

# 宇宙科学II (電波天文学) 第3回

## 電波望遠鏡と観測量

前回の復習

## 電磁波の特徴

- 電磁波は波と粒子(光子)の性質をもつ  
(electro-magnetic wave / photon)



電場、磁場の振動としての波



あるエネルギーをもった粒子(光子)

周波数 $\nu$ と波長 $\lambda$ の関係

$$c = \nu \times \lambda$$

光子のエネルギーと周波数の関係

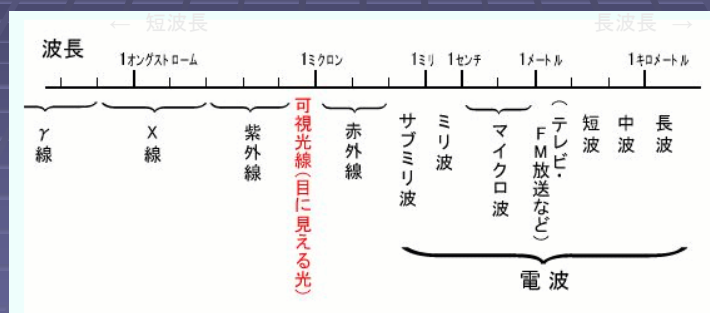
$$E = h \times \nu$$

温度と周波数の関係

$$T \sim h \nu / k$$

## 電磁波と電波

- 電波も光も、電磁波の一種  
ただし、波長(周波数)が大きく異なる



電波：周波数 1THz以下(波長0.3mm以上)の電磁波を指すことが多い

## 電波天文とつながりが深い 身近な電波技術

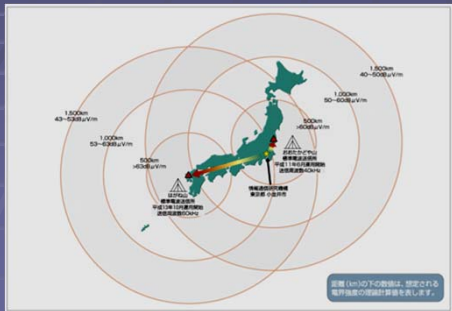
### 身近な電波

- 電波時計 40, 60 KHz
- AMラジオ 500 – 1600 KHz
- FMラジオ 70 – 100 MHz (VHF)
- アナログテレビ 100 – 200 MHz (VHF)
- 地デジ 470 – 770 MHz (UHF)
- 携帯電話 800 – 2000 MHz
- GPS衛星 1.2 – 1.5 GHz
- 衛星放送 12 GHz

c.f. 電波天文 100 MHz ~ 1 THz

## 電波時計

- 情報通信研究機構(NICT, 小金井市)が管理する日本標準時を電波に乗せて放送
- 電波時計はこれを受信して、正しい時刻にあわせる



送信所の位置(福島、佐賀)



おたかどや標準電波送信所(福島)

## レーダー

- レーダー: RAdio Detection And Ranging  
送信波の反射を捕らえることで、物体の存在および距離を求める。
- 距離は送信から反射波受信までの時間を使う



空港監視レーダー



## 衛星放送

- 静止衛星からの放送を配信
- 各地にテレビ局を設置する必要がない  
(離島でも受信可能)



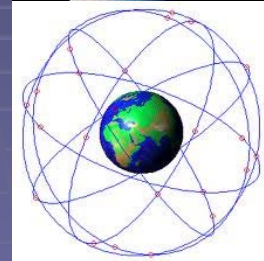
BS衛星



衛星放送受信システム  
(アンテナ、受信機 etc)

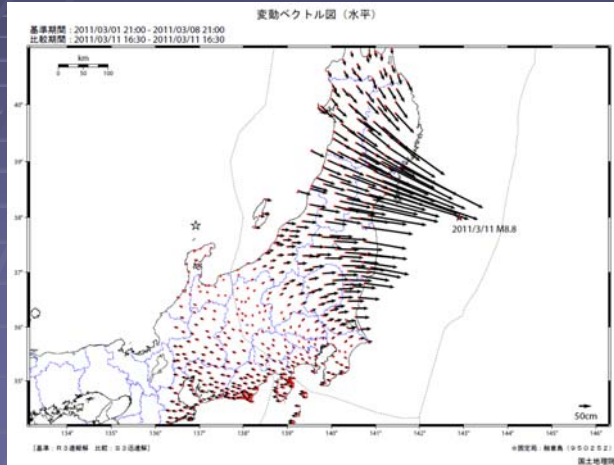
## GPS(Global Positioning System)

- 米国の軍事衛星システム。
- 地球上での位置を計測可能。
- ~30機の衛星で”GPS星座“を形成
- 測位の原理は次回以降  
(電波干渉計と同じ原理)
- もっとも身近な利用例:カーナビ



## 2011年3月11日の地震による地殻変動

- 国土地理院のGPSネットワークGEONETによる観測
- 1200点のGPS電子基準点で観測(2004年～)



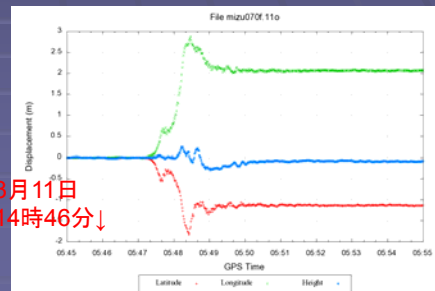
東北地方の太平洋沿岸を中心に最大5m程度東へ移動

## 国立天文台水沢のGPS

- 国立天文台水沢には国際GPS観測網の観測点が存在。
- 世界の研究者により、3月11日の地震による地殻変動の時間変化(!)が捉えられている。



水沢本館屋上のGPS受信機



## 電波望遠鏡で何が計れるか？

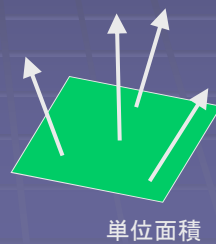


## 電波の強度

- フラックス(flux): 電波の強さを表す量

単位時間、単位周波数あたりに単位面積を  
通過する電磁波のエネルギー

単位例:  $W m^{-2} Hz^{-1}$



## 電波天文でよく使う単位

- ジャンスキー Jy (フラックス:fluxの単位)

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$



K. Jansky

実際の電波天体の強度は~数1000 Jyから1  $\mu\text{Jy}$ レベル

日常使用している電波に比べたらはるかにエネルギーが小さい

## 携帯電話はまぶしい？

- 携帯電話

出力  $P = 1 \text{ W}$ , 帯域幅  $B = 1 \text{ MHz}$

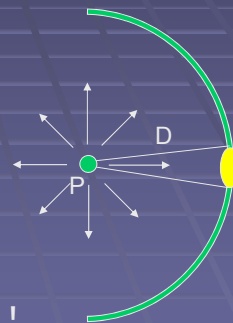
等方放射(どの方向にも等しく電波を出していること)を仮定

- 月においた携帯電話 ( $D=380000 \text{ km}$ )の場合

$$f = P / B / (4 \pi D^2)$$

$$\sim 5 \times 10^{-25} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

$$\sim 50 \text{ Jy}$$



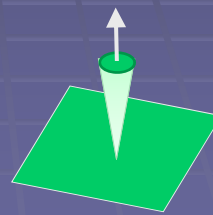
携帯電話は月においてもかなり明るい電波源に！  
地球上の携帯は桁違いに明るい電波源



## もうひとつの観測量：輝度

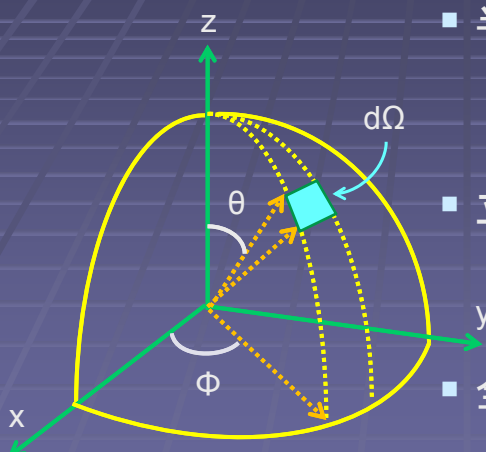
- 輝度(brightness):  
単位時間、単位周波数、単位立体角あたりに  
単位面積を通過する電磁波のエネルギー  
フラックスのうち、ある特定の方向(立体角)  
からきているものを表す

単位列:  $W m^{-2} Hz^{-1} str^{-1}$



単位面積

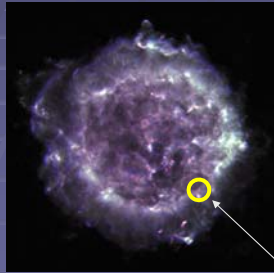
## 補足：立体角について



- 半径1の球上の面素  
 $d\Omega = d\theta \times \sin\theta \, d\phi$
- 立体角積分  
 $\int d\Omega = \iint \sin\theta \, d\theta \, d\phi$
- 全立体角の場合  
 $\int d\Omega = 4\pi$  ステラジアン

## 輝度とフラックス

- デジタルカメラ(CCD)で例えていうと、  
輝度 : 各画素での信号強度  
フラックス: すべての画素を積分した信号強度



電波写真の例 (超新星残骸Cas A):  
天球面上の各点での輝度から電波写真が得られる。

フラックスはこれをすべて積分したもの。

ある立体角から来ているフラックスが輝度

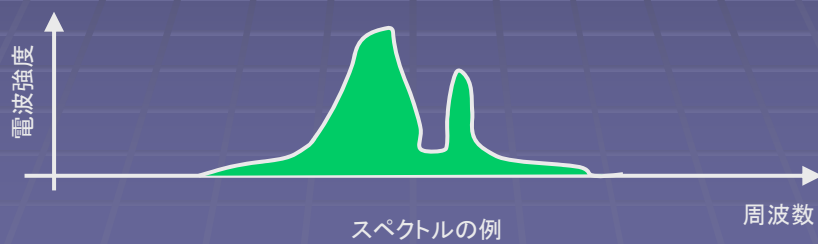
## 輝度と輝度温度

- 輝度は通常、温度(K:ケルビン)の単位を用いる(これを輝度温度という)。
- 輝度温度は、電波を出している領域が、黒体放射で何度の放射に相当しているかを表している。
- 天体が実際に黒体放射をしている場合、輝度温度は天体の温度に相当する。

電波望遠鏡は温度計である、といってもよい！？

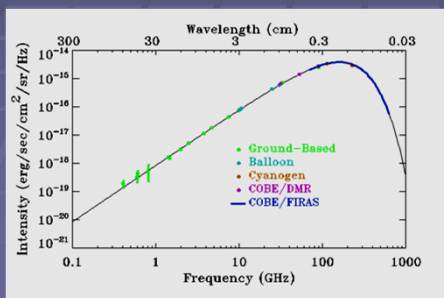
## 電波スペクトル

- 電波観測から得られるのは、各周波数ごとの電波強度(輝度、あるいはフラックス)
- これをスペクトルと呼ぶ

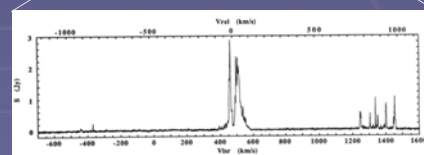
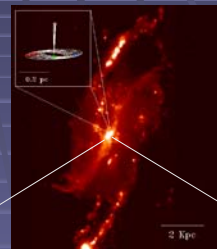


## 連続波スペクトルと線スペクトル

- 連続波: 広い帯域に渡って連続的に出る電波(例: 黒体放射)
- 線スペクトル: 特定の周波数で出る放射(例: 原子、分子輝線)



連続波スペクトルの例(宇宙背景放射)



線スペクトルの例(NGC4258の水メーザー)

# 線スペクトル

- 原子、分子内のエネルギー遷移に伴う放射
- 線幅の狭い線状のスペクトルが得られる
- 理論的に放射される周波数がわかっている  
(すなわち、特定のスペクトル線の観測から原子・分子の存在を確認できる)

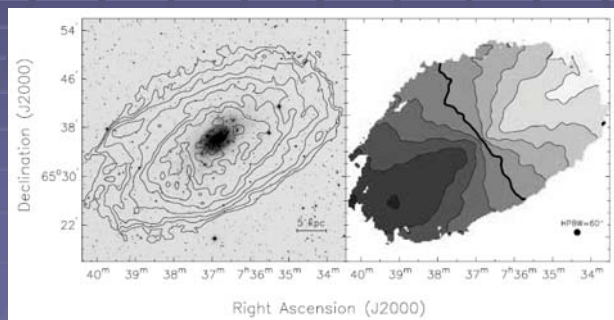
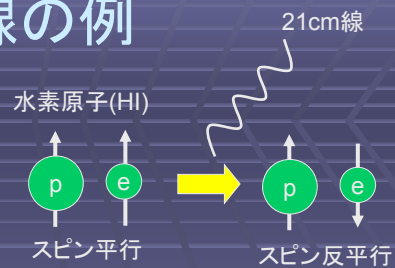
可視光での単色光に相当

例:トンネルのナトリウムランプ



# スペクトル線の例

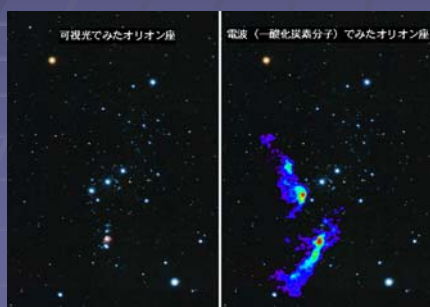
- 中性水素21cm線  
水素原子中の超微細構造の  
変化(スピンの変化)による放射  
 $\nu=1420.405 \text{ MHz}$  ( $\lambda=21.106 \text{ cm}$ )



中性水素21cm線でみた系外銀河NGC2403

## 分子のスペクトル線の例

- CO: 一酸化炭素中毒を起こす
  - HCN: 猛毒 (c.f. KCN : 青酸カリ)
  - CH<sub>3</sub>OH: 「目散る」アルコール
- 他、NH<sub>3</sub>(アンモニア)、CS(硫化炭素) ...  
電波天文学者は危ない分子が大好き!?

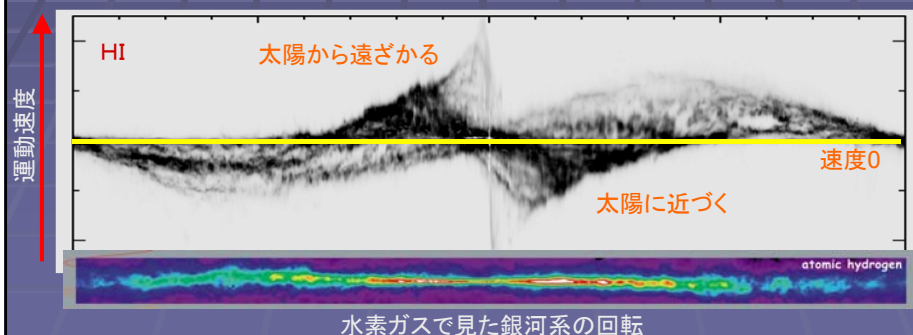


左: 可視光(左)で見たオリオン座

右: 一酸化炭素の出す電波を重ねたもの。星を作る材料となる冷たい分子ガスの分布がわかる

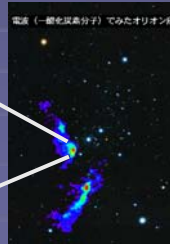
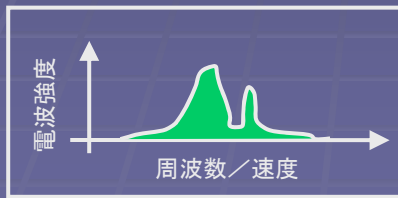
## ドップラー効果

- 電波を放射する天体が運動していると、その運動速度によって観測周波数が変化する (ドップラー効果)
- ドップラー効果を使うと、視線に沿った方向の天体の運動速度 (視線速度) を得ることができる



## 電波望遠鏡で計れるもの:まとめ

- 電波望遠鏡でスペクトルを得ることで、  
電波強度分布(電波写真)  
天体の温度  
特定の原子・分子の存在  
天体の視線速度  
などがわかる



## 電波望遠鏡の仕組み

## 望遠鏡の分解能

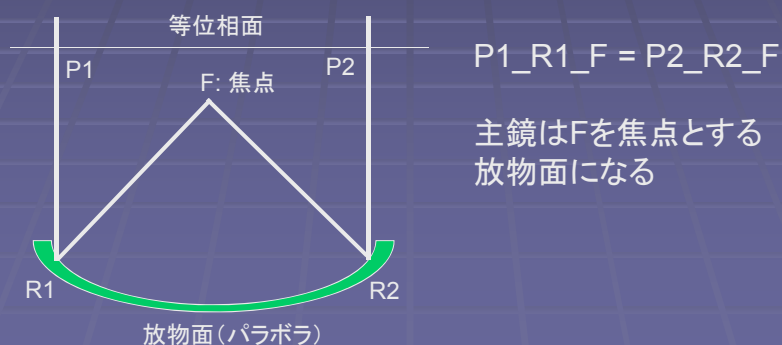
- 分解能を決める要因： 波長と望遠鏡の口径
  - $\Theta = \lambda / D$
  - $\Theta$ : 分解能
  - $\lambda$ : 波長、  $D$ : 望遠鏡口径

望遠鏡を大きくすると、より細かくものが見える  
また、集光力も増えるので感度も向上する

大きい望遠鏡ほど分解能、感度とも良い  
(その分建設費も高いが...)

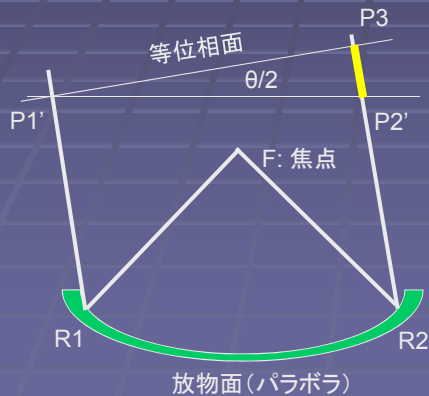
## アンテナの基本性質

- 多くのアンテナは回転放物面(パラボラ)を利用
- 放物線(e.g.,  $y=ax^2$ )の特徴:  
正面から入射した波面が等位相で焦点に集まる



## アンテナの分解能(ビーム幅)

- 斜め入射した波面には位相差が生じる。この位相差が180度(=π radian)になると波が打ち消しあい、観測できない。



$$P1'-R1-F = P2'-R2-F$$

焦点に集まる電波は位相が P3-P2' の長さ分だけずれる

この長さが  $\lambda/2$  になると、波が打ち消しあって見えなくなるから

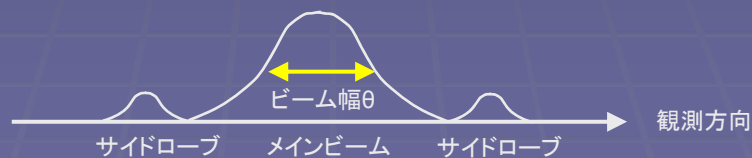
$$\theta/2 \times D \sim \lambda/2$$

よって分解能は  $\theta \sim \lambda/D$

## ビームパターン

- どんなアンテナも有限のビーム幅を持つ
- したがって、観測天体が点源であっても、実際の観測ではビーム幅分の広がりを持って観測される (この広がりをビームパターンという)
- 通常、主ビームに加えて弱いサイドローブを持つ (傾いた方向から来る電波にも感度を持つ)

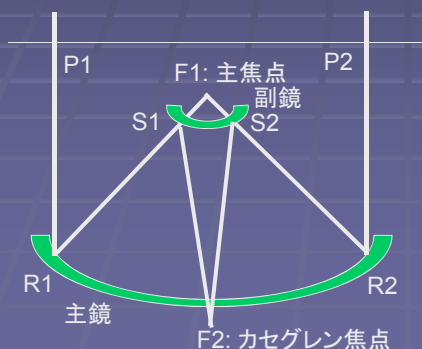
点源を観測したときの観測電波強度





# カセグレンアンテナ

- 受信機を主焦点に置くのは不便なことが多いので、通常は副鏡とあわせてカセグレンアンテナを構成することが多い。
- 副鏡は回転双曲面になる。



$$(S1\_F2) - (S1\_F1) =$$

$$(S2\_F2) - (S2\_F1)$$

副鏡は主焦点F1とカセグレン焦点F2からの距離の差が一定の面となり、双曲面になる。

## 巨大望遠鏡：1

- Jodrel bank 76m  
(英国, 1957年建設)



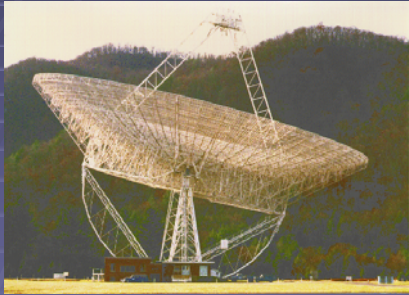
もともとは宇宙線の電波を検出するために建設された(検出できなかった)

- Effelsberg 100m  
(ドイツ, 1972年建設)



## 巨大望遠鏡: 2

グリーンバンク91m(米国 WV)



1988年11月15日 崩壊した  
写真は崩壊の当日、崩壊直前に  
とられたもの

100m鏡を再建  
(2000年完成)



## 巨大望遠鏡: 3

- アレシボ305m鏡  
コーネル大学がプエル  
トリコに建設(1963年)

地形を利用して建設  
世界最大の面積を持つ  
(ただし、球面鏡で動かない  
など、かなり特殊な望遠鏡)

レーダーの出力も世界最大  
(1Mワット: 100Vなら10000A)



## 日本の大型望遠鏡

野辺山45m(国立天文台)  
ミリ波の望遠鏡で世界最大



宇宙航空研究機構  
臼田64m鏡  
日本最大の電波望遠鏡



## VERAの望遠鏡

- VERA 20m x 4台からなる  
基線長2300kmの電波干渉計(VLBI)



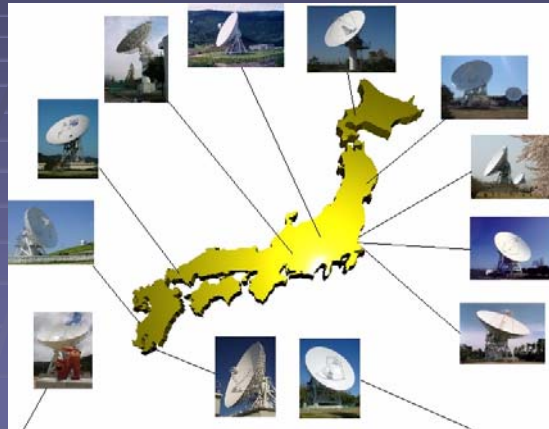
VERA石垣島局



干渉計の各アンテナは  
通常のカセグレン望遠鏡  
であることが多い

## 日本のVLBIネットワークの望遠鏡

- 大学や研究機関などで有する口径10m～64mの望遠鏡を組み合わせて観測を行う

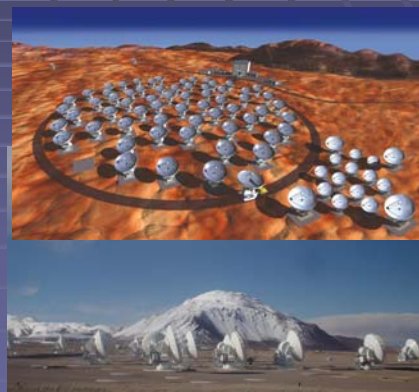


## ASTE / ALMA

- 南米チリのアタカマ高地(標高5000mレベル)にあるミリ波、サブミリ波観測用の電波望遠鏡



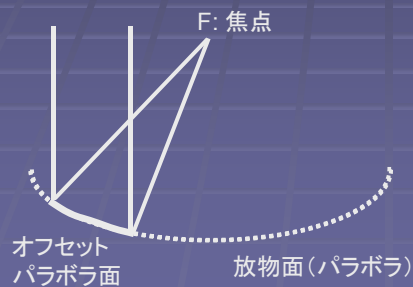
ASTE 10m 望遠鏡  
(主に単一鏡観測)



国際協力で建設中のALMA(上は想像図、下は現状)

## もっとも身近な(?)パラボラアンテナ

- 衛星放送の受信アンテナ  
通常はオフセット型のパラボラで、  
主焦点を用いることが多い



衛星放送のアンテナの例

## 受信機

- 天体からの電波は微弱なので、アンテナで集めた電波を処理するためには増幅してやる必要がある。
- これを行うのが焦点に設置される受信機。電波天文用では冷却されることが多い(絶対温度 $\sim 10$ 度)



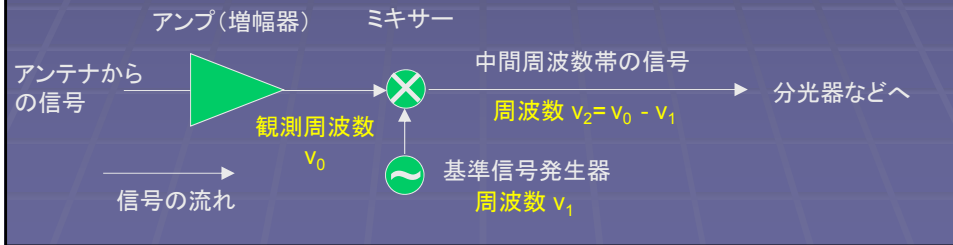
VERAの受信機 (22GHz & 43 GHz)



VERAの受信機のデューワー内部  
低雑音アンプを冷却して使用する

# スーパーヘテロダイン受信

- 受信した電波の周波数を扱いやすい別の周波数(通常は低い周波数)に変換して受信する。
- そのためには受信電波と基準信号を混ぜ合わせる。
- ラジオから電波望遠鏡まで、最も基本的な電波の受信方法



# 衛星放送受信システム

- 衛星放送もスーパーヘテロダイン受信方式

12GHz帯の信号を受信して、1~2GHz帯に変換して処理

焦点に置かれた受信装置で増幅し、周波数変換する

BC parabo

項目	BSC60RG 型	NH-63A-60	BSC75RG 型	BSC100RG 型	BSC120RG
受信周波数 Reception Frequency	11.7~12.75GHz				
受信感度 Sensitivity	右数値優先				
アンテナ利得 Gain(dB)	36.1~37dB		37.9~38.8dB	40.4~41.3dB	41.5~42.8dB
開口効率 Aperture Efficiency	75~78%		73~76%		65~75%
性能指数(G/T) Gain to Noise Temperature Ratio	16.7dB/K @ 15.5~17.8dB/K		18.3dB/K @ 17.1~19.5dB/K	20.8dB/K @ 19.8~22dB/K	21.9dB/K @ 20.7~23.5dB/K
風圧耐量 Wind Loading	48kg/風速40m/s 108kg/風速60m/s		76kg/風速40m/s 170kg/風速60m/s	133kg/風速40m/s 298kg/風速60m/s	192kg/風速40m/s 431kg/風速60m/s
受面積 Receiving Surface Area	0.34m <sup>2</sup>		0.54m <sup>2</sup>	0.95m <sup>2</sup>	1.37m <sup>2</sup>
口径径 Diameter	600mm		750mm	1000mm	1200mm
出力周波数 Output Frequency	1032~2072MHz				
1/4dB帯域 1/4dB Band	48~56dB				
局部発振位相雑音 Local Oscillator Phase Noise	◎ 75dBc/Hz (1MHzオフセット) ◎ 97dBc/Hz (5kHzオフセット) ◎ 106dBc/Hz (10kHzオフセット)				
雑音指数 Noise Figure	0.5~0.9dB				
局部発振周波数 Local Oscillator Frequency	10.678GHz				
局部発振周波数安定度 Local Oscillator Frequency Stability	±1.5MHz以内				