができる。これを見て、観測が正しく開始されていることを確認。

4. データ解析

おおまかな流れ

- (1) 一次処理
- (2) イメージング

使用するソフトウェア

□ AIPS

干渉計データの解析（リダクション）に使用。今回の実習では、主に、一次処理が済んだ（**calibration** が済んだ）**visibility** データの像合成やその解析に利用。あと、データの表示にも利用。

□ UVPROC2

干渉計の生データ（**raw visibility data**）の **calibration**（一次リダクション）で主に使用。

□ ds9

画像の表示。**FITS viewer**。特に他の波長の画像との比較に便利。

5. 物理量等の導出

主な項目

- 積分強度画像から、観測された分子ガス質量を求める。
- 視線速度画像から、分子ガスの運動の様子を把握する。
- 位置速度図から、銀河回転のパラメーターを求め、力学質量を求める。
- 3mm 帯連続波から、星形成率を求める。

参考資料

&

キーワード解説

☆ 光学系関係のキーワード

Quasioptical propagation (準光学伝播)

波長がある有限の値を持つことを考慮した光学。⇔ 幾何光学 ($\lambda \rightarrow 0$ の極限で扱うことのできる光学)。伝播する方向の軸に対し、軸からの距離の関数としてエネルギーの分布をあらわすと Gaussian であらわされるため、Gaussian beam optics (ガウス光学)とも呼ばれる(図2)。

図2(右):ガウスビームが伝播する様子の模式図。通常、伝播方向を z 軸と定義することが多い。

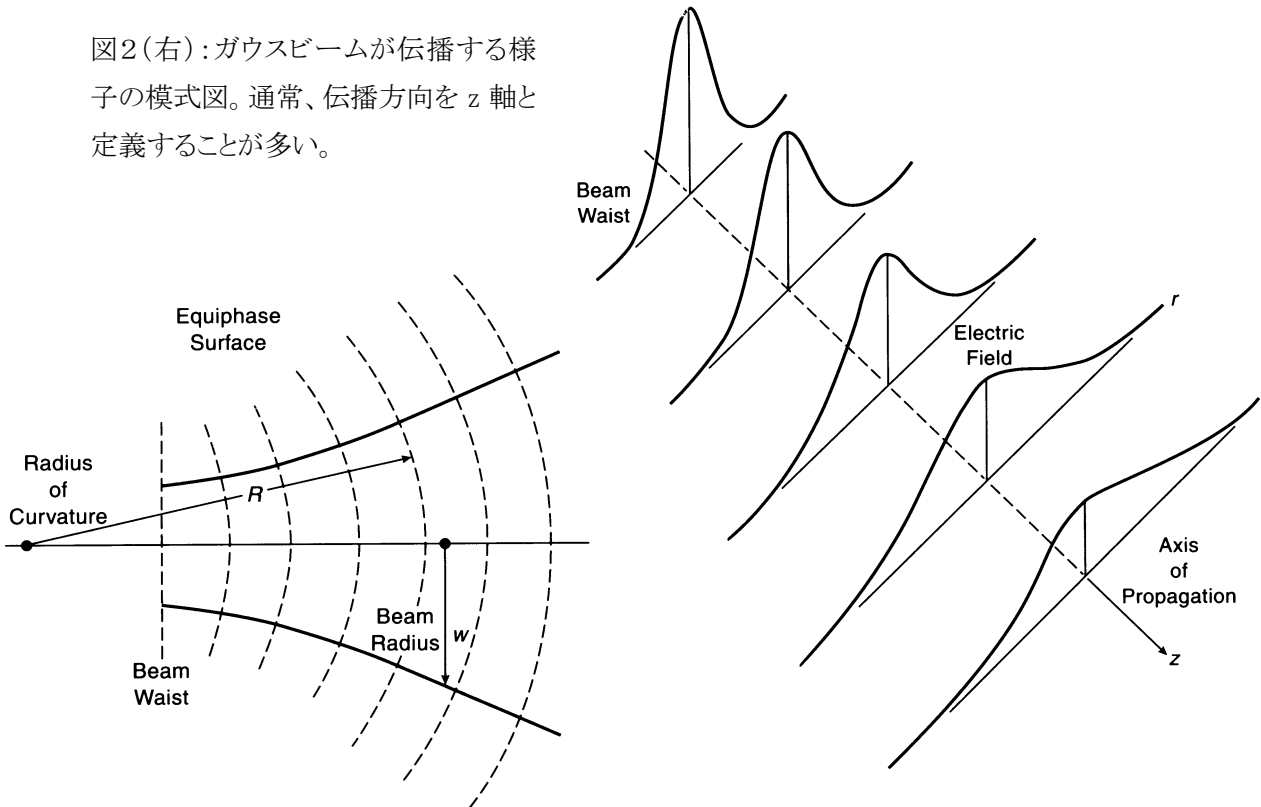


図3(上):ガウスビームを記述するパラメーターの説明。

ガウスビームを記述する諸量(図3)

- ビーム半径 (beam radius) w : 電場強度が、伝播軸上での強度に対して $1/e$ に落ちる半径。
- ビームウエスト半径 (beam waist radius) w_0 : 「焦点位置」のビーム半径。幾何光学と違い、焦点が有限の大きさを持つことを表現している。
- 曲率半径 (radius of curvature) R : 波面 (等位相面) の曲率半径。ビームウエスト位置で無限大に、また、ビームウエストからの距離が大きくなるにつれて、その距離に漸近していく (幾何光学に近づく)。
- 共焦点位置 (confocal distance) z^* : 曲率半径が極小になる位置。Near field と far field との境界位置を表す指標。 $z^* = \pi w_0^2 / \lambda$ (導出してみよ)。

パラボラ鏡

放物面を持つ鏡。平行光線をパラボラの焦点位置に集光する。

楕円鏡

異なる焦点距離のガウスビームを結合できる(焦点距離変換をしているとも言える)。

オフセットアンテナ

一次放射器が主鏡面(開口面)を遮らないため、開口能率(どのくらい鏡面を有効に使っているか)が高く、サイドローブレベルも低いアンテナになる(図5)。一方、非対称性により、交差偏波成分は高くなるというデメリットがある。ラジオメーターでは、スピルオーバー損失(サイドローブにより電力が漏れることによる損失)を極力低減することが重要であるため、オフセット・パラボラ鏡を採用している。

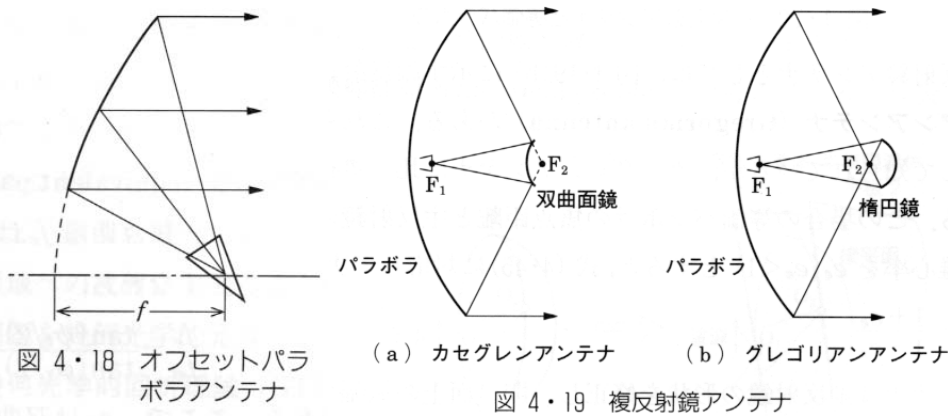


図4:いろいろなアンテナ光学系

フィードホーン feed horn

自由空間を伝播する電磁波と、導体に囲まれた空間(導波管)を伝播する電磁波とでは、インピーダンス(狭い意味では、電圧と電流の比;広い意味では、電場と磁場の振幅比)が異なる(真空中を伝播する電磁波のインピーダンスは 377Ω 。一方、同軸線路のインピーダンスは 50Ω)。フィードホーンは、このインピーダンス変換を行う役目を持つ。

コルゲートホーン corrugated horn

フィードホーンの種類で、ホーンの内側に、周期的な溝(corrugation)をつけたもの(図6)。ビームの対称性がよく、サイドローブレベルが低い、交差偏波レベルも低い、という特長を持つが、通常の(溝の無い単純なホーン=ストレートホーン)と比較して製作が技術的に難しくなる。

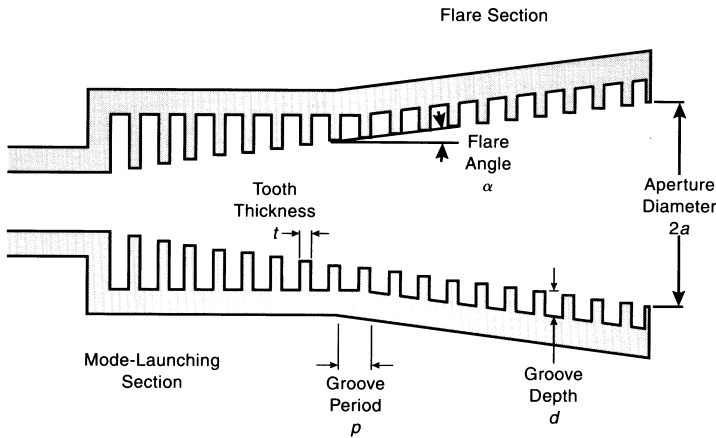


図5: コルゲートホーンの模式図。光学設計をする際に必要な基本パラメーターは、開口径 $2a$ とフレア角 α である。内側のコルゲーションのパラメーター(間隔や深さ、「歯」の厚さ)は、周波数特性や交差偏波特性などを左右する。

図6: フィードホーンとフィードホーンが放射する伝播パターンとの関係

フィードホーンが、どのようなビームを放射するか(具体的には、ビームウエスト半径がいくつのガウスビームを放射するか)、は、ホーンの開口径で決まる。また、放射されるビームウエストの位置がどこになるか、は、ホーン開口面での等位相面とガウスビームの曲率半径が一致する場所を探すことで求められる。

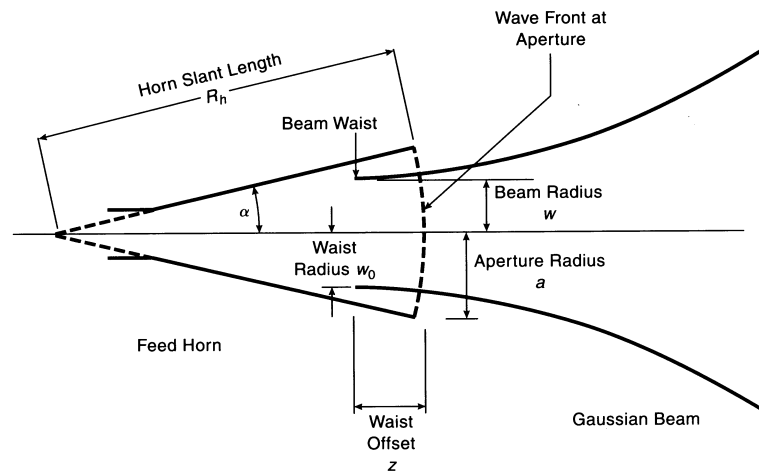


図6: フィードホーンのパラメーター(開口サイズ a およびフレア角 α もしくはホーンの長さ R_h)と、フィードホーンがつくるガウスビームのビームウエスト半径およびビームウエスト位置の説明。

☆ 受信機

デシベル(dB)

(電力の)比を表す単位。 $P \text{ [dB]} = 10 \log_{10}(P_1/P_2)$ である。特に、 $P_2=1\text{mW}$ のとき、単位を[dBm]と表記する。逆に、 $(P_1/P_2) = 10^{P[\text{dB}]/10}$ 。

- P_1/P_2 が 10 倍のとき $\rightarrow 10 \text{ [dB]}$
- $3 \text{ [dB]} \rightarrow P_1/P_2$ は 2 倍

- 10 [dB]は10倍、20 [dB]は $10^2 = 100$ 倍、30 [dB]なら $10^3 = 1000$ 倍
- 1 [dBm] = 1 mW のこと。3 [dBm]は約 2mW、10 [dBm]は 10 mW。-10 [dBm]は 1/10 mW。

Nyquist の定理

抵抗値 R 、温度 T の抵抗体 (resistor) は、(その両端に電源をつないでいない状態でも) 熱雑音を発している (Johnson 雑音という)。

※ 平均の電流値はもちろん 0 になるはず ($\langle i \rangle = 0$)。しかし、電子の熱運動があるために、「電流値の2乗平均」は 0 にならない ($\langle i^2 \rangle \neq 0$)。すなわち、何も電源を接続していない状態であっても、抵抗体が置かれている環境温度に応じて、ある有限の電力を発していることになる。

※ いろいろな雑音の例

- ◇ 熱雑音、ジョンソン雑音 (Johnson noise): 電子の熱運動に起因する雑音。
- ◇ ショット雑音 shot noise: 電子の流れのゆらぎに起因する雑音。
- ◇ 1/f noise: 周波数に逆比例するような強度分布を示す雑音。
- ◇ 白色雑音 white noise: 周波数によらず一定の強度分布を示す雑音。

抵抗体が放射する、ジョンソン雑音の電力は W_ν は、帯域幅を B とするとき、 $h\nu \ll kT$ (h は Plank 定数、 k は Boltzmann 定数) の古典論的極限で、

$$W_\nu = kTB$$

である。 $h\nu \ll kT$ の近似が成り立たない領域では、

$$W_\nu = \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} B$$

となる。

SIS ミキサー

超伝導体 (super conductor) と絶縁体 (insulator) をサンドイッチ構造 (SIS 構造) にしたデバイス。非常に強い非線形な電流-電圧特性を持ち、周波数混合器 (ミキサー) として非常に優れている。

Gunn 発振器

LO 信号の信号源として用いられる発振器の一つ。GaAs や InP などの物質による n 型半導体は、印加する電場強度と、その結果生じる電子のドリフト速度との関係が非線型になることがある。Gunn diode は、この非線型性に起因する「負性抵抗」を持つため、発振させることができる。数 10 GHz から 150GHz 帯という高い周波数を、数 10mW という比較的大きな電力で発振することが可能である。位相雑音も比較的少ないため、信号源として優れている。通常、1 軸~2 軸のマイクロメーターがついており、これを調

節することにより、発信器内部の cavity(空洞)の大きさを微調整し、発振周波数を変えることができる。発熱量が大きいので、放熱に注意する。

雑音温度

デバイス内部で発生し、付加される雑音電力を、デバイスの入力における値に換算(入力等価換算)して、さらにナイキスト定理により温度換算したもの。入力される際に入る「信号成分」と、それ以外の「雑音成分」の付与を同等に扱って比較・考察する際に有用であり、電波天文学では広く用いられる。

*** 雑音温度とは:定量的な考察 ***

いかなるデバイスであっても、入力された信号・電力を、無損失で 100%後段に伝送することはできない。程度の差はあれ、何らかの損失が生じる。このような損失の大きさを、しばしば伝送効率 η ($0 \leq \eta \leq 1$) で表す(0 は全損失=すべての入力信号を失う;1 は完全伝送=入力信号を損失なくすべて伝送)。

ここで、システムが熱力学的な平衡にあるとすれば、損失があるところにはそれに応じた放射が発生するはずである。これは、天体放射論 I で学んだ「減衰がある媒質中を伝播する放射輸送」との対比で理解することができる。

温度 T_{amb} で局所熱平衡状態(LTE)にある媒質(そこでの optical depth を τ とする)を、背景からの放射 I_{bg} と共に観測した時、観測される放射は

$$I_{bg} \cdot e^{-\tau} + B_{\nu}(T) \cdot (1 - e^{-\tau})$$

となる。第1項は、背景からの放射が、媒質により減衰を受けることを、第2項は、吸収と同時に起こる放射によって付加される放射成分を、それぞれ意味する。

電子デバイスにおける伝送効率 η は、この式における $e^{-\tau}$ に相当する。すなわち、デバイスに P_{in} なる入力電力が入ったとき、出力は $P_{in} \cdot \eta + kBT_{amb}(1 - \eta)$ になる。第1項は、入力信号が η だけ減衰すること、第2項は、その減衰に応じた熱雑音が新たに付加されることを表している。電子デバイスと星間媒質とで、全く同じ物理で理解できることに注目!(鍵は「熱平衡」)。

LTE にある星間ガスの場合:

$$I_{bg} \longrightarrow \text{cloud}(T_{amb}, \tau) \longrightarrow I_{bg} \cdot e^{-\tau} + B_{\nu}(T_{amb}) \cdot (1 - e^{-\tau})$$

熱平衡にある電子デバイスの場合:

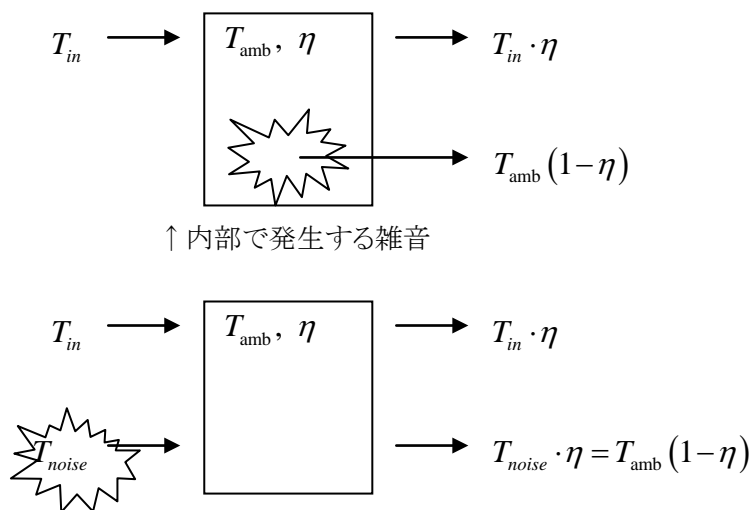
$$P_{in} \longrightarrow \text{box}(T_{amb}, \eta) \longrightarrow P_{in} \cdot \eta + kBT_{amb} \cdot (1 - \eta)$$

以上から、環境温度 T_{amb} で熱平衡状態にあるデバイスがその内部で付加する雑音は、 $kBT_{amb} \cdot (1-\eta)$ である。

これ以降、Nyquist 雑音定理を介して、電力 P と温度 T を等価なものと扱う。たとえば、入力する雑音電力 P_{in} は温度換算して T_{in} で表すこととする。このとき、デバイス内部で付加される雑音は $T_{amb} \cdot (1-\eta)$ で表される。

このデバイス内で付加される雑音 $T_{amb} \cdot (1-\eta)$ を、入力端での値に換算したもの（入力等価換算という）を、入力等価雑音温度もしくは単に雑音温度という。すなわち、雑音温度 T_{noise} は、デバイス内で付加される雑音 $T_{amb} \cdot (1-\eta)$ を、デバイスの伝送効率 η で割ったものとして、すなわち、 $T_{noise} = \{T_{amb} (1-\eta)\} / \eta$ と定義する。

雑音温度をこのように定義すれば、「デバイスに入力される電力」と、「デバイスの内部で発生する雑音電力」を、同等に（等価に）扱うことができる。すなわち、デバイスは、入ってきた信号を、 η なる伝送効率で出力する「だけ」の働きをもつものであり、その入力側には、入力信号とは別に、常に T_{noise} なる雑音信号も入ると考えればよい。



↑「内部で発生する雑音」を入力等価換算したもの

*** R-SKY 法によるシステム雑音温度の測定 ***

SKY を見たときの出力: $W_{sky} = kBG [T_{rx} + T_{atm}(1 - e^{-\tau})] = kBG T_{sys} e^{-\tau}$ (定義)

ROOM を見たときの出力: $W_{room} = kBG [T_{rx} + T_{room}]$

※ 大気の上(外)で T_{sys} を定義しているので、アンテナに到達する時点では、 T_{sys} は $T_{sys} e^{-\tau}$ に“減衰”。つまり、 $T_{sys} = e^{\tau} [T_{rx} + T_{atm}(1 - e^{-\tau})]$

もし $T_{atm} = T_{room}$ と仮定できれば、

$W_{room} - W_{sky} = kBG T_{room} e^{-\tau}$

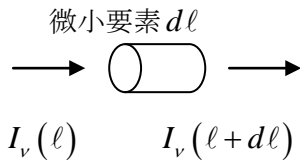
よって、 $T_{sys}/T_{room} = W_{sky}/(W_{room} - W_{sky})$

$T_{sys} = T_{room}/[(W_{room}/W_{sky}) - 1]$

この W_{room}/W_{sky} は、いわゆる R-SKY の Y-factor である。

*** 輻射輸送 radiative transfer ***

輻射 $I_\nu(\ell)$ が、ある微小長さ $d\ell$ なる体積要素を通過して $I_\nu(\ell + d\ell)$ になるとする。



この時に考慮すべき効果は

(1) 吸収: $-\kappa_\nu I_\nu d\ell$ ← κ_ν : 吸収係数 [1/m]

(2) 放射: $\epsilon_\nu d\ell$ ← ϵ_ν : 放射係数 [$W/m^3 \cdot Hz \cdot Sr$]

よって放射輸送の基本方程式は

$$\frac{dI_\nu}{d\ell} = \epsilon_\nu - \kappa_\nu I_\nu$$

である。以下、基本となる2つのケースでの解を考える。

[a] 温度 T なる完全熱平衡(黒体)

$$\frac{dI_\nu}{d\ell} = 0 \text{ より } I_\nu = \frac{\epsilon_\nu}{\kappa_\nu} \leftarrow \frac{\epsilon_\nu}{\kappa_\nu} \text{ を源泉関数 (source function) と呼ぶ。}$$

$$\text{また、定義(黒体)より、} I_\nu = B_\nu(T) \leftarrow B_\nu(T) = \frac{2h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \text{ (Planck 関数)}$$

つまり、黒体では、 $\frac{\epsilon_\nu}{\kappa_\nu} = B_\nu(T)$ が成り立つ。これを Kirchoff の法則という。

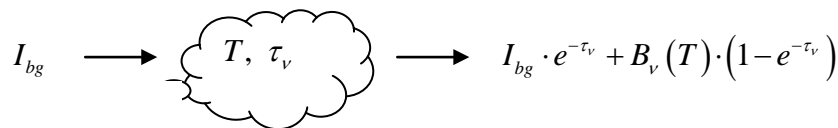
[b] 局所熱平衡

$I_\nu \neq B_\nu(T)$ であるが、 $\frac{\epsilon_\nu}{\kappa_\nu} = B_\nu(T)$ が成り立つ場合。これを局所熱平衡(LTE)といい、実際の星間空間で、しばしばよい近似として適用できる。LTE の場合、 $d\tau_\nu \equiv -\kappa_\nu d\ell$ を導入すると便利である。すなわち、

$$\frac{dI_\nu}{d\ell} = \epsilon_\nu - \kappa_\nu I_\nu = -\kappa_\nu (I_\nu - B_\nu(T)) \quad \text{なので}$$

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - B_\nu(T) \quad \text{と書くことができる。この } \tau_\nu \text{ を光学的厚み(optical depthあるいはopacity)と呼ぶ。}$$

よく出てくる例として、opacity τ_ν の等温媒質(温度 T) に、背景からの放射 I_{bg} が入射している場合を見ておこう。



第1項は、背景放射が媒質中で減衰することを、また、第2項は、減衰があるところではそれに応じた放射も付加される(Kirchoff 則が意味すること)ことを表す。

問1: 輻射輸送の方程式を実際に解いて、解が上式のような2つの項になることを示せ。

問2: $\tau_\nu \rightarrow \infty$ の極限で、観測される放射が $B_\nu(T)$ に収束することを確認せよ。

◇◇◇ 電波望遠鏡の2つの種類 ◇◇◇

- 単一鏡(single dish): 野辺山 45m 電波望遠鏡、IRAM 30m 鏡@スペイン、ASTE 10m@チリ(サブミリ波)、本実習で使用する 30cm scanning radiometer@可搬型! などなど
- 干渉計(interferometer): 野辺山ミリ波干渉計(10m×6 素子)、PdBI(15m×6 素子)@フランス、CARMA(10m×6 素子+6m×8 素子)@米国、SMA(6m×8 素子、サブミリ波)@マウナケア、VLA(25m×27 素子、cm 波)



図7: (左)南米チリはアンデス山脈の砂漠地帯(標高4860m)に設置された、アタカマ砂漠サブミリ波望遠鏡(ASTE)。口径10mで、サブミリ波帯(現在は主に周波数350GHz帯)の観測を進めている。国立天文台および東京大学ほかによる。(右)アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array)の完成想像図。口径12mのアンテナ54台と口径7mのアンテナ12台を組み合わせ、合計64素子で一つの装置(干渉計)として観測を行う。日米欧3極の国際共同建設が進んでいる。2011年1月には初期科学運用の観測提案募集を開始する予定。

干渉計という手法を使った観測の場合は、最終的に天体の輝度分布を画像として得ることができる。(一方で干渉計観測特有の「問題」もあり。ALMAは、干渉計観測と単一鏡観測のそれぞれの利点を総合した、“究極”の装置にすることを目指している)。

いろいろな電波望遠鏡の web サイト

ミリ波サブミリ波帯の単一鏡

NRO 45m	http://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/
IRAM 30m	http://www.iram.fr/IRAMES/
JCMT 15m	http://www.jach.hawaii.edu/JCMT/
CSO 10m	http://www.submm.caltech.edu/cso/
ASTE 10m	http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kkohno/ASTE/
APEX 15m	http://www.apex-telescope.org/
VST 60cm	http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/VST/index-j.html

ミリ波サブミリ波帯の干渉計

NMA	http://www.nro.nao.ac.jp/~nma/
RAINBOW	http://www.nro.nao.ac.jp/~rainbow/
PdBI	http://www.iram.es/IRAMFR/PDB/bure.html
SMA	http://sma-www.cfa.harvard.edu/
CARMA	http://www.mmarray.org/
ALMA	http://www.alma.info/

センチ波(～ミリ波)帯の干渉計

VLA	http://www.vla.nrao.edu/
ATCA	http://www.narrabri.atnf.csiro.au/

センチ波帯の単一鏡(で、現在論文生産論文のあるものは、ほとんどない。(→何故か?)

◇◇◇ 電波望遠鏡の観測性能を特徴づけるパラメーター ◇◇◇

広い意味での電波望遠鏡(単一鏡も干渉計も含め)の「観測性能」を特徴づけるパラメーターは何か?
[観測周波数][空間分解能][速度分解能(分光観測の場合)][感度]他・・・?

宇宙電波

天体からの電磁波のうち、いわゆる電波領域では、(1)さまざまな分子や原子からのスペクトル線、(2)固体微粒子(ダスト)からの熱放射、(3)磁場中を高速で運動する電子から放射される非熱的放射(シンクログロン放射)、および、(4)電離ガス中を運動する電子からの熱放射(熱制動放射、自由-自由放射)などが観測される。3K 宇宙背景放射が強くなるのもこの波長帯である。

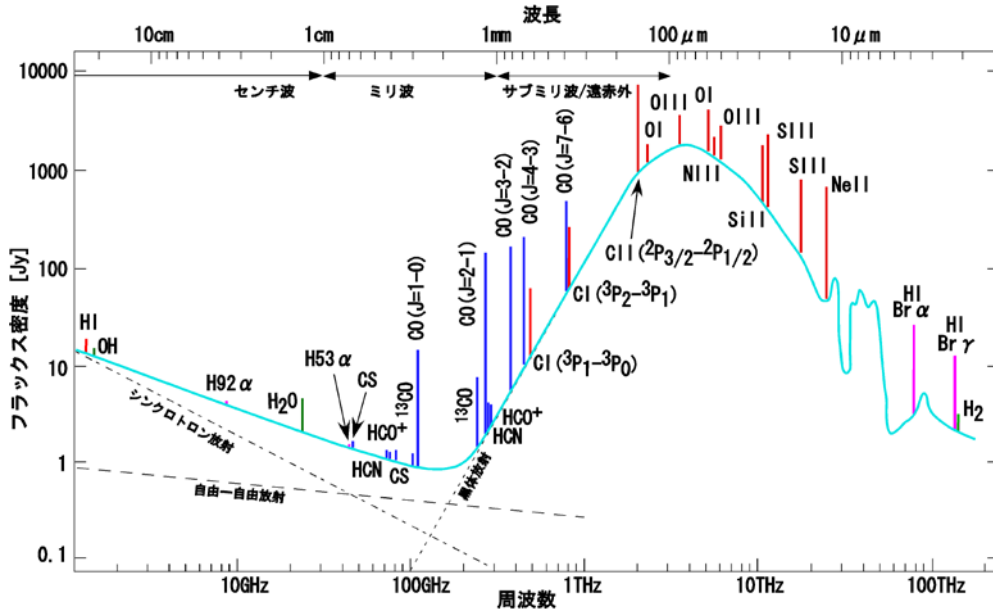
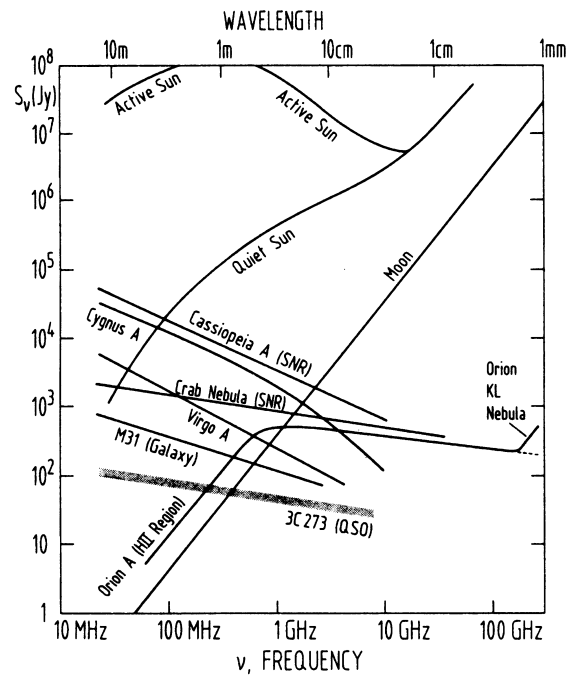


図8:爆発的星形成銀河 M82 の中心領域(～数 100 pc 領域)における、電波～近赤外域に至る輝線および連続波放射(の一部。実際には、再結合線や回転遷移など、いろいろな遷移がびっしりと観測される)。

図9:いろいろな天体の電波領域におけるスペクトル (Kraus 1986 “Radio Astronomy”から)。



大気透過率の周波数特性

ミリ波から赤外にかけて、水や酸素による多数の吸収スペクトルが存在する。酸素による吸収は、時間によらず一定であるが、水(水蒸気)による吸収量は、時間や場所で大きく変動することが知られている。ミリ波帯における、主な水の吸収線は、22.2 GHz および 183.3 GHz。

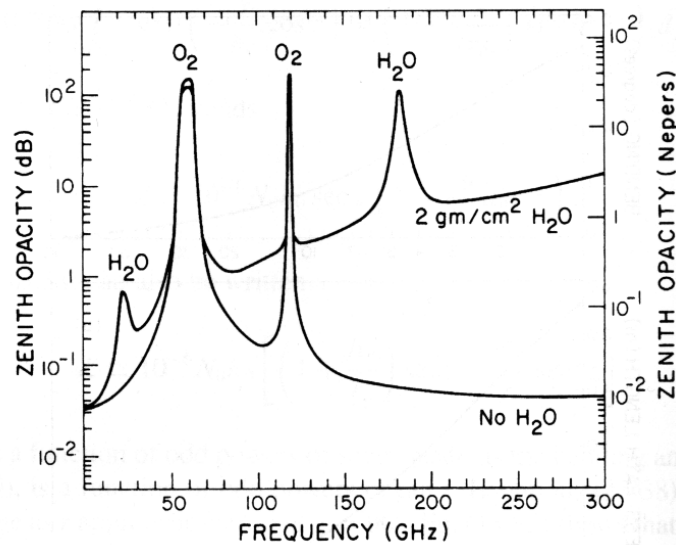


図10: ミリ波帯における大気減衰量の周波数特性。乾燥大気 (H_2O がない) 場合と、 H_2O が 2g/cm^2 ある場合とを示してある。

ミリ波サブミリ波帯における大気透過度の周波数特性 (0~1000 GHz の範囲での大気モデル)

<http://www.submm.caltech.edu/cso/weather/atplot.shtml>

◇◇◇ 電波望遠鏡(単一鏡)の基本的な構成 ◇◇◇

- ・ 光学系
- ・ フロントエンド(受信機)
- ・ バックエンド(電力計、分光観測の場合は分光計)
- ・ 制御部

電波観測に特有なところ

- ・ 光学系: 波長が光学素子のサイズに近い! →「ガウス光学」(焦点がある有限の大きさを持つてしまうことをきちんと考慮した光学的取り扱い)が必要。
- ・ フロントエンド: 「ヘテロダイン受信」到来するエネルギーを波として扱う→非線形デバイスを用いて周波数変換ができる。
 - 周波数変換を行うメリット:
 - ◇ 高利得の増幅を行う際の漏れこみを避ける
 - ◇ 一旦低い周波数に変換してから分光すれば、実質的に非常に高い「分散」が得られる。(なので、周波数変換が自由にできる電波領域は、高分散分光が非常に得意!)
 - 到来するエネルギーを波として扱うことによるデメリット:

- ◇ 不確定性原理にひっかかり、実現できる「感度」に限界が生じる:エネルギーと時間の間の不確定性($dE \cdot dt > h$)は、photon の数と、位相との間の不確定性($dN \cdot d\phi > 1/2$)に書き換えることができる。→ある観測周波数を決めると、数えられる photon の数に下限が発生。すなわち、あるレベルよりも雑音を下げることができない。それを受信機雑音温度で表すと $h\nu/k$ [K]となり、量子雑音温度と呼ぶ。
- ◇ [まあでも電波領域ではあまり深刻ではない。量子雑音限界に迫る受信機を作るということ自体が、現在もおおきく技術的に挑戦的なテーマである。一方、赤外や光学域でヘテロダイン技術を用いた観測装置を作るとなると、量子雑音限界というのはかなり問題。→インコヒーレントな検出技術が全盛]

以上