

超新星爆発

金光研究室 長谷川 泰子

1 序論

超新星爆発は古くから「客星」と呼ばれ、観測の記録も残っている突発天体の一つである。超新星が古くから観測されている理由としては、突発的に明るくなり、急速に暗くなっていくという一連の流れが人間の観測できる程度のタイムスケールで起こること、それが肉眼でも観測できることが上げられる。

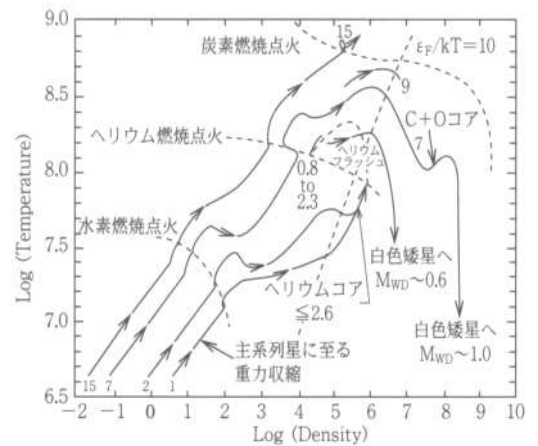
今日では肉眼では観測が不可能な天体であっても、天体望遠鏡、可視光だけでなく、電波、赤外線、X線、ガンマ線などの電磁波やニュートリノなどから観測できるようになった。以前は 100 年に 1 個程度しか見つけることがなかった超新星が、最近では年間 100 個以上も観測されるようになり、その超新星の性質から、距離測定に利用したり、さまざまな利用をされている。

本研究では、超新星爆発がどのような条件で起こるのかをアニメーション化し、視覚的にそのメカニズムを理解しやすくすることを目的としている。

2 恒星の進化

2.1 原始星

恒星は星間雲の中で密度の濃い領域が重力崩壊することによって生まれる。中心部の圧力が 10^{13}g/cm^3 程度になると、増加した内部エネルギーを逃すことができずに断熱的に圧力が上昇し、収縮が止まる。 10^{10}g/cm^3 程度になったときに、中心部で衝撃波が発生し外層に伝播することによって、力学的な平衡状態になっていくのである。衝撃波が表面まで達するとフレアアップを起こし、周りのガスやダストへの放射が、明るい赤外線源として観測される。 10^5 年程度の時間をかけて外層部のガスが降積しながら進化し、 10^7 年程度でガス円盤は散逸してしまうと示唆されている。原始星の中心部の温度は熱核反応を起こすにははるかに低いので、エネルギー源は重力であり、星は引き続き準静的に収縮して密度と温度を上昇させ、やがて中心部で水素の核融合反応が始まると主系列星となる。



2.2 主系列星

重力収縮が進み、中心温度が 10^7K を超えると水素の核燃焼が始まり、主系列の星となる。その後の進化は初期段階の恒星の質量 M により過程が異なる。 M を恒星の質量、 M_s を太陽の質量とする。

$M < 0.08M_s$ 中心温度が水素の核燃焼が起こるほどには高くないうちに電子の縮退の効果がきいて、収縮が止まり、褐色矮星となる。エネルギー源は初期に持っている熱エネルギーであり、高度が小さいため長時間にわたって輝き続ける。いずれ冷えて黒色矮星となる。

$0.08M_s < M < 0.5M_s$ 中心温度が上がり、水素の核燃焼反応を始める。水素の核燃焼が終わり He のコアを持つが、中心温度は He 燃焼を起こすのに十分なほどは上昇せず、水素殻燃焼が消えた後に He の白色矮星となる。

$0.5M_s < M$ 温度により水素の核燃焼反応の機構は異なる。

$1.5M_s$ 以下の質量の恒星 主に $p-p$ 連鎖を行う。この核反応によるエネルギー発生率の温度依存性はそれほど大きくないので、中心部での水素燃焼は比較的広がった領域で起こり、進化が進むとともに中心部に He が溜まってくるが、 He の分布は様ではなく、なだらかな分布になる。星の質量の 10%程度 He に転化すると、中心部で水素核燃料がなくなるので次の段階へ移行することになる。

$1.5M_s$ 以上の質量の恒星 中心温度が $2 \times 10^7\text{K}$ 以上になるので主に CNO サイクルがはたらく。この核反応ではエネルギー発生率の温度依存が大きく、核反応は中心部で起こる。そのため、中心部では放射でエネルギーを運ぶことができず、対流中心核が発生する。対流中心核が発生した場合には、その中で組成が一樣になるのでヘリウムのたまり方も一樣になり、対流中心核と水素燃焼を受けていない外層との間には組成が変化する領域が存在する。中心部で水素がなくなると次の段階に移行する。

2.3 ヘリウム燃焼段階の星

水素燃焼が終わると、中心に He からなるコアを持ち、外層部を水素を主体とした組成となり、化学組成の不連続

が存在することになる。具体的な進化は星の質量によって異なる。

$M < 2M_{\odot}$ He コアで電子が縮退し、温度はほぼ等温となる。不連続面での水素の核燃焼による水素殻燃焼が進むことでコアの He の質量が増加する。それにもない中心部の温度が上昇し、温度が十分高くなると He 燃焼が始まる。力学的にコアは電子縮退で支えられているので、核燃焼で発生したエネルギーは温度上昇に使われ、不安定な燃焼になるが、ある程度核燃焼が進むと縮退は弱くなり、コアは膨張し安定な燃焼になっていく。そして、最終的に赤色巨星へと進化する。

$2M_{\odot} < M$ $5M_{\odot} < M$ の星では水素燃焼殻の半径をほぼ一定に保ちながら重力収縮する。すなわち、中心核での密度勾配が大きくなり、水素燃焼殻での密度と圧力も減少していくことになる。殻では圧力は連続なので、外層部の密度も減少し、膨張する。そして、巨星に向かって進化していく。また、 **$2M_{\odot} < M < 5M_{\odot}$** の星では、水素殻燃焼開始時は等温コアをもっているが、He コア質量増加によりチャンドラセカール限界を超えると重力収縮が始まり、進化の時間は異なるものの、 **$5M_{\odot} < M$** の星と同じことが起こる。

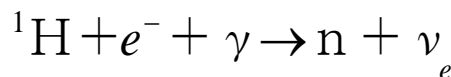
2.4 赤色巨星

赤色巨星の段階の星は表面对流が発達していることに加え、主系列に比べ星の表面での重力ポテンシャルが浅くなっているため、水素燃焼殻まで達すると、He, C, N, O などを表面に運び、表面からの質量放出が起こっていることが知られている。

2.5 その後の進化

初期質量 $M < 8M_{\odot}$ He 燃焼によりできた C+O のコアが縮退する。ニュートリノ損失や質量放出により、コアの温度は臨界値までは上昇せず、赤色巨星が漸近分岐の段階で質量放出が起き、 **$1.4M_{\odot}$** 以下のとなり、C+O の白色矮星となる。

$8M_{\odot} < \text{初期質量 } M < \sim 30M_{\odot}$ C+O のコアは縮退せず、収縮して温度が上がることで、C 燃焼が起こる。さらに O, Ne, Si の燃焼が起き、最後に Fe のコアが形成される。Fe は最も束縛エネルギーが大きな元素なので、これ以上の核燃焼は起こらなくなり、収縮が進む。その結果、コアの温度が上昇し、Fe の光分解



が起きるが、この反応は吸熱反応なので中心部の圧力が減少し、重力崩壊を起こす。その結果、コア崩壊型超新星爆発を引き起こす。この光分解は短時間で起こるため、陽子に変化する時間をあたえず、中心には中性子星を残す。

$30M_{\odot} < \text{初期質量 } M$ Fe コアの質量が大きすぎて中性子にはなれず、ブラックホールを形成する。

3. 超新星爆発

3.1 超新星のスペクトルによる分類

超新星には大きくスペクトルに水素の吸収線が見られない I 型と、水素の吸収線が見られる II 型とがある。どのような進化をした星が爆発したのかを分類することができる。また、その銀河の年齢を推測することにも役立つ。

I 型

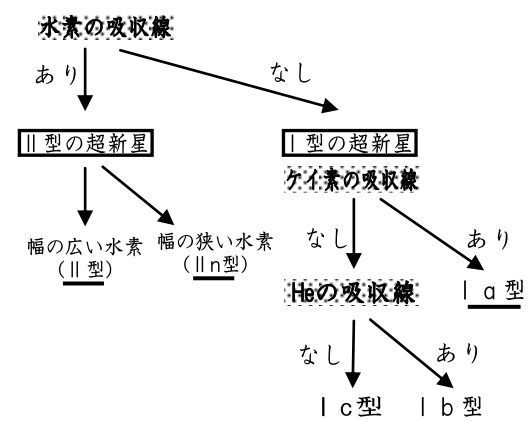
Ia 型

I 型の中でも珪素の吸収線が見られるものを Ia 型と呼ぶ。楕円状銀河・渦状銀河・不規則銀河といったあらゆる型の銀河に出現するが、後述の II 型より少ない。Ia 型超新星は、連星系をなしている白色矮星が相手の恒星から降り積もったガスによりチャンドラセカール限界まで質量を増加させ、ついには自らの重力による収縮を支えきれなくなる。この収縮によって、炭素と酸素からなる中心核で、炭素の核融合反応が暴走し、大爆発を起こす。Ia 型超新星の絶対等級はほぼ一定であることから、その見かけ上の明るさを測定することで、他の銀河までの距離を求めることができる。

Ib 型, Ic 型

I 型の中でヘリウムの吸収線が見られるものを Ib 型、He の吸収線、Si の吸収線のどちらも見られないものを Ic 型と

<超新星のスペクトル>



呼ぶ。これらについては機構がよく分かっていない。II型と同様、恒星の一生の最後に迎える大爆発であるが、その前に水素を使い果たしてしまい、水素の吸収線が見られなくなると考えられる。

II型

太陽の約8倍より重い星の場合、核融合反応を繰り返すことによって、最後に鉄の中心核ができる。鉄の中心核の質量がチャンドラセカール限界を越えると、周りからのガンマ線を吸収し、ヘリウムと中性子に分解してしまう(鉄の光分解)。この反動による衝撃波で外層部は猛烈な核融合反応を起こし、II型の超新星となる。

3.2 超新星爆発の種類

コア崩壊型超新星

初期質量が8Msよりも大きな星では中心部に1.5Ms程度の鉄のコアが形成される。鉄は一核子あたりの束縛エネルギーが最も大きい原子核なので、核反応によってエネルギーを生み出すことができない。したがって、コアのエネルギー源は重力収縮によってまかなわれることになる。鉄のコアは初期には圧力として原子の縮退圧が卓越しているが、密度の上昇とともに原子核による電子捕獲が進むため十分な圧力の上昇をもたらすことができない。同時に原子核も光分解による吸熱反応を起こすので、熱的な圧力もそれほど上昇しない。その結果、コアはほぼ自由落下するよる、重力崩壊が起きる。重力崩壊は中心部の密度が原子核の密度程度になると、強い核力の効果によって止められ(これをバウンスとよぶ)、衝撃波を発生する。この衝撃波が外層まで伝わって星全体を吹き飛ばすのがコアの重力崩壊型超新星爆発である。中心部には、原子核密度程度の物質からなる中性子星が残されることになる。初期のコアの質量が十分大きい場合には重力崩壊は止まることなく結局星全体がブラックホールになると考えられている。

炭素爆燃型超新星

Ia型の超新星はスペクトルに水素の特徴を含まないこと、光度曲線が数十日で指数関数的に減衰するといった共通性があることから、コア崩壊型ではなく、炭素燃焼または爆轟型超新星であると考えられる。また、現在星形成が起こっていない楕円銀河でも観測されることから、年齢の古い星、具体的にはC+O白色矮星で生じるものと考えられる。電子が縮退したC+Oコアで核反応が起こると、発生したエネルギーにより温度が上昇するが、圧力は縮退圧が圧倒的に大きいのでほとんど変わらない。すなわち密度など構造の変化はしばらく起こらず、温度のみが上昇する。縮退が解けるまでの温度が上昇すると、一気に膨張が始まるので、衝撃波が発生し衝撃波通過後の温度上昇によって核反応領域も広がって、星全体が吹き飛ぶ。これがIa型超新星になる。

4 超新星爆発のアニメーション

全ての恒星が超新星爆発を起こすわけではなく、恒星の初期の質量が大きく関係することがわかった。この超新星爆発にいたるまでの星の進化は、温度、密度、重力エネルギー、電子縮退等様々な要因が複雑に関係しあい成り立っている。この機構をアニメーションにより視覚的に捕らえることにより、理解しやすした。

アニメーションを行う上での条件は

- 1、天体は球対象の構造を取る。
- 2、時間的なスケール、長さは実際のものとは異なる。

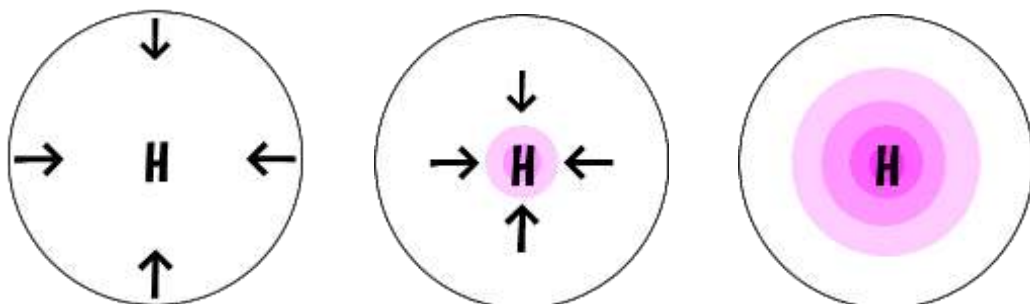


図1) 原始星の収縮にともなう圧力の上昇のアニメーション

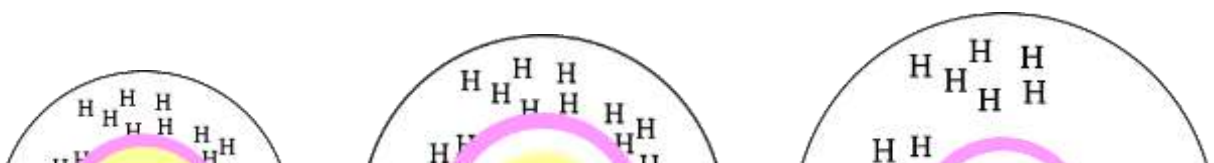


図 2) 赤色巨星における密度の変化と膨張のアニメーション

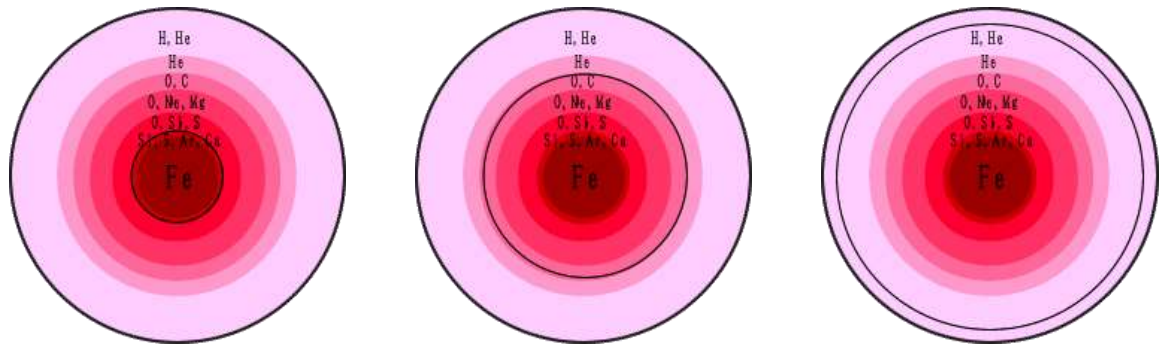


図3) たまねぎ構造に衝撃波が伝播し、爆発にいたる物質の変化のアニメーション

5 今後の課題

コア崩壊型超新星爆発に関して、具体的な点ではまだ未解決の問題が多くあり、検討が続けられている。重力崩壊から超新星にいたる家庭にはさまざまな物理過程が関与する、まず、中性子星の束縛エネルギーは静止質量の10%程度になるので力学は一般相対論的に取り扱わねばならない。電子捕獲によって発生したニュートリノは重力崩壊の初期段階では光学的厚さが薄く自由に外部に逃げていくが、ある程度密度が大きくなった段階ではコアに閉じ込められる。ニュートリノと物質の相互作用はどのような原子核が存在するかに強く依存するが、原子核は完全に分解されるわけではなく、ニュートリノのぞんざい量に依存して変化する。バウンスの起こり方はもちろん、核物質の状態方程式にも強く依存する。このような複雑な過程は数値実験により調べられているが、現在のところ、一致した結論は得られていない。むしろほとんどの数値実験では十分な強さの衝撃波がいられず、超新星爆発を再現することはできていない。

また、超新星爆発の際の衝撃波のエネルギーは実際に観測された超新星と比較すると、はるかに弱く、外層は吹き飛ばない計算になってしまう。この、外層が吹き飛ばだけのエネルギーをどうやって生み出すかを解明していく必要がある。