

45m観測マニュアル



国立天文台 野辺山宇宙電波観測所

第1.1版 2018年6月

4 5 m観測マニュアル 目次

I	45m電波望遠鏡	
I-1	45m 望遠鏡の構造概略図	3
I-2	45m電波望遠鏡について	4
II	観測装置	
II-1	受信信号の流れと受信機の調整	6
II-2	分光計	8
III	天体の追尾	
III-1	位置の追尾	9
III-2	周波数の追尾	10
IV	観測・解析	
IV-1	観測の流れ	11
IV-2	観測計画書作成	12
IV-3	位置補正 (ポインティング)	20
IV-4	強度較正 (キャリブレーション)	21
V	データ処理	
V-1	データ処理の概略	23
V-2	データ処理ソフト NEWSTAR の扱い方	24
VI	参考資料	
VI-1	受信機	33

I 45m 電波望遠鏡

I-1 45m 電波望遠鏡の構造概略図

アンテナ直径・・・45メートル

アンテナ重量・・・700 トン

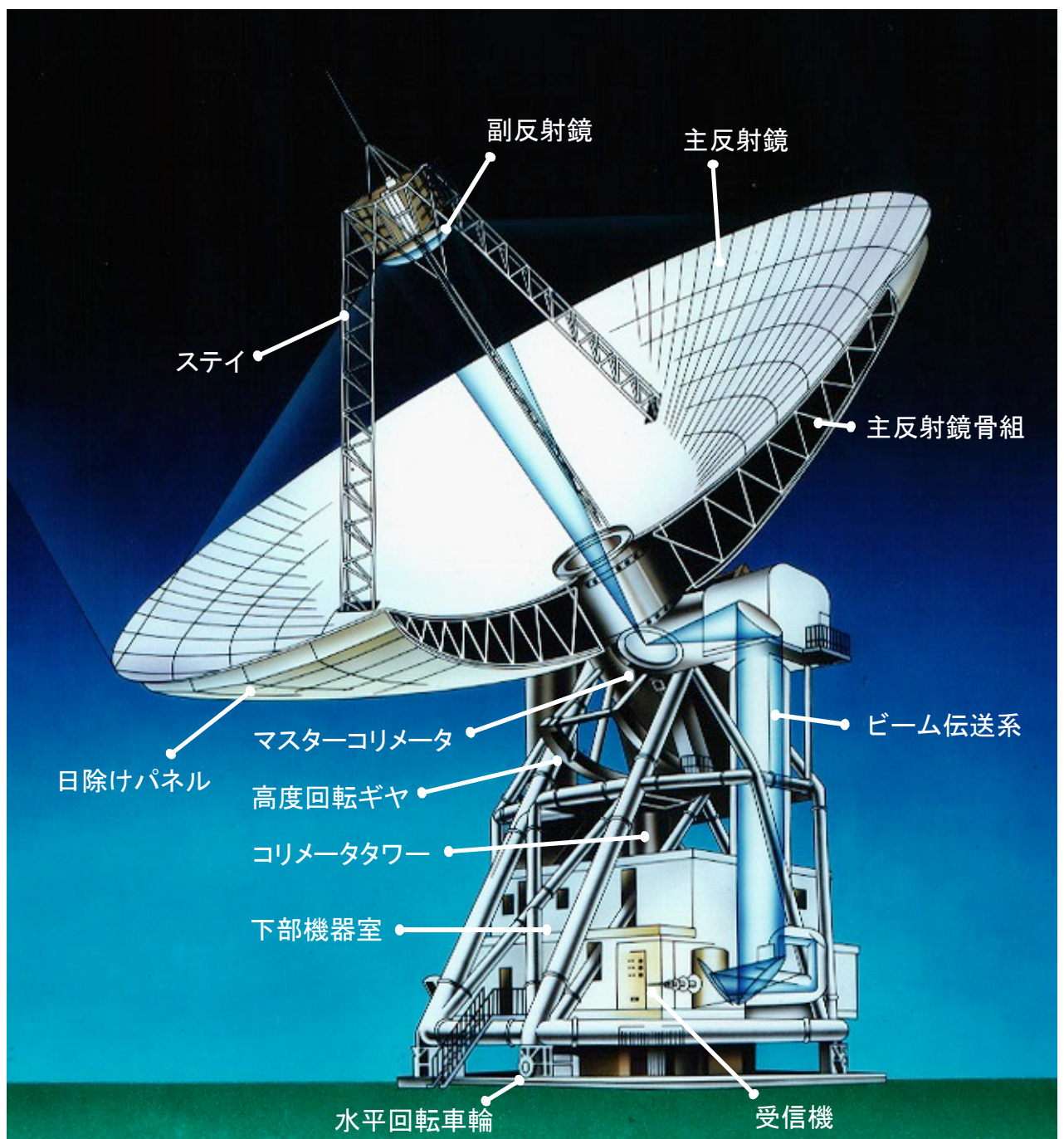
動く範囲

・高さ方向・・・ $11^{\circ} - 90^{\circ}$

・回転方向・・・ $-90^{\circ} - +450^{\circ}$

観測波長・・・1.5 cm - 2.6 mm (周波数: 20 GHz - 116 GHz)

完成・・・1982 年



I-2 45m電波望遠鏡について

1982年に観測を開始した45m電波望遠鏡(45m鏡)は、当時の我が国における最高の技術を結集して建設され、その高性能と大口径は世界の電波望遠鏡開発史の記録を大きく塗り変えた。また、その後も共同利用観測の合間をぬって性能向上のための努力が払われており、現在でもミリ波観測では世界のトップレベルに位置している。

45m鏡の特徴はいくつかあるが、ここではアンテナ自身の重さによる変形(自重変形)や熱変形等の対策、天体追尾方式、ビーム伝送系、主鏡面の調整方法等について説明する。

1. ホモロガス変形法

地上に電波望遠鏡を設置する限り、アンテナの高度角の変化による自重変形は避けられない。そこで、自重変形をホモロガス(相似的)にすることによって実際上の集光力を維持しようとする数学的検討が1960年代の初期に試みられ、1972年に建設されたマックスプランク研究所(ドイツ)の100m鏡の構造に初めて採用された。45m鏡の設計にあたっては、このホモロガス変形法を導入し、自重変形によって引き起こされる主鏡(主反射鏡)の焦点位置の変化に応じて、副鏡(副反射鏡)が駆動する機構となっている。

2. 熱変形対策

電波望遠鏡は昼間も観測を行うため、日射による熱変形も重要な検討事項である。45m鏡の主鏡面パネルは、その大半が金属よりもはるかに熱膨張係数が小さいCFRP(炭素繊維強化プラスチック)で両面をおおったハニカムサンドイッチパネルで構成されている。また、主鏡の背面を断熱パネルでおおふことにより日射を防ぎ、密閉した骨組み構造内を50台のブロー(扇風機)で空気を攪伴することで、熱の分散を図っている。また、副鏡を支える3本のステイにも、熱変形を防ぐカバーが取り付けられている。一方、建設後アンテナ各所に設置した温度センサーによって、熱変形の原因が明らかになってきた。そこで、主鏡内へのブローの増設、主鏡中心部の穴(センターハブ)周辺へ日除けカバーを取り付けるなどして、改善を図っている。

3. 天体追尾

電波望遠鏡では、ビーム幅(望遠鏡が見ている天空の領域の大きさ)の数分の1以内という高い指向精度が要求される。例えば、45m鏡で波長2.6mmの一酸化炭素の輝線を観測する場合ビーム半値幅は16秒角なので、3秒角程度以上の指向精度が必要となる。そこで、45m鏡ではマスターコリメータという機器を用いる方式を導入している。これは、電波望遠鏡の中心に独立した基礎から立ち上げたタワーを設け、高精度の小型望遠鏡を搭載、この望遠鏡をコンピュータ駆動し、光ビームでリンクすることで主鏡を追従させるものである。この結果、45m鏡の追従誤差は ± 0.5 秒角となっている。

指向精度は、強い点状の電波源を実際に観測することで検定できる。全天の指向精度測定から得られた誤差をアンテナの方向の関数で表し、観測の際には常時補正される機構にしてある。その結果45m鏡の指向精度は、夜間、快晴、無風の好条件の下で2秒角程度となっている。

この他、温度モニターに基づく補正等が行われている。

4. ビーム伝送系

電波は、光と同じように反射鏡によって方向を変えることができる。45m 鏡では、主鏡で集めた電波を、反射鏡で機器室に設けた受信機まで導く。反射鏡の組み合わせを変えることによって、合計 5 台あるどの受信機にも電波を導くことができる。また、偏波膜で 2 つの偏波を分けることによって、異なる 2 周波を同時に観測することもできる。

5. 主鏡面の調整方法

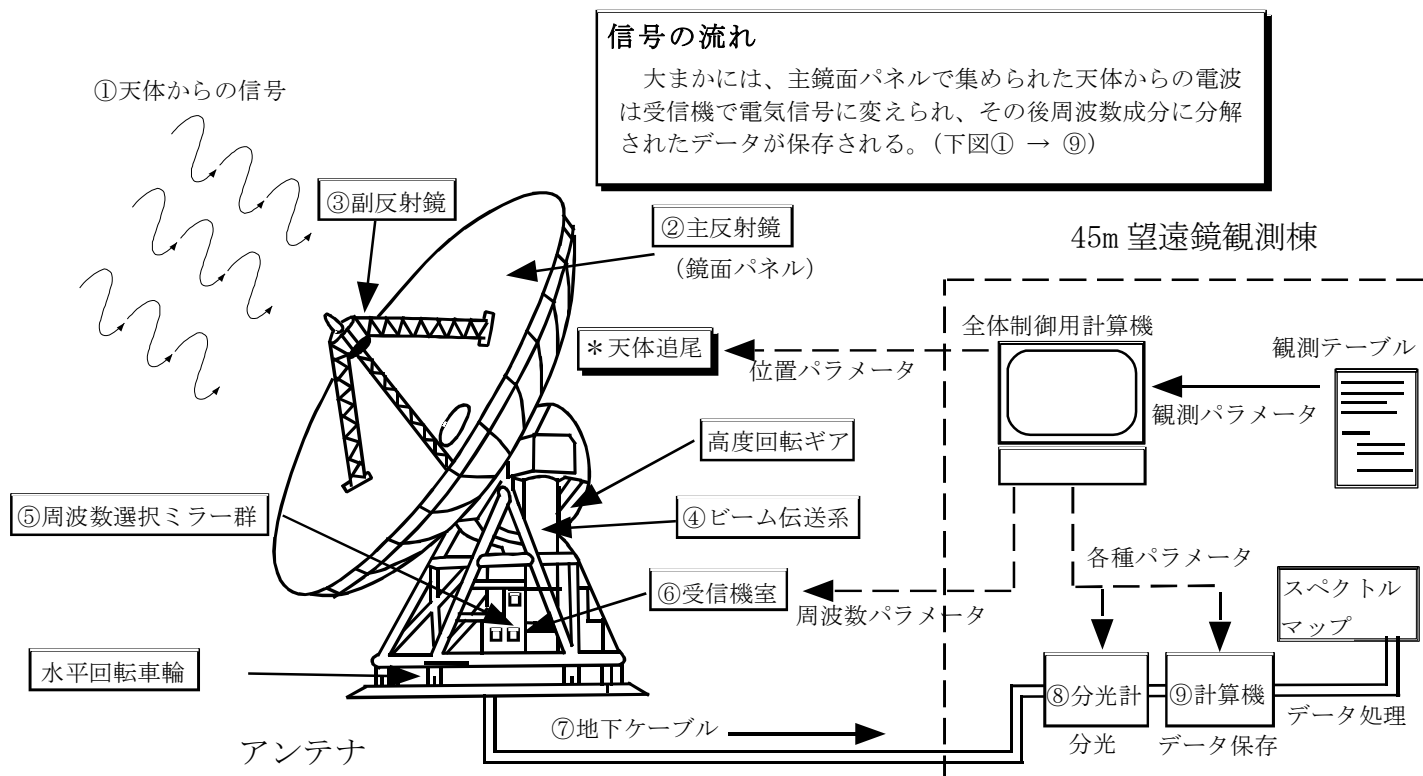
45m 鏡の主鏡は約 600 枚のパネルから構成されているが、鏡面の凹凸が大きければ電波は乱反射して焦点に集まらない。建設当初、レーザー測距測角儀で主鏡パネル一枚一枚を測定することによって鏡面調整を行っていたが、1985 年から電波ホログラフィという方法を導入した。これは、人工衛星から発射されている 19.45 GHz の電波を利用し、位相分布から鏡面誤差を求める方法である。このデータに基づいて、約 600 枚のパネルをそれぞれステッピングモータにより 10 μm 単位で上下駆動することで、鏡面精度を高めていく。これまでの最高は 70 μm (root mean square)である。

45m 鏡は建設後 30 年以上経過しているが、当時は予想し得なかった問題も発生した。そのひとつは水平 (AZ)レール基礎部の不等沈下で、高低差 0.7 mm/年程度ずつ北西方向に傾き続けている。このため、1994 年と 2000 年に部分改修を行った。また、低高度角で主鏡に異常変形が起きることがわかったので原因を調査したところ、骨組み構造を締結しているボルトの劣化が認められ、1996 年に約 1000 本のボルト交換を行った。さらに 1997 年に行った日除けパネルの交換によって、約 4 トンもの水が含まれていたことが明らかになった。

このように 45m 鏡は、様々な問題を克服しつつ精度の向上をめざしている。

II 観測装置

II-1 受信信号の流れと受信機の調整



45mのアンテナで集められた電波はいくつかの鏡によって反射され受信機へと伝送される。宇宙からの電波はとても微弱なため、非常に感度がよく雑音の少ない検出器、増幅器が必要である。

現在 45m鏡には 20 GHz から 116 GHz までの周波数帯域で観測が可能になるように、5 台の受信機が設置されており、観測目的にあった周波数帯域の受信機を使用して観測を行う。

受信機は扱う周波数によっておおまかに 2 種類に分けられる。

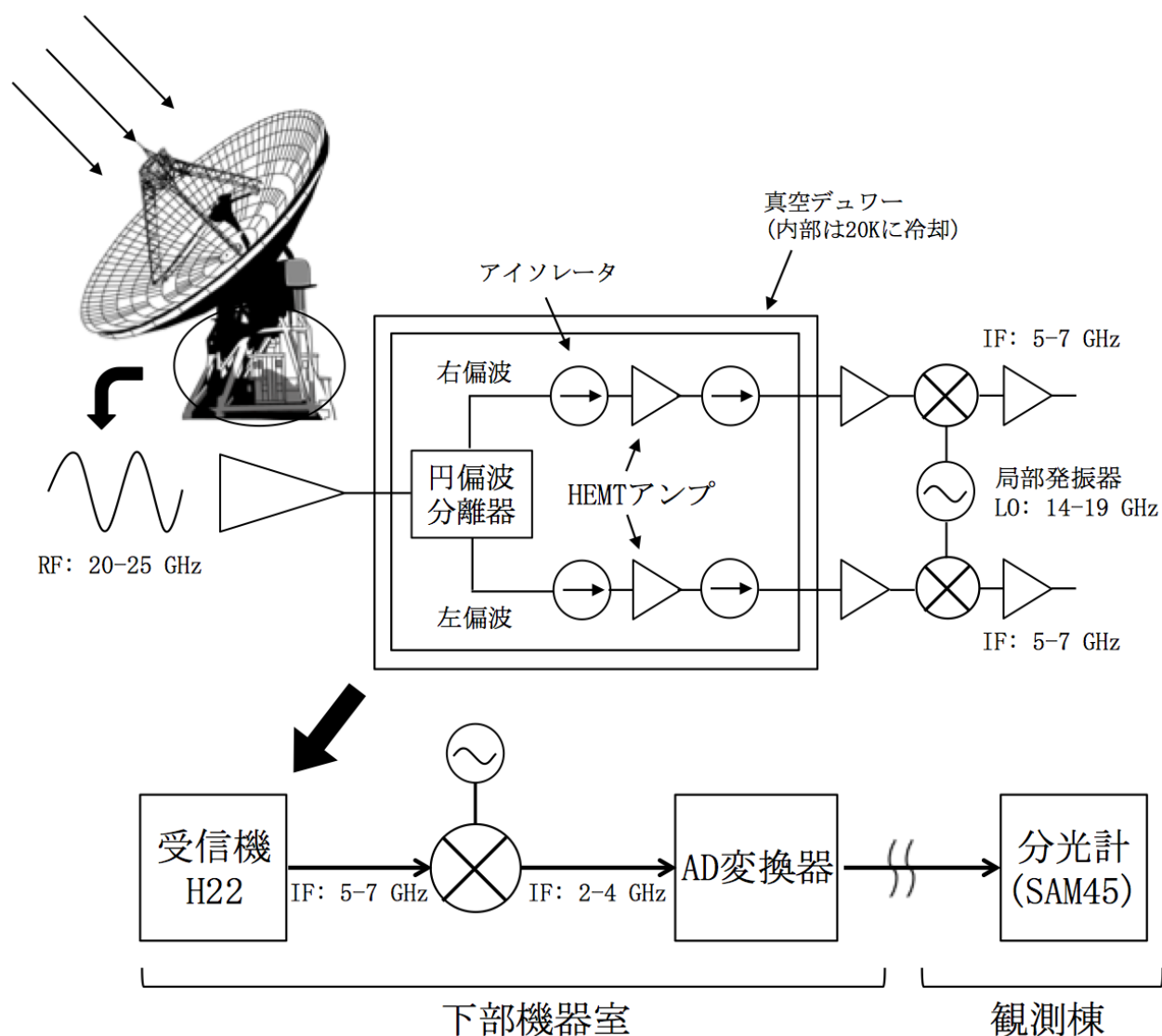
① 受信した電波 (Radio Frequency, *RF*)を直接増幅するもの

② はじめに、非線形回路 (ミクサ*)を用いて取り扱いのし易いより低い周波数; 中間周波数 (Intermediate Frequency, *IF*)に変換したのち増幅するものがある。

②の方式では、はじめに周波数変換する場合、ミクサ変換損のため受信した電波エネルギーの多くの部分を失ってしまうので、①の方式のように直接増幅するのが望ましく、実際 45m 鏡でも 40 GHz 以下では *RF* を直接増幅するタイプの受信機 (HEMT 受信機*)が用いられる。しかし、*RF* が 40 GHz 以上では周波数が高く、直接増幅できる低雑音のアンプを作るのはとても難しいので、極低温 (約 4 K)に冷却した SIS ミクサ*などで極力変換損失を少なくしたミクサを用いて周波数変換を行う受信機 (SIS 受信機*)などを主に使用している。

下に 20 GHz 帯の HEMT 受信機である H22 の信号の流れを示す。

アンテナから来た RF 信号はホーンを通して、HEMT アンプを冷却するための 20 K に冷却されたデュワー内に導かれる。デュワー内では、まず RF 信号を 2 つの偏波成分に分離させる。その後、反射による定在波 (スタンディング)* 防止のためにアイソレータを通り、HEMT アンプで増幅し、デュワー外 (常温) へ出ていく。デュワーの外でミクサを用いて、局部発振信号 (Local Oscillator, LO) と混ぜることで低周波の IF 信号 (5 - 7 GHz) に周波数変換される。その後、デジタル分光計で処理するために、アナログ信号をデジタル信号へ変換する AD 変換器 (ADC) へ進む。この時、ADC が処理可能な周波数 (2 - 4 GHz) へ周波数変換する必要がある。デジタル化された信号は観測棟に伝送され分光計へと進んでいく。



II-2 分光計

天体からのスペクトルを得るためには、電磁波を周波数によって細かく分割し、周波数ごとの強度 (パワースペクトル) を測定しなければならない。電磁波を分光する方法として、可視光の観測では回折格子やスリットが用いられている。電波観測の場合は、フィルターバンク型分光計、自己相関型分光計、音響光学型分光計などが用いられている。ここでは、自己相関型分光計の一形式である、FX 型デジタル電波分光計について解説する。

45m 鏡では、SAM45 (Spectral Analysis Machine for the 45-m telescope) と呼ばれる FX 型デジタル電波分光計が使われている。これまでの 45m 鏡では、音響光学型スペクトル分析器 AOS (Acousto-Optical Spectrometer) というアナログ分光計を中心に利用してきた。しかし、この分光計は性能の個体差が出やすい上に運用時の調整が必要であったため、現在の野辺山の主力受信機である受信機 FOREST のような、多くの分光計アレイを必要とする広帯域マルチビーム受信機には適さなくなった。一方、デジタル電波分光計は、性能のばらつきが殆どなく、観測時の調整も自動化が容易なため、そのような最新の受信機に対応が可能である。

デジタル電波分光計では、先に述べたような低い周波数 (中間周波数) へと変換された天体の信号を、まず ADC でサンプリングすることで、時系列デジタルデータへと変換する。FX 型では、この時系列データにフーリエ変換を施し、その結果から各周波数のパワーを取り出すことでスペクトルを得る (Wiener-Khintchine の公式の利用が分光原理)。デジタル電波分光計には FX 型の他に XF 型があり、こちらは時系列デジタルデータの自己相関処理を行った後にフーリエ変換をすることで同様にスペクトルを得る。数年前まで 45m 鏡で用いられていた AC45 というデジタル電波分光計はこちらのタイプだった。

SAM45 (下写真) はアタカマ大型ミリ波サブミリ波電波干渉計 (ALMA) に用いられている ACA 相関器と同様のもの (規模は小型) である。分光器一個当たりのバンド幅は最大約 2 GHz である。このような分光器が 16 台あり、合計で最大約 32 GHz の幅の電波を周波数方向に分析し、スペクトルを得ることができる。SAM45 の分光点数は 4096 であるため、この時のスペクトルの周波数分解能は約 488 kHz となるが、SAM45 は分光器一個あたりのバンド幅を 8 段階、即時に変更することが可能であり、最大の周波数分解能は約 3.8 kHz である。このようなフレキシビリティの高さもデジタル電波分光計の特徴である。



← 16 アレイ分のデジタル電波分光計 SAM45 が収納されたラック。分光のための相関処理は非常に大きな計算量になるため、計算機の発熱量も大きなものとなる。そのため、SAM45 が設置されている部屋の温度は空調によって常に管理されており、更にオーバーヒート回避のために常に送風をされている。

III 天体の追尾

天体追尾 (トラッキング)の精度は 45m 鏡での観測の場合、観測周波数を考慮すると、約 1 秒角が求められる。この精度で追尾するには以下の様な修正を行わなければならない。

III-1 位置の追尾

☆器差

アンテナの機器固有の誤差を予め測定し、それらをデータファイルとして蓄積している。これを器差ファイルと呼んでいる。観測システムはこれを読み、その瞬間のアンテナの向きに応じた指向修正を行う。

(4 ページ, 3. 天体追尾 参照)

☆地球回転

地球回転 (自転)速度の変化を予測したデータを用いて、天体位置計算の誤差情報をファイルにして蓄積している。これをタイムファイルと呼んでいる。観測システムはこれを読んで、その時のアンテナの向きに応じた指向修正を行う。

具体的には以下の 2 つのパラメータを与えている。

- ・ UTC – TAI
- ・ UT1 – UTC (予測)の値

UTC: 協定世界時 (原子時に基づきながら、地球回転に基づく世界時 UT1 との時刻差が一定範囲内に収まるように管理された人工時系→現在は UT1 – UTC が±0.9 秒を超えないように管理されている。超えそうになると閏秒を挿入する)

TAI: 国際原子時 (原子時計の刻む時刻 1958/1/1 00:00:00 を原点)

UT1: 世界時 (地球回転に基づく場所によらない一義的な世界時)

☆気象

高度角の補正に及ぼす気象の影響は高周波電波観測では無視する事ができない。

大気の屈折率を n とすると修正屈折率 N は

$$N = (n - 1) \cdot 10^6$$

で表されるが、B. R. Been (Proc. IRE Vol.50, 1962)の研究によると、マイクロ波の場合、 N は気圧、気温と湿度 (水蒸 P_w 気圧に換算してある)の関数として以下の様に求められる。

天頂角 $z (= 90^\circ - E_l)$ での高度角の補正量 ΔE_l は

$$\Delta E_l = N \cdot 10^{-6} (1 - 0.0011 \cdot \tan^2 z) \cdot \tan z$$

となる。

ここで

$$N = \frac{77.6}{T} P + \frac{3.73 \times 10^5}{T^2} P_w$$

T : 気温の絶対温度($t + 273.15^\circ$)

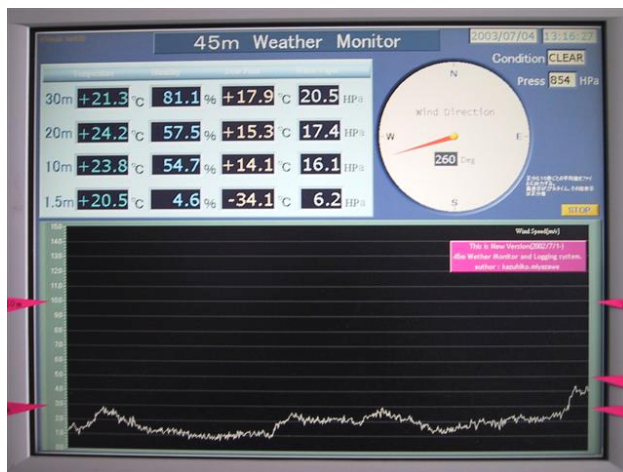
P : 気圧(hPa)

P_w : 水蒸気圧(hPa)

となる。

野辺山の気象観測から計算した高度角の補正量は、高度角 15° の場合およそ $200''$ である。45m鏡で 23 GHz の観測を行う場合、その視野 (HPBW: Half Power Beam Width) は約 $75''$ であるので、リアルタイムでアンテナの駆動に対して補正しないと、望遠鏡の視野内に天体を導入できず、ポインティング観測を行う事ができない。

45 m 気象観測システムは観測棟に隣接された気象タワーに設置したセンサーからのデータを取り込み、ファイルとして随時蓄積している。観測システムはこれを読んで、その気象状況から修正値を計算して指向修正を行っている。



観測室内に設置された気象データ収録装置
(右)と計算機によるデータ取り込み画面(上)

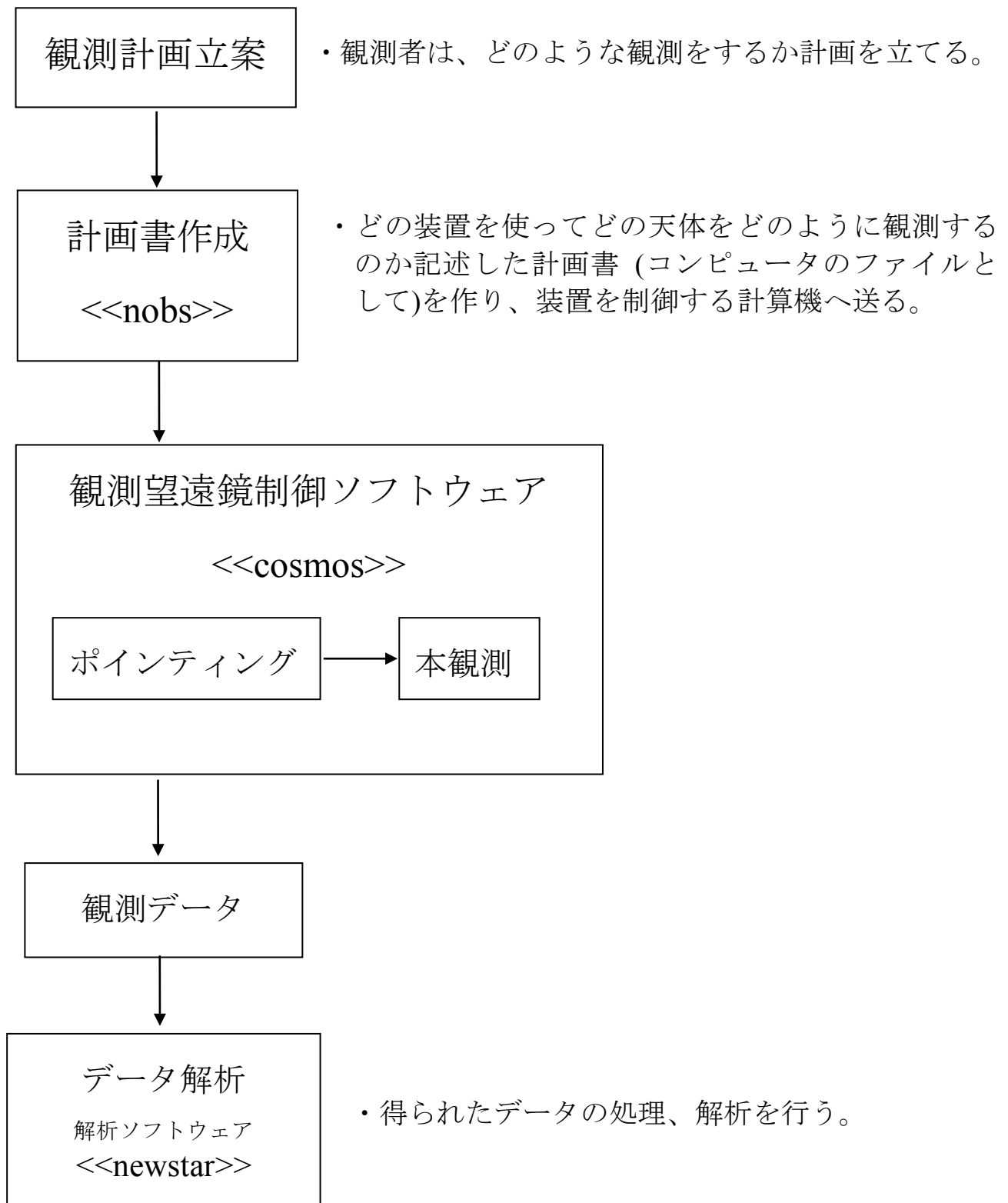


III-2 周波数の追尾

観測システムは観測天体に対する 45 m 望遠鏡の視線速度 (地球の自転・公転などを考慮)を計算し、更にその速度による受信周波数の変化 (ドップラーシフト)を計算し、常に目的の周波数で観測が続けられるように周波数追尾 (周波数トラッキング)を行っている。 → 17 ページ参照

IV 観測・解析

IV-1 観測の流れ



IV-2 観測計画書作成

ここでは観測計画書の作り方を簡単に説明する。詳しくは観測所のホームページ (<http://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/html/obs/nobs/index.html>)を参照。

観測計画書として Source Table (観測天体の情報)、Reference Table (OFF 点の情報)、Scan Table (アンテナの動きを設定)、Device Table (観測装置の設定)の 4 つのコンピュータファイル (Table)を用意する。

基本操作

- * メニュー上のボタンを押すときはカーソルをボタンの位置にもってきて、マウスの左ボタンを押す。
- * 各ウインドウの “**Choose**” ボタンを押すと、それぞれのウインドウで作ったファイルがある場合に、その一覧が表示され好きなファイルを選ぶことができる。ファイルを選び “**Open**” ボタンを押すと、そのファイルに保存されたパラメータが表示される。
- * 各ウインドウの table 名欄に存在する table 名を書いて “**Load**” ボタンを押すと、そのファイルに保存されたパラメータが表示される。

(1) 観測テーブル作成のソフトを起動する

- ・ 各 PC で端末を起動する
- ・ 各グループ ID でワークステーション (ut12x1)にログインする
\$ ssh -X group@ut12x1
\$ ssh -Y group@ut12x1 (Mac の場合)
- ・ ログインした端末上で “**nobs**” とタイプする
\$ nobs
- * 各班のグループ ID やプロジェクトについては当日配布。ここでは、それぞれ group, project と表記

(2) 観測する天体を設定 (Source Table) & OFF 点を設定 (Reference Table)

観測したい天体に関する情報 (位置、速度)を一つのファイルにする。

- ・ ウィンドウ上部の “**Source**” タブを押し、以下の項目へ情報を入力する。

Source Table: 保存するときのファイル名 (16 文字以下)

Source Name: 観測する天体の名前 (15 文字以下)

Velocity: 観測する天体の速度

Velocity Definition: 与えた速度の定義系

Velocity Frame: 与えた速度の基準点

天体の運動によるドップラーシフトの補正を行うため、天体の視線方向の速度を与えなければならない。速度といっても実は光学観測と電波観測で定義が異なる。我々から遠ざかる天体から出された周波数 ν_0 の電波または光を観測したとき、ドップラー効果によって周波数 ν になったとすると、電波の場合 $\nu = \nu_0 (1 - V_{\text{rad}} / c)$ で速度 V_{rad} が定義される。

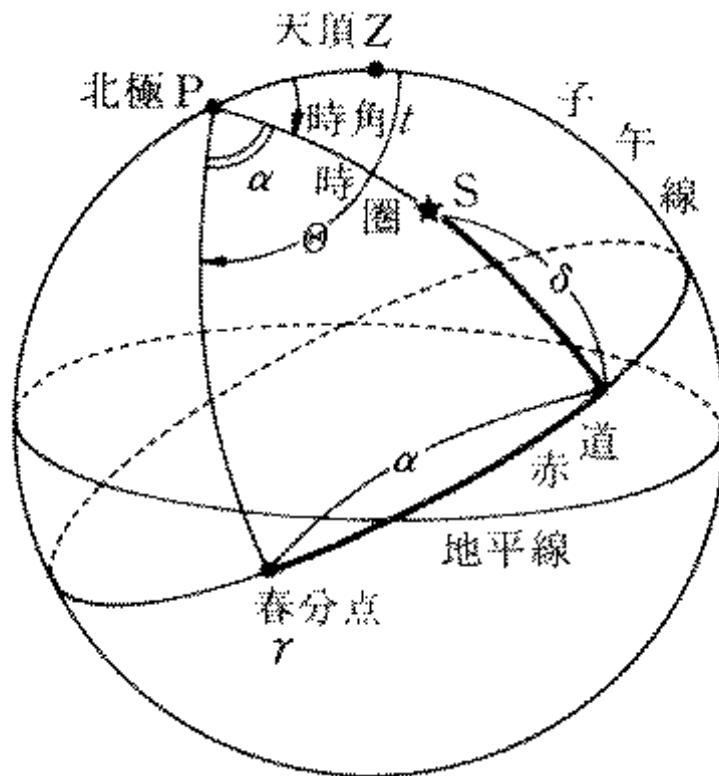
一方、光では $\nu = \nu_0 / (1 + V_{\text{op}} / c)$ で定義される。 c は光速度である。また、何に対する速度かということもはっきりさせておかなければならない。必要となるのは我々に対する速度だが、それは地球の運動によって時間変化してしまうので、太陽に対して (Heliocentric)か、あるいは太陽近傍の恒星の平均速度が 0 になるように定義された局所静止系 (LSR)に対する速度が使われる。計算機は与えられた速度に地球の運動の補正を加え、我々に対する速度に直す。

Coordinate System: 座標系の指定

Right Ascension / Galactic Longitude: 天体の赤経 (銀経)、

Declination / Galactic Latitude: 天体の赤緯 (銀緯)

天体の位置も、どの座標系を用いるかを示す必要がある。天球の北極と天体を結んだ大円 (時圏) と天球の赤道との交点を春分点から天の赤道に沿って東向きに測った角度が赤経 (α) で、天体の時圏に沿った赤道からの角度が赤緯 (δ) である (北が+、南が-)。春分点は地球の歳差運動によって移動するので、天体の座標もいつの時点でのものかを明らかにする必要がある。また、赤道と春分点の代わりに銀河面と銀河中心と考えられる射手座の電波源 Sgr A を基準にしたのが銀経、銀緯である。



- ・すべての設定が終わったら、“Save” ボタンを押す。

OFF 点の情報は Reference Table に記述する。

- ・ウインドウ上部の“Reference” タブを押し、以下の項目へ情報を入力する。

Position Type: 絶対座標か相対座標かの指定

Coordinate System: 座標系の指定

Coordinates: OFF 点の座標

OFF 点是天体からの信号がなく、空からの電波だけが受けられる領域にとる。ただし、あまり ON 点から離れていると大気のムラの影響を受けるので、できるだけ近くにとる。

(3) アンテナの動きを設定 (Scan Table)

45 m 鏡のような単一望遠鏡は、一つの受信機では天体上の一点しか観測できない。そのため、天体の電波強度分布を調べるためアンテナの向きを変えて天体上の何点か (ON 点) を観測する。また、観測中には大気成分を差し引くために、天体のない空 (OFF 点) の電波強度を測ったり、天体からの電波の強度を較正するために基準となる黒体からの電波強度を測ったりする (キャリブレーション)。それらをどのような順序で行うかを決めておく。

- ・ ウィンドウ上部の “Scan” タブを押し、以下の設定をする。

Scan Table: 保存するときのファイル名 (16 文字以下)

Scan pattern: アンテナの動かし方のパターンを選択

アンテナの動かし方にはいくつかのパターンがあり、目的に応じて選ぶ。

- (1) **Single Point:** “Source Table” で指定した天体の位置を観測
- (2) **On-On:** 今回の実習で使う受信機では使用不可
- (3) **OTF:** アンテナを動かしながら連続的にスキャンを行う
- (4) **Cross Point:** 天体の中心に対し、方位角、仰角または赤経赤緯方向に等間隔で十字に観測 (後述のアンテナ位置補正観測で用いる)
- (5) **Multi Point:** 天体上の任意の複数点を観測

以下、ここでは “Single Point” についての説明を行う。それ以外のものについては、上記 URL を参照。

Integration Time: 1 点あたりの積分時間

1 点あたりの積分時間は任意に決められるが、あまり長い時間積分していると大気の状態が変わってしまい、大気の差し引きがうまくいかなくなる。逆にあまり短いとアンテナの移動時間が増えて天体を見ている時間が短くなり効率が悪くなる。一般的には 1 点あたり 20 秒程度にする。ただし、ポインティング観測の場合はできるだけ早く終わらせたほうが本観測の時間が増えるので、信号雑音比が許す限り積分時間は短くする。

Sequence Pattern: 1 シークエンスのパターン。OFF 点の ID を指定できる

Number of Sequences: 上で指定した Sequence Pattern の繰り返し回数

観測する周波数によってどれ位の頻度でポインティングを行うかが異なる。100 GHz 帯のような高周波では、1 時間から 1 時間半位ごとにポインティングを行うので、1 回の観測時間がその程度になるように 1 点あたりの積分時間と点数から繰り返す回数を決めている。ポインティングについては、何回で終了するかは観測条件にもよるので、100 回程度にしておき、ポインティングが決定した時点で強制的に終了させる。

Calibration Mode: 電波強度を較正するのにどの較正装置を使うか

45m 鏡はいくつかの較正装置をもっており、使う受信機によってどれを使うか決まっている。今回の実習では R-SKY を選択する。

Integration time: キャリブレーションの積分時間

キャリブレーションでの積分時間についても任意に決めることができる。通常、観測点の積分時間と同じにする。

Calibration Interval: キャリブレーションを行う間隔を指定 (シーケンス単位)

キャリブレーションでは、大気吸収の補正も行う。したがって、天体を見ているときとキャリブレーション時で大気が変わってしまうと正しい補正ができない。特に天気が悪く大気の変動が大きい場合は頻繁に行う必要がある。一般的には 10 - 20 分程度の間隔で行う。1 点あたりの積分時間と観測点数から 1 回の “**Sequence Pattern**” に要する時間を見積り、“**Calibration Interval**” を決める。

- ・すべての設定が終わったら、“**Save**” ボタンを押す。

(4) 観測装置の設定 (Device Table) (この部分は特に複雑なため、概要の理解のみで十分である)

- ・ウインドウ上部の“**Device**” タブを押し、以下の項目を設定する。基本的には“**Samples**”から使用する受信機や分光計に合わせてテーブルを選択し、必要な部分を編集する。

Device Table: 保存するときのファイル名 (16 文字以下)

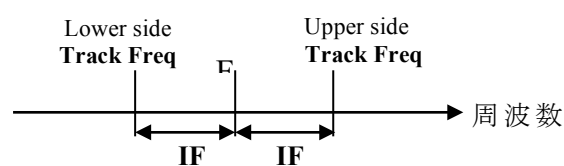
- ・“**Frontend**”タブで受信機の設定を行う。

Tracking freq.: トラッキング周波数

天体からの電波は周波数の少しずれた局部発振信号と混合 (ミキシング)され、扱いやすい低い周波数 (天体からの電波の周波数とローカル信号の周波数の差)へ変換される (ヘテロダイン方式)。静止系で測ったある周波数 (トラッキング周波数)に天体の運動、地球の運動を補正し、それに対する差が以下で指定する“**IF freq.**”となるように計算された周波数の信号がローカル信号として送られる。

IF freq.: 第 1 中間周波数の設定

天体からの信号はミクサでミキシングされて第 1 ローカル周波数との差である第 1 中間周波数に変換される。“**IF freq.**”はトラッキング周波数をどの周波数へ変換するかを指定する。ただし、一つのローカル周波数に対して低周波側と高周波側に同じ中間周波数となる周波数が存在するので、“**IF**”でどちら側に天体からの信号を入れるのかを指定する。



Frontend: どの FE /IF 系からの信号をどの分光計に接続するかを指定

Att.: 減衰量 (アッテネーション)

分光計に入る信号は、天体 (空)を見たときに適正なレベルになるように調整される。キャリブレーションの黒体からの電波は天体 (空)からの電波に比べ非常に強いため、キャリブレーション時には減衰器を使い適正レベルまで減衰させてから分光計へ送る。そのときの減衰量 (dB)を設定する。チューニング時にキャリブレーションの黒体と空のレベルを交互に見るので、その差程度にする。

- ・ “**Backend**” タブで分光計の設定を行う。

Rest Freq.: 観測する中心周波数

分光器の中心をどの周波数に合わせるかを記入する。

Resolution (kHz): SAM45 の周波数分解能

SAM45 の周波数分解能を 8 段階の中から選択する。必要な周波数分解能 $\Delta\nu$ は、上記のドップラーシフトの式である $\nu = \nu_0 (1 - V_{\text{rad}} / c)$ と、得たい速度分解能 ΔV から、 $\Delta\nu = \Delta V (\nu_0 / c)$ として求めることが出来る。各分光計のバンド幅は、この値を 4096 倍したものになる。

- ・ すべての設定が終わったら、“**Check**” ボタンを押し、間違いがないかチェックする。
- ・ 何もエラーが出なければ “**Save**” ボタンを押す。

(5) 観測テーブルの作成

ここまでにつくった 4 つのファイル (Source Table, Reference Table, Scan Table, Device Table)を組み合わせて、1 つの名前のファイルにまとめた観測計画書 (Observation Table)を作る。観測計画書には天体の情報、アンテナの動き、観測装置の設定が含まれ、計算機がそれを使って全体のシステムを制御する。

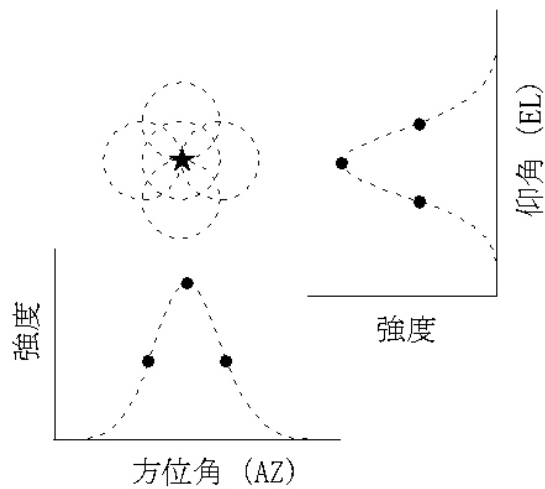
- ・ ウィンドウ上部の “**Project**” タブを押す。
- ・ “**Obstable**” に観測テーブルとして保存するときの名前 (7 文字以下)を入力
- ・ “**Generate and Send**” ボタンを押し、観測テーブルをアンテナ制御用のワークステーションに送る。

(6) 終了

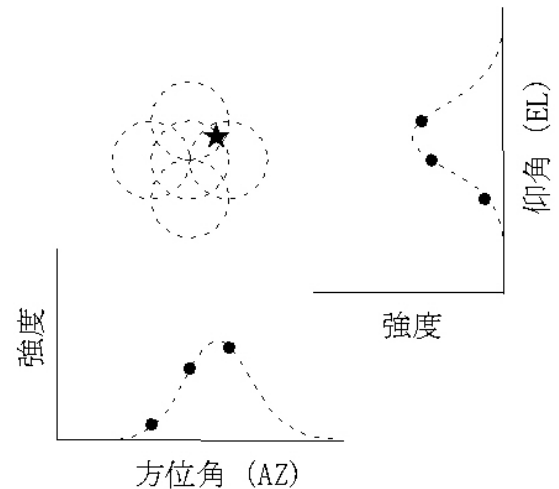
- ・ 以上の作成が終了したら、ウィンドウ下部の “**Quit**” でウィンドウを閉じる。

IV-3 位置補正 (ポインティング)

観測前には必ずアンテナの指向性のチェックを行う。電波望遠鏡の場合、良く使われるのが 5 点法と呼ばれる方法である。この方法では、位置が精度良く求められている点状電波源 (晩期型星など) にアンテナを向け、方位角および仰角方向にビームサイズのおよそ半分の間隔で 3 点の強度を測定し、その結果をガウス関数でフィッティングしてピーク位置 (方位角、仰角) を求める。アンテナが正しい方向を向いていれば、中心にピークが来るはずである。ポインティングがずれている場合、測定で得られたズレの分だけアンテナ位置の補正を加え、ピークが中心に来るように修正する。



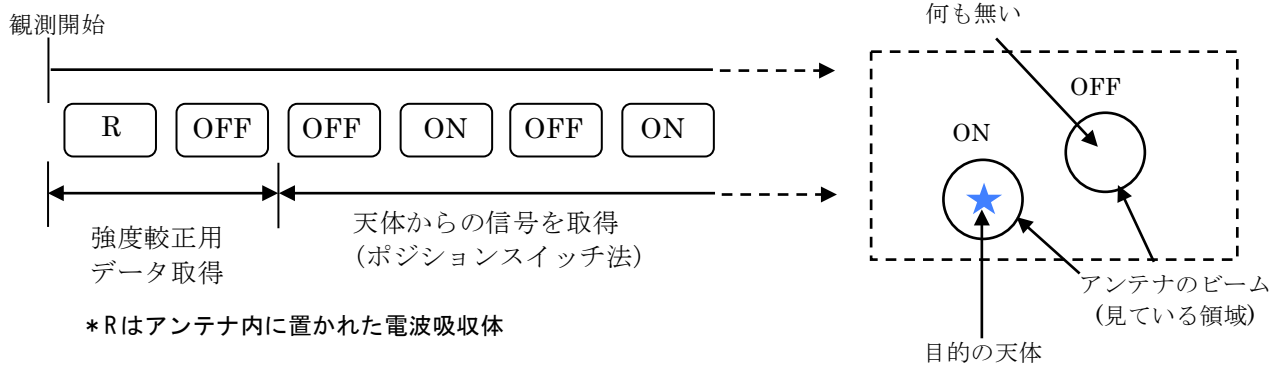
ポインティングが合っている時



ポインティングがずれると…

IV-4 強度較正 (キャリブレーション)

天体の追尾 (望遠鏡の動き)



強度較正

1) 電波強度のスケール

温度 T の黒体からの電波強度はプランクの放射の式から

$$I_\nu(T) d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu \quad [\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}]$$

ここで $h\nu \ll kT$ とすると

$$I_\nu(T) \approx \frac{2kT}{c^2} \nu^2 \propto T$$

電波の強度は温度に比例するので、対応する黒体の温度で表せる

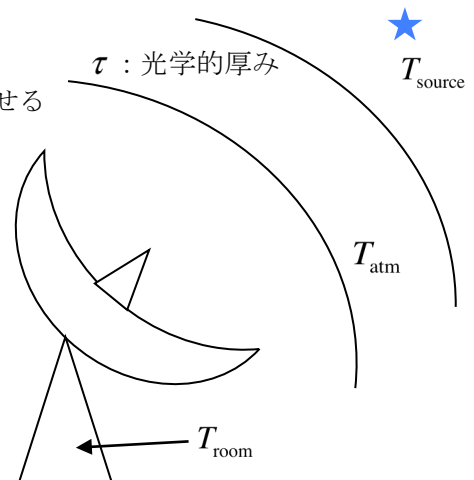
2) 大気の吸収の補正

アンテナを天体に向けた時のアンテナ温度 T_A は

$$T_A = T_{\text{source}} e^{-\tau} + T_{\text{atm}} (1 - e^{-\tau})$$

* 大気の τ が判らないと T_{source} がわからない

chopper wheel 法



$$W_{\text{on}} = G(T_{\text{source}} e^{-\tau} + T_{\text{atm}} (1 - e^{-\tau})) \quad \text{: 天体に向けた時の出力 (ON)}$$

$$W_{\text{off}} = GT_{\text{atm}} (1 - e^{-\tau}) \quad \text{: 空に向けた時の出力 (OFF, SKY)}$$

$$W_R = GT_{\text{room}} \quad \text{: 電波吸収体 (黒体)に向けた時の出力 (R)}$$

$$\frac{W_{\text{on}} - W_{\text{off}}}{W_R - W_{\text{off}}} = \frac{T_{\text{source}} e^{-\tau}}{T_{\text{room}} - T_{\text{atm}} (1 - e^{-\tau})} \quad G: \text{定数}$$

ここで $T_{\text{atm}} = T_{\text{room}}$ を仮定

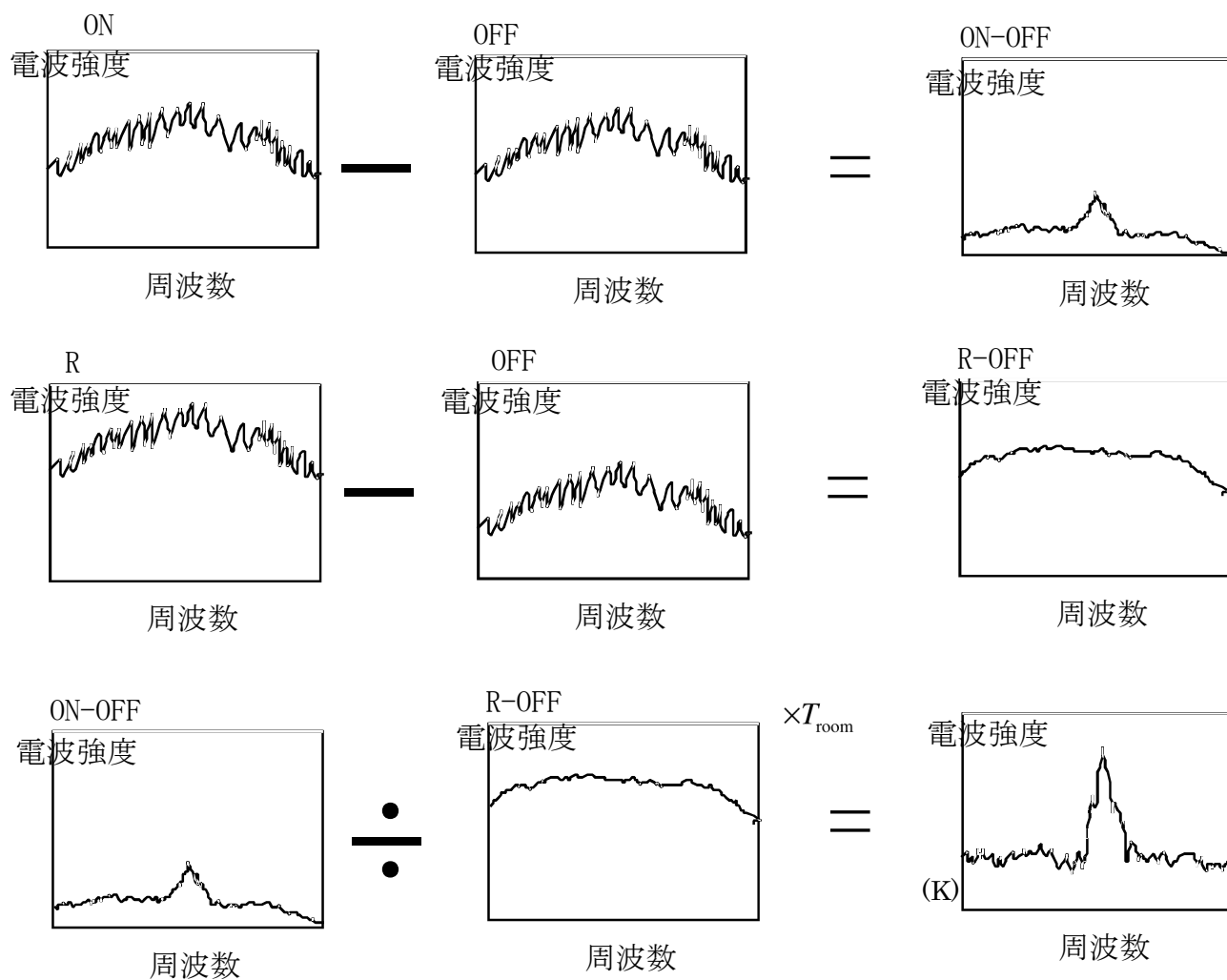
$$= \frac{T_{\text{source}}}{T_{\text{room}}}$$

よって、

$$T_{\text{source}} = \frac{W_{\text{on}} - W_{\text{off}}}{W_R - W_{\text{off}}} \times T_{\text{room}}$$

大気の τ がわからなくても T_{source} を求めることができる!

前ページの説明をスペクトルの図で示すと下のようになる。



V データ処理

観測データから天体の真のスペクトルを得るためには、データ処理をしなければならない。45m 鏡で取られたスペクトル・データの処理には、専用のアプリケーション・ソフト“**NEWSTAR**”が用意されている。これは、アメリカ国立電波天文台が開発した“**AIPS**”をベースにしたものである。以下に、その使用法を説明する。なお、より詳しいオンライン・マニュアルが野辺山観測所のホームページに書かれている。

(<http://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/obs/newstar/>)

V-1 データ処理の概略

最初に、データ処理の流れを述べる。この実習では、ポジション・スイッチ法による観測をしているために、取得したデータは、ゼロ点、強度較正用の常温吸収体 (R) と sky、そして天体 (ON) と OFF 点のデータから構成されている。ただし、実際に **NEWSTAR** に送られてくるデータは、強度較正及び ON-OFF の引き算を済ませたものである。一つの観測ファイルには、積分した回数分だけスペクトル・データが含まれている。通常はこれらのデータを全て足し併せて (**INTEG**)、信号とノイズの比 (S/N) を上げる。しかし、観測中に機器の不安定性によるスプリアス (非常に強いノイズ) が入ってしまうことがあり、このような場合は、その「悪い」データを取り除く **FLAG** という操作を行う。積分 (**INTEG**) したデータのゼロ・レベル (ベースライン) は必ずしも、アンテナ温度で 0 K になっていないし、また、傾いていることもある。これを補正するための **BASELINE fit** を次に行う。ベースラインのフィッティングを終えたデータは、アンテナ温度スケールでの天体からの正しいスペクトルである。このスペクトルを表示 (**Show Spectra**) し強度やピークの速度などを求める。

V-2 NEWSTAR の扱い方

(1) 解析サーバー (vc06x1)へのログイン

\$ ssh -X group@vc06x1

(2) データのダウンロード

Web でダウンロードする方法とコマンドラインでダウンロードする方法がある

- Web でのダウンロード

\$ firefox

<http://obsgate.nro.nao.ac.jp/nrodb/SearchTop> へアクセス

group, password を入力

project, 観測日時などを入力し “**search**” を押す

リストから必要なデータをダウンロードする

- コマンドラインでのダウンロード

\$ nrodbDownloadOffline group project

リストから必要なデータをダウンロードする

(3) NEWSTAR の立ち上げ

① vc06x1 上で “newstar” または “jnewstar” を打って起動する

② “Welcome to NEWSTAR”という画面が表示される。ホームディレクトリを記入して “OK” を押す

(“OK” をクリックした後、画面に “can’t start NEWSTAR” と表示されることがある。これは、同じワークステーション上で、NEWSTAR を終了した直後に再立ち上げた場合などに起こる現象で、数分間待つしかない。)

(4) NEWSTAR のタスク

タスクは全て初期画面のボタンを押して指定する。この実習で用いるタスクは、

FLAG 不良データの削除

INTEG スペクトルの積分

BASELINE ベースラインのフィット

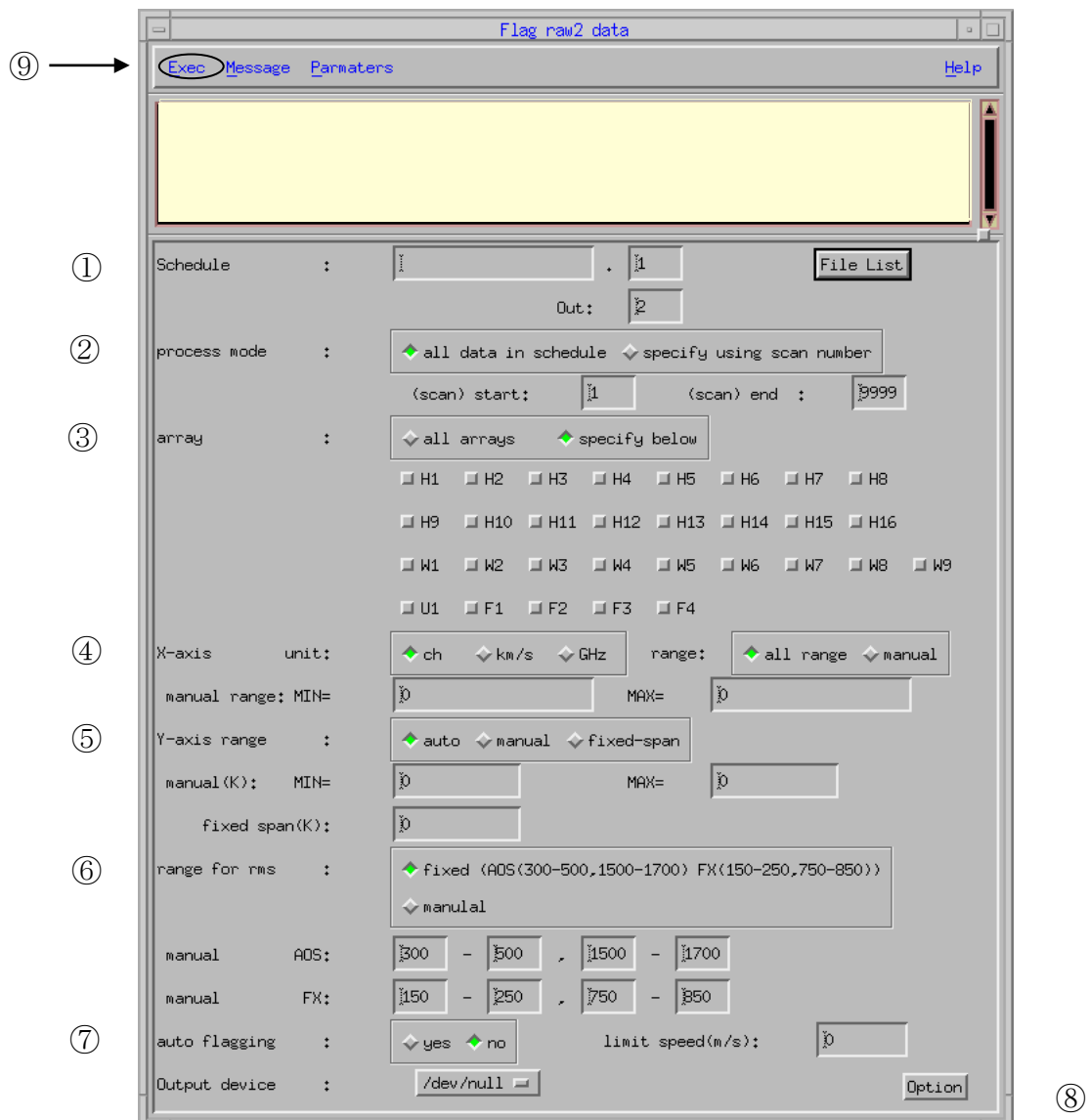
Show Spectra スペクトルの表示。積分強度や平均速度の計算もできる。

FILE SERVICE ファイルの消去等

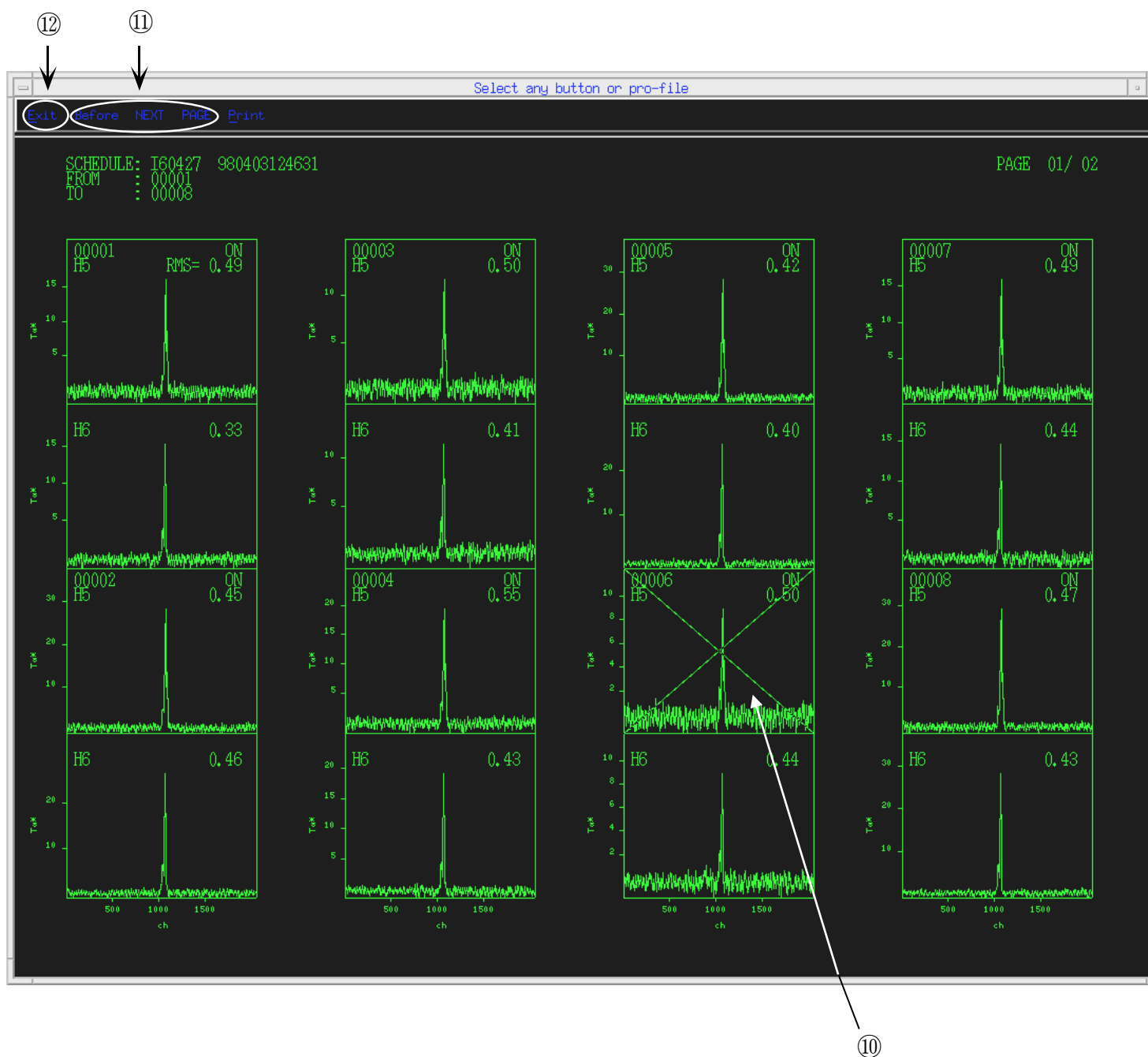
である。

(5) フラッグ (FLAG)

- ① ファイルの指定。出力ファイルは拡張子のみ指定。
- ② プロセス・モードの指定。観測ファイル中の全データをフラッグするか、start から end のスキャン番号で指定したスキャンのみフラッグするかを選択。
- ③ スキャンする array の選択。観測に使用した全 array のデータをフラッグの対象にするか、特定の array のデータを対象とするかを選ぶ。後者の場合、下欄で array を指定する。
- ④ 表示するスペクトルの横軸の単位、及び範囲の指定。特定範囲のみ表示する場合は、下欄で、最小値と最大値を指定する。
- ⑤ 表示するスペクトルの縦軸の範囲指定。④で指定した表示領域内のスペクトルが全て収まるように自動的に縦軸を調整して表示するモード、下欄で最小値と最大値を指定するモード、並びに表示幅を固定する (下欄で幅を指定)モードがある。
- ⑥ rms 雑音を計算する範囲の指定。
- ⑦ 観測時の風速による自動フラグging。
- ⑧ 中心周波数の参照元。通常はヘッダーの値を使用。
- ⑨ 実行。スペクトルが並んだ画面が現れる。

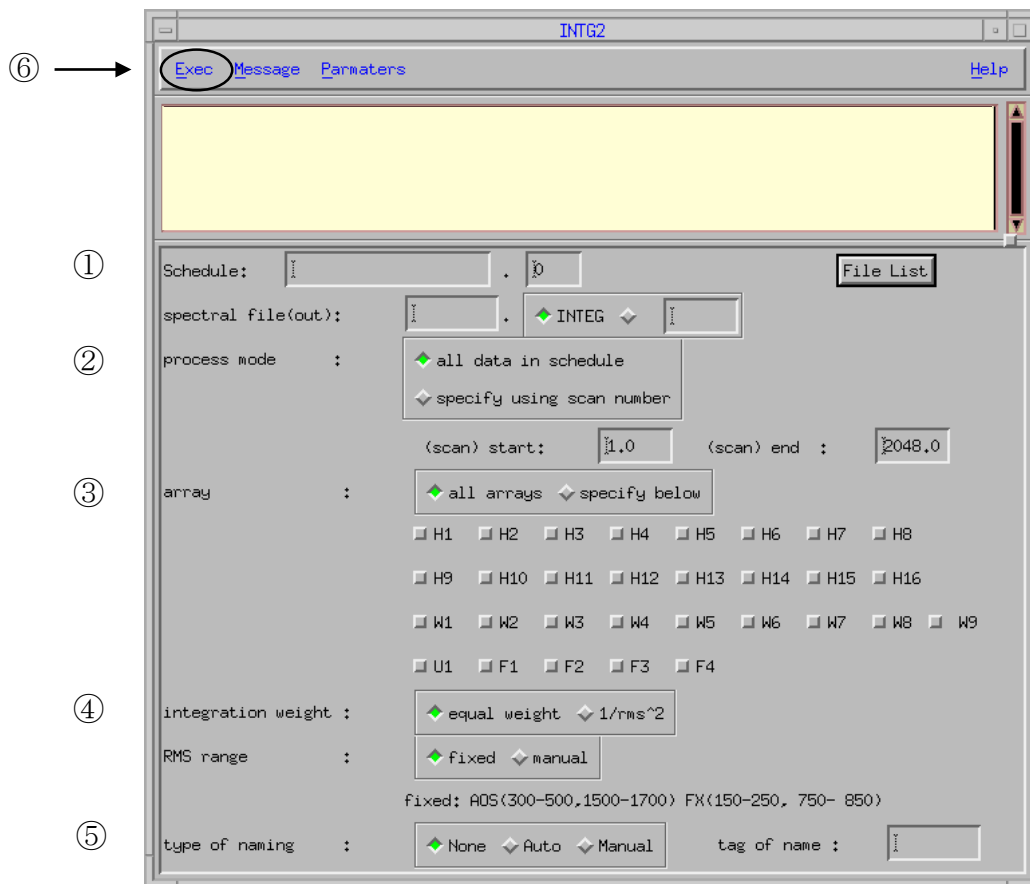


- ⑩ フラッグするスペクトルを選び、クリックする。すると、×印が付く。もう一度クリックすると×印は消える。
- ⑪ スペクトルが複数のページに渡って表示されている場合は、前後のページへの移動や、ページ番号を指定してジャンプすることができる。なお、ページ番号は右上に表示。
- ⑫ 実行。



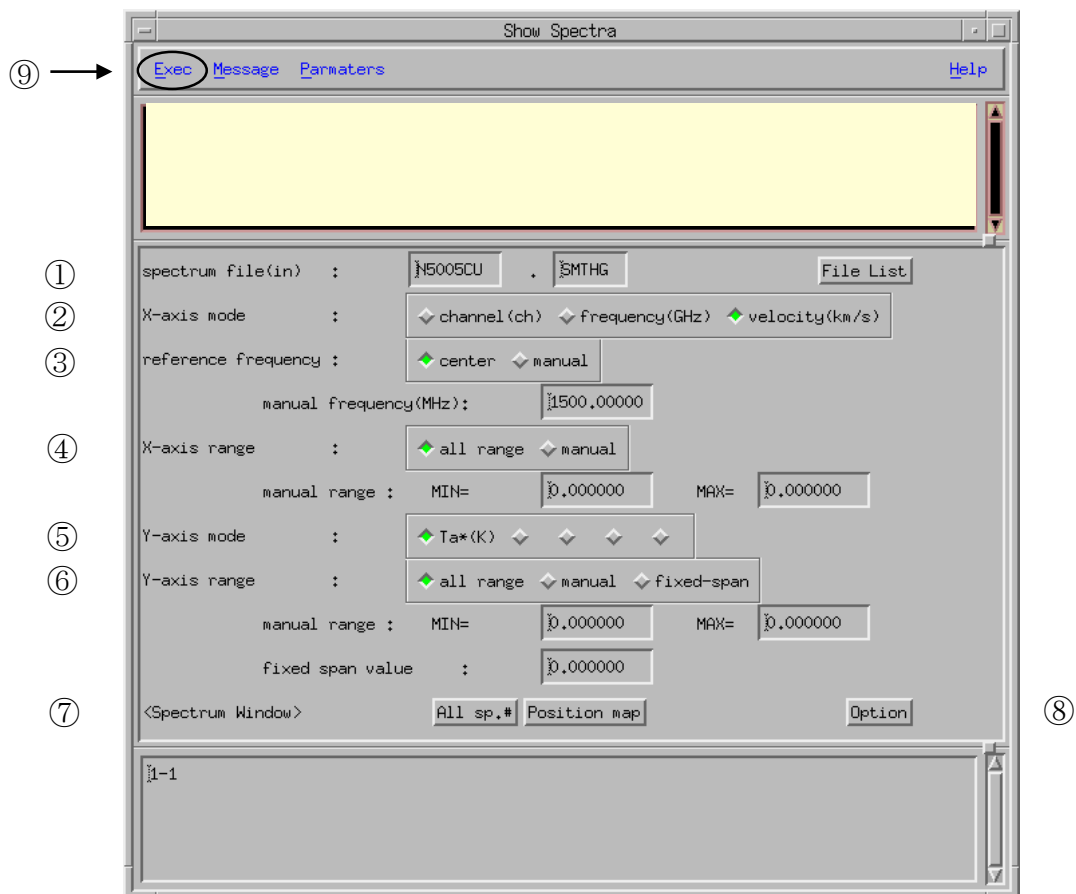
(6) 積分 (INTEG)

- ① 入力ファイル及び出力ファイル名の指定。
- ② 入力ファイルの全データを積分するか、start と end で指定したスキャンのみを積分するかを指定。
- ③ 積分する array の指定
- ④ 積分する際の各データの重み付け。どのデータも同じ重みで積分するか、rms 雑音の 2 乗に反比例した重み付けで積分するかを選ぶ。
- ⑤ 特に使用しない。
- ⑥ 実行。

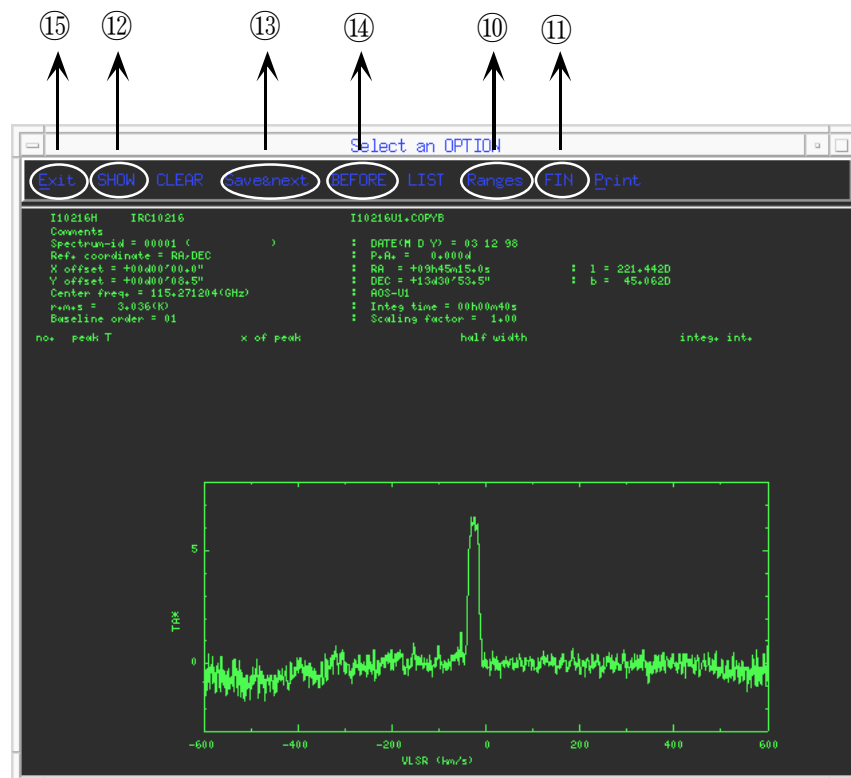


(7) スペクトルを見る (Show Spectra)

- ① ファイルの指定。
- ② 表示するスペクトルの横軸の単位の指定。
- ③ 速度表示させる場合の周波数計算に用いる基準周波数。通常はヘッダーの値を用いる。
- ④ 横軸の表示範囲の設定。
- ⑤ スペクトルの縦軸の単位の指定。
- ⑥ 縦軸の表示範囲の設定。
- ⑦ 表示するスペクトルの番号の指定。
- ⑧ スペクトルの画面上で指定した範囲の積分強度を求めるか平均速度を求めるかを選ぶ。
- ⑨ 実行。スペクトルの画面が現れる。



- ⑩ 積分強度あるいは平均速度の計算をする範囲の指定。指定が終わるとピーク位置と半幅と、積分強度あるいは平均速度が計算される。
- ⑪ 指定が終了したらここをクリック。
- ⑫ 再度表示し直す場合や表示範囲を変更する場合はここで指定。
- ⑬ 次のスペクトルを表示する。この際に、上記の計算量を保存することもできる。
- ⑭ 前のスペクトルに戻る。
- ⑮ スペクトル表示モードから抜ける。



(8) ベースライン・フィットする (BASELINE)

- ① 入力ファイル及び出力ファイルの指定。
- ② フィッティングに用いる関数の選択。多項式か三角関数が選べる。
- ③ 次数もしくは波数の指定。
- ④ 表示するスペクトルの横軸の単位の指定。
- ⑤ 静止周波数の基準。通常はヘッダーの値を用いる。
- ⑥ 表示するスペクトルの横軸の範囲の設定。
- ⑦ 縦軸の単位と表示範囲の設定。
- ⑧ ベースライン・フィットのモード。個々に行うか自動的に行うか選択する。
- ⑨ フィッティングに用いる横軸の範囲指定。
- ⑩ フィットするスペクトルの番号の指定。
- ⑪ 実行。スペクトルの画面が現れる。

なお、⑧で個々に行うモードを選択した場合、フィッティングに用いる関数の次数と波数、フィッティングに用いる範囲は、次のスペクトル画面でも指定できる

(最初はこちらの方がフィッティング結果を見ることができてお勧め)

⑪ →

Base Line Subtraction

Exec Message Parameters Help

① Spectrum file(in) : [] . INTEG [File List]

② Spectrum file(out) : [] Class ☒ BASE ☐ manual []

③ Function : ☒ polynomial ☐ sin&cos

③ Order/wave num.(1)-(5) : [1] [0] [0] [0] [0]

③ wave num.(6)-(10) : [0] [0] [0] [0] [0]

④ X-axis mode : ☒ channel(ch) ☐ frequency(GHz) ☐ velocity(km/s)

⑤ Rest Frequency : ☒ from header ☐ manual manual frequency: [0] (GHz)

⑥ X-axis range : ☒ all range ☐ manual

⑥ manual range : MIN= [0] MAX= [0]

⑦ Y-axis mode : ☒ Ta*(K) ☐ ☐ ☐ ☐

⑦ Y-axis range : ☒ auto ☐ manual ☐ fixed span

⑦ manual range : MIN= [0] MAX= [0]

⑦ fixed span value: [0]

⑧ Execution Mode : ☒ Interactive ☐ Background

⑨ fitting parts for background operations

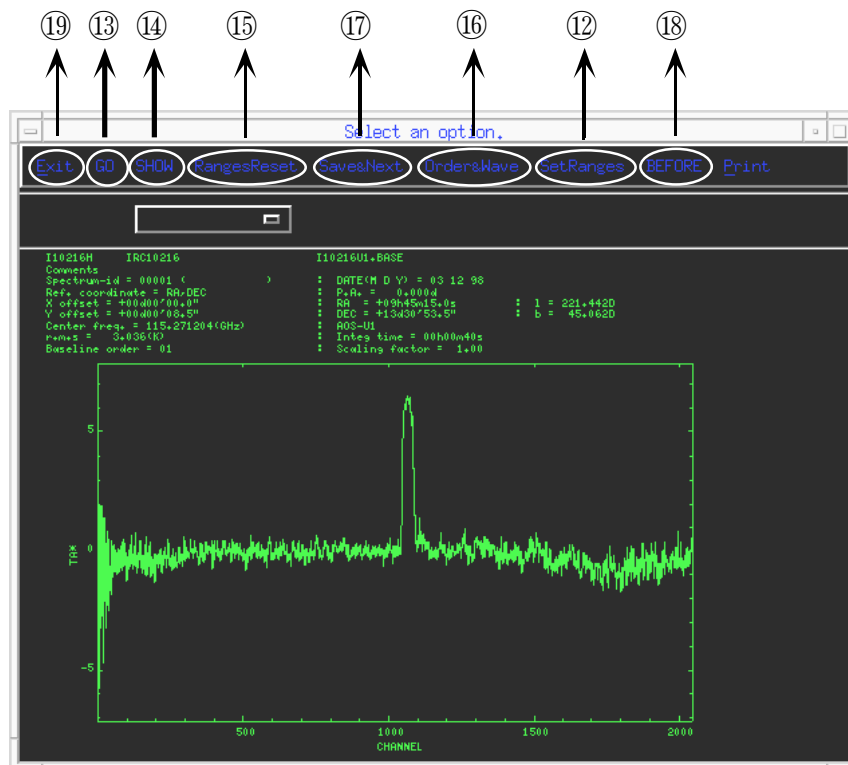
⑨ (1): [0] - [0] (2): [0] - [0]

⑨ (3): [0] - [0] (4): [0] - [0]

⑨ (5): [0] - [0] (6): [0] - [0]

⑩ <Spectrum Window> [All sp.#] [Position map]

- ⑫ ベースライン・フィッティングに用いる範囲の指定。
- ⑬ フィッティングの実行。
- ⑭ 結果の表示。フィッティング前のスペクトルを表示させることもできる。
- ⑮ フィッティングに用いる範囲の取消。
- ⑯ 多項式の次数、三角関数の波数の変更。
- ⑰ 次のスペクトルを表示。
- ⑱ 前のスペクトルに戻る。
- ⑲ ベースライン・フィットのモードから抜ける

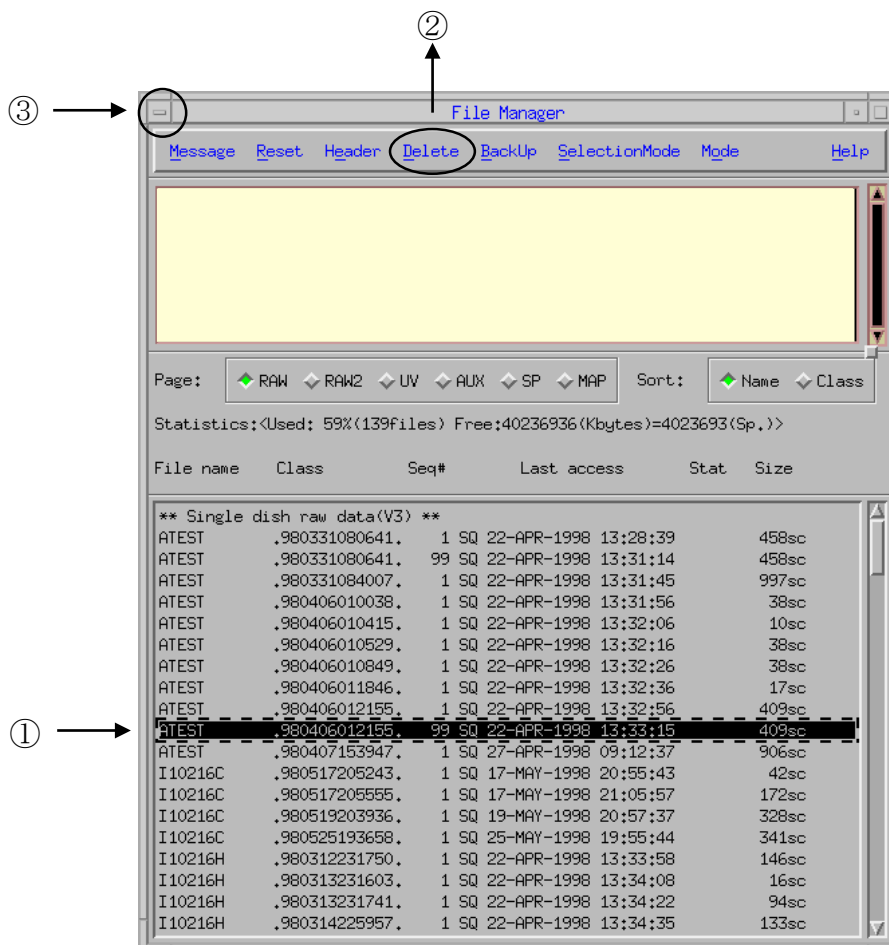


(9) ベースライン・フィットしたスペクトルを見る (Show Spectra)

- ① (7)と同様にスペクトルを表示する。
- ② ピーク・アンテナ温度、速度、及び積分強度、平均速度を求める。
- ③ 印刷する。

(10) 不要なファイルの消去 (FILE SERVICE)

- ① 消去するファイルを選ぶ。
- ② ファイルの消去。確認のメッセージ画面が現れるので、“OK” をクリック。
- ③ FILE SERVICE のタスクを抜けるためには、ウインドウを終了させる。



(11) NEWSTAR の終了

- ① メイン・メニューの“EXIT NEWSTAR”をクリック。確認のメッセージ画面が現れるので、“OK”をクリックする

VI 参考資料

VI-1 受信機

HEMT 受信機

電波望遠鏡を使って集光した信号 (RF 信号または単に RF と呼ぶこともある) を 20 K に冷却された HEMT (High-Electron-Mobility-Transistor) アンプを用いて直接増幅した後、取り扱い易い周波数に変換するタイプの受信機。

SIS 受信機

RF 信号を局部発振信号 (ローカル信号または単にローカル、LO と呼ぶこともある) と超伝導素子を使用した 4 K に冷却された SIS ミクサを用いて、扱い易い周波数に変換した後、増幅するタイプの受信機

ミキサ (ミクサ)

天体からの信号に、周波数の安定した電波をミックスすることでビート信号 (差の周波数) を発生させることにより信号の周波数を変換し、取り扱い易い周波数に変換するための装置。

SIS ミクサ

超伝導薄膜で絶縁層の薄膜を挟んだ構造をしているミクサ。

SIS とは “Superconductor-Insulator-Superconductor” の略。

野辺山宇宙電波観測所製作の SIS ミクサはニオブと酸化アルミニウム (Nb/Al-AlO_x/Nb) の薄膜で形成されている。

定在波 (スタンディング)

入射波と反射波との間で発生する定在波のことで、通常スタンディングが発生すると雑音レベルが高くなり観測に悪影響を与える。