

# 宇宙科学II（電波天文学） 第6回

星の一生

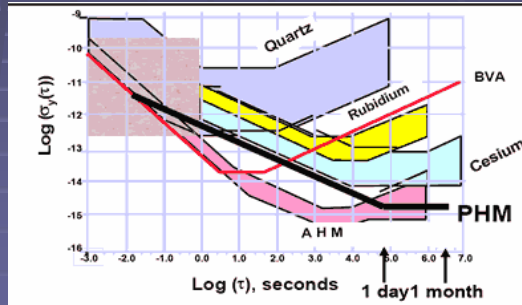
前回の復習

## 周波数標準(時計)の安定度

- アラン標準偏差 : Allan Standard Deviation (ASD,  $\sigma_y$ )  
周波数標準(時計)がある時間  $\tau$  の間にどれくらい安定かを表す。時計の安定度評価によく利用される指標。

大雑把には、  
1日で1秒狂う時計は  
 $\sigma_y \sim 1 / 86400 \sim 10^{-5}$   
( $\tau = 86400 \text{ sec}$ )

VLBIの要求精度は  
 $\sigma_y \sim 10^{-13}$   
( $\tau \sim 1 - 100 \text{ sec}$ )



高精度の周波数標準のアラン分散

Quartz: 水晶、AHM: 水素メーザー、Cesium: セシウム原子時計

## 黒体放射

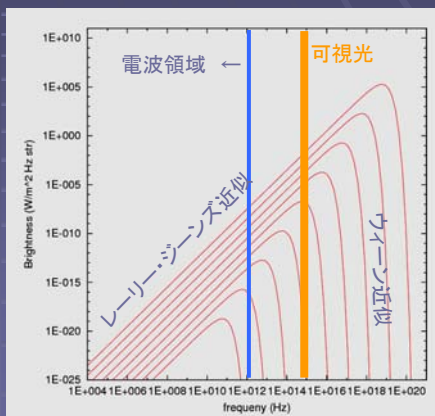
- 黒体(すべての周波数の電磁波を吸収し、再放射する仮想的物体)から出る放射

黒体放射の例 : 溶鋳炉からの光



八幡製鉄所

黒体放射の研究は、19世紀末に溶鋳炉の温度計測方法として発展



$B_\nu$ のプロット ( $10^0 \sim 10^8 \text{ K}$ )

## 黒体とプランクの放射公式

- 黒体の輝度を表す式

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

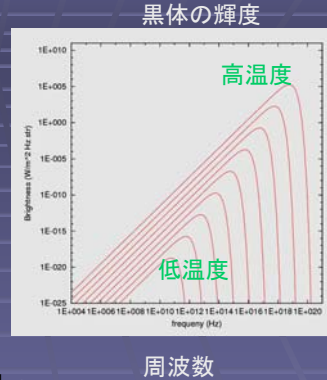
$\nu$  : 周波数、T : 黒体の温度

c : 光速度  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

h : プランク定数  $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J s}$

k : ボルツマン定数  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$

$B_\nu$  の単位例:  $\text{W / m}^2 \text{ Hz str}$  (単位立体角strあたりのフラックス)



## プランク放射の極大値

- プランクの放射公式で

$$dB_\nu/d\nu = 0, \quad dB_\lambda/d\lambda = 0$$

の条件から、極大値が求まる(計算略)

- 周波数のピーク

$$\nu_{\max} = 2.82 kT / h = 59 \times (T \text{ in K}) \text{ GHz}$$

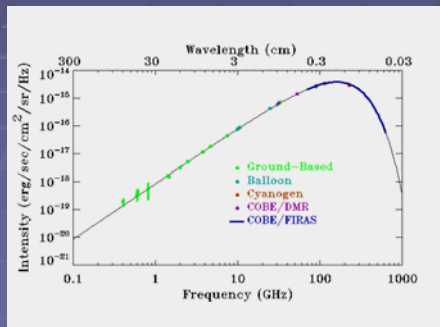
- 波長のピーク (ヴィーンの変位則)

$$\lambda_{\max} = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \times (T \text{ in K})^{-1} \text{ m}$$

T in K は絶対温度(K:ケルビン)で表した温度の値。摂氏0度=273 K

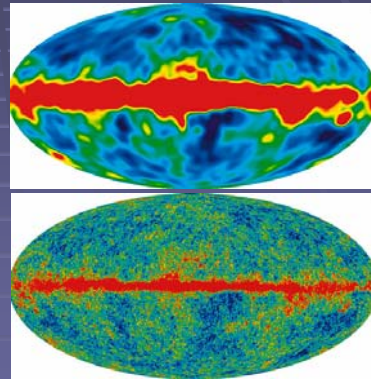
## 宇宙背景放射

- 宇宙は3Kの黒体放射で満たされている＝宇宙背景放射
- ビッグバン宇宙に対する最も重要な観測的証拠のひとつ  
(宇宙が過去に高温高密度であったことの証拠)



宇宙背景放射のスペクトル

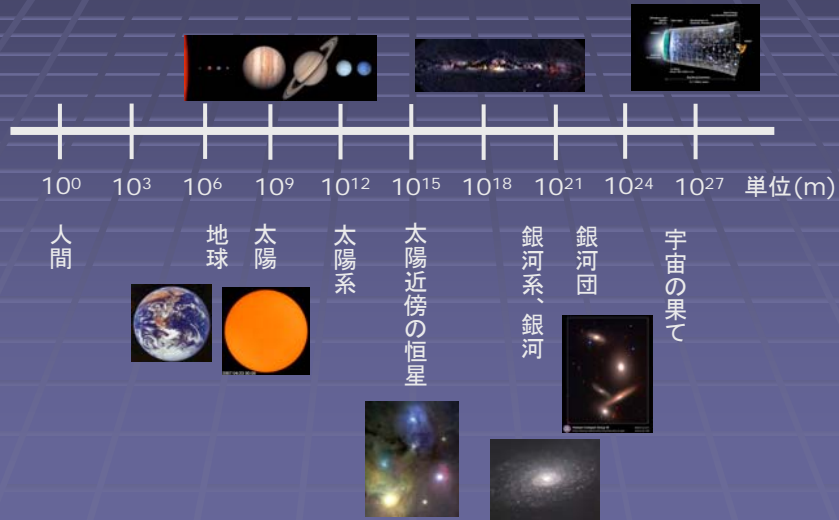
COBE(上)とWMAP(下)が電波でみた宇宙(中央は銀河面)



## 星の一生

# 宇宙の階層構造

- ログスケールで表示した宇宙の大きさ

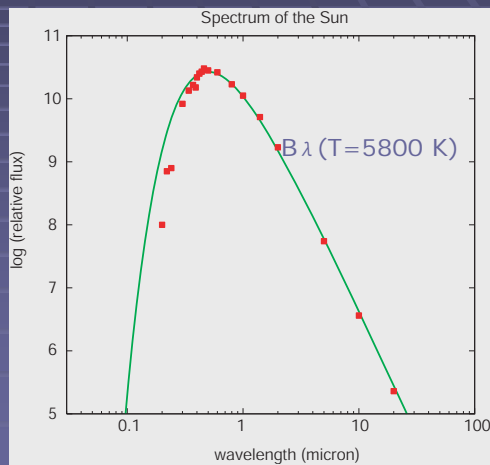


# 太陽: 恒星の代表格

- 太陽: 極めて普通の恒星
- 太陽の光球  
温度~5800度の黒体に近い
- $\lambda_{max} = 0.5 \mu m$   
→ 可視光線



SOHOが見た太陽



## 主系列星

- 太陽のような普通の恒星を主系列星という
- 中心部で水素の核融合が起きて輝く
- 質量は太陽の~0.1倍から~100倍  
(それより軽い星は核融合を起こさない)
- 星の色(温度)と等級に良い相関がある  
(色一等級関係)

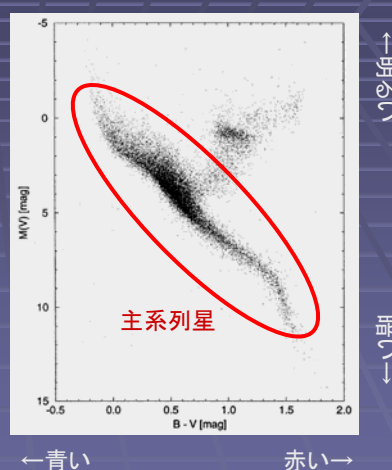


恒星の例  
(オリオン座)

## 色等級図(HR図)

- 星の色と明るさ(等級)の関係を表す。
- Hertzsprung-Russell図(HR図)とも呼ばれる。
- この図上で、太陽のような星は1本の主系列にのる

主系列: 明るい星ほど青い  
(明るい星ほど温度が高い)



## 星には一生がある

- 星は人間と同じように生まれて死ぬ

星間ガスが重力収縮して星が誕生



核融合反応で恒星として輝く(主系列)



核融合の燃料が無くなると燃え尽きる

主系列星は可視光で最も明るく、電波天文学の対象として取り上げられることは少ない。しかし、星の誕生と死は電波天文学でも重要な観測対象

## 星の誕生

# 星の誕生

- 星は星間ガスの重力収縮から生まれる。
- そのためには、ある程度密度が高く、温度が低い領域が必要:「星間分子雲」
- 誕生した星は周囲のガスを熱して電離する:「電離領域」
- 星が誕生している領域を「星形成領域」という。  
(通常、分子雲+電離領域)



星形成領域の代表例、オリオン星雲 (生まれたての若い星とその母体のガスからなる)

# 星が誕生するための条件

- 密度  $\rho$ 、温度  $T$  の一様なガス雲があったとき、その中の半径  $R$  の領域が重力でつぶれるための条件は？

ガスの重力エネルギー

$$E_g \sim GM^2 / R$$

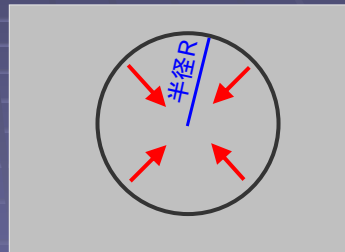
ガスの運動エネルギー

$$E_k \sim M c_s^2$$

$M$  は半径  $R$  の球の質量

$c_s$  はガスの音速 (内部運動速度) 密度  $\rho$ 、温度  $T$  の一様ガス

$G$  は重力定数 ( $G=6.6 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m s}^2$ )





## 星が誕生するための条件 II

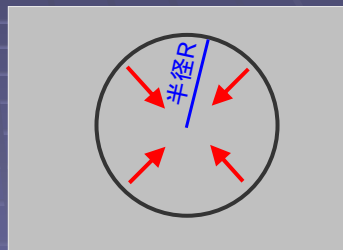
- 重力エネルギーが運動エネルギーよりも大きいときガスは収縮可能。そのための条件は

$$R_{\min}^2 \sim c_s^2 / G \rho$$

$R_{\min}$  はジーンズ長と呼ばれる。  
その半径内の質量  $M$  は

$$M \sim \rho R_{\min}^3$$

これをジーンズ質量と呼ぶ



密度  $\rho$ 、温度  $T$  の一様ガス

## ジーンズ質量

- 典型的な冷たい分子雲として、  
 $T \sim 10 \text{ K}$

$$n \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

さらに、

$$\rho = \mu m_H n \quad (m_H \text{ は水素原子質量})$$

$$c_s^2 = k T / \mu m_H$$

$$\mu = 2 \quad (\text{水素分子の平均分子量})$$

とすると、

$$M_{\min} \sim 1 M_{\text{sun}}$$

確かに太陽質量程度の星を重力収縮で作ることができる。

したがって、星が誕生する母体となるガスは低温 ( $T \sim 10 \text{ K}$ )、  
高密度 ( $n > 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ) と期待される。

## 星形成と分子輝線放射

### 輝線放射

- 原子・分子内の内部エネルギー遷移にともなう放射
- 物質ごと、遷移ごとに特定の周波数を持つ
  - どのような物質が存在するかを知ることが可能
  - ガスの運動速度を知ることが可能

## さまざまな輝線放射

- 原子の電子軌道遷移  
可視~紫外 水素のバルマー線など
- 分子振動  
赤外線 温室効果ガス(CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>Oなど)
- 分子回転  
電波 CO回転遷移線など
- 原子の超微細構造  
電波 HI21cm線など



## 宇宙における分子の例

例) H<sub>2</sub>, OH, CO, CS, SiO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, HCN, CH<sub>3</sub>OH  
など

2原子分子から複数核分子までいろいろ

一般に、これらの分子からの電波放射は低温、高密度領域を観測する手段として利用される。

ただし、宇宙でもっとも多い分子H<sub>2</sub>は、等核分子で双極子モーメントが0のため観測が難しい

## 分子回転遷移

- 分子の回転エネルギー遷移にともなう放射
- 2原子分子の場合

$$E = \frac{h^2}{8\pi^2 I} J(J+1)$$

ここで、 $I$ は慣性モーメント、 $J$ は回転量子数  
 ( $I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2$ )

- COの場合、たとえば $J=1 \rightarrow 0$ 輝線  
 なら

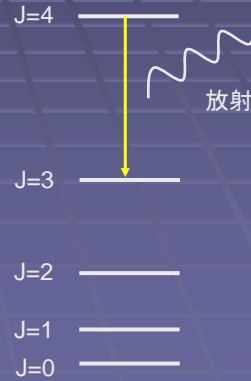
$$\nu = E/h \sim 115 \text{ GHz}$$

$$T \sim E/k \sim 5 \text{ K}$$

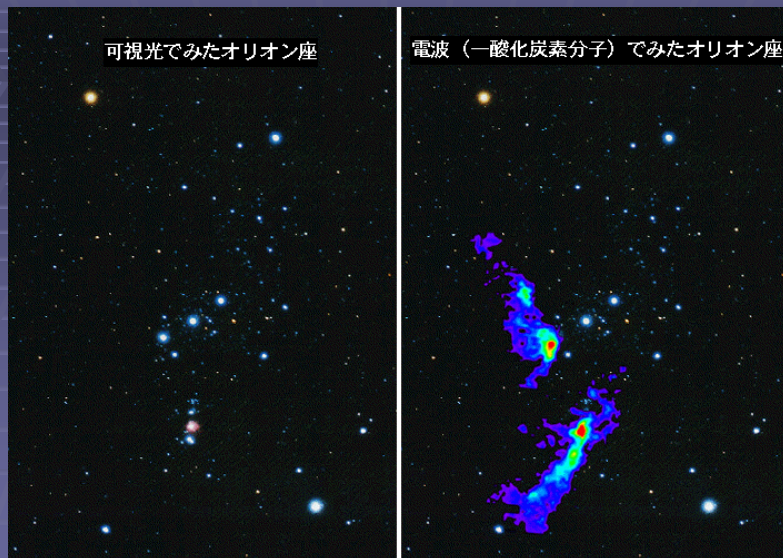
→ 極低温のガスから放射される



CO分子の回転とエネルギーレベル



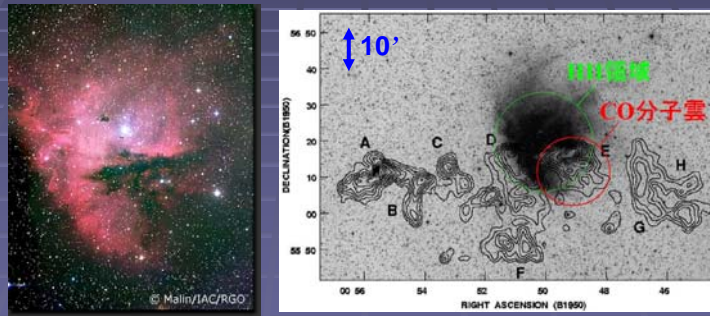
## オリオン座と分子雲



COにより低温度・高密度の分子ガスを検出できる。

## 分子ガスと若い星の競演

- 星形成領域では、分子雲内で星が生まれ、生まれた若い大質量星が周囲のガスを電離する

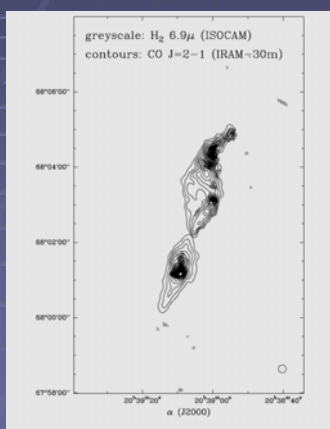


星形成領域NGC281の例 (左:光学写真、右:光学+CO分子)

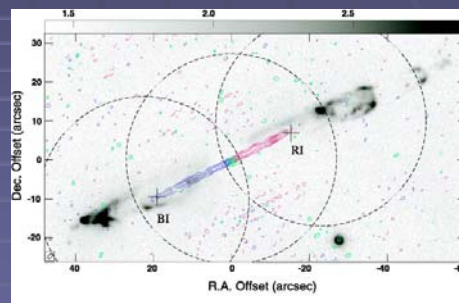
星形成領域では、冷たい分子ガス( $\sim 10\text{K}$ )と熱い電離ガス( $\sim 10^4\text{K}$ )が同じ領域に観測されることが多い

## 原始星からのジェット

- 分子の観測から誕生間もない星からの質量放出(ジェット)が見える



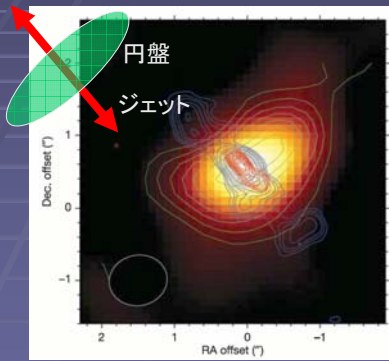
L1157 with CO and IR



HH211 with SiO (J=5-4) and IR

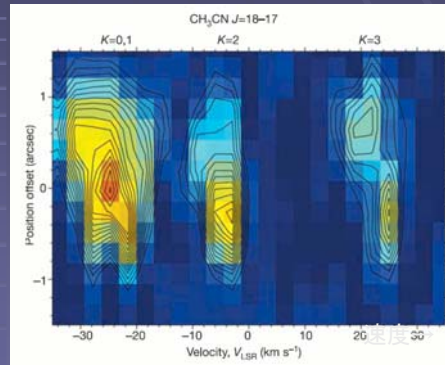
# CEP-A HW2の降着円盤

- Cep-A HW2: 大質量原始星(と期待される)



CH<sub>3</sub>CNおよび連続波のイメージ(SMA)

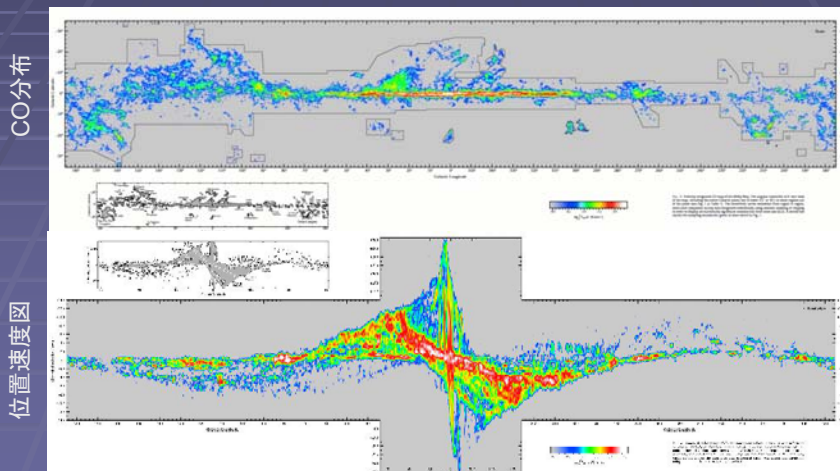
Patel et al. (2005) Nature



円盤に沿った位置-速度図  
速度勾配が回転円盤を示唆  
中心質量は15太陽質量と推定

# COで見た銀河系

- 銀河系全域でのサーベイから銀河系内の星形成の概観を得ることができる



CO分布

位置速度図

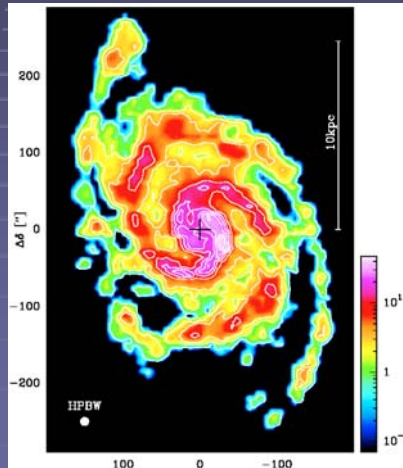
## 系外銀河の星形成領域

- 系外銀河の例 (M51)

高密度分子ガス(～星形成領域)で渦状腕が追える



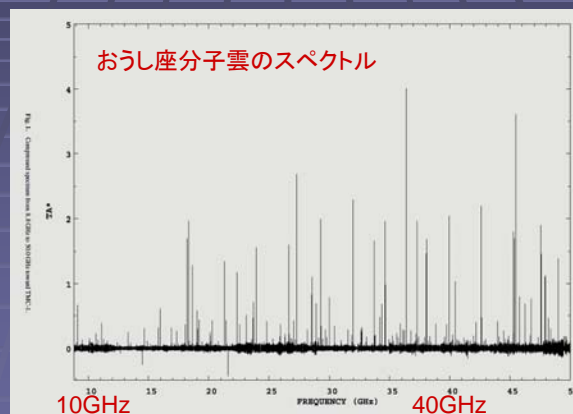
光学写真



CO  
マップ

## ラインサーベイ

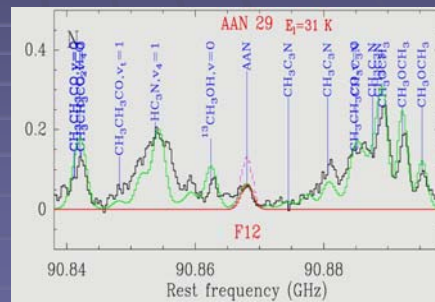
- 電波帯の様々な分子の輝線を系統的に探査することで、様々な分子の存在が確認できる



野辺山45m鏡でのラインサーベイ(8 – 50 GHz)。多数の分子輝線が見える。  
検出分子: CS, OCS, NH<sub>3</sub>, HNCO, ..., C<sub>6</sub>H, HCCNC, HNCCC, HC<sub>9</sub>Nなど38種

## アミノ酸の探査

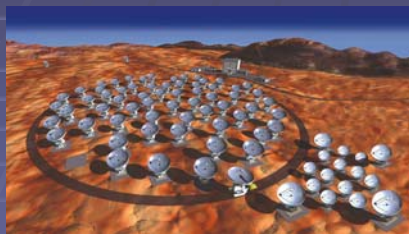
- 生命の源は宇宙からくるという説も(?)  
→ 分子雲中にアミノ酸があるかも。
- 現在のところ最も単純なアミノ酸(グリシン)もまだ未確認
- グリシン( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ )に似た分子アミノアセトニトリル( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$ )は検出
- グリシンも将来見つかる?



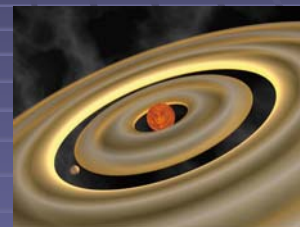
90GHz帯の分子輝線スペクトル

## ALMAと星・惑星形成

- ALMAの大きな目標のひとつは、惑星が形成される現場を直接捉えること



ALMAの想像図  
(上)とサイト(右)



惑星形成のイメージ





## まとめ：星形成と電波天文

- 星形成領域での冷たい分子ガスは、電波天文学の重要な観測対象
- 詳しい観測から宇宙において  
太陽のような星がどのように誕生するか  
惑星系がどのように誕生するか  
生命(の源)がどのように誕生するか

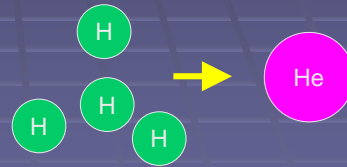
等を明らかにすべく研究が続けられている。

## 星の死

## 恒星のエネルギー源と寿命

- 太陽のような恒星は核融合を起こして輝く
- 核融合を起こす燃料がなくなると星は燃え尽きて死を迎える

- 主系列での核融合反応  
 $4\text{H} \rightarrow \text{He}$



したがって恒星中の水素が燃え尽きるのにかかる時間が星の寿命の目安に

## 核融合のエネルギー

- 質量とエネルギーは等価 :  $E = mc^2$
- 核融合で開放されるエネルギーは反応前後の質量差 ( $\Delta m$ ) による ( $E = \Delta m c^2$ )

水素 $^1\text{H}$ の質量	1.0078 u
ヘリウム $^4\text{He}$ の質量	4.0026 u
ヘリウム1個と水素4個の差	$\Delta m = 0.0286\text{ u}$
( $\Delta m / 4\text{u} \sim 0.7\%$ , 静止質量の0.7%を解放)	

u はおよそ陽子1個の質量( $m_{\text{H}} = 1.67 \times 10^{-27}\text{ kg}$ )に相当  
ヘリウム1個が生成されて解放されるエネルギー

$$E = \Delta m c^2 = 4.3 \times 10^{-12}\text{ J}$$

## 太陽の寿命

- 太陽の光度  $L_{\text{sun}} = 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$
- 太陽質量  $M_{\text{sun}} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$
- すべてが水素だとして核融合で取り出せるエネルギー総量  

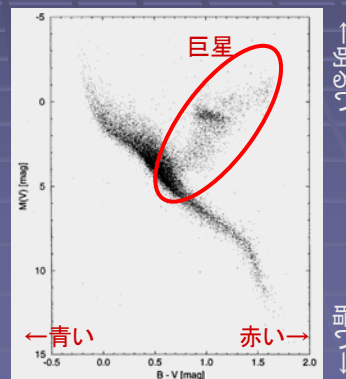
$$E = 0.007 M_{\text{sun}} c^2 = 1.3 \times 10^{45} \text{ J}$$
- すべての水素が燃えた場合の寿命  

$$t = E / L_{\text{sun}} = 1000 \text{ 億年}$$
- 実際には質量全体の10%程度が燃焼可能なので、太陽の寿命は約100億年である。

## 巨星

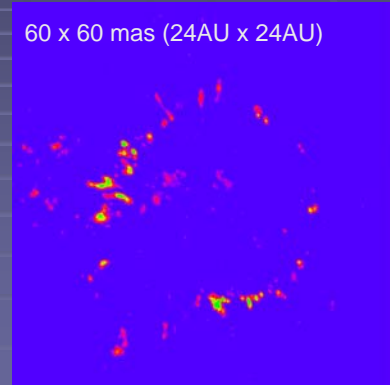
- 中心部で水素が燃え尽きた星は、ヘリウムコアの周囲で水素が燃える → 赤色巨星
- ヘリウムコアの温度があがるとヘリウム燃焼が始まり、やがて炭素のコアができ、周囲でヘリウムと水素が燃焼 → 漸近巨星(AGB星)
- 巨星になると半径が増大し、半径が数AUにもなる(太陽が巨星になると地球も飲み込まれてしまう)

赤色巨星と漸近巨星の模式図



## 巨星を分解して見る

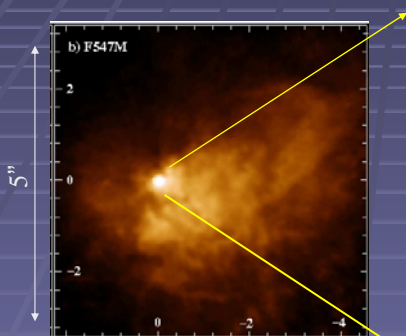
- 巨星は数AUの半径を持つが、光学観測ではその分解は難しい。一方、明るいメーザーを持つAGBをVLBIで観測すると、光球近傍のガスを分解できる。



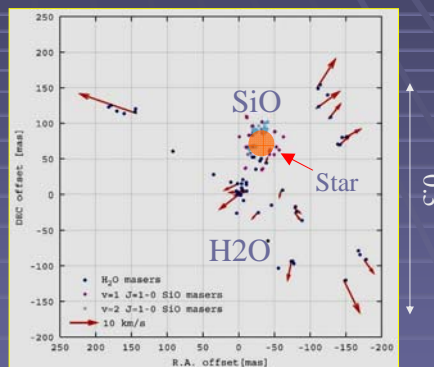
TX CamのSiOメーザー(VLBA)

## 巨星からの質量放出

- 大犬座VY星: 進化した大質量星(超新星爆発目前?)



HSTの画像

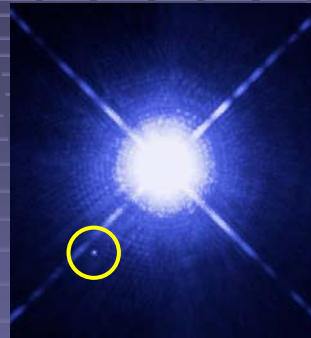


VERAで見たH<sub>2</sub>OとSiOメーザーガスの運動が捉えられている。

極めて明るい星の輻射圧によって外層が吹き飛ばされている

## 星の最後

- 太陽質量の8倍程度までの星は、最後に炭素のコアが残り、惑星状星雲を経て白色矮星となる
- 太陽質量の8倍以上の星は、超新星爆発を起こし、中性子星やブラックホールを形成する。

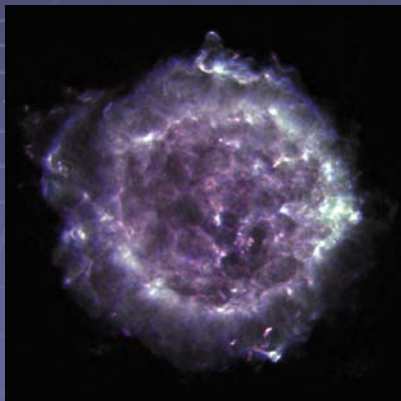


シリウスとその伴星シリウスB  
後者はシリウスより温度が高いが100万分の1の明るさしかない。シュテファンボルツマン則から半径が極めて小さく、超高密度の天体であることがわかる。

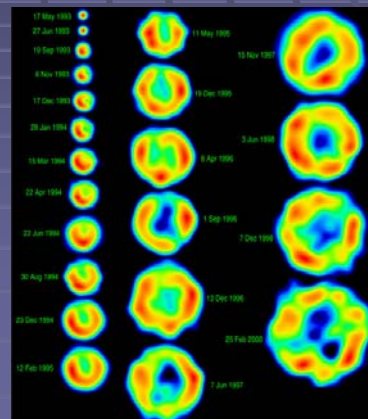
## 超新星残骸

- 超新星残骸での電子加速+磁場によりシンクロトロン放射で電波でも明るく輝く

超新星残骸 Cas A (VLA)

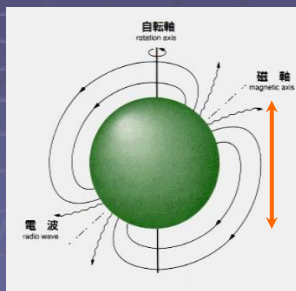


超新星残骸 SN1993J (M81)  
VLBAによるモニターから系外銀河の超新星残骸の膨張が見える

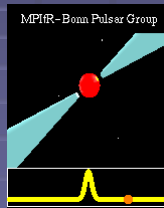


# パルサー

- 定期的なパルスを発する星
- 高速回転する中性子星で、超新星爆発で形成される



パルサー(中性子星)の模式図



かに星雲 : 1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つかった