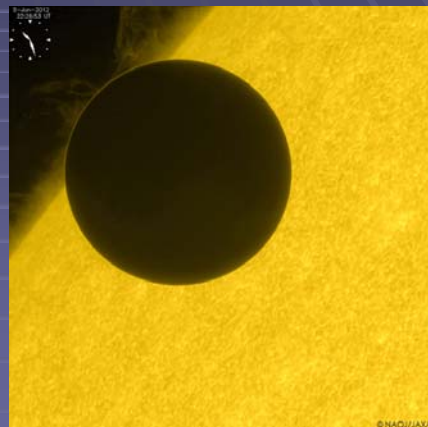


宇宙科学II (電波天文学) 第8回

星の一生

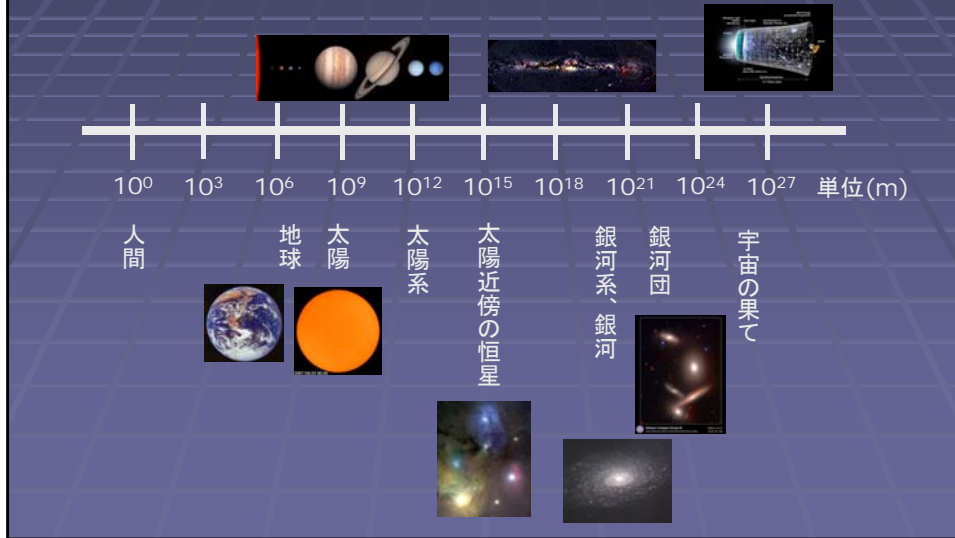
6月6日 金星の日面通過



次回は2117年

宇宙の階層構造

- ログスケールで表示した宇宙の大きさ



元素と宇宙

- ビッグバン元素合成: 水素、ヘリウムでほとんど終了

<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 1 18 </div>																	
1 H 1.0079																	2 He 4.0026
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 3 4 ビッグバン 13 14 15 16 17 </div>																	
3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71 * Lanthanide series	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 # Actinide series	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (281)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (291)		118 Uuo (294)
			57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
			89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)

- 残りの元素はどこから来た？

恒星のエネルギー



- 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(Δm) による ($\Delta E = \Delta m c^2$)

水素 ^1H の質量 1.0078 u
 ヘリウム ^4He 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($m_H = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$)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
 $\Delta E = \Delta m c^2 = 4.3 \times 10^{-12} \text{ J}$

原子核の話 I

- 原子は、原子核と電子からなる
- 原子核は、陽子と中性子からなる
- 原子核質量 $A = Z(\text{陽子数}) + N(\text{中性子数})$
- 原子番号 = 陽子数 (Z) = 原子核の電荷

原子核 電子



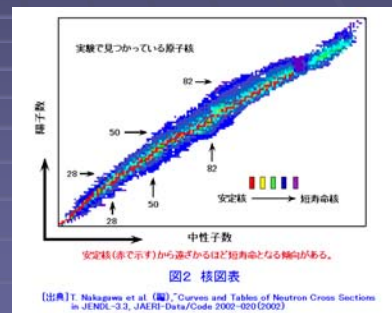
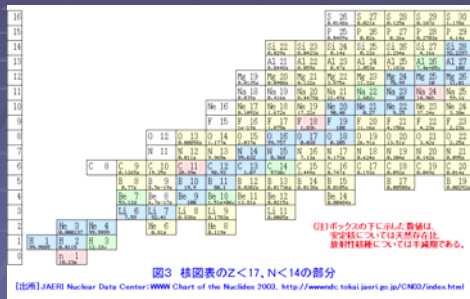
1 H 1.0079																	18 He 4.0026
3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71 * Lanthanide series	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 # Actinide series	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (281)	111 Rg (282)	112 Uub (285)	113 Uut (289)	114 Uuq (288)	115 Uup (291)	116 Uuh (291)	117 Uuq (294)	118 Uuo (294)
		57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97	
		89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)	

原子核の話II

- 原子核は強い力(短距離力)で結合
10⁻¹⁵mレベルでクーロン力よりも大きくなる
- 原子核には(Z,N)の値によって、安定なもの不安定なもの存在。半減期はその核種が半分になるのにかかる時間(1/eになる時間を寿命ともいう)
- 単独の中性子は不安定で、約15分で陽子に崩壊(弱い力)。質量差はわずか。
 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

核図表

- (中性子数N,陽子数Z)の平面上に核種を配置した表
- およそN~Zが安定な原子核(Z>>1では N > Zで安定)

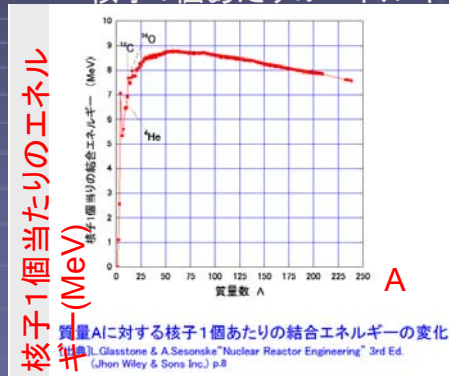


核図表の例 (横軸は中性子数N、縦軸は陽子数Z)

原子核の結合エネルギー

- 安定核種の中でも最も安定な原子核はFe (A=56)
- これより小さい原子核に陽子や中性子を加えエネルギーを得るのが核融合
- これより大きな原子核を壊してエネルギーを得るのが核分裂

核子1個あたりのエネルギー



1eV = 1.3 x 10⁻¹⁹ J, 電子に1Vの電圧をかけて得られるエネルギー

核融合が起きる条件

電荷Z, 大きさaの原子核同士を速度vでぶつけて融合させる(量子力学的なトンネル効果を使う)

- 超えるべきクーロン障壁

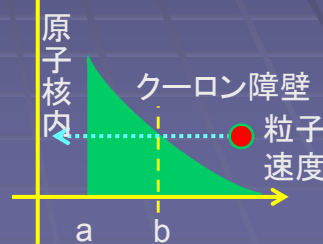
$$\Delta E = U(a) - U(b) = \frac{Z^2 e^2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$$

- 障壁の通過時間 $\Delta t = \frac{b-a}{v}$

- 不確定性関係より、

$$\hbar \sim \Delta E \Delta t,$$

原子核ポテンシャルの模式図



核融合が起きる条件(続)

- 以上より、衝突速度 v は

$$v \sim \frac{Z^2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \frac{(b-a)^2}{ab} \equiv V_0 Z^2 \frac{(b-a)^2}{ab}$$

ただし、
$$V_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar}$$

V_0 は水素($Z=1$)の核融合における速度の目安を与え、その値は $V_0 \sim 2000$ km/sである。

- 2つ水素が同じ速度で正面衝突するとすれば、必要な速度は $v=1000$ km/sとなり、対応する温度は $T = \frac{mv^2}{2k}$ より、 $T \sim 1$ 億 Kとなる。

すなわち、水素の核融合でも1億度程度が必要である(重くて電荷の大きな核種ではさらに高い温度が必要)

星の温度

- 恒星の質量 M 、半径 R の星の中心温度(オーダー評価)

- 星の重力エネルギー
$$E_{\text{grav}} = \frac{GM^2}{R}$$

- ガスの運動エネルギー
$$E_{\text{gas}} = Mc_s^2$$

ただし、
$$mc_s^2 = kT$$

- 両者が釣り合っているとすると、 $\frac{GM^2}{R} \sim Mc_s^2$ より

$$T \sim \left(\frac{Gm}{k}\right) \left(\frac{M}{R}\right) \quad \text{という関係式を得る}$$

- 太陽の場合、 $M \sim 1M_{\text{sun}}$, $R \sim 1R_{\text{sun}}$ から $T \sim 2 \times 10^7$ K
これはほぼ太陽の中心温度(1.5×10^7 K)に相当する

星の核融合と進化

- 質量に応じて、最大でFeまで燃焼が進む。
 - 4H → He
 - 3He → 12C
 - 12C → 16O → 20 Ne ... → 56 Fe
- 軽い星では温度が十分あがらないので燃焼が途中で止まる。→ 縮退圧で支える白色矮星へ
- 重い星(太陽の10倍以上)では鉄の生成まで進む
その後鉄より安定な核がないために核反応によるエネルギー生成で星を支えることができなくなる
→ 超新星爆発へ

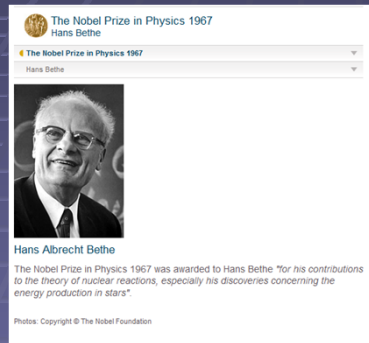
元素と宇宙

- すべての元素は宇宙起源

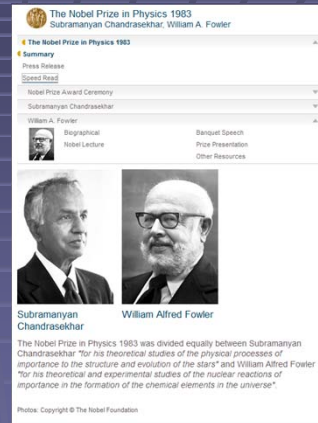
1																	18				
1 H 1.0079	2	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px;">ビッグバン</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">超新星</div> </div>														17	18 He 4.0026				
3 Li 6.941	4 Be 9.0122															5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305															13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798				
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29				
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71 * #	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)				
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 #	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (281)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (291)		118 Uuo (294)				
* Lanthanide series			57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97				
# Actinide series			89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)				

- 天体による元素合成がなければ、生命は誕生しえない

恒星分野のノーベル賞



1967年 ベーテ(1906-2005)
星のエネルギー源(核融合)の解明



1983年
チャンドラセカール(1910-1995)
星の構造と進化の理論
ファウラー(1911-1995) 星の元素合成

エネルギーの話

エネルギー論

- 化学エネルギー(石油 etc.)
最も安価だが CO2排出、枯渇の可能性有。
- 核エネルギー
高効率。高い技術が必要。
 - ・核融合 クリーンだが要超高温。未実用。
 - ・核分裂 実用中だが放射能汚染問題。
- 太陽エネルギー(太陽光発電 etc)
クリーン だが高コスト。
未来のエネルギーは何か？

エネルギー生成効率

エネルギーを取り出せる割合(静止質量比)

- 核融合
 $\epsilon_{pp} \sim 0.7\%$ (4H \rightarrow He)
- 核分裂
ウラン(A=235)をA~100程度の核2個に分裂する場合、核子あたりのエネルギーから
 $\epsilon_{uran} \sim 1 \text{ MeV} / m_H \sim 0.1\%$ ($m_H = 937 \text{ MeV}$)
- 化学エネルギー
 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 890 \text{ kJ/mol}$
 $\epsilon_{chem} \sim 6 \times 10^{-8}\%$ ($\ll \epsilon_{pp}, \epsilon_{uran}$)

核エネルギーの効率は化学エネルギーに比べ桁違いに大きい！

ブラックホール発電所!?

- 宇宙で最もエネルギー生成効率が高いのは、実はブラックホールへの質量降着
- BHに物質を落として重力エネルギーを解放すると
 $\epsilon_{\text{BH}} \sim 10 \text{ -- } 40 \%$ (核エネルギーの10倍以上)
- 落とす物質は何でもよい!(ゴミ、放射性物質 etc.)
 一石二鳥である。
- しかし、BHは危ない(飲み込まれる...)
 いまのところは、SFの世界の存在か

核融合と核分裂

- 核融合
 水素 → ヘリウム → 炭素 ...
 長所: クリーン
 短所: 超高温が必要(1億度)
- 核分裂
 重元素 → 質量数の小さい別元素
 長所: 簡単(自然分裂、または中性子を当てる)
 短所: 放射性物質が発生

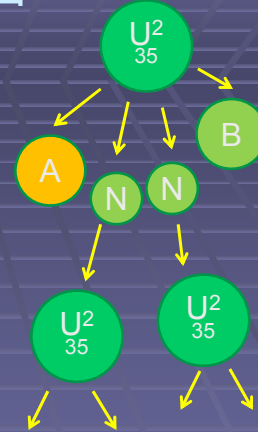
核分裂が簡単な理由

- ^{235}U の例

半減期7億年で自然に崩壊

その際数個の中性子を放出

その中性子を別の ^{235}U が吸収して連鎖反応(臨界)



- 必要なのは ^{235}U を高濃度にした「濃縮ウラン」
- 濃縮ウランが一定量あれば、簡単に臨界に
(例: 1999年の東海村JCO事故)

原子炉と原子爆弾

臨界: 核分裂で出る中性子が他の原子核の分裂を誘発して、連鎖的に反応が続く状態

原子炉は臨界ぎりぎりでの制御が必要、爆弾は不要
核燃料を高密度状態にするだけ

- 広島 ウラン型
- 長崎 プルトニウム型



爆薬で核燃料を高密度に
押し込めば自然に爆発

エネルギー収支

- 日本の年間消費エネルギー（電気、石油、他）
 $E \sim 2 \times 10^{19} \text{ J}$
 - 世界の人口（70億人）が日本レベルでエネルギーを消費すると
 $E \sim 1.2 \times 10^{21} \text{ J}$
 - 地球が太陽から受け取るエネルギー（年間）
 $E \sim 5 \times 10^{24} \text{ J}$
- 太陽エネルギーは人類の活動を支えるのに十分

太陽光発電の問題点

- 建設コスト
 - 原発 ~ 25 万円/kW
 - 太陽電池 ~ 50 万円/kW（原発の倍）
- 土地
太陽光を集めるために広大な面積が必要
- 電池
昼に発電して充電し、夜に回す必要

太陽電池の面積

- 地球表面での太陽フラックス

$$F = L_{\text{sun}} / (4 \pi a^2) = 1.4 \text{ kW/m}^2$$

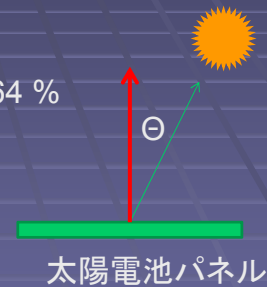
- 太陽電池の変換効率 ~20 %
- 昼の長さ ~50 %
- 平均入射効率 $2 / \pi \sim 64 \%$
- 晴天率 ~50 %

- 一般家庭1世帯あたり必要な面積

$$P = 100 \text{ V} \times 30 \text{ A} = 3 \text{ kW}$$

$$S = 3 / F / (0.2 \times 0.5 \times 0.64 \times 0.5) = 70 \text{ m}^2$$

(→ 8.3m x 8.3m, 家の屋根レベル)



太陽電池パネル

太陽電池の面積II

- 原発1基分(100万kW)の太陽光発電に必要な土地

$$S = 100 \text{ 万} / F / (0.2 \times 0.5 \times 0.64 \times 0.5) = 23 \text{ km}^2$$

- 日本の原発全部(55台分)を置き換えるには
1300 km²
(山手線内面積~63km²の約20倍!!)

- 土地代もどうする?

1平米あたり1万円なら13兆円

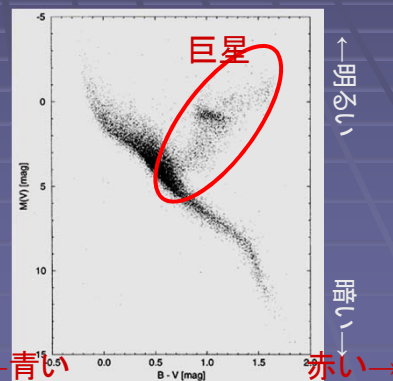
電池(蓄電)の問題ももちろん重大...

星の死

巨星

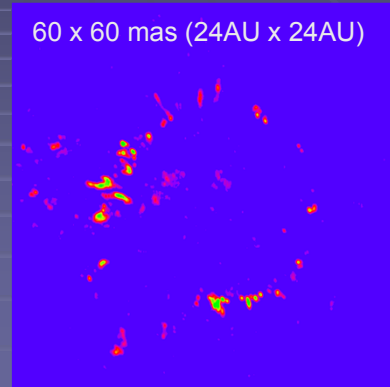
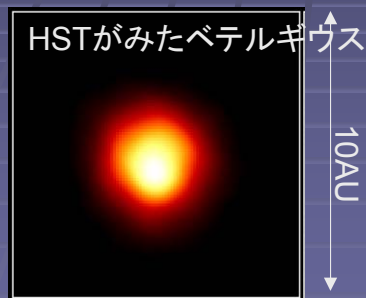
- 中心部で水素が燃え尽きた星は、ヘリウムコアの周囲で水素が燃える → 赤色巨星
- ヘリウムコアの温度があがるとヘリウム燃焼が始まり、やがて炭素のコアができ、周囲でヘリウムと水素が燃焼 → 漸近巨星(AGB星)
- 巨星になると半径が増大し、半径が数AUにもなる(太陽が巨星になると地球も飲み込まれてしまう)

赤色巨星と漸近巨星の模式図



巨星を分解して見る

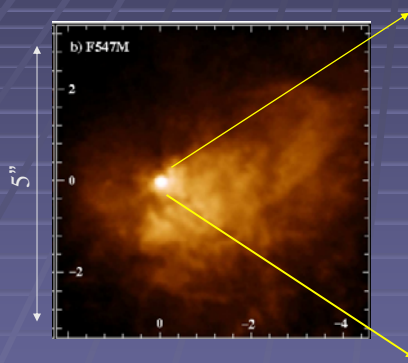
- 巨星は数AUの半径を持つが、光学観測ではその分解は難しい。一方、明るいメーザーを持つAGBをVLBIで観測すると、光球近傍のガスを分解できる。



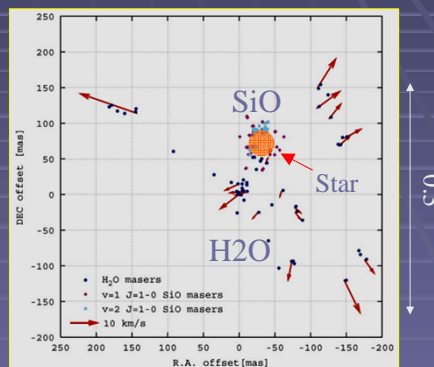
TX CamのSiOメーザー(VLBA)

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H₂O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

星の進化の末期

- 質量に応じて、最大でFeまで燃焼が進む。
 $H \rightarrow He \rightarrow 12C \rightarrow 16O \rightarrow 20Ne \dots \rightarrow 56Fe$
- 軽い星(太陽質量の8倍程度まで)では中心温度が十分あがらないので燃焼が途中で止まる。
 → 縮退圧で支える白色矮星へ
- 重い星(太陽質量の10倍以上)では鉄の生成まで進む。その後鉄より安定な核がないので核反応によるエネルギー生成で星を支えることができなくなる
 → 超新星爆発へ

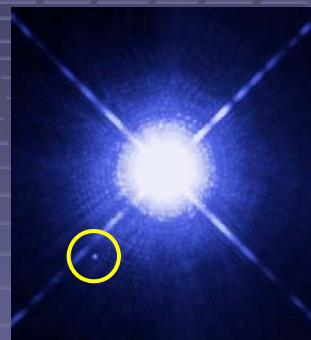
白色矮星

- 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
- シリウスBの例
 恒星の見かけの明るさと等級

$$m = -2.5 \log (F / F_0)$$

$$\Delta m = +5 \text{ 等級で明るさ100分の1}$$

シリウスA -1.5 等星
 シリウスB 8.4 等星



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1万分の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。

シリウスBの例(続き)

- A,Bとも距離が同じなので、等級比=光度比、よって

$$L_B = L_A / 10000$$
- シリウスBの温度をAを同じとし黒体輻射を仮定する。シュテファン・ボルツマン則より、半径比は

$$(R_B^2 T_B^4) / (R_A^2 T_A^4) = 1/10000 \quad \text{より、}$$

$$R_B = R_A / 100$$

一方、 $R_A = 1.7 R_{\text{sun}}$ より、 $R_B \sim 1/60 R_{\text{sun}} \sim 10000 \text{ km}$
- 一方、連星の運動からシリウスBの質量は $\sim 1 M_{\text{sun}}$
 → シリウスBの密度は太陽の ~ 30 万倍！

チャンドラセカール質量

- 相対論的な縮退圧で支えられる天体の限界質量

- 縮退圧のエネルギーを大ざっぱに見積もる

$$\text{粒子間距離} \quad \Delta x \sim \left(\frac{1}{n}\right)^{1/3} \quad n \sim \left(\frac{M}{\mu m R^3}\right)$$

$$\text{運動量とエネルギーの関係} \quad \varepsilon \sim cp$$

$$\text{不確定性関係} \quad \hbar \sim \Delta x \Delta p$$

$$\text{より、} \quad E_{\text{deg}} \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right) c \Delta p \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right) \frac{c \hbar}{\Delta x} \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right) c \hbar n^{1/3}$$

チャンドラセカール質量(II)

以上より、縮退圧のエネルギー $E_{\text{deg}} \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right)^{4/3} \frac{c\hbar}{R}$

これが重力エネルギー $E_{\text{grav}} \sim GM^2/R$ と等しいとして、

$$\frac{GM^2}{R} \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right)^{4/3} \frac{c\hbar}{R}$$

これより、 $M \sim \left(\frac{1}{\mu m}\right)^2 \left(\frac{c\hbar}{G}\right)^{3/2}$ となる。これは、チャンドラセカール質量といい、縮退圧で支える天体の限界質量である(上式では $\mu=1$ で、 $M \sim 1.8 M_{\text{sun}}$)
 詳しい計算では炭素($\mu=2$)からなる星で $M \sim 1.4 M_{\text{sun}}$