

恒星進化概要

東北大学大学院理学研究科天文学専攻修士1年 高山正輝

1. 星の進化を司るもの

single starに限れば恒星の進化経路を決めるもっとも大きな要因は星の質量である。そこで以下では星の質量による進化経路の多様性と、各段階の星の内部でどのような現象が起きているのかを紹介する。

2. 恒星進化経路

2.1. 小質量星

太陽と同じくらいの組成の星では一般に小質量星とは $M < 2.3M_{\odot}$ の範囲の星のことを言う。境界値は金属量によって変わる。なおここでは $M < 0.85M_{\odot}$ のものは考えない(宇宙年齢のうちに主系列を出ないため)。

主系列段階では質量によってエネルギー源となる核融合の反応経路が異なる。およそ $1.5M_{\odot}$ を境に軽いものは pp-chain 反応を、重いものは CNO サイクルで主にエネルギーを生成する。また反応の違いが構造の違いを生む。軽い星では core では放射でエネルギーが運ばれるが、外層の一部は対流層となっている。一方重いものは逆に対流 core と放射外層である。また、主系列段階でも徐々に明るく赤く変化していくのは核融合反応に伴い core が収縮することで外層が徐々に膨張するためである。

中心の水素を使い果たすと星はわずかに重力収縮をし(この時 core は等温、すなわち密度勾配のみで支えられている)、やがて H shell burning を始め、外層は膨張を始める。 $1M_{\odot}$ より軽い星はこの時点で core の縮退が強く重力収縮しない。一方それより重い星は縮退が弱く、H shell から He が供給され core mass が星の質量のおよそ 10% を越えると core

の重力収縮が始まる。この収縮は core の縮退が強くなる(RGBの根元のあたり)まで続くが滞在時間が短いため、この段階の星は観測数が極めて少なく HR 図を描くと若い散開星団ではこの領域だけが星のない、ヘルツシュプリングギャップとして現れる。その後、外層で対流が深くまで進行し(赤色巨星、RGB)、He core の質量がおよそ $0.475M_{\odot}$ に達すると中心のヘリウムに着火し熱を発生する。しかし core は縮退しているため温度が上昇しても膨張せず、温度が下がらないため核反応が暴走する(He flash, Fig1)。ところで He が着火する場所は実は core の中心よりわずかに外側である。その理由は中心部では photo neutrino や plasma neutrino の発生により温度が周りより低くなっているためである。He flash の後、core の縮退が弱まると安定した He core burning の状態(red clump 星)となるが、これは pop I の星の場合であり、より金属量の少ない星では水平分枝星となる(光度がどの星も同じになるのは He flash が起きる際に core mass が揃うからである)。

He flash 以降水平分枝のどの位置に降りてくるかは外層の質量次第だが、それはすなわち RGB の段階でどれだけ mass loss したかによる。しかし現在のところこの mass loss rate を第一原理的に導く

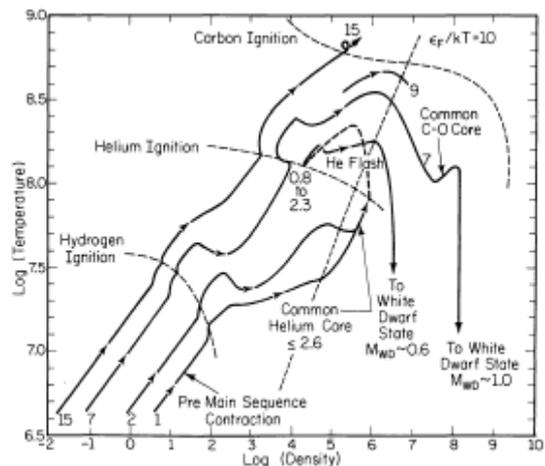


Fig1. core の進化 (Iben, 1991)

ことに成功しておらず、また理論も確立されていない。水平分枝とセファイド不安定帯が交わるころでは星の外層が不安定となり RR-Lyrae 型星として観測される。

He core burning 段階を終えると、AGB 星となる。AGB 星は縮退した C, O core を持ち、He shell burning の不安定性(熱パルス)による外層の対流による汲み上げ(dredge up)により種々の核反応生成物が表面で観測される。特に Tc が発見されたことで s-process が起きていることが証明されたことの意義は大きい。AGB 段階は外層の(主に H の)質量が $0.01 \sim 0.001 M_{\odot}$ を下回るまで続く。その間の mass loss rate は RGB 同様わかっておらず、観測から適当な値を用いる以外今のところ解決策はない。外層の質量が十分小さくなると opacity が小さくなるため効率よくエネルギーを流せるようになり、星はコンパクトになることができるため光度を保ったまま収縮(表面温度が上昇)する。この状態が planetary nebula nuclei(PNN)であり我々からは周りのガスによって惑星状星雲として観測される。最後に C, O white dwarf としてその一生を終える。

2.2. 中質量星

He flash を起こすより重く、かつ C 燃焼まで進まない星を中質量星という。initial mass にしておよそ $2.3 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$ の星である。中質量星の進化は He flash を経験しないことを除けば小質量星のそれと大きく異なることはない。これらの星は小質量星同様主系列を出ると core が収縮するが、縮退することは無く、したがって flash は起きない。He core burning が始めると HR 図上でループを描く(セファイドループ)。ループとセファイド不安定帯が交わるころにある星は Cepheid 変光星となる。その後 AGB、PNN を経て C, O WD となる。

2.3. 大質量星

C, O 燃焼まで進行する星は大質量星である。小中質量星同様に H、He と順に燃えていくが、中質量星同様に He core の電子は縮退しないので He flash は起きず、一方中質量星とは異なり、金属量にもよるが initial mass が $10 \sim 20 M_{\odot}$ を越えるものはセファイドループを描かない(重元素汚染が進むと縮めなくなる。Fig2)。代わりに進化の途中でほとんど明るさが変わること無くただ膨れていく。明るさが変わらないのは外層が電子散乱型であることからわかる。これらは進化のタイムスケールが非常に短く、He 燃焼以降の段階では core の変化に外層が応答できなくなり HR 図上の位置から星の状態を知ることが困難となる。また主系列を出た段階で激しく mass loss を始め、特に $50 M_{\odot}$ 以上の重い星は LBV となり外層をほとんど吹き飛ばした後 Wolf-Rayet 星へと進化する。一般に $30 \sim 40 M_{\odot}$ を越える星は全て Wolf-Rayet 星となり、最終的には重力崩壊型超新星爆発を起こす。

最終的に比較的軽い星($\sim 9 M_{\odot}$)は C 燃焼後に O+Ne+Mg core が縮退するため、一般に星の内部では Na の β 崩壊で Mg と電子が生成されるところを、逆に Mg が電子捕獲してしまい圧力(主に縮退圧)を失った core が重力崩壊を起こす。一方もっと重い星は Fe 生成まで核反応が進行するが、高温の core 中の高エネルギーフォトンにより He に分解され(吸熱反応、鉄の光分解)、core の温度が急激に減少、重力崩

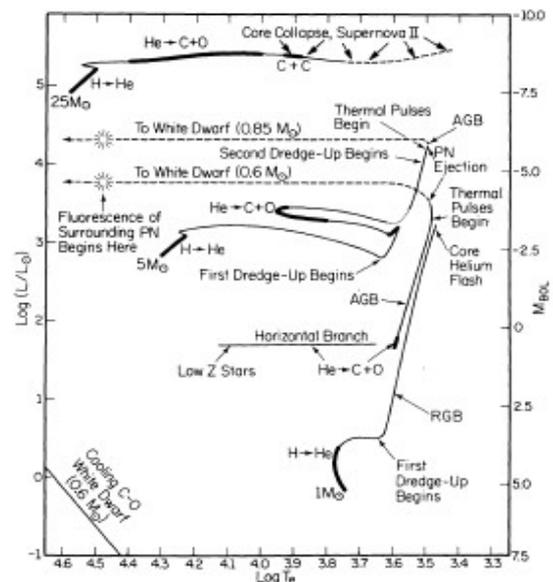


Fig2. 進化経路 (Iben, 1991)

壊し、超新星爆発を生じる。この時 He は更に陽子と中性子に分解され、生成された中性子と残っている Fe とが反応(r-process)することによって r-process 元素が生成されと考えられているが、r-process を生じさせるための大量の中性子 Flux を実際に作れるのかは未だ持って議論の途中である。