

* 自然界の4つの力

重力

電磁気力

強い力

弱い力



原子核を結合

ハート破壊など

させる力

起こす力

働く距離

働く距離

短い

長い

反重力はない。

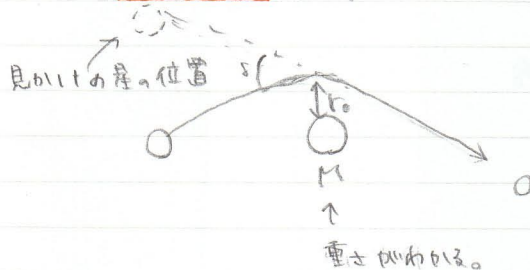
働く距離 長 } により、宇宙の運動を支配

宇宙の階層構造

宇宙全体	100 億光年	(10^{26} m)
大規模構造	1 億光年	(10^{24} m)
銀河団	1 千万光年	(10^{23} m)
銀河	10 万光年	(10^{21} m)
星団	1 ~ 1 千光年	($10^{16} \sim 10^{19} \text{ m}$)
惑星	④は①の $\frac{1}{100}$	($10^6 \sim 10^7 \text{ m}$)
恒星	④程度	($10^8 \sim 10^{11} \text{ m}$)

< 大規模構造 >

宇宙は等方一様で (はたして) (かつてハッブル構造という)

宇宙の年齢 137 ± 1 億年* 重力レンズ 効果光路は重力により
曲けられる。

$$\delta = \frac{4GM}{c^2 r_0}$$

ハッブル宇宙望遠鏡などの活躍で重力レンズ効果が発見
されている。 ダーク・マター などの存在を示唆すると同時に、
重力源の分布についても様々な情報を示している。

ハッブル宇宙膨張則

$$v = H_0 r$$

v : 銀河の後退速度

H_0 : ハッブル定数

r : 銀河との距離

どこを中心と考えるまい。

- v は、銀河から来る光の赤方偏移のドップラー効果によるものであると決定される。
- H_0 が決定されると、宇宙年齢がわかる。

$$t_1 = \frac{r_1}{v_1} = \frac{1}{H_0}$$

$$t_2 = \frac{r_2}{v_2} = \frac{1}{H_0}$$

⋮

$$t_{\text{universe}} = \frac{1}{H_0}$$

つまり過去に あり一点から宇宙ははじまったとわかるから、

$H_0 = 75 \text{ km/s (Mpc) とすると、}$

$$t_{\text{universe}} = \frac{10^6 \times 3 \times 10^{16} \text{ m/s}}{75 \times 10^3} = 4 \times 10^{17} \text{ s} = 1.26 \times 10^{10} \text{ yr}$$

(1 pc $\equiv 3 \times 10^{16} \text{ m}$)

宇宙膨張の等速度であり、 t が保証されているので、多少の変更は許される。

<ドップラー効果>

速度が大きい ($v \sim c$) の場合

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

赤方偏移

$$z \equiv \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$$

宇宙の距離、測り方

・ レーザ測距

・ 三角測量

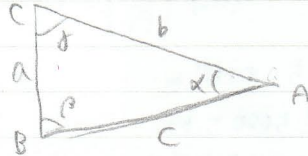
BCがわかれている
とする。

正弦定理から

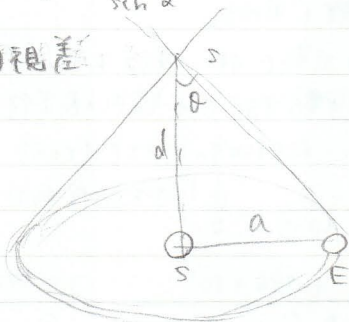
$$b = a \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$$

$$c = a \frac{\sin \delta}{\sin \alpha}$$

レーザの光の進む時間 → 距離



・ 年周視差



$$1 \text{ 角度秒} = \frac{\pi}{180 \times 60 \times 60} \text{ (rad)}$$

1pc: 年周視差が1角度秒
に対応する距離

・ 宇宙はここを登る

・ レーザエコー実験 → 地球軌道、半径決定

→ 太陽近傍の星の距離決定 (年周視差)

→ 太陽近傍のセファイド変光星の距離決定

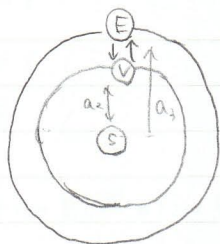
→ セファイド型変光星の絶対光度決定

→ " " " " 周期 - 光度関係を導出

→ 近傍銀河のセファイド変光星の周期から絶対光
度と決定→ セファイド型変光星の見た光度と絶対光度
を比較

→ 近傍銀河の距離決定

① 地球軌道の長半径・太陽質量の決定

地球と金星の距離を地上から
発射された電波(光速)が
金星表面に届くまでとどく
時間を測ることによって決定できる。これを レーザエコー実験 という。

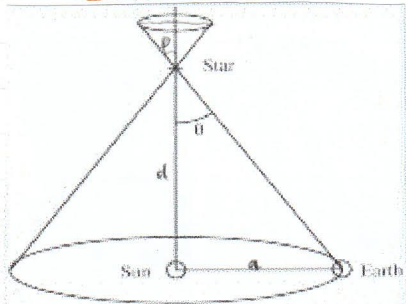
$$a_1 - a_2 = \frac{1}{2} ct$$

ケプラーの第三法則

$$(a_2)^3 \left(\frac{2\pi}{P_2} \right)^2 = GM_0 \quad (a_3)^3 \left(\frac{2\pi}{P_3} \right)^2 = GM_0$$

$$\begin{aligned} \text{よって} \quad a_3 &= 1.495 \times 10^{11} \text{ m} \\ &= 1 \text{ 億 } 5000 \text{ 万 km} \\ &= 1 \text{ AU (天文単位)} \end{aligned}$$

$$M_0 = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$$

② 年周視差から太陽近傍までの距離を求める。

地球の公転に伴い、星は天球上を
楕円運動する。この楕円の長半径を
角度で表す(1-時の大よそ (rad))

$$d = \frac{a}{\tan p} \approx \frac{a}{p} \quad p \text{ を角度秒で表す (p) と、}$$

$$d = \frac{1.496 \times 10^{11}}{\pi p / (180 \times 60 \times 60)} = \frac{3.0857 \times 10^{16}}{p}$$

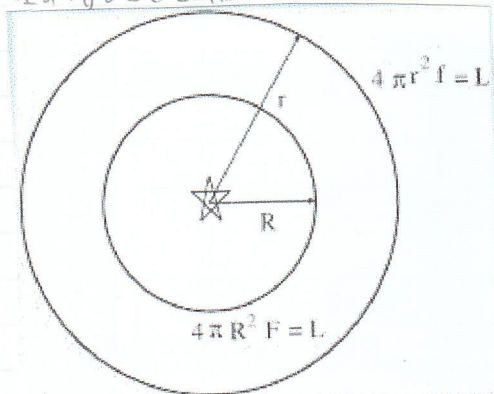
$3.0857 \times 10^{16} \text{ m}$ を距離の単位とすると、

$$d(\text{pc}) = \frac{1}{p}$$

と表す。この距離を パーセク (pc)

と表す。星の遠くにあるほど年周視差が小さくなる。

年周視差が測れる比較的近い星にしかこの方法は使えない。

③ 星の明るさと距離

エネルギーフラックス f

に 表面積 $4\pi r^2$

をかけると、

星の光度 L

$$f = \frac{L}{4\pi r^2}$$

(f は距離、

逆2乗に比例)

星の見た等級 m は、 f と、見た等級 m_0 である

標準星のエネルギーフラックス f_0 を使えば、

$$m = m_0 - \frac{5}{2} \log \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad (\log \text{ は常用対数を表す})$$

エネルギーフラックス: 単位時間、単位面積

ある方向に入るエネルギーの総量

人の目の感度の異なるエネルギーの対数値に比例するため、

星の等級は光のエネルギーの対数であらわされる。

5等の差は100倍の明るさの違い。

エネルギーフラックスは r の逆二乗に比例して減少

したがって、星は遠ざかると等級が小さくなる。

星の本当の明るさを比較するために、絶対等級を定義する。

つまり、星を 10 pc の距離に置いて 絶対等級 M を定める。

$$F = \frac{L}{4\pi R^2} \quad R = 10 \text{ pc} \quad \text{とすると、}$$

$$m = m_0 - \frac{5}{2} \log \left(\frac{F}{F_0} \right)$$

$$M = m_0 - \frac{5}{2} \log \left(\frac{F}{F_0} \right)$$

$$\Leftrightarrow M - m = -\frac{5}{2} \log \left(\frac{F}{F} \right)$$

$$= -\frac{5}{2} \log \left(\frac{r^2}{r_0^2} \right)$$

$$= 5 - 5 \log(r)$$

$r(\text{pc})$ は天体までの距離。

これを d と置き換えると、

$$M = m + 5 - 5 \log(d) \quad \leftarrow \text{視差がわからない時に。}$$

④ ③ から、 $d = (10^{0.2(-M+m+5)}) (\text{pc})$ である。

すなわち、絶対等級のわかる天体の距離を測定する

際の目安。このように天体を 標準光源 という。

もっともよく標準光源に使われるのが セファイド。

<セファイドの性質> 脈動変光星

・ 周期的に明るさが変化する。時間平均した平均光度

をセファイドの明るさとする。 (1980s)

・ 周期 数日 ~ 数百日

↑ (1980s) 天の川銀河

・ 太陽近傍のセファイドの観測から、絶対光度

明るいセファイドほど周期が長い。 周期-光度関係

エネルギーフラックス: 単位時間, 単位面積

あたりに入ってくるエネルギー 総量

人の目の感度の光のエネルギー対数値に比例するため

星の等級は光のエネルギーの対数であらわされる。

5等の差は 100倍の明るさの違い。

エネルギーフラックスは r の 二乗に比例して減少

すなわち、星は遠いほど等級が大きくなる。

星の本当の明るさを比較するために 絶対等級 を定義する。

すなわち、星を 10 pc の距離に置いて 絶対等級 M を定める。

$$F = \frac{L}{4\pi R^2}$$

$$R = 10 \text{ pc}$$

とすると、

$$m = m_0 - \frac{5}{2} \log \left(\frac{F}{F_0} \right)$$

$$M = m_0 - \frac{5}{2} \log \left(\frac{F}{F_0} \right)$$

$$\Leftrightarrow M - m = -\frac{5}{2} \log \left(\frac{F}{F} \right)$$

$$= -\frac{5}{2} \log \left(\frac{r^2}{r_0^2} \right)$$

$$= 5 - 5 \log(r)$$

$r(\text{pc})$ は天体までの距離。

これを d と置き直すと、

$$M = m + 5 - 5 \log(d) \quad \leftarrow \text{周囲視差がわからない時に。}$$

④ ③ から、 $d = 10^{0.2(-M+m+5)}$ (pc) である。

すなわち、絶対等級のわかる天体の距離を測定する

際、目安。このように天体を 標準光源 という。

もっともよく標準光源に使われるのが セファイド。

<セファイドの性質> 脈動変光星

・ 周期的に明るさの变化。時間平均した平均光度

をセファイドの明るさとする。 (1980s)

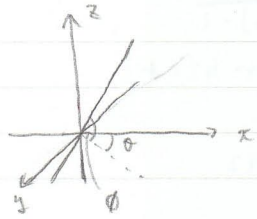
・ 周期 数日 ~ 数百日

ヒッパルコス衛星

・ 太陽近傍のセファイドの観測から、絶対光度

明るいセファイドほど周期が長い。 周期-光度関係。

* (θ, ϕ) について



* 立体角 $d\Omega$ について



h ... プランク定数 k ... ボルツマン定数

温度 T の物体表面から、この温度に対応した黒体放射が出ている

としてプランク分布をすべし、振動数 ν による半面立体角 $d\Omega$

で積分

$$f = \int_{\Omega} d\Omega \int_0^{\infty} B_{\nu}(T) d\nu = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \sin\theta \cos\theta \int_0^{\infty} \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{d\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

$$= \frac{2\pi h}{c^2} \left(\frac{kT}{h}\right)^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{2\pi h}{c^2} \left(\frac{kT}{h}\right)^4 \left(\frac{\pi^4}{15}\right)$$

$$= \sigma T^4 \quad (\because \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} : \text{ステファン・ボルツマン定数})$$

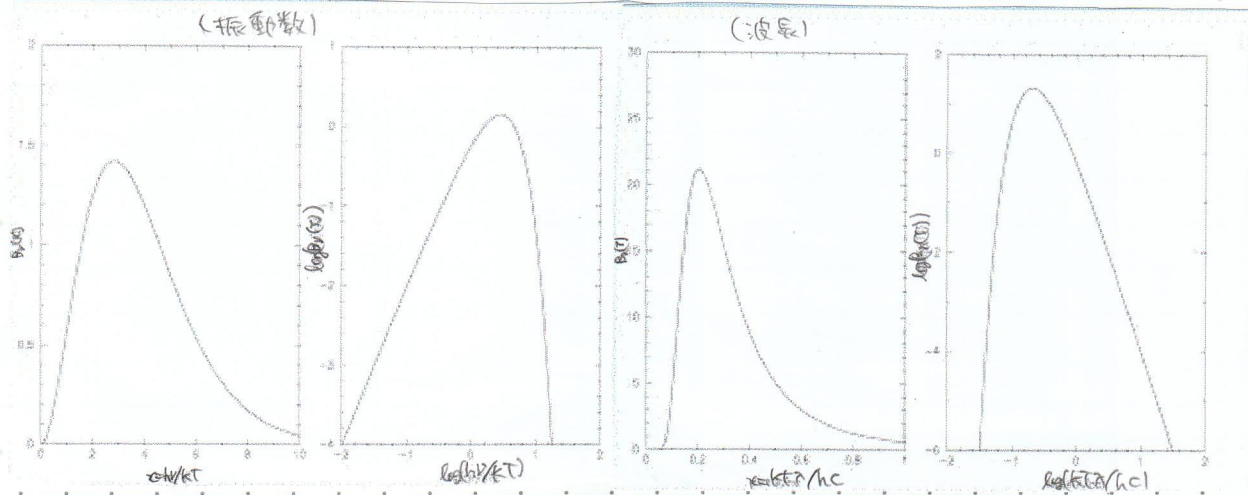
ステファン・ボルツマンの式 $f = \sigma T^4$

従って、単位時間に出るエネルギー総量(光度)は、星の半径を

R とすると、

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

<プランクの黒体放射分布関数>



$$B_{\lambda}(T) d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{\exp(hc/kT\lambda) - 1}$$

のところで、 $\frac{kT\lambda}{hc} \approx 0.1$ と与えられる。

従って、黒体放射のピークの波長は

$$\lambda(A) = \frac{2.9 \times 10^7}{T} \quad \dots \text{ウィーンの変位則}$$

⇒ 高温の天体は波長、短い光(電磁波)を出す。

(例) γ 線 — α 線、バースター... 2つの中性子が合体している(?)

1億度以上

X線 — 中性子、太陽コロナ、銀河団中の高温ガス

10万度 ~ 1億度

紫外線 — 恒星、エッジワース

1万度 ~ 10万度

可視光 — 恒星

数千度 ~ 1万度

赤外線 — 褐色矮星、原始星

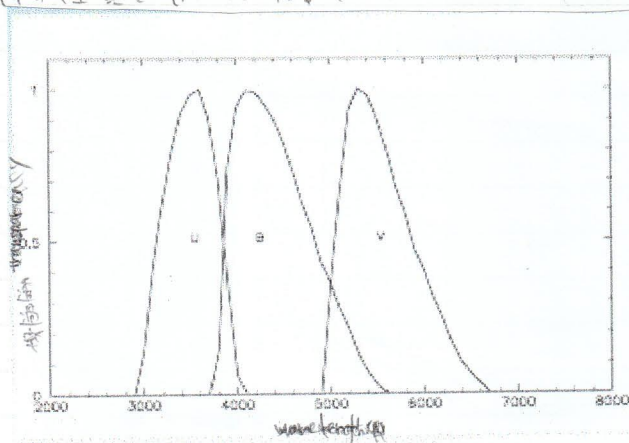
千度程度

↑ 温度

U, B, V-3色測光

U (紫外線 ultra-violet), B (青い光 blue light), V (黄緑色の光 visual light) に感度を持つフィルターを使い、天体の明るさを測定し、

天体の性質を明らかにする。



3つのフィルターを使って測った天体の明るさ E , M_B と m_V とから表す。

$$m_B = m_0 - \frac{5}{2} \left(\frac{f_B}{f_0} \right)$$

$$m_V = m_0 - \frac{5}{2} \left(\frac{f_V}{f_0} \right)$$

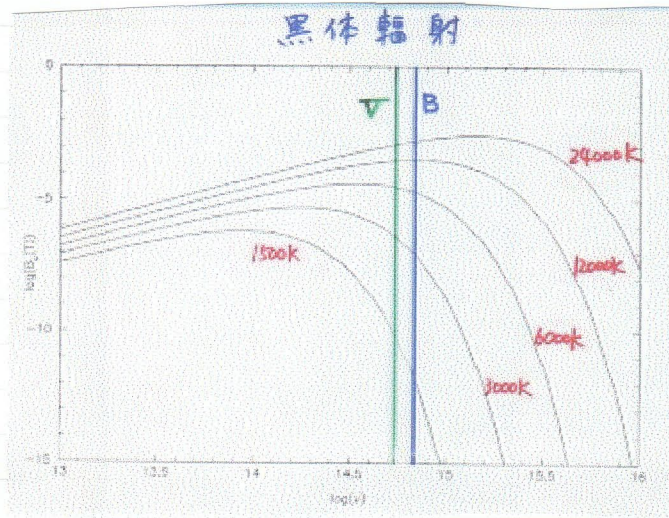
$$M_B = m_B + 5 - 5 \log(d)$$

$$M_V = m_V + 5 - 5 \log(d)$$

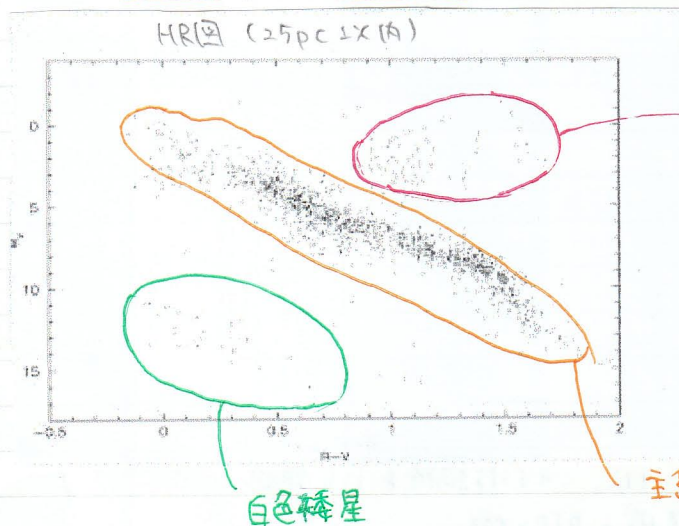
$$B - V \equiv m_B - m_V = M_B - M_V = \frac{5}{2} (\log f_V - \log f_B) : \text{色指数}$$

黒体放射の場合、 $B - V$ と T は一対一対応 (距離によらず)

下図から、 $B - V$ が小さいと温度が高い。



縦軸に星の絶対等級、横軸に星の色指数をとりプロットしたものを HR図 (ハルツシュワルツァー・ラッセル図) という。



赤色巨星

$B - V$ が大きい \rightarrow 赤い星

$B - V$ が小さい \rightarrow 青い星

白色矮星

主系列星

スペクトルや光度に関する分類

H-R(ハート)分類

O → B → A → F → G → K → M

高温



低温

(憶えろ Oh! be a fine girl! Kiss me.)

と書いてあるから かけろやまんて"3-6"?

水素のライマン、バルマー系列

水素の電子が n 番目から (1) 番目の軌道へ落ち込む (1 番目から n 番目に $(n \rightarrow 1)$ にたま上げられる) 場合の系列が ライマン系列
電子が落ち込むとき、

$$E_n - E_1 = |E_1| \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) = h\nu$$

のように、エネルギー差に対応して振動数 ν の光子が 1 個放出される。

このが 光線。電子が n にたま上げられる時は、吸収線。

ライマン系列は波長の長い方から

Ly α , Ly β , ...

と名付けられている。

水素の電子が n 番目から 2 番目に落ち込む系列が バルマー系列

$$E_n - E_2 = |E_1| \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = h\nu$$

バルマー系列は波長の長い方から、

H α , H β , ...

と名付けられている。

 $n = \infty$ の極限で線スペクトルが連続スペクトルに移行。それぞれ、ライマン・エッジ、バルマー・エッジ と呼ぶ。

ライマン・エッジ

$$\lambda_{\text{Lyman}} = \frac{h\nu}{|E_1|} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \cdot 2.9979 \times 10^{10}}{13.6 \times 1.6022 \times 10^{-19}} = 911.6 \text{ \AA}$$

(バルマー・エッジ)

$$\lambda_{\text{Balmer}} = \frac{4h\nu}{|E_1|} = 3647 \text{ \AA}$$

ライマン・エッジに対応するより短い波長の紫外線と中性水素原子に

あかるとプラズマ状態になる。この場所は H II 領域

H II 領域は、星形成領域の目印となる。

ライマン系列：紫外線の領域

大気に吸収されて、地上では観測できない。

バルマー系列：可視光の領域。地上で観測できる。

パッシェン系列： $n \rightarrow 3$ の遷移

赤外線領域

大気圏外に観測可能

光学望遠鏡の分解能

分解能とは、ある角度（ θ ）に2つの点を分解できるか、決められる。

$$\theta = 1.44 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{rad})$$

D ：望遠鏡の主鏡の直径 λ ：光の波長

例) 4.0m 望遠鏡 ($D = 4.0\text{m}$)

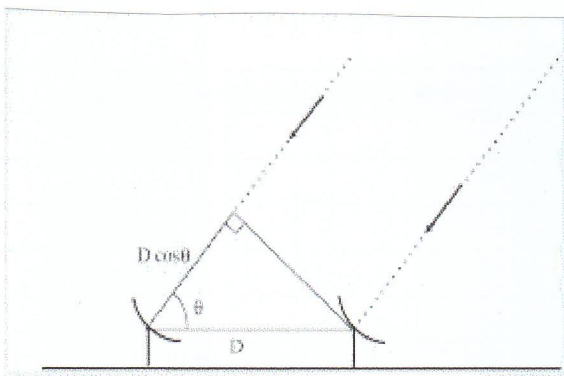
$$\theta = 1.44 \times \frac{4000(\text{\AA})}{(4.0 \times 10^3)(\text{\AA})} = 9.8 \times 10^{-8} \text{ rad} = 0.02 \text{ arcsec (秒角)}$$

- 大気の揺らぎ (秒角以上あると、地上の望遠鏡は分解能がいまいに観測できない。(実際の分解能は 2 arcsec 以上))
- 10m 口径宇宙望遠鏡は、口径 2.4m で、 $\theta = 0.08 \text{ arcsec}$ であるが、大気の揺らぎがないと、観測上有利。

電波干渉計の分解能

電波は光に比べて波長が長いので、光学望遠鏡では分解能が落ちる。

\Rightarrow 干渉計の原理を使った開口合成望遠鏡



位相差が波長の整数倍

\Rightarrow 強め合う

半整数倍

\Rightarrow 弱め合う

$$D \cos \theta = \lambda \times \begin{cases} n & (\text{強め合い}) \\ n + \frac{1}{2} & (\text{弱め合い}) \end{cases}$$

2つの天体の角度 $\cos \theta$ と $\cos \theta'$

を区別するには、位相差が 2π 以上

である必要があるから、

$$2\pi D (\cos \theta - \cos \theta') = 2\pi \lambda$$

$$\begin{aligned}\cos \theta' &= \cos(\theta + \Delta\theta) \\ &= \cos \theta - \sin \theta \Delta\theta\end{aligned}$$

を使て

$$D \{ \cos \theta - (\cos \theta - \sin \theta \Delta\theta) \} = \lambda$$

$$D \sin \theta \Delta\theta = \lambda$$

天頂付近では $\sin \theta \approx 1$ だから、

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{D}$$

大気の影響 ... 大気を透過するいくつかの電波の波長帯

→ 可視光、赤外線、幾つかの波長帯、ミリ波〜ラジオ波

これ以外は大気圏外で観測

星形成領域

渦巻銀河の渦状腕のところで衝撃波によりガスが圧縮され、分子雲が形成

↓

分子雲の中で密度の高いところから星が出来る

↓

紫外線により周りの中性水素ガス(HI)が電離され、電離水素ガス(HII)領域ができて、H α 線が明るく輝く

恒星の基礎方程式

(連続の式(密度×体積=質量)、力学平衡の式(圧力勾配と重力が釣り合っている)、
輻射平衡の式、対流平衡の式(核融合反応による熱の伝わり方)、
エネルギー保存の式、理想気体の状態方程式)
を解いて恒星の進化を追いかける。

※ 恒星はエネルギーを放出すると温度が上がる ⇒ 比熱が負

星の内部の核融合反応

1.1 Mo の軽い星 中心温度 $T_c < 1.8 \times 10^7 \text{ K} \Rightarrow \text{pp チェーン}$

それより重い星 中心温度 $T_c > 1.8 \times 10^7 \text{ K} \Rightarrow \text{CNO サイクル}$

H 原子 4つ \rightarrow He 原子 1つ

質量欠損 $E = \Delta mc^2$ のエネルギーが放出

星の内部の熱輸送

光子の伝導 ... 光子が物質にぶつかりながら熱を伝える

対流

対流は伝導や伝導に比べ、効率がよい。

対流の起こる条件

星の内部温度勾配が断熱的溫度勾配より大きい場合

断熱的溫度勾配

与えられた熱のやりとりを繰り返す星の内部と圧力が平衡に

なるようにして星の各地点のガスを外側に移動させる

\rightarrow 温度が下がる

この温度勾配。

星の中心部で pp チェーン が働いている場合

中心部 ... 光子の伝導 = 輻射平衡

外部 ... 対流 = 対流平衡

外部で対流平衡が起きると、表面温度が低くなり

光に対する不透明度が大きくなり、光子の伝導が遅くなり

熱の伝わり方が悪くなるから。

CNO サイクル が働いている場合

中心部 ... 対流平衡

外部 ... 輻射平衡

CNO サイクルは、非常に温度に敏感であるから、温度が高い

中心でエネルギーの発生率が非常に大きくなり、高い温度勾

配が起るため、中心部で対流が起きる。外部では、

温度が高く、光の不透明度が大きくなるため、対流は

起きない。

星の核融合反応はなぜ安定か？

星は自己重力系で、系全体の熱が負

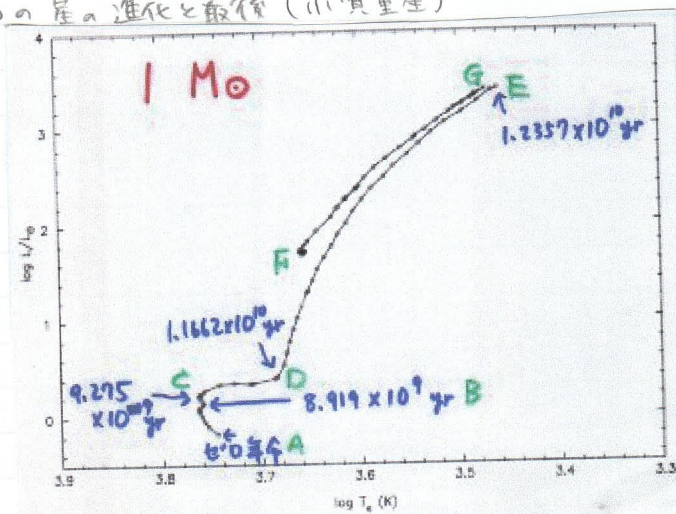
内部で核融合の熱が多量に出る \rightarrow 温度 \uparrow \rightarrow 星が膨張 \rightarrow 温度がそれまでより \downarrow

主系列にとどまる時間

太陽程度より軽い星 ... ppチェーンによる核融合がゆっくりと進み、
時間あたりのエネルギー発生率が低く、主系列
段階に留まる時間が長い

重い星 ... CNOサイクルによる核融合が早く進み、時間あたりの
エネルギー発生率が高くなり、明るくなる。CNOサイクル
は非常に温度に敏感のため、重い星ほど中心温度
が高く、エネルギー発生率が非常に大きくなる。このため、
多少質量が大きくても、非常に早く水素を燃やして尽く
してしまうので、主系列段階に留まる時間が短い。

1 Mo の星の進化と最後 (小質量星)



- 星の中心で対流平衡 → じわじわと水素が燃える。
- 約100億年で水素を燃やして、主系列を離れる (B)
- ヘリウム中心核 (He 98%, それより重い重元素 2% の形成)
- ヘリウム核の周りで水素が燃える
- 密度の大きいヘリウム核と密度の小さい水素の2極分化
- 密度の高いヘリウム核が縮み圧で支えられる (C)
- 水素が燃えてヘリウム核の質量が増加
- 中心密度が上昇 → ヘリウム核の半径が小さくなる → 重力が大きくなる
→ 重力を支えるために水素が燃える場所の圧力が上昇し、温度上昇
⇒ 水素が燃える際のエネルギー放出率が増え、明るくなる。
- 放出されたエネルギーが外層を押し出し、半径が増える。星の表面温度↓
表面対流層が次第に深くなり、外層全体が対流層になる (D)
- ⇒ 核の禁止領域の縁 (核の境界線) に沿ってHR図を上昇 ... 赤色巨星 ...
赤色巨星分枝、赤色巨星分岐という。

* 電子の縮退圧 $\Delta x \sim 0.1 \text{ nm}$

絶対温度 0 K とき熱運動による圧力は 0 になる。

量子力学的な電子の圧力は存在し、量子力学的な

効果による圧力を 縮退圧 という。

縮退圧が大きくなることを「星が縮退する」

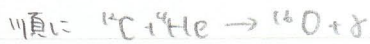
という。

密度が高いか温度が低いとき電子は縮退する。

1 Mo の星のヘリウムフラッシュと水平分岐

ヘリウム核が 0.46 Mo に至ったとき、中心部に「密度」×「温度」

により、3つのヘリウムが1つの炭素になる トリアルピルファ反
応がはじまる。



の反応が起きる。

(この時、温度が高いほど $12\text{C}/16\text{O}$ が小さくなる。)

トリアルピルファ反応の熱による圧力は電子の縮退圧に比べ、

小さいので「圧力は上がらない」 = ヘリウム核は膨れ長くなる。

密度も上がらず、温度だけ上がる。ヘリウム燃焼が一気

に加速 = ヘリウムフラッシュ

核反応による熱はヘリウム核の重エネルギーと同程度に上

ると、ヘリウム核が膨らみはじめる。 = 縮退が融ける。

すると、密度と温度が上がり、安定な核燃焼になる

安定なヘリウム燃焼に移行した段階 = 水平分岐 (F)

(ヘリウム燃焼は温度上昇に敏感なので、中心部は対流核)

炭素・酸素コアと漸近赤色巨星

ヘリウム核の中心にヘリウムがなくなると ⇒ 炭素・酸素コア形成

ヘリウムは炭素・酸素コアの周りで殻燃焼 } 二重殻燃焼

ヘリウム核と水素外層の境で水素殻燃焼

炭素・酸素コアが大きくなるにつれて水素外層が膨れ、対流層が

発達。林トラークに沿って HR 図を上昇。この段階は、発達した

C+O コア、薄い He 層、密度の低い H 外層。この星を、漸近

赤色巨星段階の星、AGB 星と呼ぶ。

質量放出と惑星状星雲

太陽は太陽風を吹かせて質量放出。赤色巨星は星表面の重力が減り、より強い恒星風が吹いている。AGBの段階はさらに恒星風が強い。1 M_{\odot} 程度の星は、AGB段階の最終ステージ(G)で1万年~10万年かけて水素外層を吹き飛ばす。初期の段階では炭素・酸素コアは高温で光っているのを吹き飛ばされた外層が明るく輝く = 惑星状星雲。星雲は次第に膨張し消失。水素・酸素コアは冷えて 白色矮星 になる。1 M_{\odot} 程度の星では0.55~0.60 M_{\odot} 。

※ 白色矮星の特徴

密度が高いので電子の縮退圧で支えられる

地球サイズくらい。

重いほど半径が小さい

質量に上限 (1.4 M_{\odot}) がある。 ... チャンドラ・セーシエリ限界

※ 太陽ニュートリノ問題

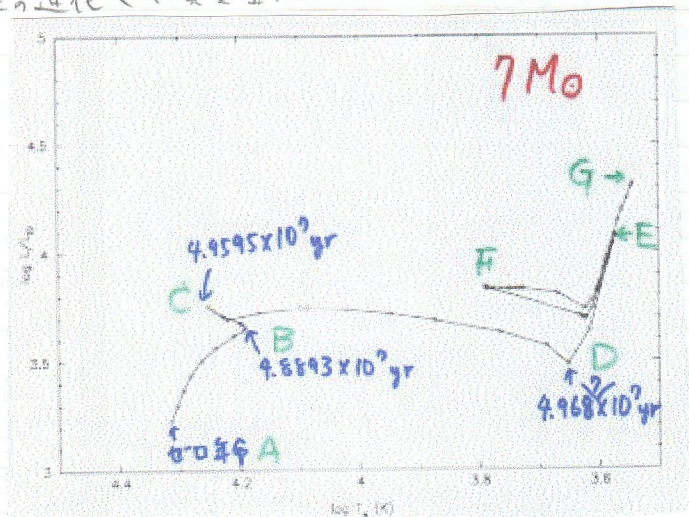
・ Davis の実験 - ν_e の理論の 1/3 以下

・ カミオカンデー - ν_e の理論の半分以下

⇒ ニュートリノに質量がある

ニュートリノ振動: 3種、ニュートリノ ($\nu_e, \nu_{\mu}, \nu_{\tau}$) の間を切り替わる。

7 M_{\odot} 星の進化 (中質量星)



主系列段階で対流核を持っているので、対流核全体で同時に水素が燃える。ヘリウム核が形成される(B) このヘリウム核は比較的密度も低く、密度も高くはないので縮退しない。主系列に留まる時間(A→B)は約4000万年。水素がヘリウム核で燃え始めるのと同時に燃え始める。水素核燃焼が止まる。核融合熱が放出されるので星全体が収縮を始める。収縮して重力エネルギーを解放し、ヘリウム核の周りの温度が上がる。HR図を右へ動かす。ヘリウムコアの周りの水素に火がうつり、十分な熱が水素核燃焼に与えて来るようになる。水素外層の収縮が止まる(C)。ヘリウム中心核は熱源がなくなるのでさらに収縮。重力エネルギー解放 → ヘリウム核の表面温度上昇 → 水素核燃焼がますます盛んになる → 出て来るエネルギーがどんどん下がる → 水素外層が膨らみ、表面温度↓。HR図を左へ。

HR図上を左から右へ移動する時間は主系列段階に留まる時間とその後、赤色巨星の枝に留まる時間に比べて短いので、この位置にいる星を見つけることが非常に稀である。従って、この領域(CD間)をヘルツシュプルング・ディヤックと呼ぶ。

表面温度が低くなるにつれて、表面近くの不透明度が大きくなり、熱が流れにくくなる。表面から対流層が発達して外層全体の対流層になる。(D) この後は林、限界線には達してHR図上を左へ移動する。ヘリウム中心核の周りの水素核燃焼から出るエネルギーが増えても、対流の効率が高く熱を流すことが出来るので、半径があまり膨らまない。出てくるエネルギーが増えるので明るくなる。

※ 重力エネルギーの解放

星の重力エネルギーは、 $W \approx -\frac{GM^2}{R}$ である。Rが小さくなると、Wは減り、エネルギー保存則から、減った分のエネルギーが熱エネルギーとして出てくる。

これが、重力エネルギーの解放。

ヘリウム燃焼と漸近赤色巨星分岐

7 M_{\odot} の星の場合、ヘリウム核の質量が1.4 M_{\odot} まで増加すると

トリプルアルファ反応が起こる。(E)

トリプルアルファ反応の温度依存はCNOサイクルより速い

→ヘリウム核の中心部で対流核

ヘリウム中心核は縮退しているため、核燃焼はフラッシュになるが、比較的安定。

ヘリウムに火が着くと、水素殻燃焼の場合よりたくさん熱が出てくる。星の表面温度が上昇し、表面近くの不透明度が上がり、対流外層が薄くなる。従ってHR図を左側に移動し、しばらくそこに留まる(F)

ヘリウムが燃え尽きると、中心部は放射平衡となり、重力収縮がはじまる。C+Oコアの周りが1億度以上になると、ヘリウム殻燃焼がはじまる。1 M_{\odot} と同様、二重殻燃焼。C+Oコアの密度が高くなると、縮退するようになる。C+Oコアは縮退圧で支えられ、中心温度が上昇して行く。従ってC+Oコアで進化がとまる。

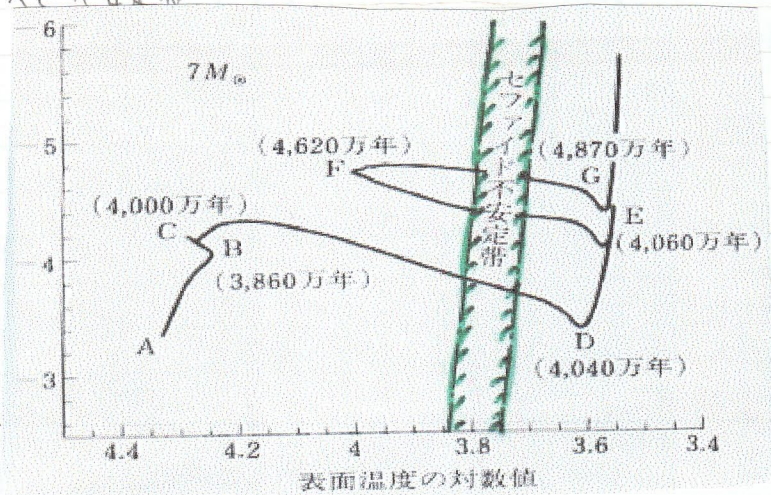
C+Oコアの質量が増え、縮むと、C+Oコアの表面の圧力が上昇し、温度も上昇。ヘリウム核反応によるエネルギーが増す。外層が膨張し、表面温度が下がる。→対流層発達。

赫羅図に描いてHR図を上げると漸近赤色巨星分岐。

質量放出

7 M_{\odot} の星もAGBの最後において恒星風が吹き、水素外層を失う。残されるのは、0.8~1.1 M_{\odot} のC+O白色矮星

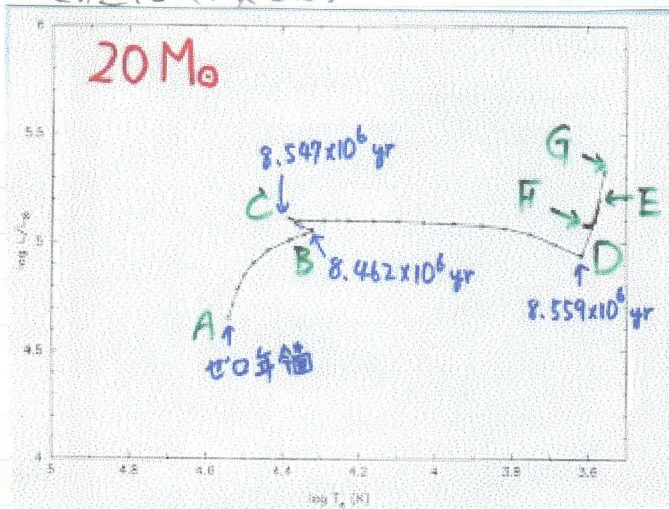
セファイド不安定帯



セファイド不安定帯も3度繰り返す

- ・1度目は時間が短いので存在確率が小さいが、
- ・2度目、3度目は時間が長いので存在確率が大きい。
- ・この領域に星が存在すると、外層が不安定になり、振動をはじめる。この振動の周期は、星の中を音波が通り過ぎる程度の時間のかかほり、半径が大きいほど（日差しが大きいほど）長い。

20M_☉の星の進化（大質量星）



Dまでは7M_☉の星と同じ

- ・ヘリウム核が6M_☉まで増加すると中心温度が1億度に達し、ヘリウム燃焼（安定）
- ・中心核が縮退することになり、ヘリウム燃焼、炭素燃焼、ネオン燃焼、酸素燃焼、シリコン燃焼と次々と進行。最後に鉄のコアからなるコア構造になる。
- ・鉄はもっとも安定な原子核で、これ以上核融合しない。
- ・鉄の中心核が重力収縮して100億度を超えると、γ線を吸収、α粒子（ヘリウム原子核）や陽子、中性子に分解
 = 鉄の光分解
- ・鉄の光分解は吸熱反応のため、中心温度が下がり（← 熱が負）、重力に抗する圧力が作れない。鉄のコアが一気につぶれる。この重力崩壊がきっかけになって、星は中心部に中性子星となり、外層は中性子星の形成時の反応で跳ね飛ばされる。= 超新星爆発。

※ 鉄コアの重力崩壊で、物質の密度が原子核密度に近づくと、大量のニュートリノが発生



※ 鉄のコアが収縮し、原子核密度に達すると

衝撃波が発生。この衝撃波はあき強く
たいてい、落下してくる物質をはね返さない。

時間とともにニュートリノの熱により、衝撃波が生き残り、強い衝撃波が落下してくる物質をはね返す。

質量範囲	最後	コメント
$0.08 \sim 0.8 M_{\odot}$	主系列星	水素核融合反応中
$0.8 \sim 8 M_{\odot}$	C+O 白色矮星	外層を放出し惑星状星雲
$8 \sim 10 M_{\odot}$	中性子星	電子捕獲型超新星
$10 \sim 20 M_{\odot}$	中性子星	鉄コアの光分解型超新星
$20 \sim 100 M_{\odot}$	ブラックホール	鉄コアで爆縮するも爆発なし

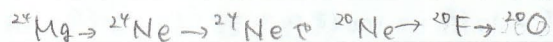
星の質量	進化の最後
$M < 0.08 M_{\odot}$	褐色矮星 (惑星と同じ)
$0.08 M_{\odot} < M < 0.8 M_{\odot}$	現在も主系列星 → 進化
$0.8 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$	恒星風 → C+O 白色矮星
$8 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$	電子捕獲型超新星 → NS
$10 M_{\odot} < M < 40 M_{\odot}$	鉄光分解型超新星 → NS
$40 M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}$	鉄光分解型超新星 → BH

中性子性

ブラックホール

- $M < 0.08 M_{\odot}$: 水素核融合反応に点火しない。
- $0.8 M_{\odot} < M < 0.8 M_{\odot}$: 主系列段階の宇宙年齢が長い

- $8 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$: C+O コア → O+Ne+Mg コア



(どちらも電子吸収) と2つとも安定。

電子が減り、縮退圧 ↓

→ 重力崩壊 → 超新星爆発

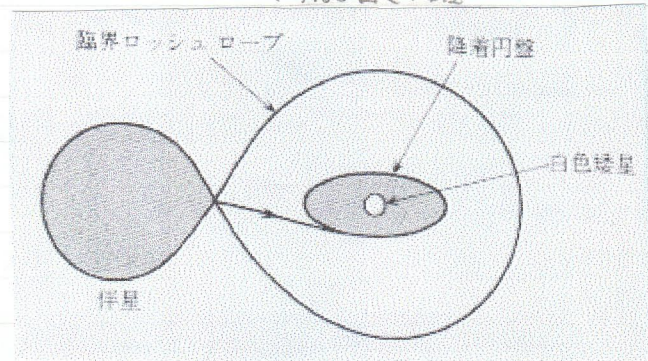
- $40 M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}$

鉄の光分解 → 中性子星

中性子星の上限質量を超えるのでブラックホールに。

超新星爆発

超新星爆発 - 鉄の光分解型
 炭素爆燃型 ← 連星系を作っているC+Oコア
 からなる白色矮星



- C+O 白色矮星に相手の星のカスが降りてきて、質量が増える。
- チャンドラセカール限界質量に近づくと炭素に火が着く。C+Oコアは縮退していること、燃焼が爆発的に起こって星全体が吹き飛び。

I型 ... 水素の吸収線なし	Ia ... Si, Fe 吸収線, 炭素爆燃	鉄の光分解
II型 ... 水素の吸収線あり	Ib ... He 吸収線が強い	
	Ic ... He 吸収線が強い, C, Fe 吸収線	
	II-L ... 光度曲線 リニア 第7回	
	II-P ... 光度曲線 フラット 1987A ... ピークの光度がほぼ等しい	
II-P と II-L の両方の特徴をもつ		

★ 超新星の意義

- 宇宙は生じた時、H と He のみ。それより重い元素 (C, O, Fe など) は星の内部の核融合反応でつくられる。
- でもこのままでは宇宙に広がらない。
- 宇宙に重元素がばらまかれるには超新星爆発が必要。
- 鉄の光分解型 ... シリコンや炭素、窒素などをばらまく。
- 鉄コアは 中性的星 or ブラックホールに。
- 炭素爆燃型 ... 鉄やシリコンが多い。金やウランなども鉄より重い原子核形成される。

1. 宇宙空間に出た重元素を含んだガスは新しい星に取り込まれる。
 → このサイクルをくり返し、現在の値に。

なぜ超新星が明るいか。

鉄の光分解による超新星爆発で発生した衝撃波の後には高温・高圧
 ⇒ 衝撃波が表面を通過すると表面温度が 3000 K から数十万度には
 上昇。と同時に、激しく膨張

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

から、光のエネルギーが大きくなる。

膨張するにつれて温度は下がっていく、あるところまで冷却に。

その後、明るさは ^{56}Ni の量に比例。

^{56}Ni は放射性同位体 (半減期 77 日) である。

横軸に時間 t をとり、縦軸に明るさ ($\log_{10} L$) をとると、暗くなる方向
 は直線的になる。 ^{56}Ni の量を $M(^{56}\text{Ni})$ とすると、

$$L \propto M(^{56}\text{Ni}) \propto 2^{-t/\tau} \quad (t(\text{日}))$$

両辺の常用対数をとると、等級の定義式を使う。

$$m - m_0 = -2.5 (\log_{10} L - \log_{10} L_0)$$

$$= 2.5 \times \frac{t}{\tau} \log 2 + C$$

$$= 0.0098 t + C$$

∴ 約 100 日で約 1 等級暗くなる。

極超新星と γ 線バースト

・ 極超新星 ... 通常、超新星に比べて、非常に明るく、エネルギーの
 大きい超新星

・ γ 線バースト ... 時々、短い時間、天空の色々な方向から強力な
 γ 線の放出される。

極超新星に γ 線バーストが付随

SN1987A について

- ・ 400 年ぶりに銀河系近傍に出現した超新星
- ・ あらゆる電磁波の波長帯での観測ができたはじめての超新星
- ・ 爆発前の星が同定できたはじめての超新星
- ・ 中性子星ができてからニュートリノをはじめて観測
- ・ 星の進化論の検証ができた

→ 1.6 M_{\odot} の鉄のコア → 1.4 M_{\odot} の中性子星

縮んで重力エネルギーが大きくなる。その中で質量欠損した。

SN1987Aの不思議

① 極大光度が暗かった

↑ 爆発時の半径が太陽半径の約50倍と小さかった

(典型的II型は太陽半径の1000倍ほど)

・ 赤色巨星の時、水素外層へヘリウムが混合

→ 吸収係数が下がり、(透明度が上がり)光が

通りやすくなるので半径が縮む

青色巨星において爆発

② 極大が平ら

↑ 光度曲線にフラットになるのは、

物質自身の膨張速度と水素結合面が入ってくる速度

が釣り合うと結合面がある半径に留まり、明るさは

ほぼ一定になるから。

(典型的II型超新星の光球面は水素の再結合面と一致。)

爆発後は外に向かって膨張。再結合面は内側に。

超新星の爆発後は、外ほど速い速度を持つ。

内側は500km/s程度

水素外層は2000km/s ~ 5000km/s程度

→ 長いフラットを出すには、膨張速度の遅い水素が必要

外層にある水素を爆発時に内側に混入させると説明できる。

③ X線が予想より早く(100日後)に出現

④ γ 線の早期出現 ↑

↑ 爆発時に ^{56}Ni 星の素面近くの水素外層まで混入。

⑤ 超新星爆発後の中での大規模な物質混合

これらの不思議を説明するには、超新星爆発後で外と内の物質混合が必要

レイリー・テイラー不安定の成長が必要

2次元軸対称および3次元。流体力学計算

・ レイリー・テイラー不安定の成長

○ 爆発前はヘリウム層(重い)の上に水素層(軽い) → 安定

○ 衝撃波の後ろの物質は前の物質を押しよけようとする

反作用として、減速を受ける

○ 減速を受ける系は見かけの重力が外向きに

→ 水素層の上にヘリウム層 → 不安定。

電波パルサー ... 正確な周期で電波パルスを出す天体

= 強力な磁場 (10^{12} ガウス) をもった高速回転する中性子

連星の片方が中性子星の場合: 連星パルサー or バイナリーパルサー

4. パルサーが中性子であることの証明

角速度 Ω とすると、

遠心力で飛び去れないためには、

$$R\Omega^2 < \frac{GM}{R^2}$$

$$R^3 < \frac{GM}{\Omega^2}$$

ミリ秒パルサーでは、質量 $1M_{\odot}$ とすると、 $R < 20 \text{ km}$

→ 中性子以外にない。

中性子星・物質の中性化が起こり、中性子に主成分の星

中性子の縮退圧で支えられる。(電子の縮退圧で支えきれない)

電波パルサー PSR 1957+20

・電波パルサーの100ms周期は非常に正確な方で、100msの周期の伸縮

縮みから、ドップラー速度が求まる。

・軌道はほぼ1年で、太陽質量程度の主系列星が電波パルサーの周りを回っている。

電波パルサー PSR 1913+16

・連星の片方が電波パルサー、もう一方は電波を出していない中性子

・一般相対論によると、楕円軌道の近星点は次第にずれる。

このずれの電子パルサーの近星点の移動量は予想量とぴったり合う。

= 正確な一般相対論の検証である

X線バースト

・中性子と普通の星の連星系において

普通の星の自分の重力圏(ロッシュローブ)を満たす

→ あつめたガスがロッシュローブのふれいところを通って中性子星に流れこむ (L点) ↑

→ 降着円盤をつくる。角速度を失うにつれて中性子星に降りかかる。

→ 重力エネルギーの解放によりガスが高温に。

→ ガスが定常的水素燃焼を起こし、ヘリウムが主になる。

→ 爆発的ヘリウム燃焼

= X線バースト

強いX線が放出される。

ブラックホール

脱出速度 $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R} = 0$ $v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$

強い重力: $\frac{v_{esc}}{c} = \sqrt{\frac{2GM}{c^2 R}} \approx 1$ ← 一般相対性理論。
枠組で考えなければならぬ

弱い重力: $\frac{v_{esc}}{c} = \sqrt{\frac{2GM}{c^2 R}} \ll 1$

シュワルツシルト半径: 脱出速度と光速の値が等しくなる半径。

$$r_g \equiv \frac{2GM}{c^2} \quad \left(\because 1 = \frac{v_{esc}}{c} = \sqrt{\frac{2GM}{c^2 r_g}} \right)$$

星の半径がシュワルツシルト半径より小さいと、 $v_{esc} > c$

→ 物が光より速い (∵ 光速より速いものはない)

⇒ ブラックホール

ブラックホールと潮汐力

省略。トラバ or P59, 60 or 2冊を見て下さい。

ブラックホールの蒸発

量子力学のハイゼンベルクの不確定性原理によると、非常に短い時間 Δt であれば、あるエネルギー ΔE を持った粒子・反粒子の対が生成して消滅することが可能

$$\Delta t \cdot \Delta E \approx \hbar \quad (\hbar: \text{プランク定数})$$

★ ブラックホールのシュワルツシルト半径付近で粒子・反粒子の対が生成し、反粒子がシュワルツシルト半径の内側に、粒子が外側に出てくることもある。

→ 粒子がブラックホールから出て来たように見える。

∴ この現象は確率的

→ 統計力学的な処理

⇒ ブラックホールに温度が定義でき、その温度で星と同じように黒体輻射をする。

∴ 黒体輻射をみる。

$$T_{BH} = \left(\frac{\hbar c^3}{8\pi k G} \right) \frac{1}{M_{BH}} \quad \left(k: \text{ボルツマン定数} \right)$$

$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$ 質量に反比例

相対性理論から $E = Mc^2$

ブラックホールのエネルギーと放射されたエネルギーの和は保存

⇒ 時間微分 0 $\frac{dE}{dt} + \dot{E} = 0$

$$\Rightarrow L = -\frac{dE}{dt} = -c^2 \frac{dM}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \int_0^t dt = \int_0^t c^2 \frac{dM}{L} \quad (\because L = 4\pi r_g^2 \sigma T_{\text{BH}}^4)$$

$$\Leftrightarrow t = \int_0^M \frac{256\pi^3 k^4 G^2}{5\alpha h^4 c^6} M^2 dM = \frac{256\pi^3 k^4 G^2}{30\alpha h^4 c^6} M^3 = 8.3 \times 10^{-26} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1g}\right)^3 s$$

質量の小さいブラックホールは超高温で非常に明るいから、輻射
で出しこ消費してしまう。

= ブラックホールの蒸発

逆に、 $M_{\text{BH}} > 2 \times 10^{16} g$ なら、充分長い時間光っていられるので、蒸発
することは無い。 $M_{\text{BH}} > 2 \times 10^{16} g$ なら、宇宙初期に作られたブ
ラックホールが残っている可能性もある。このように 宇宙初期にこ
して現在まで生き残っているブラックホールをミニブラックホールと呼
ぶ。

★ 太陽質量程度のブラックホールは非常に温度が低い

$$(\because T_{\text{BH}} = 6.2 \times 10^{-8} \left(\frac{M_{\odot}}{M_{\text{BH}}}\right)^2 \text{ K})$$

宇宙黒体放射より温度が低いので、宇宙黒体放射からブ
ラックホールに熱(エネルギー)が流れ、ブラックホールは太ること
ができる。

ブラックホール候補天体... ブラックホールが存在する可能性が
非常に高い天体

(例1) Cygnus X-1 (連星X線星)

連星X線星... 可視光で見えない天体と非常に明るい青色巨星の連星系

青色巨星の輝線のドップラー効果 → 自転速度

→ ケプラー運動から連星系の質量比を含む関係式

+ 軌道周期からトータル質量

+ 巨星はどんな星かわかっているから、質量が出る

⇒ 見える星の質量の条件が求まる。

$$\text{巨星の質量 } 15M_{\odot} \quad \therefore q = \frac{M_{\text{HB}}}{M_{\text{giant}}} > 0.2 \text{ なら } M_{\text{HB}} > 3M_{\odot}$$

これは 白色矮星 ではなく 中子星 である ⇒ ブラックホール?

(例2) 銀河中心のブラックホール

電波のホーミング源、正確な測り定 → ホーミング源のブラックホール

→ 回転速度

→ 銀河中心にわたり4700年回転

→ 銀河中心核、半径 r 内にある質量を求める。

$$\left(\begin{array}{l} \frac{v^2}{r} = \frac{GM_r}{r^2} \quad M_r = \frac{v^2 r}{G} \\ \therefore M_r = 1.7 \times 10^7 M_\odot \left(\frac{v}{1000 \text{ km/s}} \right)^2 \left(\frac{r}{1 \text{ 光年}} \right) \end{array} \right)$$

→ ホーミングの空間分布から、それがいかに狭い領域に分布しているかわかる

→ 非常に狭い領域に非常に大きな質量

この質量が全部星だとすると、お互い同士ぶつかりあって壊れてしまい、長時間は存在できない

⇒ 巨大ブラックホールしかない。

★ 活動的な銀河の中心から、非常にエネルギーの大きなジェットが吹き出している。

⇒ 銀河の中心に巨大な(100万倍～1億倍太陽質量)

ブラックホールが存在することの理論的予測

銀河・星団

球状星団 ... 1個1個の星がまったくランダムに分布している星団

星団の星は1度に生まれた → ある時間後の星のHR図上の位置

は計算でき、この位置と連ねた線

(=等時線)と星団のHR図を合わせる

⇒ 年齢の推定

球状星団が最も古い、150～170億年

宇宙の年齢は150億年より古い

銀河 ... ~~楕円銀河、棒状渦巻銀河、渦巻銀河、不規則銀河~~

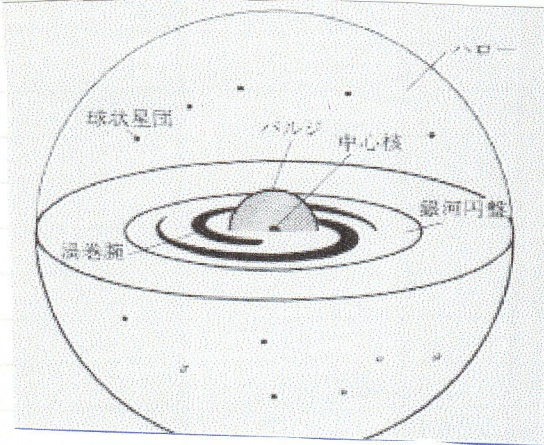
ハッブルは、楕円銀河から渦巻銀河へ進化していると提案

⇔ 実際は、形態は銀河が生まれた時にほぼ決まっていた、
進化して構造を変化させることはない。

楕円銀河 ... 1個1個の星がランダム

ある軸方向に依存性がある。

渦巻銀河



円盤部は銀河の中心周りを回転

回転速度の測定 → 銀河中心から半径 r の内側にある質量

$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM_r}{r^2} \quad M_r = \frac{v^2 r}{G}$$

$$\frac{M_r}{M_\odot} \approx 3 \times 10^4 \left(\frac{v}{250 \text{ km/s}} \right)^2 \left(\frac{r}{30 \text{ kpc}} \right)$$

⇒ 見える質量より別なモノがある ⇒ ダークマター

活動的銀河中心 (AGN)

クエーサー (QSO) ... 強力な電波を出す天体

セイファート銀河 ... 銀河中心に非常に明るい点がある

(1943. セイファート)

ビッグバン

根拠 ① ハッブルの膨張長則

② ヘリウム量 ... 星の中で作られるヘリウム量: $Y = 0.1$ 程度

実際は、どこでも $Y \approx 0.25$ に反する

⇒ 初期に火の玉宇宙 ($T \approx 10$ 億度 $\rho \approx 10^4 \text{ g/cm}^3$)

を通過。このとき He ができて、

③ 3K 宇宙背景放射 ... ビッグバンの高温の名残

宇宙の昔、黒体放射で満たされていた $T = (3000 \text{ K})$

→ 宇宙は 1000 倍膨張して現在に。

$$\text{ウィーンの変位則} \quad \frac{kT\lambda}{hc} \approx 0.2 \quad \frac{kT'\lambda'}{hc} \approx 0.2 \Rightarrow T\lambda = \text{一定}$$

$$\Rightarrow T' = \frac{T}{1000}$$

<宇宙膨張のニュートン力学的理解>

宇宙密度一定 (ρ)半径 r の球内の質量 $M_r = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$ " r 場所での膨張速度 $v = \frac{dr}{dt}$ ニュートンの運動方程式 $\frac{dv}{dt} = -\frac{GM_r}{r^2}$ 両辺に v をかけ、 t で積分 $\frac{1}{2} v^2 = E + \frac{GM_r}{r}$

$$\therefore E = \frac{1}{2} v^2 - \frac{GM_r}{r}$$

$$\begin{cases} E > 0: \text{永遠に膨張} \\ E = 0 \\ E < 0: \text{いつか収縮し始める} \end{cases}$$
 $v = H_0 r, E = 0$

$$\frac{1}{2} (H_0 r)^2 = \frac{4\pi G r^3 \rho_{cr}}{3}, \rho_{cr} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

 $E = 0$ に対応する限界密度 ρ_{cr} が存在

$$E = \frac{4\pi G}{3} r^3 (\rho_{cr} - \rho)$$

宇宙に十分物質があれば、 \rightarrow 収縮に転じる
 十分には無い \rightarrow 膨張し続ける
 境界 \rightarrow 膨張するが、膨張速度が減り、ゼロになる。

宇宙の晴れ上がり- プラズマ中で光は直進できなかった \rightarrow 3000K 以下で中性水素に。 \Rightarrow 光が「散乱される」に進めるようになること。

インフレーションはなぜ必要か?

① 宇宙が一様等方

② 宇宙が平坦 ($E = 0$)

③ 宇宙のゆらぎの起源

宇宙は約40億年前減速から加速に転じた。

 \rightarrow アインシュタインの Λ (ラムダ) 項 \Rightarrow ダークエネルギー \rightarrow 宇宙年齢の矛盾の解決

晴れ上がり直後のゆらぎが成長し、現在の大規模構造ができた。

 \rightarrow 宇宙論パラメータの決定 \Rightarrow 宇宙年齢

ダークマターがより多く集まったところとより少なくて集まったところの
重力ポテンシャルの深さが異なる。

光は深いポテンシャルから出ると、その分エネルギーを使うので
光のエネルギーが下がる。→ 宇宙背景放射の温度を下げる
⇒ ゆらぎのもとになる。

惑星系の形成

・現在の太陽系

- ・地球型惑星... 水星、金星、地球、火星 - 金属コア + 岩石の地殻
- ・小惑星帯... 火星と木星の軌道の間に存在する質量、小さな惑星群
- ・木星型惑星... 木星、土星 - コア + 太陽大気と似た組成の大気
- ・天王星型惑星... 天王星、海王星 - コア + 氷マントル
- ・カイパー帯... 冥王星の外の氷の微小天体
- ・オ尔特・雲... カイパー帯の外の氷の微小天体

最古の隕石 45.66 億年 → これより以前に太陽系形成

・原始星・プロト星

分子雲コア内部で重力収縮 → 放射冷却効果により分子雲コア収縮

→ 中心部の密度 ↑ → 輻射に対して不透明に

→ 解放された重力エネルギーを放射冷却で出せなくなってくる

→ 中心温度上昇

⇒ 原始星の誕生

10~100万年ほどカスと塵は中心星に落ちこみ、双極分子流という

星風で吹き飛ばされる

→ 中心星が可視光で光輝く。= プロト星

星の重力収縮に従って中心温度 ↑ → PP チェーンに火がつく

惑星形成論の標準モデル

① 原始惑星系円盤形成

中心星に向かって落ちてくるガスと塵が降着円盤形成

→ ガスの降着が終わり比較的質量の小さな円盤が残る。

(吸積円盤)

② 塵の沈殿と成長

塵同士が合体成長 → 重力に引かれて赤道面に。

③ 微惑星形成

お互いの重力が集まってきて塵の団子 (= 微惑星)

ランダムな運動に抗して集まる不安定 = ジーンズの重力不安定

②-4 惑星集積

微惑星の衝突合体 → 原始惑星

大きい質量の微惑星は小さい微惑星をたくさん食べて大きくなる。

→ 暴走成長。

④ 原始大気形成

原始惑星の質量↑ → 重力↑

⇒ 原始惑星系円盤のガスが引き寄せられる。(木星型惑星)

ガス: 温度高(太陽から近い) + 質量小

→ 太陽組成の原始大気をもつていく。

⑤ 原始惑星系星雲消失

月の形成

ジャイアント・インパクトモデル

地球に同サイズの惑星衝突 → 表面の物質がとびあがる

→ ガスの冷却により塵形成 → シーラー不安定のため合体

→ 微惑星 → 微惑星の寡占的成長

→ ロッシュ限界内微惑星は地球に落下

“ 外 → 月に。

原始生命

原始大気の散逸

→ 二次大気の生成。このとき CはCH₄に、N₂はNH₃に

O₂はH₂Oに還元される還元性大気

→ 紫外線により有機物生成 → 脱水縮合。

→ 海に溶けこみ → 何らかの化学進化 → 原始生命

→ オゾン層形成。紫外線がこぼれなくなる → 葉緑素をもつ

独立栄養生物 → O₂ → ...

宇宙文明の存在数

$$N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_c \cdot f_i \cdot f_e \cdot L \sim 0.01L$$

R_*	10	銀河系において1年あたり、新しい恒星が生まれる数
f_p	0.1	恒星が太陽系のような惑星系を持つ割合
n_e	1	ひとつの恒星あたり、地球のように生命発生にとって都合の良い条件を備えた惑星の数
f_i	1	生命の発生に適した条件を持つ、ひとつの惑星あたり、生命が発生する確率
f_e	0.1	生命が発生した場合、その生命が進化して、知的生命になることのできる確率
f_c	0.1	知的生命が、我々地球人のように技術文明をつくり上げることのできる確率
L	?	文明社会の持続する時間(年数)

銀河系の大きさ 直径10万光年

→ 面積 $\pi \times (5 \times 10^4)^2 (ly^2)$

から、それらの平均距離

$$d = \sqrt{\frac{\pi \times (5 \times 10^4)^2}{N}} (ly)$$

※赤外線を放射する天体を探るという手もある

(ダイン-球)

これらの赤外線天体と見わけが困難