

宇宙科学II (電波天文学)
第6回

ビッグバン宇宙(続)
&
星の一生

前回の復習

黒体放射

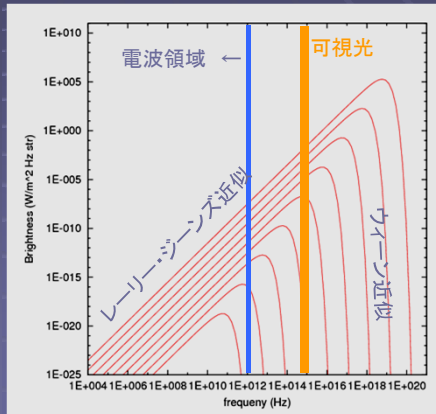
- 黒体(すべての周波数の電磁波を吸収し、再放射する仮想的物体)から出る放射

黒体放射の例：溶鉱炉からの光



八幡製鉄所

黒体放射の研究は、19世紀末に溶鉱炉の温度計測方法として発展



B_vのプロット (10⁰ ~ 10⁸ K)

黒体放射関連の式

黒体放射の輝度

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

単位面積あたりの放射強度 (シュテファン・ボルツマン則)

$$I = \iint B_{\nu} \cos \theta \, d\nu d\Omega = \pi \int B_{\nu} d\nu = \sigma T^4 \quad (2)$$

単位周波数あたりのエネルギー密度

$$\varepsilon_{\nu} = \frac{4\pi}{c} B_{\nu}, \quad (3)$$

エネルギー密度

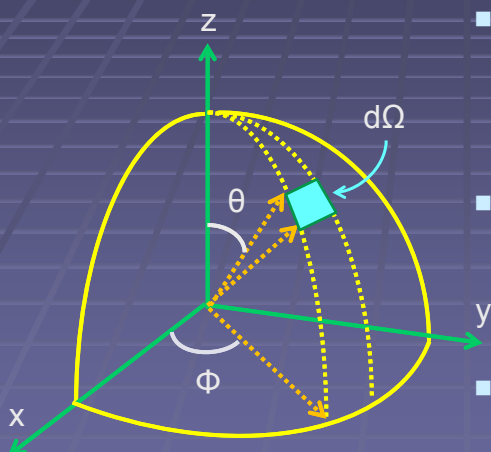
$$\varepsilon = \int \varepsilon_{\nu} d\nu = \frac{4\pi}{c} \int B_{\nu} d\nu = \frac{4\sigma}{c} T^4 \quad (4)$$

放射の圧力 (参考：光子の運動量 $p = E/c$)

$$P = \frac{2}{c} \iint B_{\nu} \cos^2 \theta \, d\nu d\Omega = \frac{4\pi}{3c} \int B_{\nu} d\nu = \frac{\varepsilon}{3} \quad (5)$$

すべて温度で決まる

補足: 立体角について



- 半径1の球上の面素
 $d\Omega = d\theta \times \sin\theta \, d\phi$

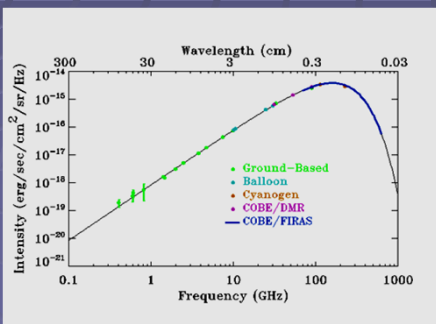
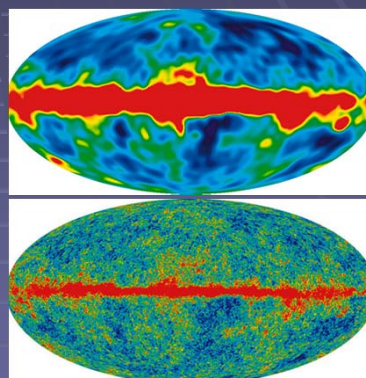
- 立体角積分
 $\int d\Omega = \iint \sin\theta \, d\theta \, d\phi$

- 全立体角の場合
 $\int d\Omega = 4\pi$

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)

COBE(上)とWMAP(下)が電波でみた宇宙(中央は銀河面)



宇宙背景放射のスペクトル

宇宙背景放射 と ビッグバン宇宙(続)

アインシュタイン方程式

- アインシュタイン方程式(一般相対性理論, 1915年)
時空の構造(左辺)と物質(右辺)の関係式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}.$$

$R, R_{\mu\nu}$ は計量テンソル $g_{\mu\nu}$ によって決まる量
(含む微分)

$T_{\mu\nu}$ はエネルギー-運動量テンソル

Λ は任意の定数(アインシュタインの宇宙定数)

- 上式から時間、空間に対する微分方程式が得られる。
(テンソルは4x4、ただし対称性より式は最大10本)

ロバートソン・ウォーカー時空

- 計量 $g_{\mu\nu}$: 時空の構造を表す量
- ロバートソン・ウォーカー計量
一様等方宇宙を表す計量

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right].$$

- $a(t)$ はスケール因子。時間変動する。
現在($t=t_0$)において $a(t_0)=1$
- K は宇宙の曲率(ユークリッド空間からのずれ)

フリードマン方程式

- アインシュタイン方程式とロバートソン・ウォーカー計量から以下の関係式が得られる(1922年)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \varepsilon + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{Kc^2}{a^2}$$

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right) = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\varepsilon + 3P) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

ε はエネルギー密度(ρc^2), P は圧力(共に時間の関数)

スケール因子の時間微分を含む微分方程式であり、特殊な解を除いて宇宙は変動(膨張or縮小)することがわかる。

エネルギー密度、圧力、温度

- 2本の方程式から2回微分項を消去すると

$$\frac{d\varepsilon}{da} = -\frac{3}{a}(\varepsilon + P)$$

という関係式を得る。

- 通常の場合P=0とみなせ、 $\varepsilon(=\rho c^2) \propto a^{-3}$
- 光子など相対論的な物質(光速度で運動)の場合、 $P=\varepsilon/3$ より、 $\varepsilon \propto a^{-4}$
- 輻射(光子)については $\varepsilon \propto T^4$ の関係より、

$$T = \frac{T_0}{a}, \quad (T_0=2.7\text{Kは現在の輻射温度})$$

宇宙のパラメーター

- 宇宙を記述するパラメーターを以下で定義する。

ハッブル定数 $H_0 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)_{t=t_0}$

臨界密度と密度パラメーター $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}, \quad \Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_c},$

宇宙項パラメーター $\lambda_0 = \left(\frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}\right)$ ρ_0 は現在の密度

曲率パラメーター $k_0 = \left(\frac{Kc^2}{H_0^2}\right)$

ハッブル定数は時間の逆数の次元、臨界密度は質量密度の次元、他の3つは無次元

無次元化した方程式

- フリードマン方程式の第一式を $\tau = H_0 t$, 等を用いて無次元化すると

$$\left(\frac{da}{d\tau}\right)^2 = \Omega_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) a^2 + \lambda_0 a^2 - k_0,$$

ただし、現在 $a=1$, $da/d\tau=1$ より

$$\Omega_0 + \lambda_0 - k_0 = 1$$

- すなわち、宇宙の進化は $(H_0, \Omega_0, \lambda_0)$ の3パラメーターと ρ の関数形が与えられれば決まる。

密度のふるまい

- 宇宙の密度分布は通常物質(非相対論的物質)および相対論的物質の和

$$\Omega_0 \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\Omega_{N0}}{a^3} + \frac{\Omega_{R0}}{a^4},$$

このときのスケール因子の方程式は

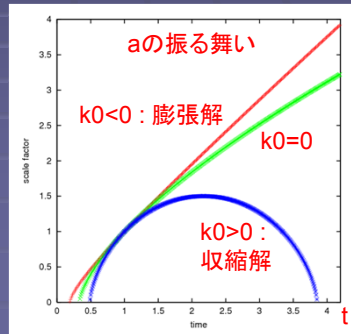
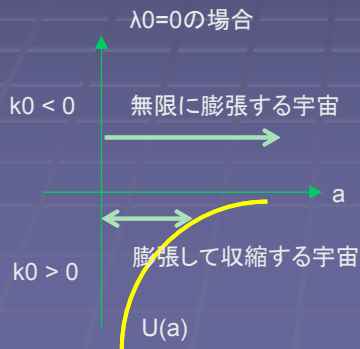
$$\left(\frac{da}{d\tau}\right)^2 = \frac{\Omega_{N0}}{a} + \frac{\Omega_{R0}}{a^2} + \lambda_0 a^2 - k_0,$$

スケール因子のふるまい

- スケール因子に関する方程式は、ポテンシャル中の1次元運動と同じ形

$$\left(\frac{da}{d\tau}\right)^2 + U(a) = -k_0,$$

$$U(a) = -\frac{\Omega_{N0}}{a} - \frac{\Omega_{R0}}{a^2} - \lambda_0 a^2.$$



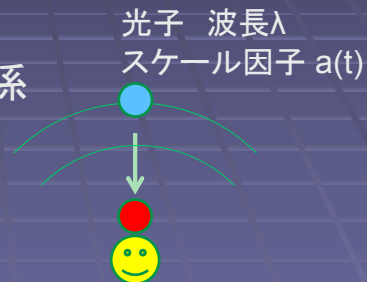
赤方偏移

- 宇宙を伝播する光子の波長は、スケール因子の変化に伴って変化する。

- 波長とスケール因子の関係

$$\lambda_{\text{obs}} = \frac{a(t_0)}{a(t)} \lambda = \frac{\lambda}{a},$$

$E=hc/\lambda$ の関係から光子のエネルギーも変化する



光子 波長 λ_{obs}
スケール因子 $a(t_0)=1$

宇宙背景放射

- 過去にスケール因子が現在より小さければその分温度が上昇

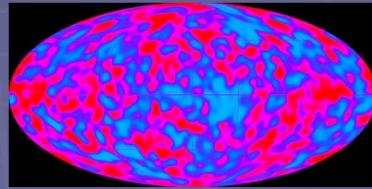
$$T = \frac{T_0}{a},$$

- 物質が電離するくらい温度が高い状態では、多数の電子によって光子が散乱されるため、宇宙が不透明に → 宇宙全体が黒体放射で満たされる

- 宇宙の晴れ上がり(電子散乱が効かなくなる状態)は、 $T \sim 3000 \text{ K}$ で起こる

$$\rightarrow a \sim 1/1000$$

- このときの黒体放射(約3000K)が赤方偏移によって2.7Kの宇宙背景放射として見える



宇宙背景放射の発見

- 宇宙背景放射の発見 (1965年)
ペンジャス、ウィルソン



宇宙の温度は絶対温度3度 (マイナス270度)

The Nobel Prize in Physics 1978

"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"

"for their discovery of cosmic microwave background radiation"

Pyotr Leonidovich Kapitsa	Arno Allan Penzias	Robert Woodrow Wilson
1/2 of the prize USSR	1/4 of the prize USA	1/4 of the prize USA
Academy of Sciences Moscow, USSR b. 1894 d. 1984	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA b. 1933 (in Munich, Germany)	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA b. 1936

COBE衛星

- COsmic Background Explorer
- 宇宙背景放射を精密計測する衛星(米国 NASA)
- 1989年に打ち上げ
- 周波数 30 ~ 90 GHz ほか
分解能~7度
- 宇宙背景放射が黒体輻射であることを高い精度で確認し、
一方、その温度揺らぎを初めて発見した。

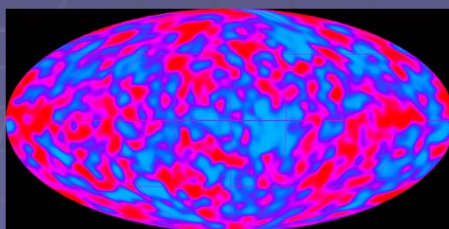


宇宙背景放射のゆらぎの検出

- 構造形成の種となるゆらぎを発見
 $\Delta T/T \sim 10^{-5}$

宇宙に構造(銀河、星など)が
形成するために必要な種を発見

COBEがみた宇宙背景放射の揺らぎ



2006年度ノーベル賞



The Nobel Prize in Physics 2006

"For their discovery of the blackbody form and anisotropy of the
cosmic microwave background radiation"

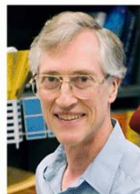


Photo: NASA

John C. Mather

① 1/2 of the prize

USA

NASA Goddard Space
Flight Center
Greenbelt, MD, USA

b. 1946

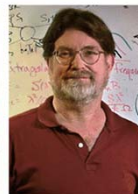


Photo: R. Kaltschmidt/LBNL

George F. Smoot

① 1/2 of the prize

USA

University of California
Berkeley, CA, USA

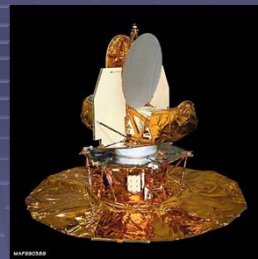
b. 1945

背景放射の揺らぎの意味

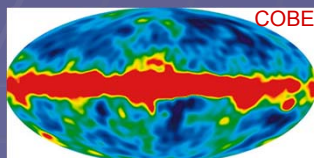
- 揺らぎの検出の意義
現在の宇宙に存在する構造の種が確認された。
ビッグバン宇宙論の枠組みで、現在の宇宙の構造(銀河、銀河団など)を説明することが可能に
- 2つの重要な問題
 - 1) ゆらぎが小さすぎる
通常物質だけから宇宙ができているとすると重力で構造(銀河、星)が成長するのに宇宙年齢以上かかる
→ 通常物質と異なる暗黒物質が必要
 - 2) どの方向を見ても一様
因果関係の無いはずの場所だが...
→ インフレーション?

WMAP

- COBEよりもさらに高分解能で揺らぎを観測する衛星(米国)(2001年打ち上げ)
- 口径1.5m、周波数 22 – 90 GHz
- $\Theta = \lambda / D \sim 0.3 \text{ deg}$ (@ 40GHz)
(COBEは $\theta \sim 7 \text{ deg}$)

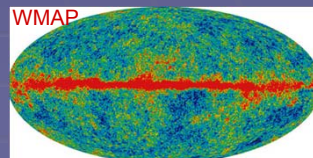


WMAP衛星



COBE

全天マップの比較
COBE → WMAP



WMAP

WMAPの成果

- ゆらぎの角度相関の測定から宇宙の基本構造(宇宙論パラメーター)を決定

- 代表的なもの

宇宙の組成

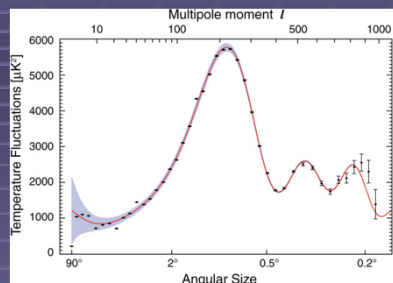
ダークマター 23% (Ω_0)

ダークエネルギー 72% (λ_0)

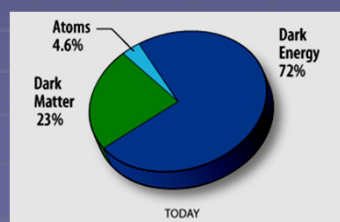
バリオン 5% (Ω_b)

宇宙年齢 137億年 など

Spiegel et al. (2003) : すでに6000回以上引用されているメガヒット論文!



背景放射の相関の角度スペクトル



宇宙の組成

ビッグバン宇宙論の三大証拠

- 宇宙膨張(ハッブルの法則, 1929年)
遠い銀河ほど大きな後退速度を持つ
- 元素合成(1948年)
宇宙における元素組成(水素~75%, ヘリウム~25%)
は宇宙初期の高温状態から説明可能
- 宇宙背景放射(1965年)
宇宙が昔高温、高密度であったことの痕跡

ハッブルの法則

- 近傍の銀河の距離 l と後退速度 v は比例する

$$v = H_0 l$$

- 銀河を光が出た時刻 t での $a(t)$

$$a(t_0 - \delta t) = a(t_0) - \dot{a}(t_0)\delta t = 1 - H_0\delta t,$$

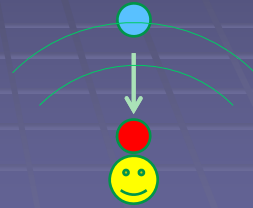
- 伝播時間と距離の関係

$$\delta t \approx \frac{l}{c},$$

- 後退速度

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda}{\lambda} = \frac{1}{a} - 1 \approx H_0 \frac{l}{c}$$

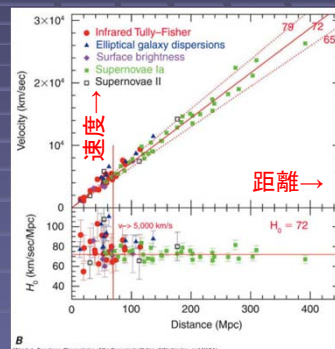
光子 波長 λ
スケール因子 $a(t)$



光子 波長 λ_{obs}
スケール因子 $a(t_0)=1$

ハッブルの法則 II

- エドウィン・ハッブル(1889~1953)が1929年に発見



最新の
観測結果

- 最新の値: $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$ (+/-2)
- H_0 の逆数は宇宙年齢の目安 ($1/H_0 \sim 135$ 億年)

ビッグバン宇宙論の三大証拠

- 宇宙膨張(ハッブルの法則, 1929年)
遠い銀河ほど大きな後退速度を持つ
- 元素合成(1948年)
宇宙における元素組成(水素~75%, ヘリウム~25%)
は宇宙初期の高温状態から説明可能
- 宇宙背景放射(1965年)
宇宙が昔高温、高密度であったことの痕跡

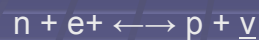
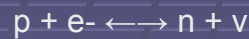
宇宙初期の物質の進化

- $t < 10^{-4}$ sec
クォーク・グルーオンプラズマ
- $t \sim 10^{-4}$ sec
陽子、中性子生成。同数で平衡状態
- $t \sim 1$ sec
弱い相互作用が効かなくなり、陽子、中性子数が凍結 (計算によると約7:1)
- $t \sim 10^2$ sec
元素合成

ビッグバン元素合成 I

ヘリウムが25%の理由

- $t < 1 \text{ sec}$ 以下では陽子と中性子は平衡状態で同数



- 弱い相互作用が効かなくなると平衡がやぶれる。その時の温度で陽子・中性子比が決まる。
- 元素合成が行われる時刻($t \sim 100 \text{ sec}$)での陽子・中性子比は理論計算から約7:1
- 中性子がすべてHeに取り込まれると

$$X_{\text{He}} = 4(N_n/2) / (N_p + N_n) = 0.25 !$$

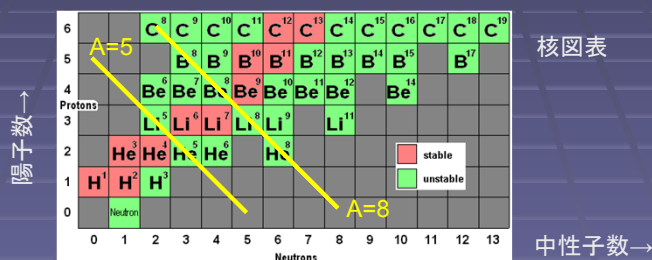


ビッグバン元素合成 II

ヘリウムより重い元素の生成がほとんど進まない理由

- 質量数5, 8の安定な元素がない

He + p, He + n, He + He などの反応が起こらない



- 星の中心での元素合成にくらべて密度が低く、

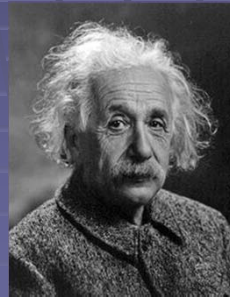
$$3\text{He} \rightarrow 12\text{C}$$

 などの3体反応はおきない。 → 水素75%, ヘリウム25%

ビッグバン宇宙 まとめ

- 理論的に予想され、3大証拠を含む多数の科学的証拠により実証された現代宇宙観の根幹である
(常識的には信じられないかもしれないが...)

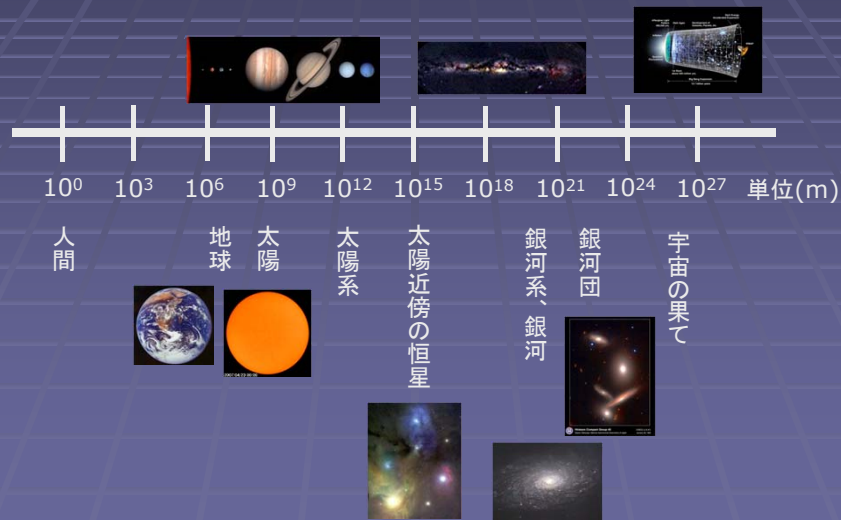
アインシュタイン自身も最初は
信じなかった...
(宇宙項の導入とその後の
撤回。しかし、宇宙項は現在
その存在が確実)



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

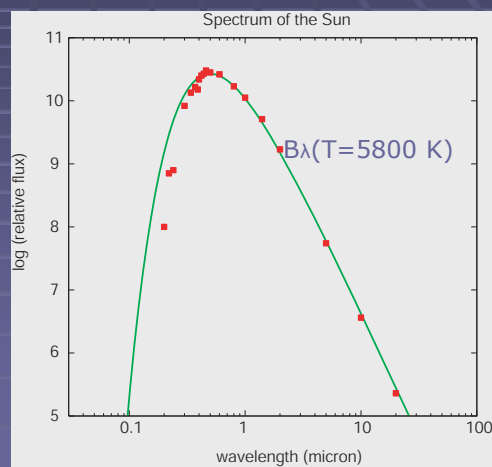


太陽: 恒星の代表格

- 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
- $\lambda_{max} = 0.5 \mu\text{m}$
→ 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)

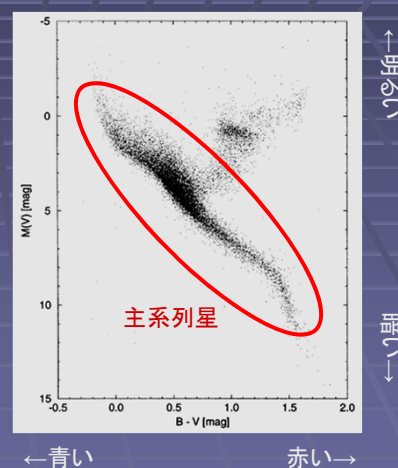


恒星の例
(オリオン座)

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 ρ 、温度 T の一樣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

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

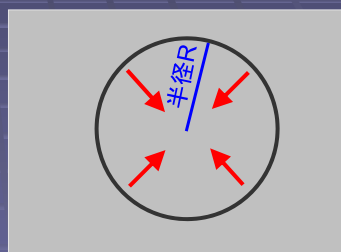
ガスの運動エネルギー

$$E_k \sim M c_s^2$$

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 ρ 、温度 T の一樣ガス

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

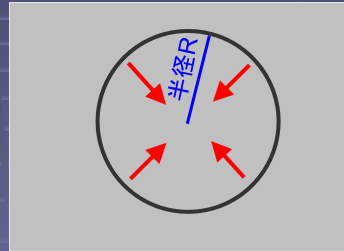
- 重力エネルギーが運動エネルギーよりも大きいときガスは収縮可能。そのための条件は

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

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 ρ 、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、
 $\rho = \mu m_H n$ (m_H は水素原子質量)
 $c_s^2 = k T / \mu m_H$
 $\mu = 2$ (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。このような低温ガスはミリ波の電波で観測される。

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(CO₂, H₂O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) H₂, OH, CO, CS, SiO, NH₃, H₂O, HCN, CH₃OH
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H₂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

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

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

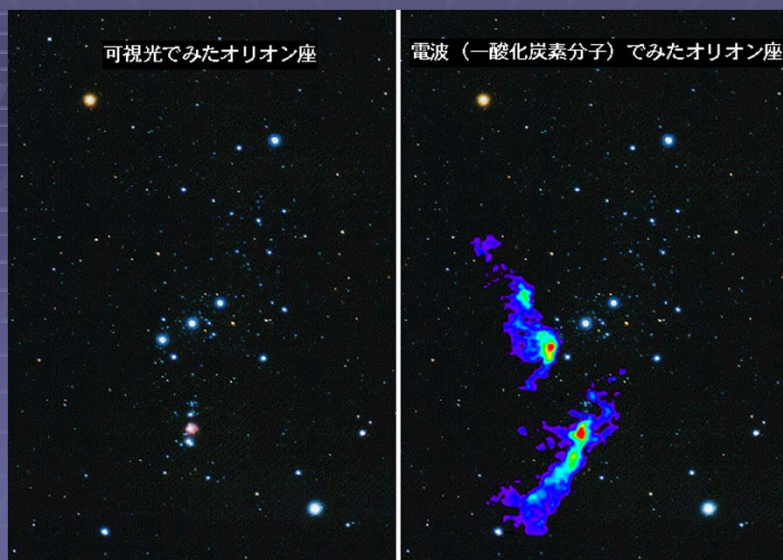
→ 極低温のガスから放射される



CO分子の回転とエネルギーレベル



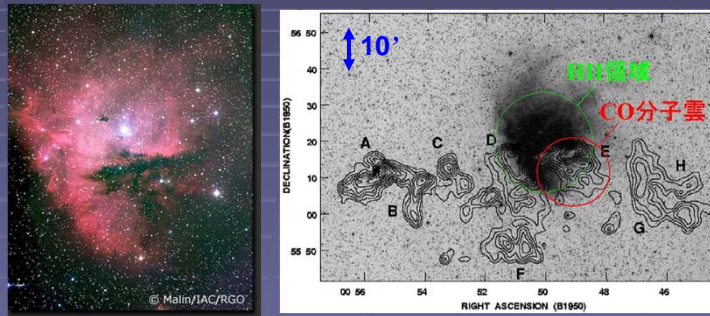
オリオン座と分子雲



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

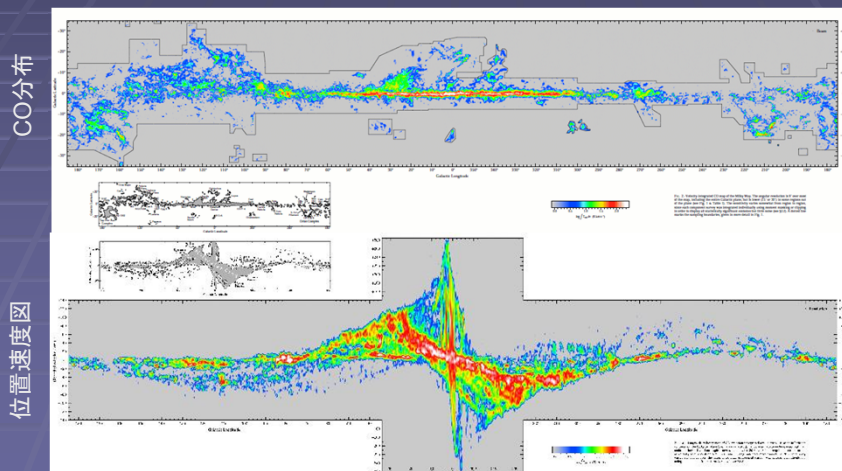


星形成領域NGC281の例 (左:光学写真、右:光学+CO分子)

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

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



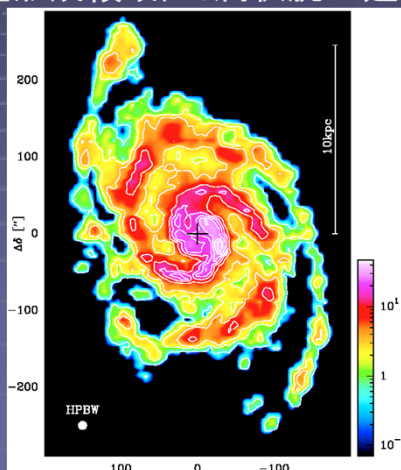
系外銀河の星形成領域

- 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



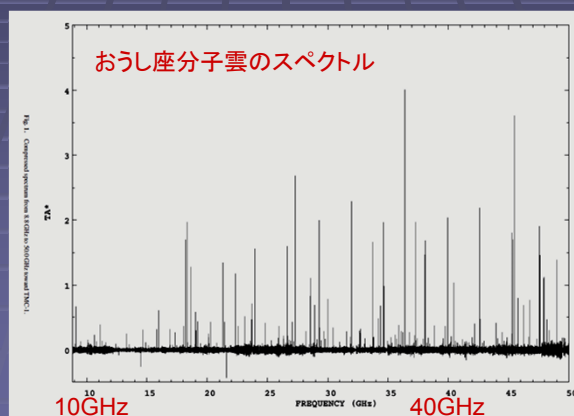
光学写真



CO
マップ

ラインサーベイ

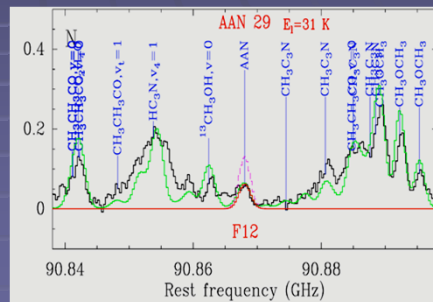
- 電波帯の様々な分子の輝線を系統的に探査することで、様々な分子の存在が確認できる



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, NH₃, HNCO, ..., C₆H, HCCNC, HNCCC, HC₉Nなど38種

アミノ酸の探査

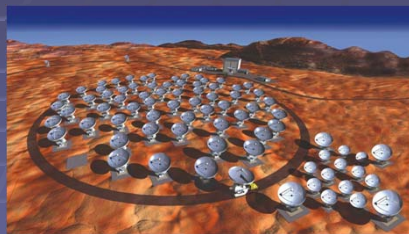
- 生命の源は宇宙からくるという説も(?)
→ 分子雲中にアミノ酸があるかも。
- 現在のところ最も単純なアミノ酸(グリシン)もまだ未確認
- グリシン($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$)に似た分子アミノアセトニトリル($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$)は検出
- グリシンも将来見つかる?



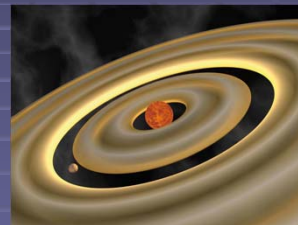
90GHz帯の分子輝線スペクトル

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。