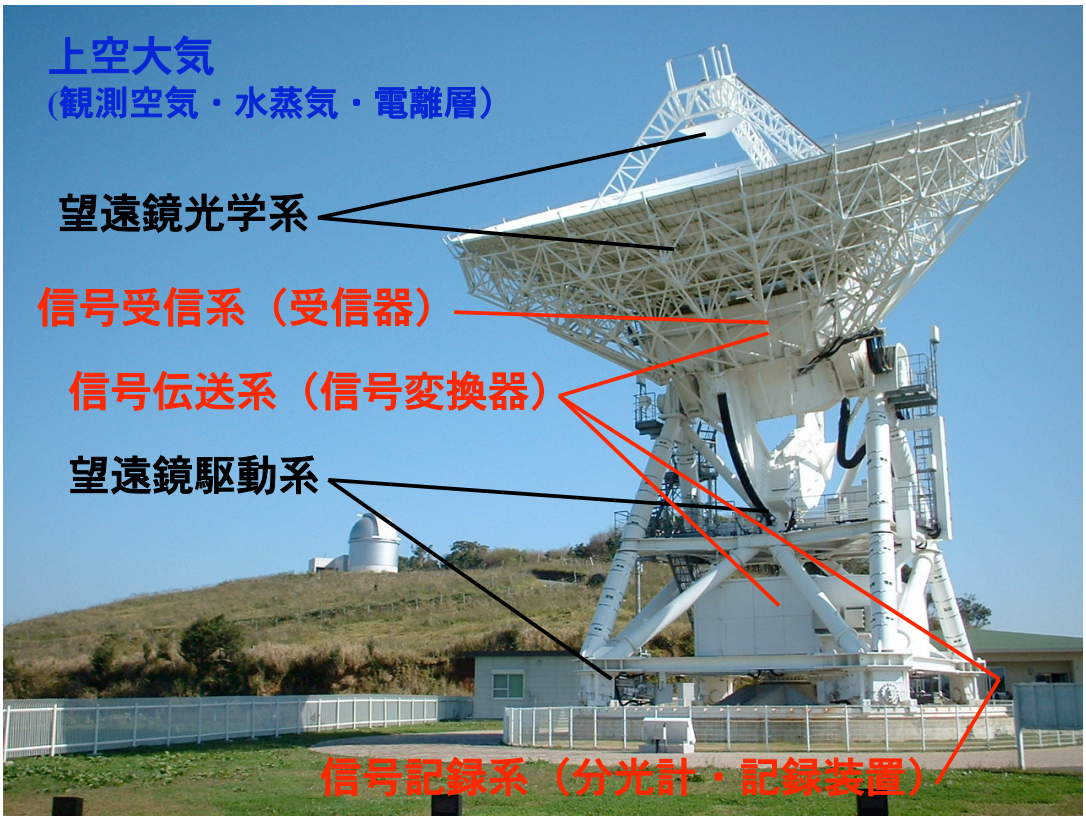
宇宙からの電磁波を観測する



入来観測実習(VERA20m電波望遠鏡)

- ２人×5―6グループ＋３人グループ
  - Kバンド(水蒸気メーザー源・単一 or 2ビーム)
  - Qバンド(一酸化珪素メーザー源 v=1 &2)
  - 局部基準信号周波数
  - 入力レベル(DCLO, BBCLO)
  - デジタルフィルタ(32MHz帯域幅)
  - 天体選択・アンテナ操作
  - スペクトル確認
  - 制限時間：15分
- 観測するメーザー源
  - LST=18h--20h @11月--12月 15:00 JST頃
  - 北天： R.A.= 13h--2h
  - 南天： R.A.= 15h--0h

入来20m電波望遠鏡で
すぐ検出できる水蒸気メーザー源

天体(略称)	アンテナ温度(K)	天体(略称)	アンテナ温度(K)	天体(略称)	アンテナ温度(K)
W3 (2)	50	R Crt	30	OH43.8	15
W3OH	50	W Hya	5	W51M	150
Orion KL	300	RT Vir	30	R Aql	30
Orion B	10	I16293	20	W75N	50
NGC2071	40	Sgr B2M	120	RR Aql	15
U Ori	7	VX Sgr	40	WB60	8
VY CMa	20	IRC10414	8	S140	10
AF Leo	8	ON1	20	WB176	20
R UMa	7	W49N	5000	Cep A	50

入来20m電波望遠鏡ですぐ検出
できる一酸化珪素メーザー源

天体(略称)	アンテナ温度(K)	天体(略称)	アンテナ温度(K)
WX Psc	10	R Leo	30
O Cet	20	R Hya	15
NML Tau (IK Tau)	10	W Hya	10
TX Cam	5	S Crb	5
Orion KL	20	RU Her	7
IRC+70066	40	VX Sgr	7
VY CMa	7	R Aqr	5
R LMi	10	R Cas	5

入来観測実習（VERA20m電波望遠鏡）

- レポート:
  以下の事項を筋道をつけてまとめること
  - 望遠鏡駆動の仕組み（光学系との関連も考える）
  - 信号受信系＞＞伝送系＞＞記録系における一連の信号の流れ
  - 観測・データ取得方法
    - 単一鏡によるメーザー源スペクトルデータ取得の場合
    - VLBI観測特有の手法（展示パネル等参考）
    - VERA観測と通常VLBI観測の相違について
- レポートは一人一人が提出
  - 誰と同じグループだったのかも記入
  - 実習グループ・受講生間での知識の交換を勧める

入来観測実習（1m光赤外線望遠鏡）

- 1m鏡運用チームの指示に従うこと

- レポート:
  以下の事項を筋道をつけてまとめること
  - 電波・可視光線・赤外線観測の共通点・相違点
  - 観測・データ取得方法
  - 赤外線観測の対象天体
    - 何故赤外線観測でなければいけないの？

データ解析実習（NEWSTAR）

- 宇宙メーザーの静止周波数（単位は GHz=10^9GHz)
  - H_2O: 22.235080
  - NH_3:

    23.624941(1,1)-(1,1), 23.649843(2,2)-(2,2), 23.789421(3,3)-(3,3)
  - SiO (J=1—0): 43.122027 for v=1; 42.820539 for v=2
- 有効数字を省略すると正しく視線速度に変換できない
  - c（光速）=2.99792458x10^5 km/s
  - メーザースポットの運動：~10 km/s
  - VERAスペクトルの周波数分解能：15.6 kHz
- 周波数>>>視線速度
  - 相対視線速度差ならばすぐに計算できる
  - 実際の（地球から見た）視線速度：
    地球の自転・公転による逐次変化してしまう
    天体自身の運動による視線速度を知りたい

  >>>局所静止座標系(the local standard of rest)から見た視線速度

作業端末・作業ホスト・プロジェクト名の組み合わせ
（ログイン名はすべて”guest”）

Group	Working terminal	NEWSTAR host	NEWSTAR project
1	aips2	aips2	prjct1
2	kannoko	kannoko	prjct1
3	quartet	aips2	prjct2
4	jaguar	jaguar	--
5	tiger	tiger	--
6	siam	siam	--
7	panther	panther	--
8	puma	puma	--
9	個人パソコン1	kannoko	prjct3
10	個人パソコン2	aips2	prjct3

FITSデータのコピー

```
[guest@aips2 prjct5]$ cd
[guest@aips2 guest]$ pwd
/home/guest
[guest@aips2 guest]$ ls
    newstar_training/    node*    prjct2@  prjct4@
   newstar_training.tar  prjct1@  prjct3@  prjct5@
[guest@aips2 guest]$ ls newstar_training
SFR/  STAR/  WHya/ ….
[guest@aips2 guest]$ cp newstar_training/SFR/*
   /work8/newstar/guest/prjct5/（これは例です）
                                (コピー先は SpFITS 中で確認）
[guest@aips2 guest]$ cd /work8/newstar/guest/prjct5/
[guest@aips2 guest]$ ls
```

NewStar データ解析の流れ

- SpFITS: FITSファイルの読み込み

  ファイル名を短くしないと読み込めません！
- Show Spectra: スペクトルの表示

Rest frequency=正しい線スペクトルの静止周波数を入力

- Auto SP Sum: 複数On-Offデータの足し合わせ（長時間積分）

※Show Spectraで長時間積分の効果を確認してみること

- Baseline: スペクトルベースのうねりを取り去る
- Show Spectra:

  積分/補正済みのデータをスペクトル表示
  - 視線速度範囲を拡大
  - 線スペクトルピーク毎に

    アンテナ温度(K)・ピーク視線速度(km/s)・視線速度幅(km/s)を読み取ること
  - メーザー検出速度範囲をまるごとカバーするように範囲を選択し、

    速度積分アンテナ温度(K km/s)を読み取ること
  - スペクトルを数枚印刷すること >>> レポートへ添付

NewStar データ解析実習 レポート

- データ処理の原理をまとめること
  - もともとのデータはどんなデータ？
  - どんなデータ較正を行った？
  - 周波数>>>視線速度変換はどうやるの？
  - 積分時間と感度（ノイズの低さ）との関係式を導出
- スペクトルを分析し、科学的考察を行う

  下記の3テーマ中1テーマ最低まとめること

  （2テーマ以上まとめるとさらに加算される）
  - 星周ガスの膨張速度について　(/STAR or /SFR)
  - 観測した水蒸気メーザー源の銀河系中での分布(/SFR)
  - ミラ型変光星W Hydrae水メーザーの強度（ピークアンテナ温度・速度積分アンテナ温度）の時間変化分析 (/Whya)
  - 線幅を用いた運動学的温度の推定について (/STAR or /SFR)

積分時間と感度との関係式を導出

- 使用データ: ~/newstar_training/STAR/ RS-UMa_K_050322_S0[1-6].fits

コピーしたファイルの名前を短縮してから読み込む

mv RS-UMa_K_050322_S01.fits RS-UMa_01.fits

- On-off data set: 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 60 sets
- 上記セット数のスペクトルを積分し、得られたスペクトルのノイズ(r.m.s)を記録する

@Auto SP Sum: Spectrum window で 1-N (N=1,4,9,16…)

- グラフを作り、関係式を回帰直線から得る
  - 横軸 積分時間 (1set=60sec)の対数
  - 縦軸 r.m.s. ノイズ(単位はK)の対数

アンテナ温度とフラックス(エネルギー流速)密度

- 天体からの受信パワーを温度換算

$$kT_A = \frac{1}{2} A \eta_A \eta_D S_\nu, \quad \eta_A = 0.4\ (\text{Q - band})\ 0.5\ (\text{K - band}), \quad \eta_D = 0.75$$

A: アンテナ口径面積　η_A:アンテナ開口能率

η_D: デジタル変換効率係数

$$\rho(\nu) = \frac{T_A}{T_{sys}} = \frac{A \eta_A \eta_D S_\nu}{2kT_{sys}}$$

システム雑音温度の計測

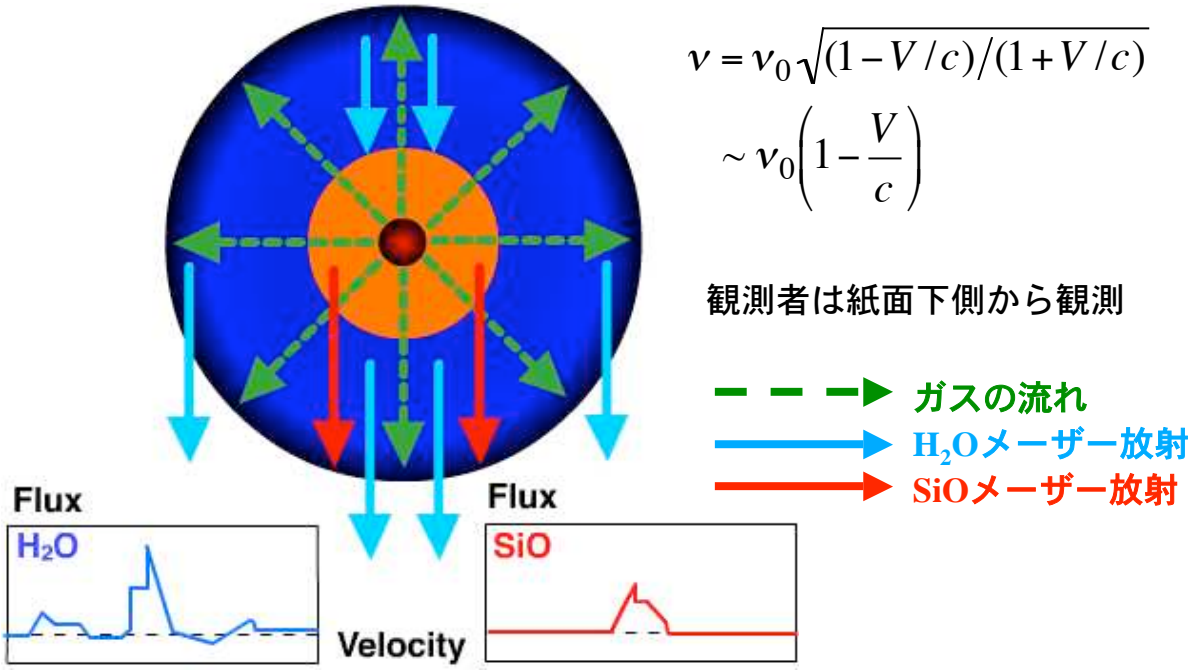
$$P_{sky} = k(T_{sky} + T_{sys}), \quad P_R = k(T_R + T_{sys}), \quad T_R \approx 290K(known)$$

$$\frac{P_R}{P_{sky}} = \frac{(T_R + T_{sys})}{(T_{sky} + T_{sys})} = \frac{(1 + T_{sys}/T_R)}{(T_{sky}/T_R + T_{sys}/T_R)}$$

$$T_{sys} = T_R \frac{1-\sigma}{P_R/P_{sky} - 1}, \quad \sigma = \frac{P_R}{P_{sky}} \frac{T_{sky}}{T_R}, \quad T_{sky} \approx T_{sky}(z=0)\tau_0 secZ$$

スペクトルの形とガス運動との関係

- 星からのガス放出:複数のガス塊がメーザー発光する



$$\nu = \nu_0 \sqrt{(1 - V/c)/(1 + V/c)}$$

$$\sim \nu_0 \left(1 - \frac{V}{c}\right)$$

観測者は紙面下側から観測

ガスの流れ

H_2Oメーザー放射

SiOメーザー放射

複数メーザーピークがある変光星 (/STAR)

WX Psc(IRC+10011), S Per, NML Tau, RX Tau, T Lep, RW Lep, IRC+60169(AP Lyn), VY CMa, R Crt, AF Leo, S Crt, RT Vir, W Hya, WX Ser V2108 Oph, VX Sgr, IRC-10414, V1111 Oph, R Aql, RR Aql, NML Cyg, IRAS 22134+5834, IRAS 22480+6002, IRAS 23004+5642

星周ガスの膨張速度についての注目点

- 複数メーザー源を解析して推定される
  典型的な星周ガス膨張速度
- メーザー源の明るさと星周ガス膨張速度との
  間での関係の有無（相関性という）
- 単一メーザー源における強度や
  （見かけの）膨張速度についての時間変化
- 星周ガス膨張速度から、ガスを噴き出す星についてどんなことが推察できるだろうか？

スペクトルの形とガス運動との関係

- それぞれのガス塊中の無数分子の運動
  ⇒線スペクトルに幅をつける

$$f(V_x,V_y,V_z)=\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2}\exp\left[-\frac{m\left(V_x^2+V_y^2+V_z^2\right)}{2k_BT}\right]=A\exp\left[-\frac{mV_z^2}{2k_BT}\right]$$

$$\int_{-\alpha}^{\infty} f(V_x,V_y,V_z)dV_xdV_ydV_z=1$$

$$f(\frac{1}{2}\Delta V)=\frac{A}{2},\quad \Delta V=\sqrt{\frac{2\ln 2k_BT}{m}}\approx 0.2(T/A_m)^{1/2}\ (\mathrm{km\ s^{-1}})$$

- 熱力学的温度

$$T[K]\approx 25.0A_m\left(\Delta V[\mathrm{km\ s^{-1}}]\right)^2$$

  - 水蒸気：A_m=18
  - 一酸化珪素：A_m=46

ΔV: 線幅(半値幅)
k_B: ボルツマン係数
A_m: 原子／分子数

星周ガスの温度（＝運動学的温度）についての注目点

- 複数メーザー源を解析して推定される
  典型的な星周ガスの温度
- 複数メーザー源の間に見られる
  星周ガス温度の差異について：
  メーザー強度などに関係ある？
- 実際のメーザー発光ガスの物理温度
  (~400K)との比較

※メーザーが起きると、輝線ピーク中央の放射がより 著しく増幅されるが、運動学的温度はどう見える？

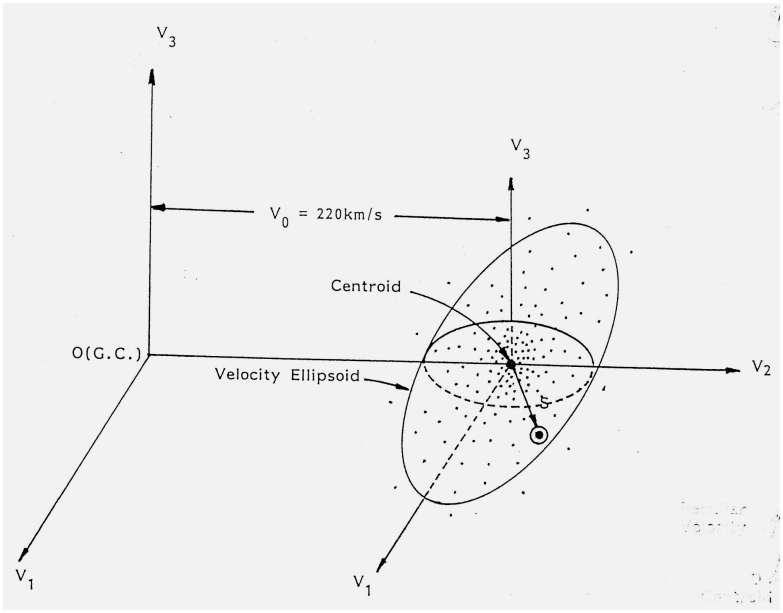
- 「温度」という概念について
  おさらい・考察してみよう！

視線速度情報の取り扱い方

- 観測されるドップラー（視線）速度
  ＝天体視線速度ー観測者視線速度
- 観測者視線速度
  ＝地球公転＋地球自転＋太陽系運動
- 銀河系外の天体を観測した場合
  銀河系回転に乗った太陽系を考慮することもある
- 局所静止系 (the local standard of rest)
  - この系に対する天体の運動を共通とする
  - この系に対して太陽系／地球運動を考慮した
    視線速度表示の補正を行う

局所静止系における視線速度

- The local-standard-of-rest velocity (V_{LSR})
  - 銀河系回転と共に移動する系
  - 太陽系近傍星団の平均速度ベクトル



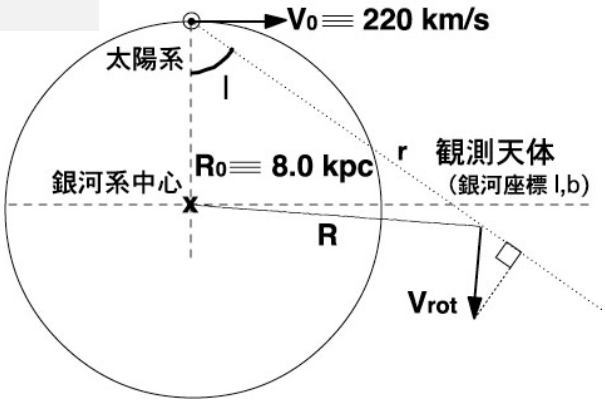
銀河系内部の星･ガスの分布

- 観測される天体の視線速度

$$V_{\rm r} = \left(\frac{R_\odot}{R} V^{\rm rot} - V_\odot^{\rm rot} \right) \sin l \cos b$$

- R--r--l 間の関係

$$R^2 = r^2 + R_\odot^2 - 2 r R_\odot \cos l$$



- 距離の不確定性

$$r = R_0 \cos l + (R^2 - R_0^2 \sin^2 l)^{1/2}$$

$$r = R_0 \cos l \pm (R^2 - R_0^2 \sin^2 l)^{1/2}$$

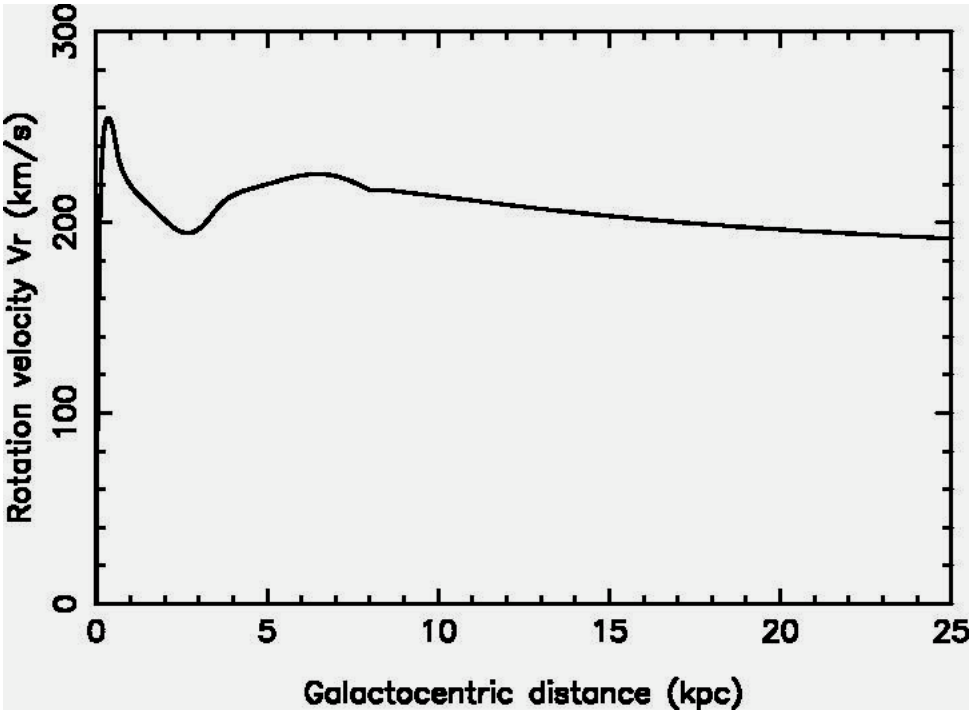
R>Ro（Solar circleより外側）

R<Ro（Solar circleより内側）

銀河系回転曲線

銀河系回転モデルのひとつ

内側：Clemens 1985; 外側：Dehnen &Binney 1998)



銀河系内におけるメーザー源の分布についての注目点

- 視線速度と銀河系回転曲線を利用したメーザー源の位置推定法（得られた距離を運動学的距離と　呼ぶ）をまとめること
- メーザー源位置を推定しにくい方向は？
- この方法から銀河系についてどのようなことを推定できるであろうか？

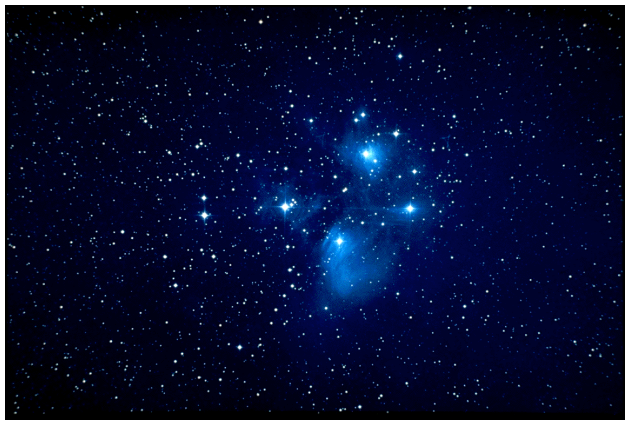
銀河系スケールで分布する星形成領域(/SFR)

Cep-A, G34.4+0.2, G50.32+0.68, IRAS00420, IRAS17482, IRAS19160, IRAS19213, IRAS20142, K3-50, L1287, M17, NGC2264, NGC281, OH43.8-0.1, ON1, ON2N, RCW169, S152, S252A, S255-7, S269, S76W, Sh2-128, W31-1, W31A, W3IRS5, W3OH, W43M, W44, W48, WB105, WB453, WB621, WB724, WB755

データ解析実習（IRAF）

- **可視光線・赤外線撮像データを処理**
- **可視光線像（B,V,R)及び赤外線像(J, H, K'バンド）を解析し、星団に対する色(J-K)--等級(Kバンド)図を作成**
  - **100星程度を簡易測光**

実習対象：
散開星団
（１日目、可視光線）
（右図のものではありません）
球状星団
（２日目、赤外線）

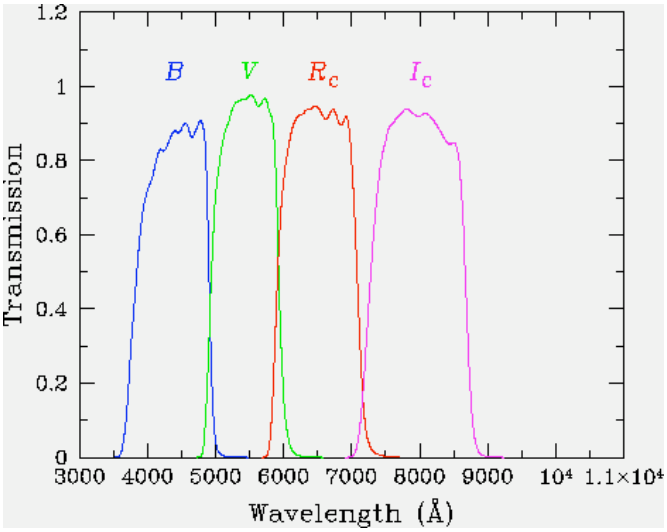


IRAFデータ解析実習 レポート

- 色ー等級(HR)図をとにかく仕上げる
  - どうしたらまともな図を描くことができるのだろうか？
  - 測光する星の選び方に問題はないだろうか？
- 色ー等級図を用いた科学的考察
  - HR図上での個々の星の進化について
  - 星団の年齢の推定を実際にやってみる

等級(magnitude)の定義

- $m = -2.5 \log_{10}(F\lambda / F0\lambda) = -2.5 \log_{10}(F\nu / F0\nu)$
- ゼロ等級:
  - ベガ(Vega)を基準(ベガ等級)
  - 3630 Jy(ジャンスキー)=0等級(AB等級)



Hertzsprung--Russel図 = 色--等級図

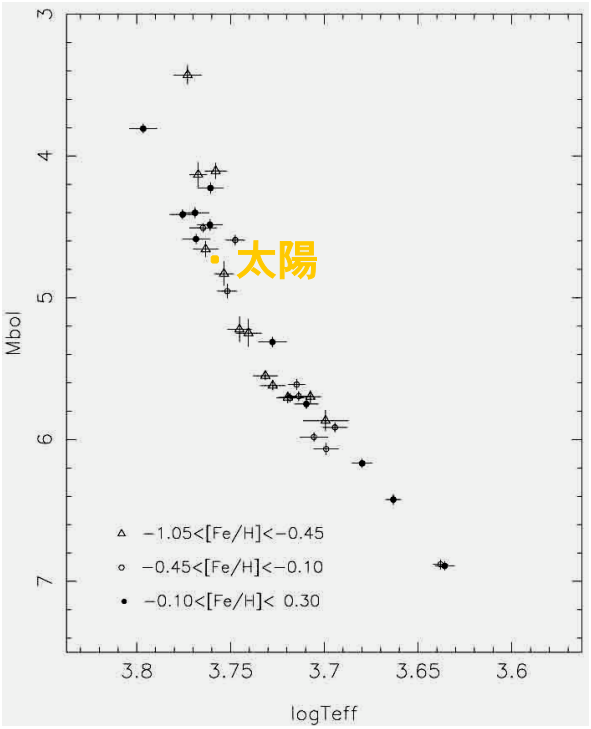
- 縦軸:恒星光度の指標
  - 絶対等級(absolute magnitude)
  - 実視等級(visual magnitude)
    - 同距離の恒星集団でのみそのまま使える
  - 輻射等級(bolometric magnitude)
    全波長域からのエネルギー換算
    - 5等級大きくなると100倍放射エネルギー
      が小さい(暗くなる)
  - 光度(luminosity) $L_\nu = 4\pi r^2 F_\nu$

※絶対等級と光度は
星までの距離が分からないと測定できない

HR図 ＝ 色--等級図

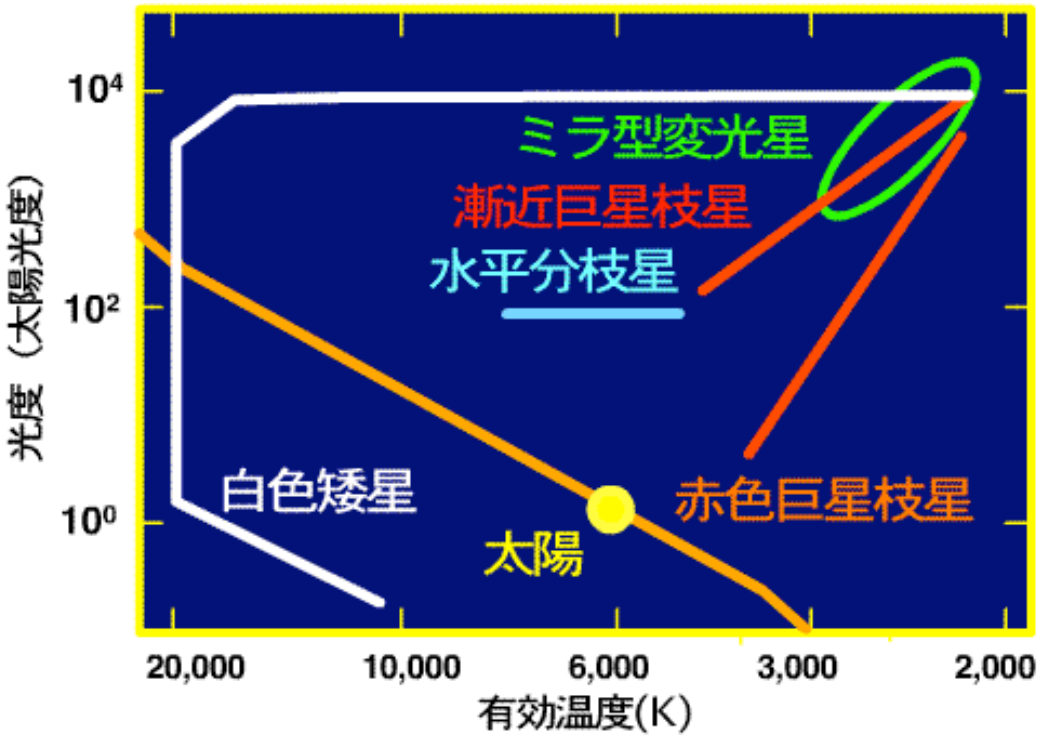
- 横軸： 恒星表面温度の指標
  - 有効温度（Stefan--Boltzman’s law）
  - スペクトル型(O, B, A, F, G, K, M)
  - 色指数(B-V, V-I, J-H, J-K, ...)
    - 正の大きい数>>>より赤い（低温）
    - 普通は右へ行く程低温を指す

Heltzsprung--Russell diagram

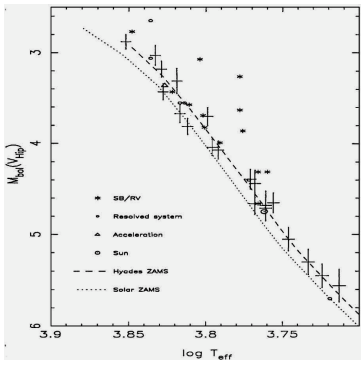


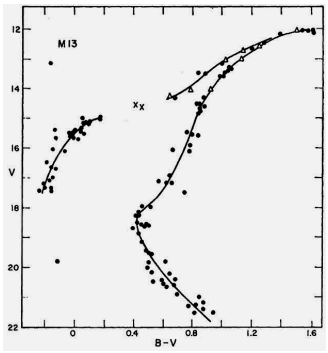
太陽近傍の星々
(Lebreton et al.1999)

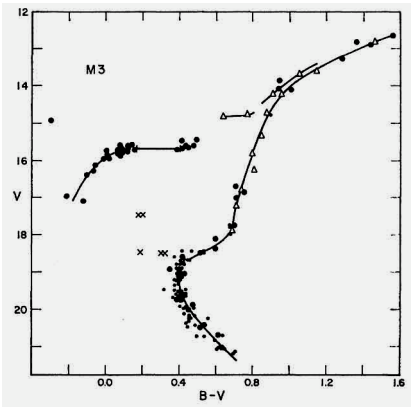
HR図上における主系列後の恒星の進化



距離と年齢によるHR図上での違い







レポート問題：

３つの星団のうち
どれが最も若く
どれが最も古い？

M13とM3とでは
どっちが遠い？

作業端末・作業ホスト・ログインアカウント名の組み合わせ

Group	Working Host	IRAF host	Login account
1	aips1	aips1	iraf1
2	aips2	aips2	iraf1
3	kannoko	kannoko	iraf1
4	jaguar	kotetsu	iraf1
5	tiger	aips1	iraf2
6	siam	aips2	iraf2
7	panther	kannoko	iraf2
8	puma	kotetsu	iraf3
9	個人パソコン1	個人 IRAF	個人アカウント
10	個人パソコン2	個人 IRAF	個人アカウント