

# 電波天文学入門

# 講義予定

1. 電波天文学入門・放射輸送
2. 宇宙電波の発生1
3. 宇宙電波の発生2
4. 宇宙電波の観測1
5. 宇宙電波の観測2
6. 太陽系天体
7. 恒星
8. 銀河系
9. 星間物質・星形成
10. 超新星爆発・残骸
11. パルサー
12. 活動銀河核1
13. 活動銀河核2
14. 宇宙背景放射

## 参考書

「宇宙電波天文学」赤羽 他  
その他は随時紹介する

# 天文学

- 位置天文学\*
  - 天体の位置と運動
- 天体力学
  - 天体の運動を力学的に解析
- 太陽系
  - 地球惑星物理学\*
  - 太陽系形成論\*
- 太陽\*
  - 唯一表面が見える恒星
  - 宇宙電磁気学、電磁流体力学
- 恒星
  - 特異な恒星、白色矮星、中性子星、ブラックホール、連星\*
  - 恒星の形成と進化
  - 超新星・超新星残骸\*
- 星間物質\*
  - HI雲、HII領域、分子雲、星間磁場、高エネルギー粒子
- 銀河系・銀河
  - 構造\*
  - 組成、ダークマター\*
  - 活動銀河・銀河核\*
  - 銀河団\*
  - 銀河形成論\*
- 宇宙論
  - 宇宙背景放射\*
  - 大規模構造
  - 宇宙の始まり
- 観測
- 理論・シミュレーション

\* 印は電波天文学に関係が深い分野。天文学のほとんど全ての分野にわたる

# 電波天文学

宇宙・天体が放射する電波を観測し、そこで生起する現象を物理的に解明することを目指す

- 主な研究対象
  - 星間物質・星間現象
  - 恒星形成と終末
    - 星間ガスが主体となる天体・現象
  - 銀河電波、活動銀河・銀河核
    - 高エネルギー粒子と磁場によるシンクロトン放射
  - 宇宙背景放射
    - 宇宙論の最も重要な研究手段
  - 太陽・惑星・木星電波
  - 位置天文学
    - 干渉計観測による超高分解能を利用
- 電波天文学の得意と苦手
  - 得意
    - 希薄だが大量に星間ガスが存在する天体・現象
      - 例: 星間現象、恒星形成、銀河系の高エネルギー粒子と磁場、
    - 高エネルギー粒子が関与する現象
      - 活動銀河核、マイクロクエーサー、太陽電波バーストなど
  - 苦手
    - 高密度な天体。見込む立体角が小さいと、電波は弱い
      - 例: 普通の恒星。肉眼でも見える大部分の恒星は、世界最高の電波望遠鏡でも見えない
      - フレアを起こしたり、ガスを撒き散らす恒星は観測できる

# 太陽の電波

- 太陽
  - 全天で最も強力な電波源
  - $\sim 10^6 \text{ Jy} @ 8 \text{ GHz}$
- 電波発生機構
  - 光球・コロナの熱放射・・・6000K
  - フレアの非熱的・熱放射・・・ $10^6 \text{ K}$
- 研究内容
  - 太陽表面でのエネルギー解放メカニズム
  - 表面ガスの運動
  - フレアの解明



# 太陽の電波観測例

- 静穏時の輝度温度  $T_b$

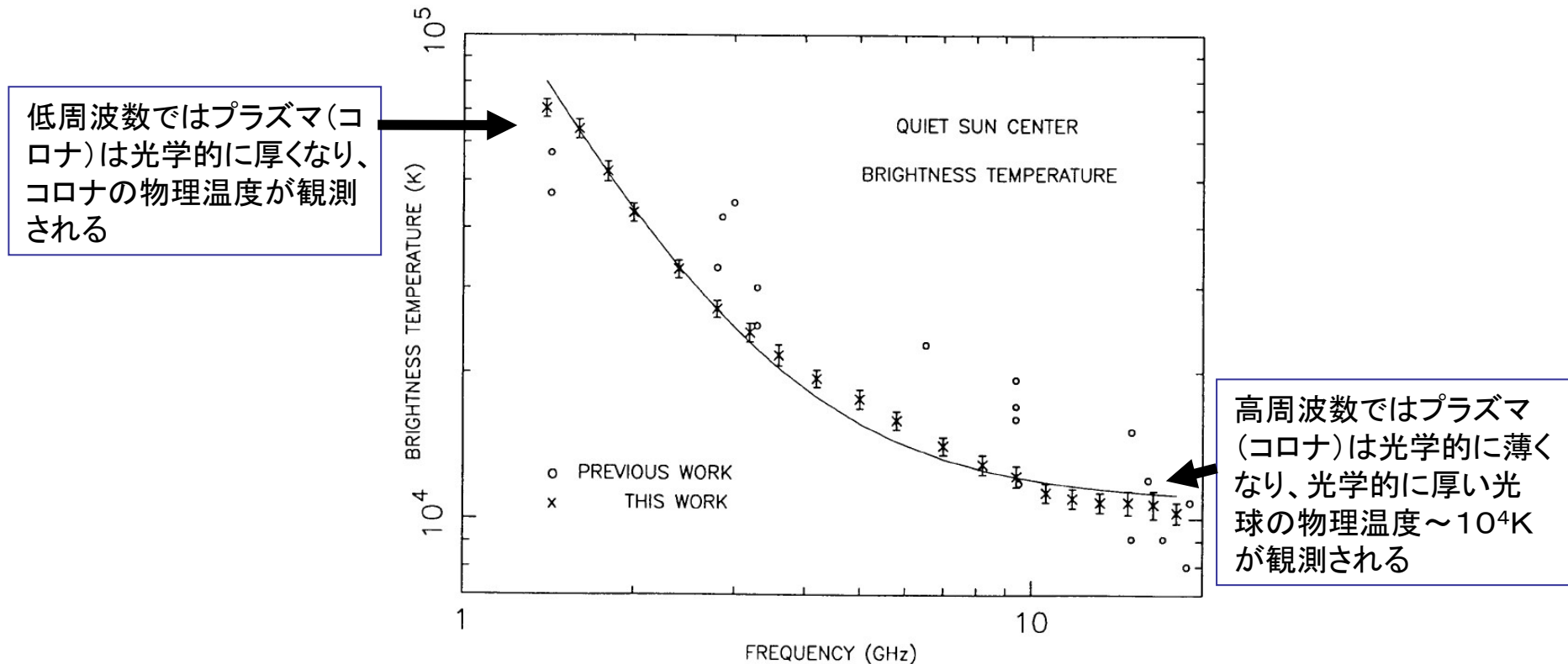


FIG. 3.—Observed brightness temperature as a function of frequency, ( $\times$ ), compared to the results of previous authors ( $\circ$ ) from (Fürst 1979). The solid line is the fit discussed in the text.

# 太陽のフレア(バースト)

- 時折発生する太陽フレア
  - 短時間(1分程度)
  - 太陽表面の磁場

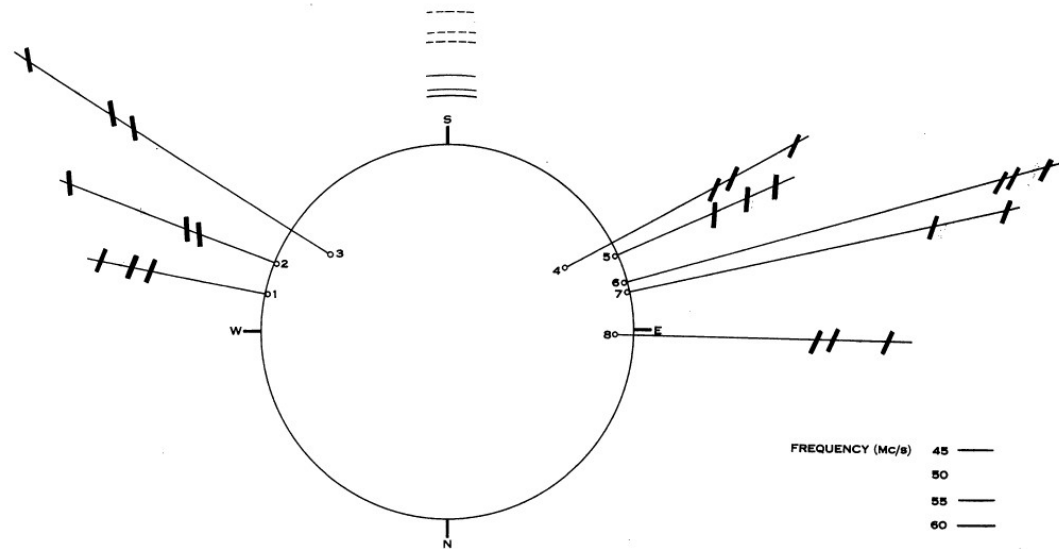
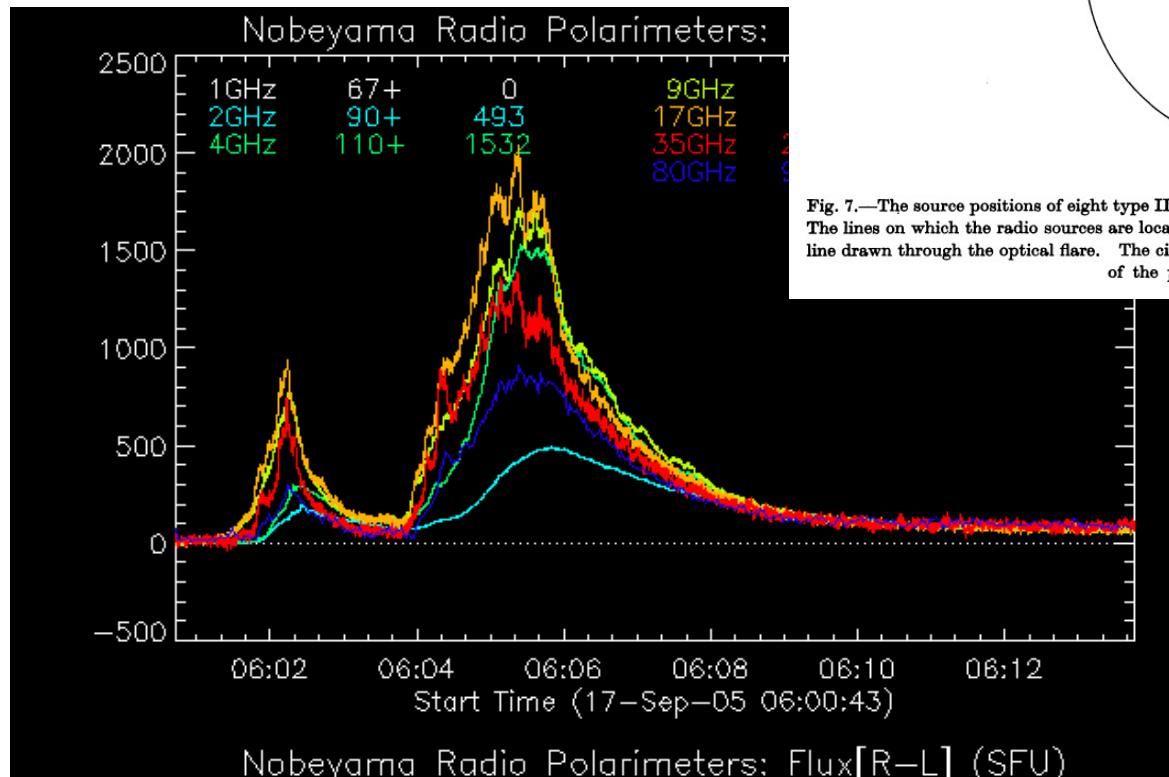


Fig. 7.—The source positions of eight type III bursts (coloured lines) associated with limb flares (optical positions shown as open circles). The lines on which the radio sources are located by the interferometer are shown in part only, viz. that part which is close to the radial line drawn through the optical flare. The circular arcs show the levels of the fundamental (full lines) and second harmonics (dotted lines) of the plasma frequency, assuming the Baumbach-Allen corona.

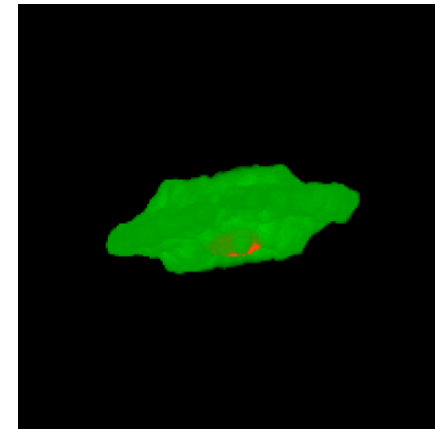
バーストに伴ってプラズマの雲が太陽表面から高速に放出される



# 惑星・月・小惑星

- 電波発生機構
  - 天体の表面が発する熱放射
  - ほぼ天体の物理温度に等しい輝度温度
    - 例: 木星の輝度温度  $T_b=150\text{ K}$  @  $8\text{ GHz}$
    - 金星  $T_b=466\text{ K}$  @  $31.4\text{ GHz}$
- 研究内容
  - 天体の表面・大気の種類・密度・組成
  - 金星の輝度温度は観測周波数によって大きく異なる
    - 電波で見通す距離(光学的厚み)の違いと、表面高度による物理温度の違い
  - 電波強度が安定・強力なので、他の電波源の強度参照に使われる

- 木星電波
  - 100MHz–3GHz
  - 非熱的(シンクロトロン)放射
  - 太陽系の惑星では木星のみ
    - 強力な双極磁場( $\sim 1$ ガウス)と高エネルギー粒子(数十MeV)



20MHz付近

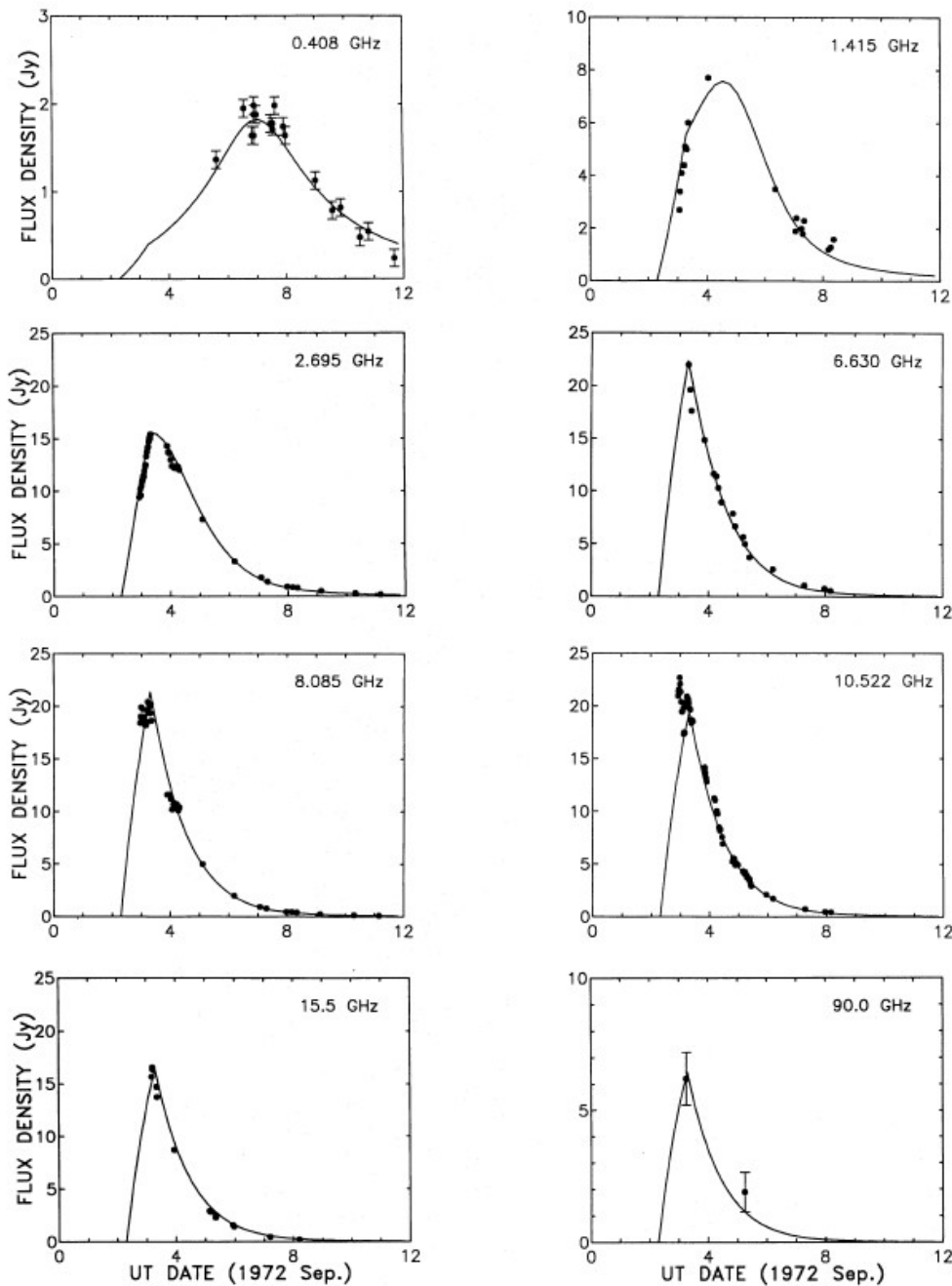
- デカメートル波と呼ばれる強力なバースト的電波放射



# 恒星

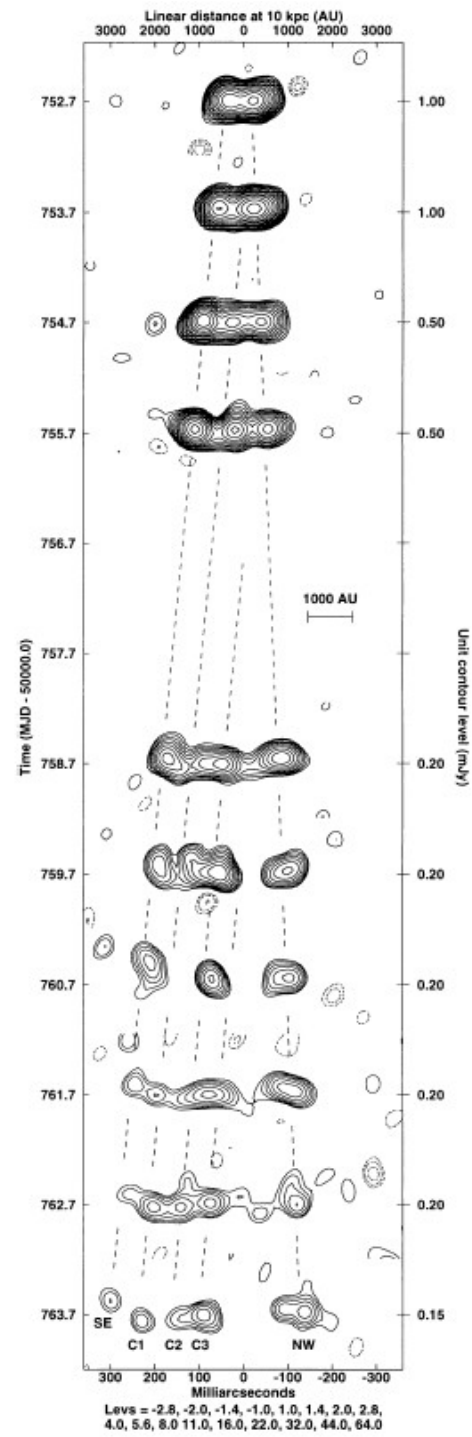
- 通常の恒星
  - 通常の恒星の電波は極めて微弱
    - 太陽を10光年の距離に置いたら、 $1 \mu\text{Jy}$ 程度。世界最高の電波望遠鏡の観測限界以下
  - 肉眼で見える星でも、一般には電波望遠鏡では観測できない
  - 理由
    - 星の立体角が小さい
    - 電磁波放射のスペクトルが黒体放射に近いため低周波数(電波)領域では強度が小さい
- 観測できる恒星
  - フレア星
    - 時折、急激に電波強度が増大する恒星。近傍の矮星に多い。太陽フレアを数桁強力にしたものか
  - X線連星・マイクロクエーサー
    - 例: Cyg X-3, SS433, GRS1915+105
    - 時折、高速なジェットを放出する
    - 通常の恒星とコンパクト星(白色矮星・中性子星・ブラックホール)の連星
    - シンクロトン放射
  - 新星、Tタウリ星、アルゴル型連星

何らかの形でガスを放出する恒星が強い電波放射をする



←  
**マイクロクエーサー  
 Cyg X-3のフレア**

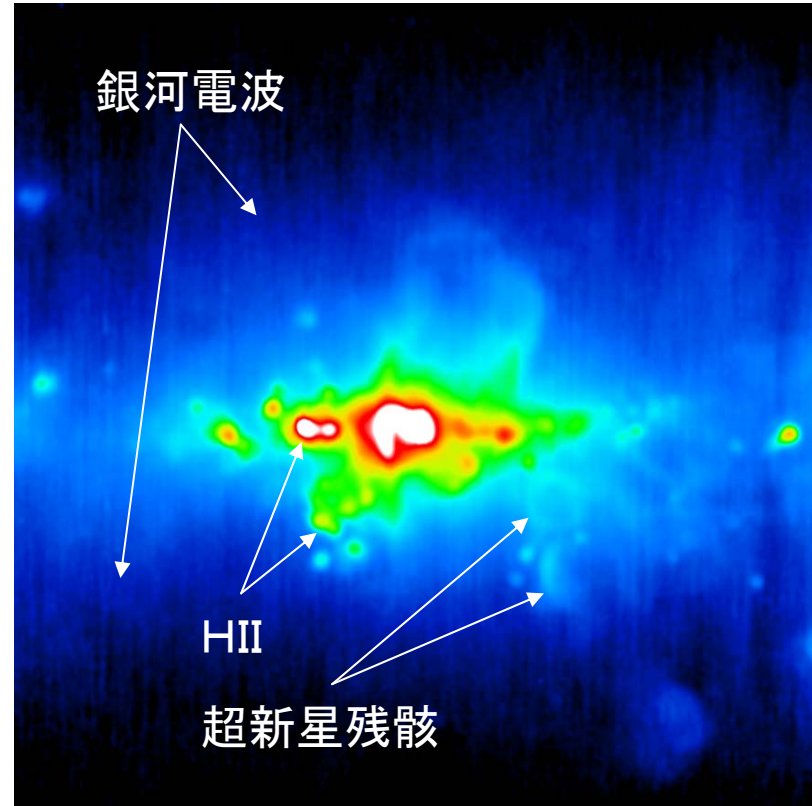
→  
**マイクロクエーサー  
 GRS1915+105 が時  
 間と共に超光速で広  
 がる様子**



**Fig. 2.** Radio light-curves computed from the present model using the physical parameters of Table 1, for frequencies of 0.408, 1.415, 2.695, 6.630, 8.085, 10.522, 15.5, and 90.0 GHz, corresponding to the first strong radio outburst of Cyg X-3 in 1972 September. The points observed from Anderson et al. (1972) (0.408 GHz), Shaffer et al. (1972) (1.415 GHz), Hjellming & Balick (1972) (2.695 and 8.085 GHz), Gregory et al. (1972a) (6.630 and 10.522 GHz), Dent et al. (1972) (15.5 GHz), and Pomphrey & Epstein (1972) (90.0 GHz), are also plotted. Error bars not shown are smaller than the symbol size

# 銀河系

- 銀河電波
  - 銀河系内の高エネルギー宇宙線と星間磁場によるシンクロトロン放射(非熱的電波)
  - HII領域の制動放射(熱的電波)
- 星間ガス
  - 中性水素(HI)
  - 水素分子(H<sub>2</sub>)
  - 電離ガス(HII)
- 銀河回転



銀河中心の周辺5×5度  
広がった放射が銀河電波(非熱的放射)  
個別の天体はHII領域(熱的)や超新星残骸(非熱的)

# 銀河系の回転

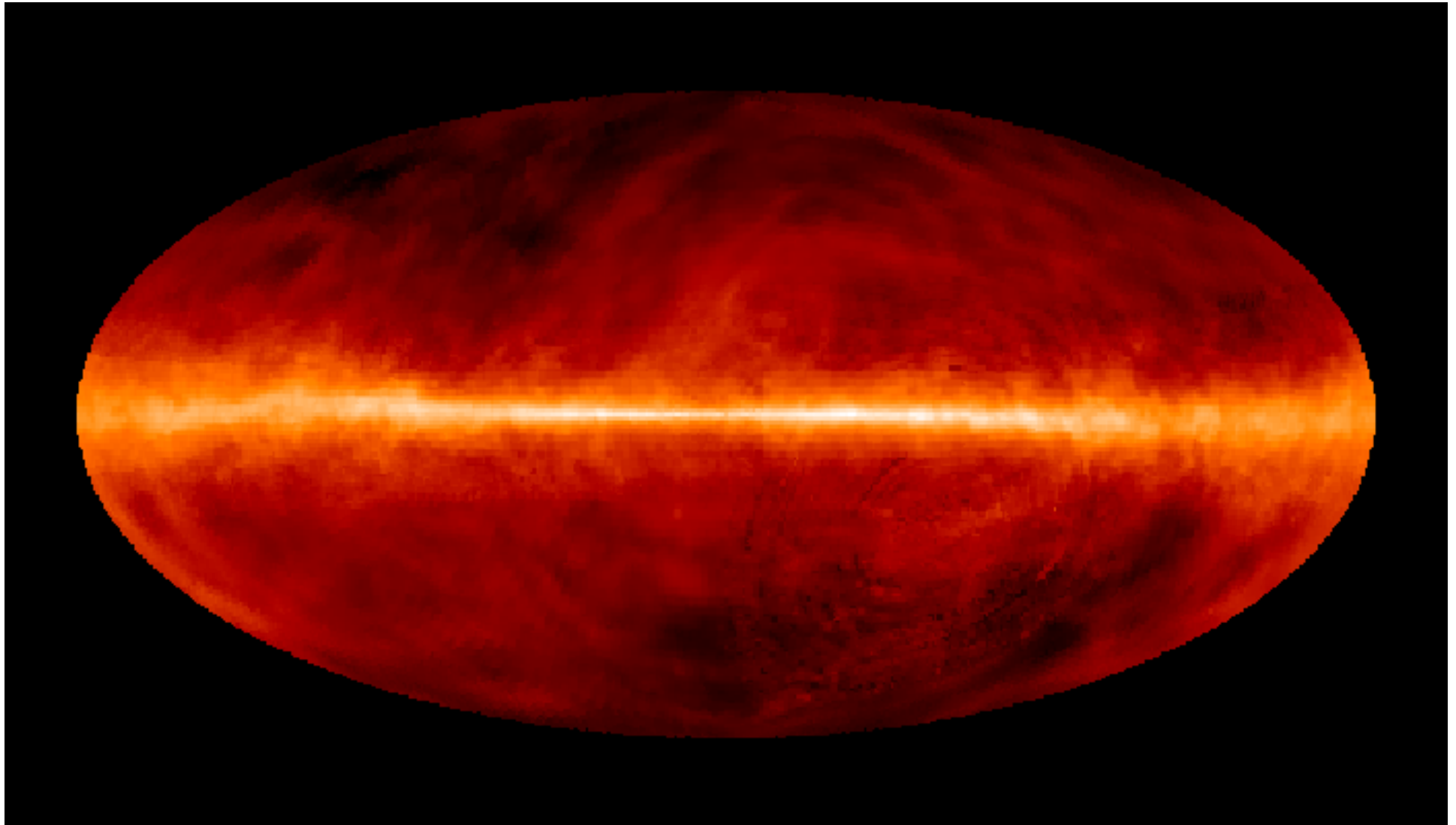
- 銀河系の理解
  - 銀河系の質量
  - 物質分布と星形成
    - 星は銀河の主要構成要素
  - 星間物質の存在形態
  - エネルギー分布
  - 高エネルギー粒子
  - 銀河の腕と密度波理論
  - 衝撃波
- ダークマター
  - ダークマターの存在は古くから知られているが正体不明
  - どこにどのように分布するかが正体の手がかりとなる
- 銀河形成論
  - 銀河系を構成する物質の分布と運動は、銀河の形成過程を研究する材料

銀河系研究全ての基礎に銀河回転がある

# 星間物質

- 星間物質
  - 中性水素 HI
    - HI=電子スピン反転
  - 水素分子 H<sub>2</sub>
    - H<sub>2</sub>=電波放射しない。  
別の分子から推定
  - 電離水素 HII
    - HII=プラズマの制動放射+水素再結合輝線
  - ダスト
    - 熱放射
- 存在形態
  - 分布・大きさ・密度・温度
- エネルギー源と加熱・冷却過程
  - 高エネルギー宇宙線による加熱と輝線放射による冷却

# 銀河系の中性水素ガス(HI)の分布



# 星形成

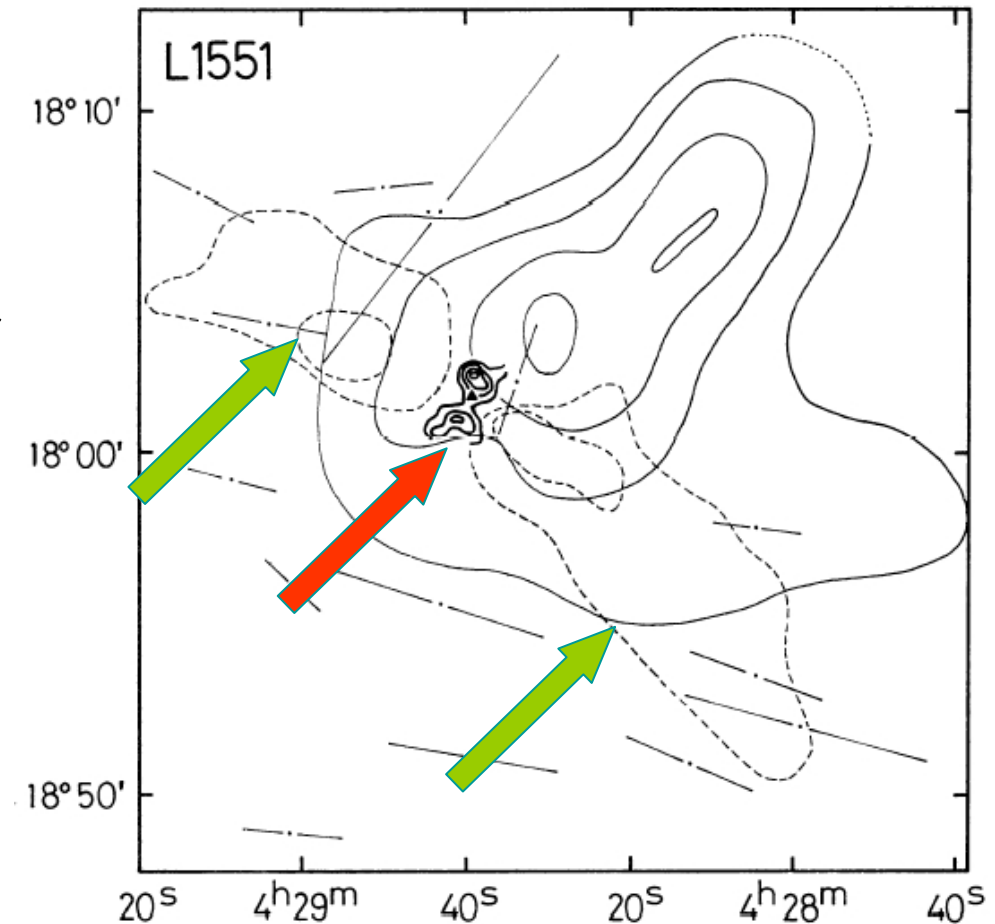
- 電波観測の意義
  - 恒星は電波では観測できないが、可視光で観測できる
  - 恒星以前・以後のガスの状態は可視光では観測が困難だが、電波では観測できる
- 分子雲コア・原始星
  - CO分子の観測
- 様々なアウトフロー
  - 恒星形成の動的現象
- 降着円盤
  - 恒星の形成、惑星系の形成
- 惑星系形成
  - 地球・惑星物理学への貢献

銀河系内の星間物質と恒星の循環を研究する

# 原始星周辺のガス

- 原始星リンズ1551
  - 1981年に初めて双極分子流(分子ガスのアウトフロー; 緑矢印)が発見された天体
  - 1984年には原始星の周辺に回転するガスの円盤(赤矢印)を発見

Kaifu et al. (1984)

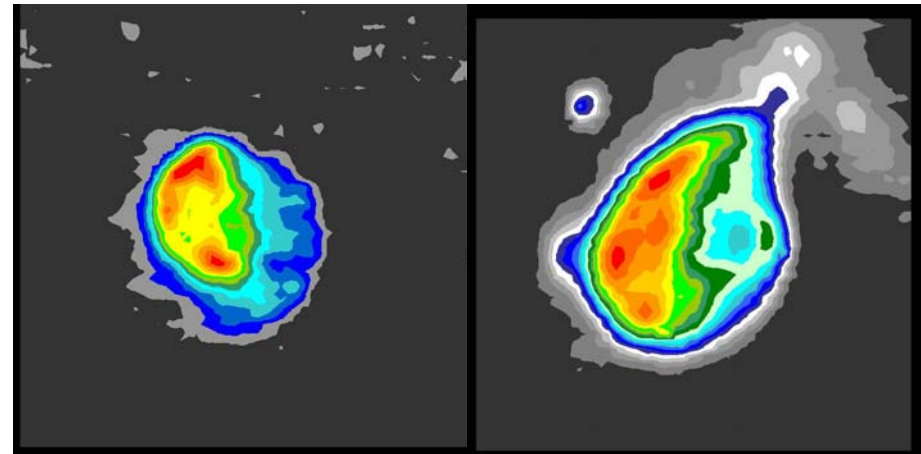




# 超新星爆発・残骸

- 超新星爆発
  - $>8M_{\odot}$ の大質量星の最後の爆発
  - 銀河系内に100年に1回程度発生
  - $10^{39}$ Jのエネルギーの解放、星間空間に広がる爆風
- 超新星残骸
  - 放出されたエネルギーが形成する残骸
- 超新星残骸の放射機構
  - 高エネルギー粒子と星間磁場による強いシンクロトロン放射

- 超新星残骸と銀河系
  - 銀河系内へのエネルギー注入
    - ショック
    - 高エネルギー粒子の加速機構と宇宙線の起源
  - 星間物質の進化

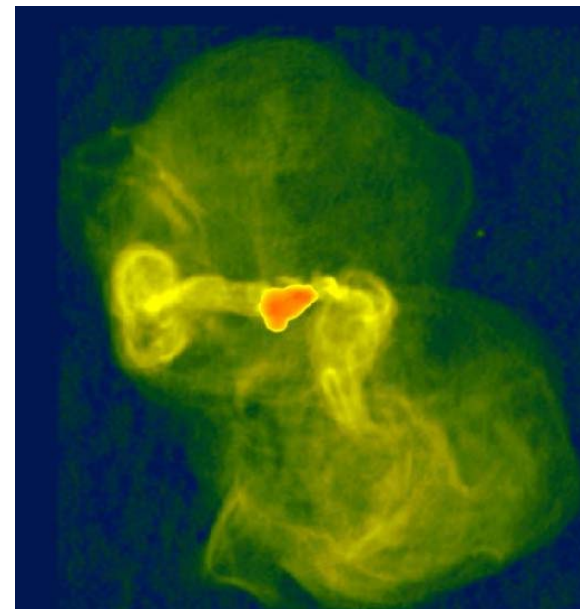
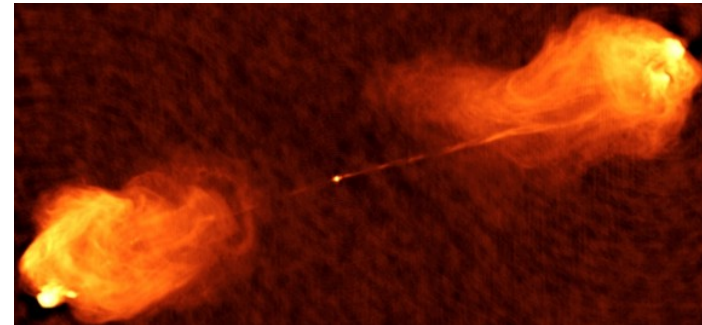


# パルサー

- 発見と研究の歴史
  - 回転する中性子星
  - バイナリパルサーと重力波
- パルスの性質
  - 高い規則性
- 放射メカニズム
  - 強い磁気圏と高エネルギー電子によるシンクロトン放射
  - 詳細な機構はいまだに不明
  - 直線偏波＋円偏波
  - 高エネルギー粒子の加速
    - 宇宙線の加速
- 様々なパルサー
  - ミリ秒パルサー
  - X線パルサー
- 銀河内の分布・運動と形成過程
  - 超新星爆発時の加速
- パルス・直線偏波の性質
  - 伝播効果(分散・ファラデー回転)を利用して距離を推定、銀河系内のプラズマ密度の推定
- パルスの正確さ
  - 距離の推定
  - 惑星を持つパルサー
  - グリッチと内部構造
  - 重力波の検出

# 活動銀河核1

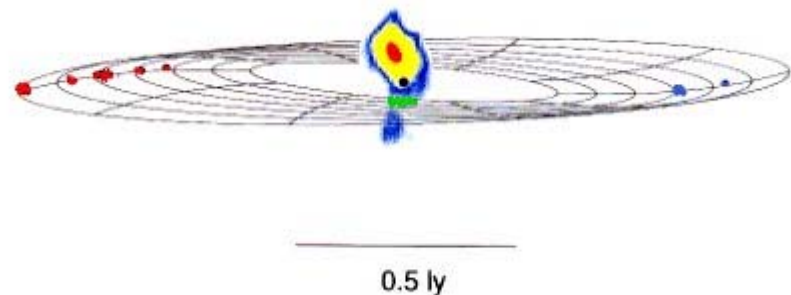
- クエーサーの発見
  - 電波天体3C273, 3C48
  - 光学観測による距離の決定
  - $10^{12}L_{\odot}$ の光度
- 活動銀河核
  - 銀河中心部のコンパクトな天体
  - 高光度、時間変動、シンクロトロン放射のジェット
- 電波観測
  - コア <1光年の点状天体
  - ジェット コアから伸びる構造
  - ロープ ジェットの先の広がった構造、コアからジェットを經由して流れた物質が蓄積している



# 活動銀河核2

- 電波コア・高速ジェット
  - 強度変動
  - シンチレーション
- ジェットと超光速現象
  - VLBI観測
  - コンプトン限界
  - ドップラー増幅効果
  - エネルギー等分配
- エディントン限界
- 高エネルギー粒子加速

- メガメーザ
  - 銀河中心部の強力なメーザ
  - 活動銀河核の1つの特徴
  - 活動銀河核中心領域の研究手法

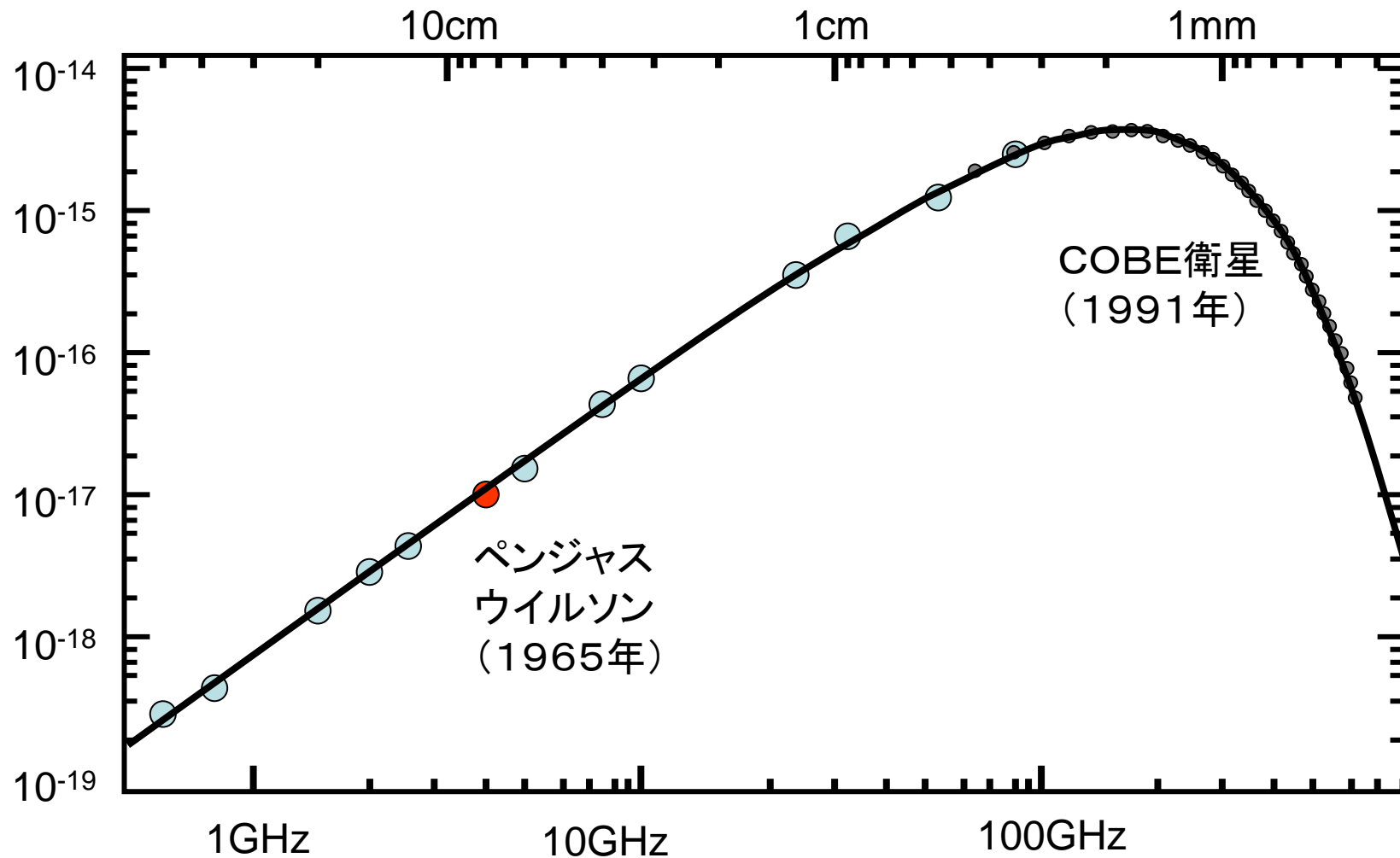


メガメーザ天体NGC4258のガス円盤

# 宇宙背景放射

- 現代の宇宙論
  - 宇宙はビッグバンで始まった
  - 宇宙初期は高温高密度。その熱放射が3K放射として現在も観測される
- 宇宙背景放射の発見
  - 衛星通信技術研究の副産物(1965年)
  - ほぼ等方的=宇宙論的
- 宇宙背景放射(3K放射)
  - ビッグバン宇宙論の最も重要な根拠
  - 現在観測できる最も古い宇宙の姿
  - 宇宙初期を研究する手がかりをもたらす
    - 温度揺らぎ
    - 宇宙論パラメータの精密化

# 宇宙背景放射のスペクトル



# 講義の段取り

- 宇宙電波の放射機構
  - 様々な天体が様々な電波放射をする。これを使って天体・宇宙を調べるために、電波放射の素過程を調べ、観測される電波から何を知ることができるかまとめる。
- 電波の観測方法
  - 現代の技術で宇宙電波をどのようにどこまで観測できるのかを説明する。
- 宇宙電波を用いた天体の観測
  - 個別の天体について上記の方法を当てはめながら考察する。