

星の一生 誕生から死まで

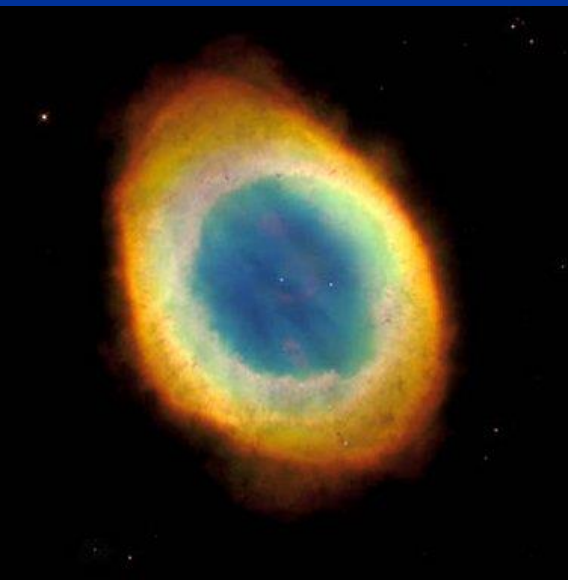
John R. Percy

*International Astronomical Union
University of Toronto, Canada*



星の進化

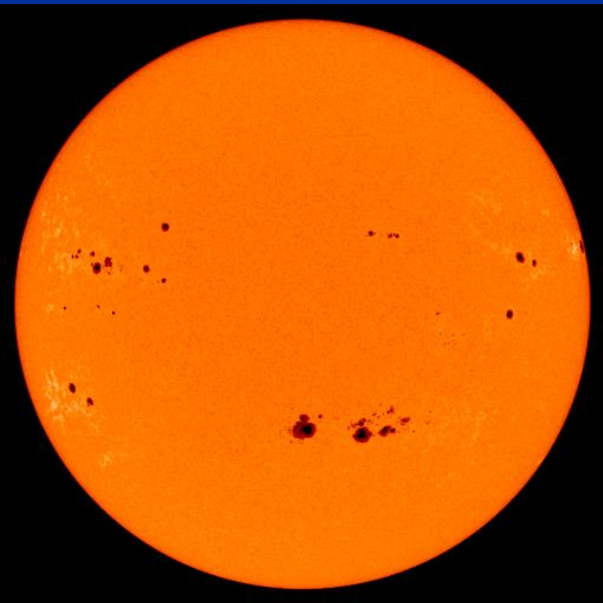
- 星の進化は、星そのものが変化すること
いう。星の一生の間に、星の内部で「燃
料を消費」して進行する。
- 星の進化を知ることは、以下のことを知
る鍵になる：
 - 太陽の性質とその未来
 - 太陽系の起源
 - 太陽系と他の惑星系の比較
 - 地球外生命の可能性



こと座の環状星雲、死にゆく星
出典：NASA

太陽の特徴：最も近い星

その特徴を知る方法（重要）



太陽
出典：NASA SOHO 衛星

- 距離： 1.5×10^{11} m
例えば、内惑星の軌道を1天文単位を単位で描いた後、内惑星までの距離をレーダー波反射や太陽面通過の際の視差から絶対値を入れ、1天文単位を実測する
- 質量： 2×10^{30} kg
太陽の周りを回る惑星の運動から
- 直径： 1.4×10^9 m
見かけの大きさ（角度）と距離から
- 放射エネルギー： 4×10^{26} W
距離と地球で計測されるエネルギーから
- 元素組成：98%が水素とヘリウム
スペクトルの分析から



星の特徴：遠くの太陽

そして、その特徴を知る方法（重要）

- 距離：視差を調べることによって測定、あるいは星が放つエネルギーが分かっている時は見かけの明るさから
- 放射エネルギー：距離と見かけの明るさから
- 表面温度：色やスペクトルから
- 半径：放射エネルギーや表面温度から
- 質量：連星の観測によって測定
- 元素組成：スペクトルから



オリオン座

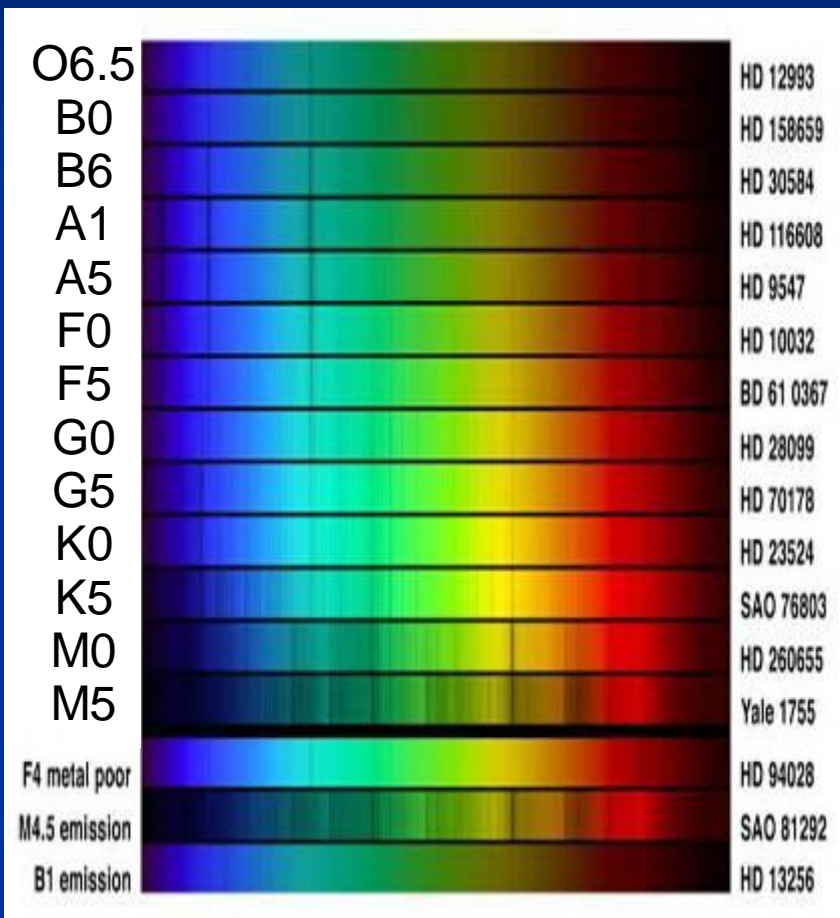
出典：ハッブル宇宙望遠鏡、ESA、藤井旭



星のスペクトル

星の光を色に分解する

スペクトル型



- 放つ光を調べることで、その天体について知ることができる。
- スペクトルを見れば、元素組成比、温度やその他の星の性質が分かる。

左図：上から13個の星のスペクトルは、表面温度は上ほど高温。

下の3つのスペクトルは特異な性質を持った星（上は重元素量が少ないもの、中と下は輝線を放つものの例）のスペクトルである。

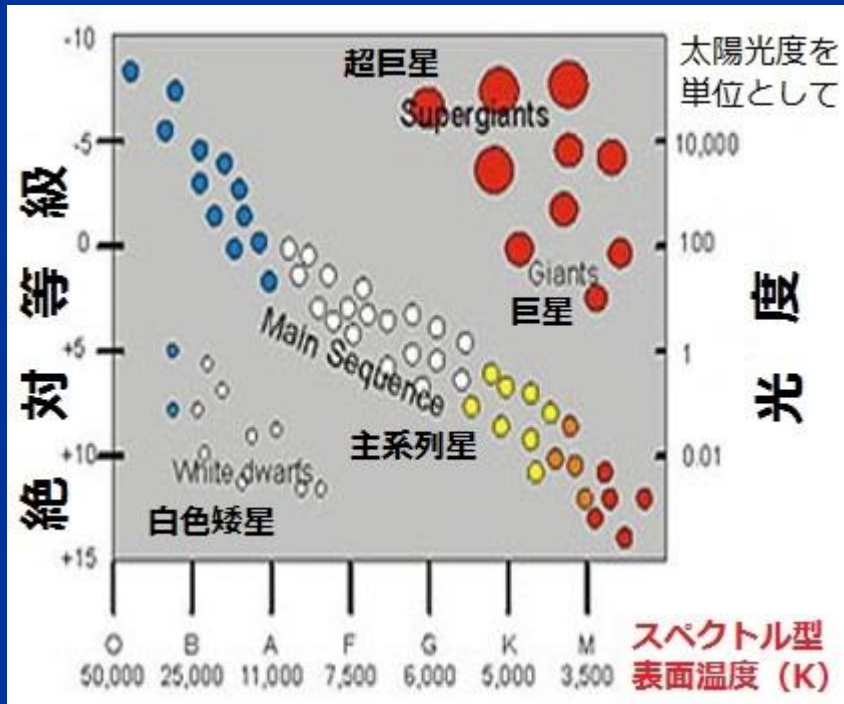
星のスペクトル

出典：アメリカ国立光学天文台（NOAO）



ヘルツシュプルング・ラッセル図 星の性質を分類する

- ヘルツシュプルング・ラッセル（HR）図は、温度（スペクトル型）と放射エネルギー（明るさ）の関係を示したものである。縦軸の「絶対等級」は放射エネルギーの対数である。

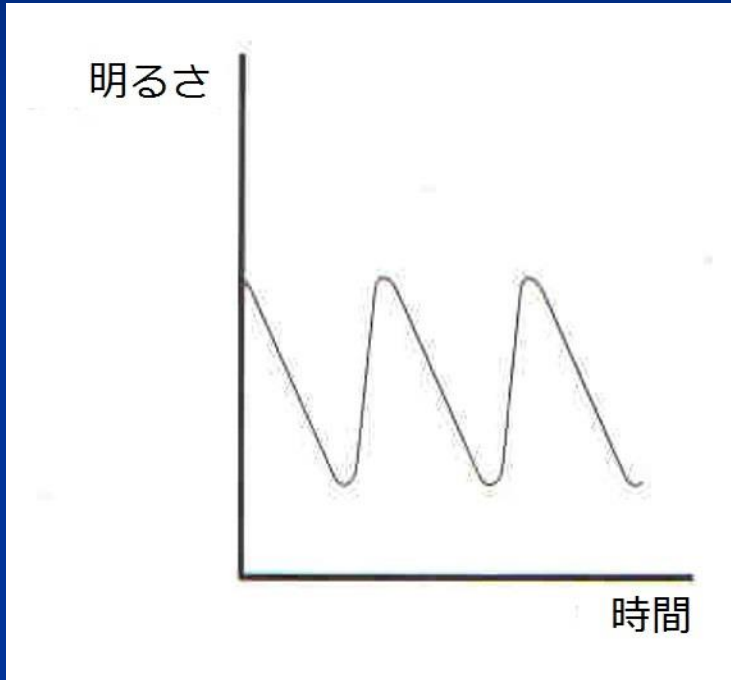


- 多くの星は「主系列」に並ぶ：重い星は高温で明るく（左上）、軽い星は低温で暗い（右下）。
- 右上に位置するのが、低温だが明るい、すなわち大きな半径を持つ巨星で、左下に位置するのが、高温だが暗い、すなわち小さな半径を持つ白色矮星。

HR図 出典：NASA



変光星

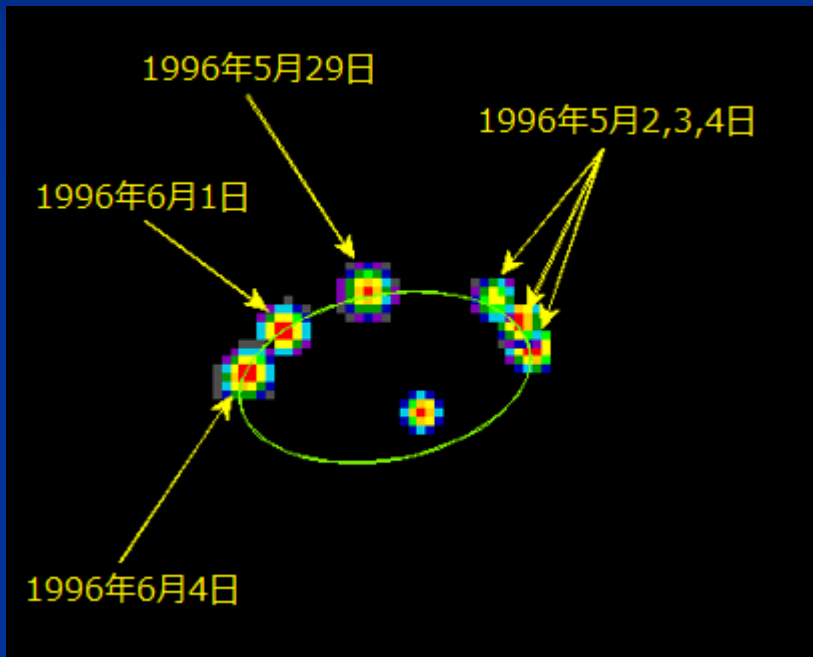


- 変光星は、時間とともに明るさが変化する星である。
- 多くの星は変光星である。星が振動したり、明るくなったり、噴出現象や爆発が起きたりするからである。また、伴星や惑星に食されて、変光星として見えることもある。
- 変光星によって、星の性質や進化の重要な情報が分かる。

星の明るさを縦軸に、時間を横軸に
取った変光曲線の模式図。

連星と多重連星

- 連星とは、距離が近い恒星がペアになっていて、互いの重力によって互いの周りをまわっているものである。連星は直接撮像で見分けられる場合がある（左の写真）。スペクトルや食によって連星として検出されることもある。
- 連星は、星の質量を測るために重要である。
- 多重連星は3つ以上の恒星が重力によって結びついたものである。



おおぐま座のミザールの動き
出典：NPOIグループ USNO, NRL

星団

「天然の実験室」

- 星団は恒星の集まりのことで、互いの重力で引きつけあっている。また、星団は集団を成しつつ宇宙空間の中を動いている。
- 星団内の恒星は、同時に、同じ場所で、同じ物質から生まれたものであり、地球から同じ距離にあると見なせる。違うのは互いの質量である。
- 星団は、それぞれの質量は違いますが同じ年齢の星の集団である。

プレアデス星団

出典：ウィルソン山天文台



太陽や星は何で構成されているのか

宇宙の元素組成比（個数比）



- 分光やその他の技術を使えば、星の「主成分」を知ることができる。
- 水素、ヘリウムは星に最も多く含まれる元素で、宇宙創成の時にできた。
- 重元素は非常に少ない。重元素は星の一生の中で作られていく。

1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
87 Fr	88 Ra			104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 UUp	116 Lv	117 Uus	118 Uuo			
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					

ビッグバンの際に生成された元素

恒星内部の熱核反応で生成された元素

超新星爆発等の際に生成された元素



星の構造の法則

- 星の内部深くなるにつれて、上の層の重さによって圧力が強くなっている。
- 気体の状態方程式によると、温度、密度が大きくなるにつれて、気体の圧力も大きくなる。
- エネルギーは、放射、対流によって内部の高温部から外部の低温部に移る。
- エネルギーは星の外へ流れ出るので、星の内部でさらにエネルギーを作らない限り、星は冷えてしまう。
- 星はこのように基礎的な物理法則に支配されている。

なぜ太陽は収縮してしまわないのか



- 左は膨らんだ風船である。
- 外部からの圧力が風船の内側に向かって力を働かせる。内部のガスの圧力が風船の外側に向けて力を働かせるので風船はしぼまない。
- 太陽の内部では、重力とガス圧のバランスが保たれている。

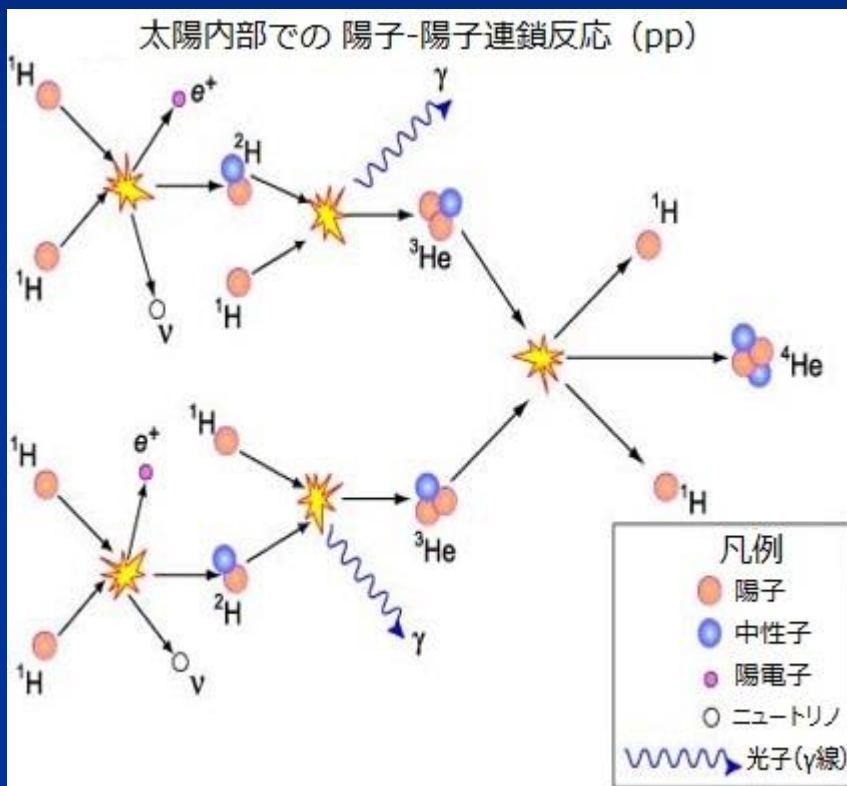
太陽や星のエネルギー源

- ガス、油、炭素の化学的な燃焼なのか？
（日常生活で言うところの燃焼）エネルギーを得るには非効率で、数1000年しか続かない。
- ゆっくりとした重力収縮か？
（高所から落として発電する水力発電のような方法）太陽の数100万年分のエネルギーになるが、太陽は数10億歳とわかっているので矛盾する。
- 核分裂か？
（原子力発電所のような方法）放射性同位体は太陽や星の内部にほとんど存在しない。
- 軽元素から重元素への核融合か？
効率の良い反応で、水素やヘリウムのような軽元素は太陽や星の重量の98%をも占めているため、非常に長期間のエネルギー源になる。



陽子-陽子連鎖反応 (p-pチェーン)

太陽の中の核融合の主たる過程

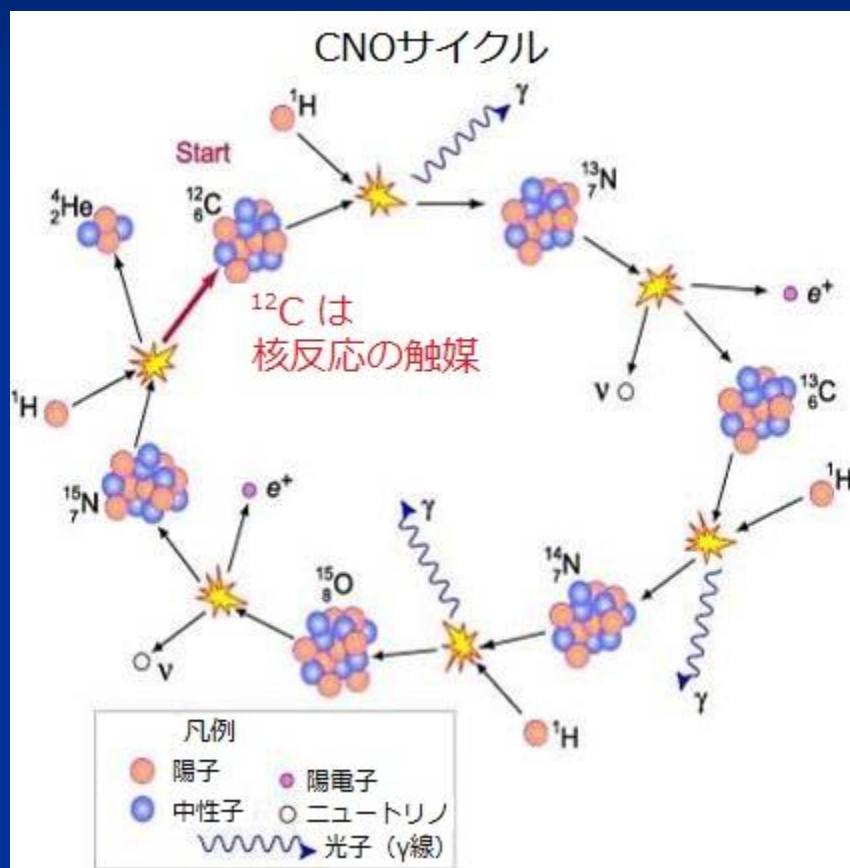


- 高温高密度の星や太陽中心部で、陽子は互いの静電気力に打ち勝ち、陽子と陽子が結合し ^2H （重水素）を形成する。その際、陽電子とニュートリノを放出する。
- 他の陽子が重水素に結合し、 ^3He を形成する。その際、ガンマ線光子を放出する。
- 次に2つの ^3He の核が結合して2つの陽子と ^4He の核を形成する。
- 結果として、4つの陽子が集まって、He原子とエネルギーを生成する。

陽子—陽子連鎖反応循環

出典：オーストラリア国立望遠鏡機構

炭素-窒素-酸素循環 (CNOサイクル)



CNO循環

出典：オーストラリア国立望遠鏡機構

- 大質量星（重い星）では、星の中心核はとても熱くなっており、陽子は ^{12}C （炭素）の核と衝突する（図の左上）。
- これは最終的に4つの陽子が結合してヘリウムの核が形成される循環的な反応の始まりである。
- ^{12}C の核はこの循環で終わりで元に戻る。 ^{12}C は生成も破壊もせず、核反応の触媒の役割をしている。

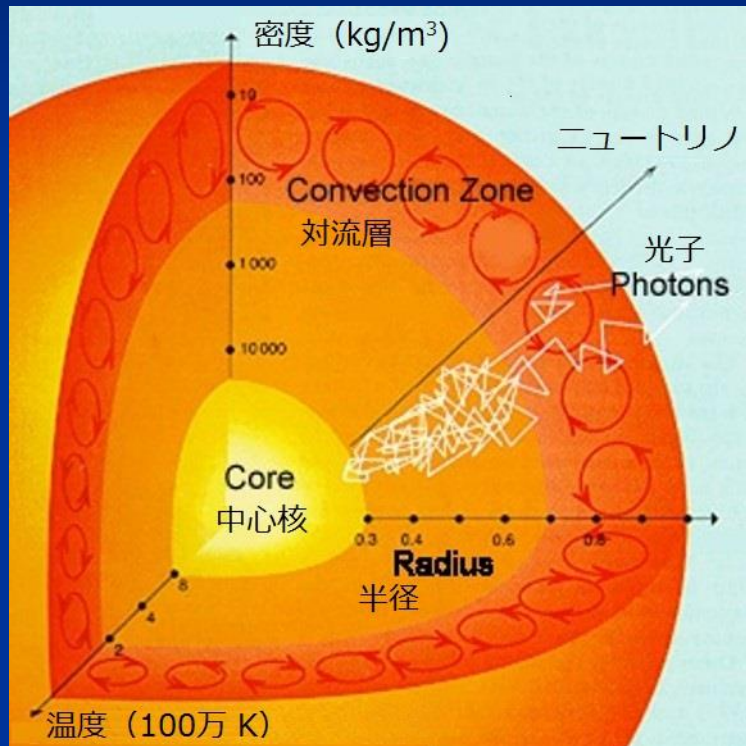
星の「モデル」を作る

- 星の構造を記述する法則は方程式で表され、コンピューターで解くことができる。
- コンピューターは太陽や星の各点の温度、密度、圧力、エネルギーを計算する。
- 太陽の中心部では、密度は水の密度の150倍、温度は約1500万 K にもなっている。



太陽の内部

コンピューターで計算した太陽のモデル

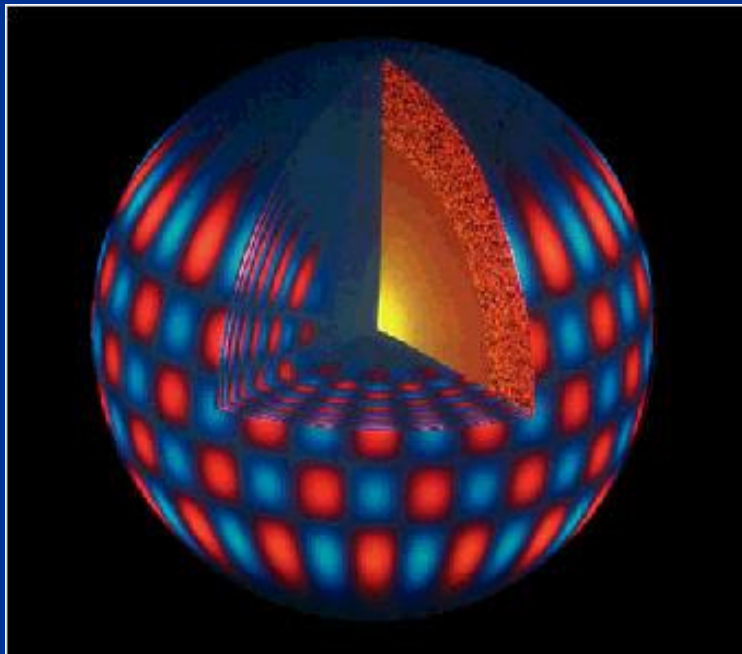


- 熱い中心核では、水素がヘリウムに核融合するという原子核反応でエネルギーを生成する。
- 中心核の上にある放射層を通してエネルギーは外へ流れ出る。
- 放射層と表面の間の対流層では、対流によってエネルギーが流れ出ている。
- 表面である光球から外は透明になっている。

太陽のモデル

出典：オスロ大学理論物理学研究所

太陽振動モデルのテスト

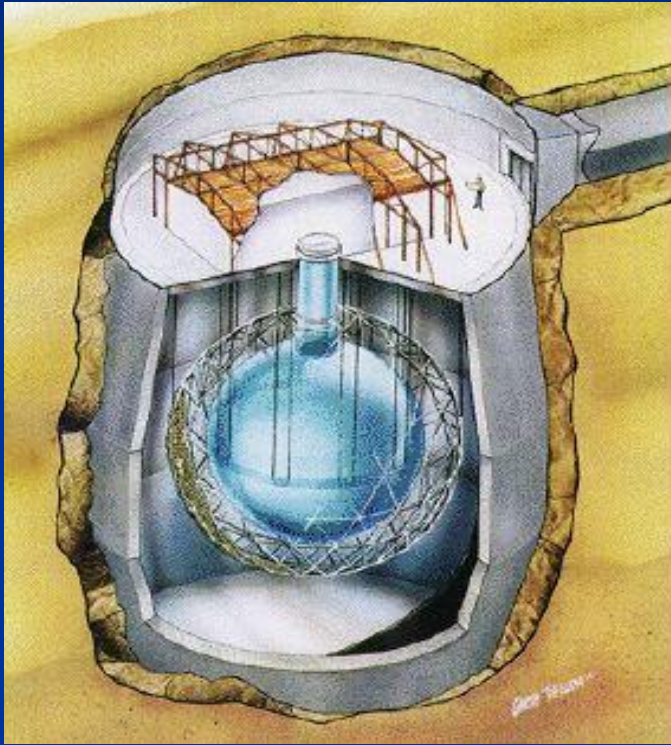


太陽の振動の概念図

出典：アメリカ国立光学天文台（NOAO）

- 左図の例のように、太陽は5分程度で、数千のパターンで振動している。
- この振動は観測することができ、地震の解析から地球内部を探るように、太陽の内部構造を推定することができる。太陽構造のモデルのテストにもなっている。この研究は日震学と呼ばれている。
- 振動は他の星でも観測でき、星震学と呼ばれている。

太陽ニュートリノモデルのテスト



- 核融合反応はニュートリノと呼ばれる素粒子を生成する。
- ニュートリノの質量は非常に小さく、物質とほとんど反応しない。
- ニュートリノの質量は、スーパーカミオカンデやサドベリー・ニュートリノ天文台のような特別な望遠鏡のおかげで、検出、測定されている。モデルからの予測と矛盾していない結果が出ている。

サドベリーによるニュートリノの望遠鏡
出典: : サドベリー・ニュートリノ天文台

星の一生の時間



- 星の一生の時間は、どれだけ核の燃料（水素）を持っているか、どれだけの速さで消費するのか（放射エネルギー）によって決まる。
- 星は太陽より軽いものがほとんどである。そういった星は、燃料が少ないが放射エネルギーが少ないので、太陽より長生きをする。
- 太陽より重い星はあまり存在しない。そういった星は、たくさんの燃料があるが、放射エネルギーが大きいので、太陽の方が長生きをする。

星の進化をどうやって知るのか

- 様々な年齢段階の星を観測し、進化を論理的に並べていく。
- コンピューターでモデルを作り、物理の法則を使い、核融合による恒星の元素組成比の変化を説明していく。
- 同じ年齢だが質量の違うものの集合体である星団を調べる。質量の違いによる進化の違いを調べることができる。
- 星の一生の中の、時間変化が速く、変わった現象を調べる（例：超新星や新星）。
- 脈動変光星の研究を通して、星の進化に伴って、脈動周期が変化していくことを調べる。



太陽のような星の進化

- 太陽のような星の一生は、はじめの約90%間、あまり変化しない。燃料(水素)が十分にある限り、核融合反応を続ける。この段階のものを主系列星という。



太陽と赤色巨星の大きさの比較
出典：オーストラリア国立望遠鏡機構

- 燃料の水素を使い果たした時、赤色巨星へと膨張する。
- 中心核は非常に高温になる。あまりの高温でヘリウムが炭素へと核融合してエネルギーを生成するようになると、膨張していた星は、いったんしぼむ。
- 燃料のヘリウムが尽きた時、星は再び大きくなり、もっと大きな赤色巨星になる。その大きさは太陽の数100倍にもなる。

太陽のような星の死



- 赤色巨星になった時、星は振動を始める。ミラ型星と呼ばれる段階に入る。
- 脈動によって星の外側は分離していき、美しい星雲ができる（左図）。
- 星の中心核は小さく高密度で白く光るのみで、燃料は、ない。

惑星状星雲「らせん星雲」 (NGC 7293)
出典：NASA

白色矮星



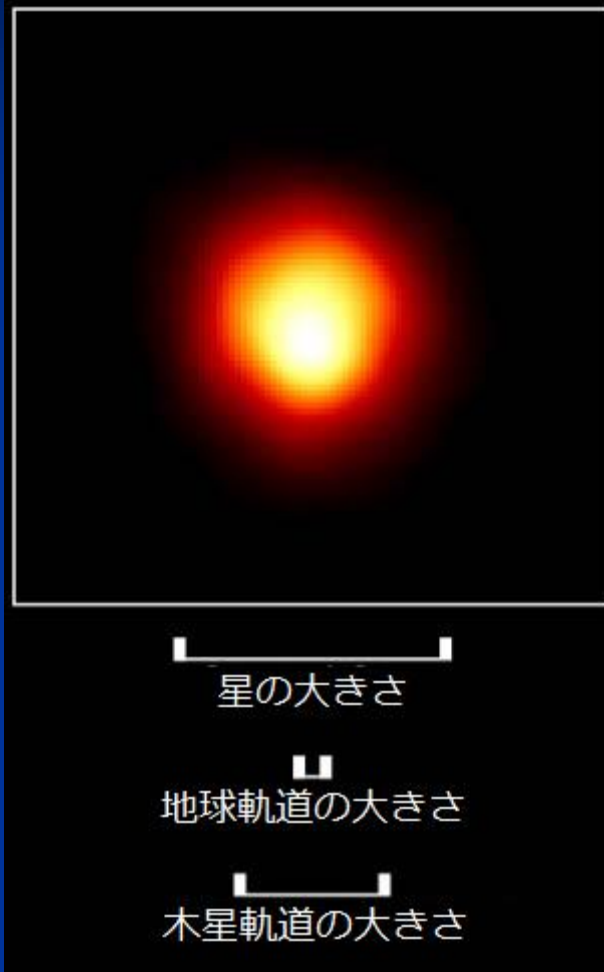
- 白色矮星は、太陽のような星の、死んだ中心核を示している。
- 白色矮星は、太陽と同程度の質量、体積は地球と同程度で、密度は水の100万倍である。
- 白色矮星では中心に向かって働く重力と内部の電子の量子力学的な圧力がバランスしている。
- シリウス（左）やプロキオンなど、地球に近い恒星には、白色矮星の伴星を持っているものもある。

シリウス（上）の伴星である
白色矮星（下） 出典：NASA



重い星の進化

- 重い星は数が少ない。非常に明るく、燃料を消費するのが速く、寿命は数百万年の場合もある。
- 燃料を使い果たした時、大きくなって赤色超巨星になる。
- 星の中心核はとても熱く、鉄のような重元素を核融合で生成するのにも十分になってくる。
- オリオン座のベテルギウス（左）は明るい赤色超巨星である。その大きさは地球軌道より大きい。



ベテルギウス

出典：NASA/ESA/HST



重い星の死



かに星雲
1054年に観測された超新星の残骸
出典：NASA

- 重い星の中心核が主に鉄できているくらいになった時、核融合のための燃料はもうなく、高温を保てなくなる。
- 中心核が重力崩壊し、中心核は中性子星になり、外側の層は落下し、反動で吹き飛び、エネルギーを放出する超新星爆発となる（左）。
- 超新星爆発の際、鉄より重い元素を生成し、それらの元素を周辺にばらまく。それらは新たな星、惑星、そして生命の一部になっていく。

中性子星

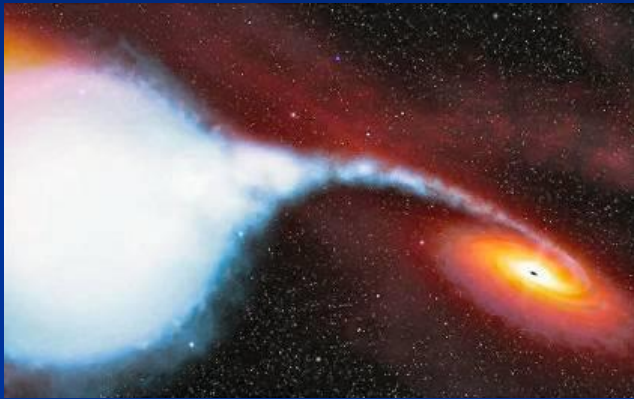


- 太陽質量の1.5から3倍の質量を持つ中心核は、非常に圧縮されて中性子星になる。
- 半径は約 10 km で、密度は水の数 10億倍となっている。
- 中性子や極限状態の粒子から成っているとされる。
- 若い中性子星は高速回転し、電波で周期的なパルスが見え、パルサーとして観測される。

かに星雲中心部にある中性子星はパルサーとしても知られている。回転しながら放射エネルギーが星雲を輝かせている。

出典：NASA/ESA/HST

ブラックホール



はくちょう座X-1の想像図
可視光で見える星（左）と
降着円盤の中心にある
ブラックホール（右）
出典：NASA

- ブラックホールは、重力がとても強い
ため、光さえ脱出できないような天体
のことである。
- 太陽質量の30倍以上の重い星の中心
核は燃料を使い果たした後、ブラック
ホールになる。
- ブラックホールを検知する方法のひと
つは、その周りを周回する、光で見え
る天体を見ることである（左図）。

白色矮星との近接連星系

- 互いに非常に接近している連星系で、より質量が大きい方が先に白色矮星になり、片方がまだ普通の星という場合がある。
- 互いに接近しているため、普通の星が進化して膨張していくとそのガスの一部が白色矮星へと降り注ぐことがある。白色矮星の周りに降着円盤が形成される（左図）。
- 降着円盤のガスが白色矮星に落ち込む時、爆発や噴出が起き、急激な増光として観測される（激変星の一種）。



普通の星（左）と、
降着円盤を伴った
白色矮星（右）の系
出典：NASA

星の誕生

- 星は、冷たいガスと塵でできた分子雲（星雲）の中で形成される。
- 星間物質であるガスと塵は、天の川銀河（銀河系）の重量の約10%を占めている。
- 若い星は、生まれた元の星雲の中やその近くで発見されることが多い。
- 星が生成される領域として、近くてきれいに見える例はオリオン星雲（左）で、約1500光年先にある。



オリオン星雲
出典：NASA

星間ガス

星々の間にあるガス



オリオン星雲では、
星雲中の恒星の紫外線によって
ガスが励起している。

出典：NASA

- 星間ガス（原子または分子）は近くの星からの紫外線によって励起され、輝線星雲となる（左図）。
- 星々の間にある冷たいガスは電波を放射し、電波望遠鏡で見ることができる。
- 星間ガスの重量の98%は水素とヘリウムである。

星間塵

星々の間にある塵



- 明るい恒星の近くにある星間塵は可視光でも存在が分かる。
- 塵は、その奥にある恒星からのガスの光をさえぎる（左図）。恒星は、それらの雲の中で形成されている。
- 星間物質の1%が塵である。塵の粒子数は数100 nm の大きさで、砂粒（シリケート）や炭素のスス（グラファイト）のたぐいである。

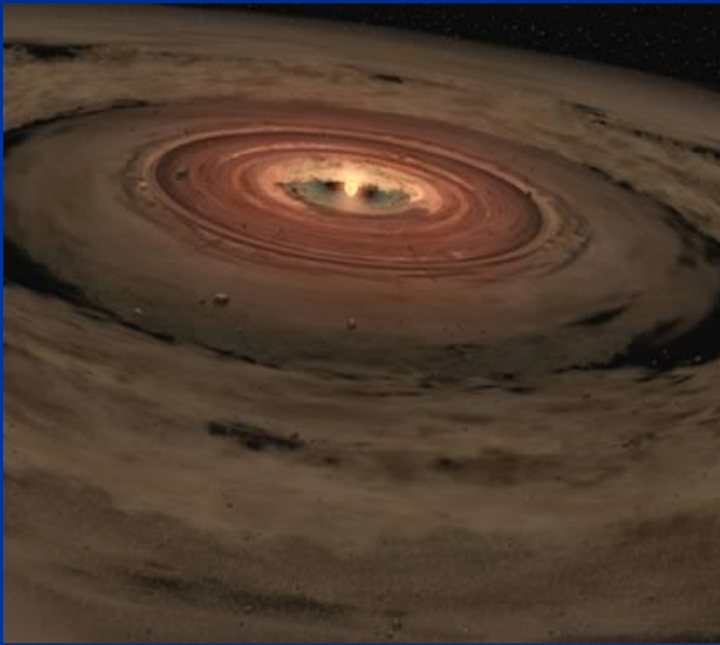
M 16

出典：NASA/ESA/HST



星形成

- 星は星雲中の密度の高くなった核（塊）のようところで形成される。
- そのような塊を作る力は重力である。
- 角運動量の保存によって収縮する塊は回転を速め、塊は平坦になり、円盤状になっていく。
- 恒星は円盤の中心にて形成される。惑星は、円盤の外側の低温領域で形成される。



惑星系の形成過程の想像図
出典：NASA

原始惑星系円盤 形成途上の惑星系

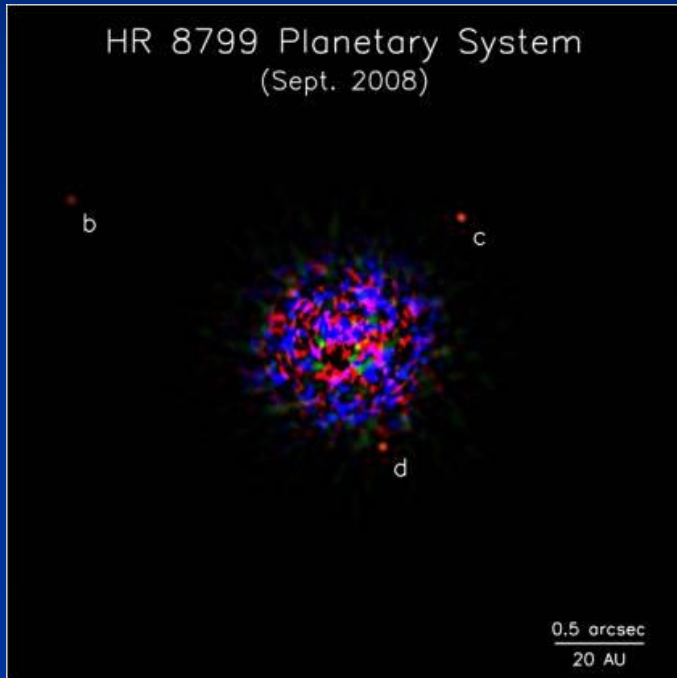
- 原始惑星系円盤はオリオン星雲などで観測されている（左図）。
- 円盤の中心にいるはずの星は、ほとんど見えない。
- 円盤の塵は背後からの光を隠している。
- このような観測は、惑星系形成モデルの直接的な証拠となっている。

原始惑星系円盤：プロプリッド
出典：NASA/ESA/HST



太陽系外惑星（系外惑星）

他の恒星の周りを回る惑星



HR 8799の系外惑星系

出典：C. Marois 他、
カナダ国立研究機構

- 系外惑星は、中心の星へ及ぼす重力的な影響や、中心の星の前面を通過して食を起こすことを通じて発見されることが多い。
- 直接観察されることは、まだ非常に少ない（左図）。
- 太陽系の惑星と違い、これまで発見された系外惑星は大きく、恒星にとっても近いところにいるものが多い（訳注：検出法による対象の偏りという可能性があり、近年、多種多様な系外惑星系が見つかってきている）。惑星系形成の理論の修正を迫る観測例も多い。



まとめ

- 「重力は恒星の形成、誕生、死を支配する」
(R.L. Bishop教授)
- 恒星の誕生は、太陽系やほかの惑星系の誕生ともつながっている。
- 星を輝かせ続けている核融合は、惑星上の生命にとっても大事なエネルギー源である。
- 恒星の一生と死によって、星、惑星、そして生命の材料となっている、重元素が生成される。
- 恒星が死ぬ際、重力は白色矮星、中性子星、ブラックホールといった、特異な天体を生成する。



ありがとうございました

