

pulsational pair-instability における質量放出

石井 達穂 (東京大学大学院 総合文化研究科)

Abstract

pulsational pair-instability は、圧力を支えるために使われていたエネルギーが電子陽電子ペアの静止質量エネルギーに使われることで酸素燃焼の時に不安定を起こすが星全体を飛ばす爆発には至らず、pulsationしながら質量放出を繰り返す。これは pair-instability よりも少し軽い $40 - 60 M_{\odot}$ の CO コアを持つ大質量星で起こる。放出された質量は互いに衝突し非常に明るく輝く可能性があるが、その光度は放出された質量、爆発エネルギーと pulsation の時間間隔に依存する。そこで本研究では恒星進化計算と流体力学計算を組み合わせ進化を求めることで pulsation 時の放出を詳しく調べた。我々は金属量が $Z = 0.004$ で初期質量が $250 M_{\odot}$ で炭素燃焼後の質量が $61 M_{\odot}$ 、金属量が $Z = 0.004$ で初期質量が $140 M_{\odot}$ で炭素燃焼後の質量が $54 M_{\odot}$ の 2 つのモデルについて pulsation 時における質量放出を計算した。この 2 つのモデルについてそれぞれ質量放出は最大で $4 M_{\odot}$ および $1 M_{\odot}$ であり、爆発エネルギーは最大で 3.9×10^{50} erg および 3.8×10^{49} erg であることがわかった。重力崩壊に至るまでに 3 回および 6 回 pulsation し、合計で $7.9 M_{\odot}$ および $4.0 M_{\odot}$ の質量が放出された。

1 Introduction

星の最期はその質量に大きく依存するが、特に大質量星においては CO コアの質量によって次の 3 つに分類することができる。すなわち CO コアが $2 - 40 M_{\odot}$ の星は core collapse supernova, $40 - 60 M_{\odot}$ の星は pulsational pair-instability, $60 - 137 M_{\odot}$ の星は pair-instability supernova となる。(Woosley, Blinnikov and Heger. (2007))

ここで pair-instability とは、圧力を支えていたエネルギーが電子陽電子ペアの静止質量エネルギーに使われたことによって酸素燃焼の段階で重力的に不安定となった状態のことである。pair-instability supernova は電子陽電子ペアの形成により重力的に不安定となった星が急速に崩壊し、温度と密度が急上昇することによって酸素燃焼、シリコン燃焼が爆発的に起こり、そのときに得た熱エネルギーによって星全体を吹き飛ばす。しかし、pulsational pair-instability supernova においては、酸素燃焼、シリコン燃焼は急速に起こるものの、星全体を吹き飛ばす程ではなく、pulsation と呼ばれる小規模の爆発を繰り返す。pulsation の際に質量放出を行うが、どの程度質量放出するのか詳しいことはわかっていない。Chatzopoulos らは CO コアからなる星について pulsation 時の放出質量を

計算した。彼らの計算によると 1 回の pulsation で約数 M_{\odot} 、爆発エネルギーは約 $\times 10^{50}$ erg である。(Chatzopoulos and Wheeler. (2012))

pulsational pair-instability では、pulsation 時に放出された質量と CSM との相互作用による光、放出された質量は互いに衝突し相対的な運動エネルギーが光に変換されることによる光、pulsation を繰り返した後で supernova となった場合に大量の質量放出をして輝く光の 3 種類の光り方がある。これらの光度は放出された質量、爆発エネルギーと pulsation の時間間隔に依存する。(Woosley, Blinnikov and Heger. (2007))

2 Methods

ここでは 1 回の pulsation における放出質量を求めるために以下の方法をとった。まず、恒星進化計算で 1 回の pulsation の進化を計算し、pulsation 後の星の全エネルギーを求める。この進化の過程において収縮が膨張に転じるのは、収縮によって中心温度と中心密度がある値に達したことで星内部に電子陽電子ペアが形成され、重力的に不安定となり急速に収

縮が起こるが、その結果中心温度と中心密度は一気に増大することとなり核燃焼が活発となって、酸素燃焼、シリコン燃焼によって熱エネルギーが増大するためである。次に恒星進化計算から得られたエネルギーと等しくなるように星の中心部にエネルギーを与え流体力学計算を行う。恒星進化計算と流体力学計算のエネルギー値が一致しないのは、この流体力学計算には核燃焼によるエネルギー計算が含まれていないためである。今回用いた方法の利点は、エネルギー計算は恒星進化計算によって正確に求め、質量放出は流体力学計算によって正確に求めるというところにある。星の中心部で上昇したエネルギーは衝撃波となって外へ伝わり、星の表面付近の流体は加速してその一部は脱出速度を超える。そこで脱出速度を超えた質量を放出質量とする。次の pulsation の恒星進化計算は pulsation によって星が十分膨張したところから始め、まず放出質量分の質量を人為的に放出させ、その後星が収縮し始める。

この一連の計算を繰り返すことで我々は金属量が $Z = 0.004$ で初期質量が $250 M_{\odot}$ 、金属量が $Z = 0.004$ で初期質量が $140 M_{\odot}$ の 2 つのモデルについて pulsation 時における質量放出を計算した。恒星風による質量放出は星の金属量に依存する。pulsation の直前の時点で 2 つのモデルの質量は $61 M_{\odot}$ および $54 M_{\odot}$ となった。このときの CO コアの質量はそれぞれ $56 M_{\odot}$ および $49 M_{\odot}$ である。これは Woosley らの pulsational pair-instability における CO コアの質量範囲 $40 - 60 M_{\odot}$ とも一致している。

3 Results

初期質量 $250 M_{\odot}$ のモデルでは、質量放出は最大で $4 M_{\odot}$ となり、爆発エネルギーは最大で 3.9×10^{50} erg となった。重力崩壊に至るまでに 3 回 pulsation し、合計で $7.9 M_{\odot}$ の質量が放出された。一方、初期質量 $140 M_{\odot}$ のモデルでは、質量放出は最大で $1 M_{\odot}$ となり、爆発エネルギーは最大で 3.8×10^{49} erg となった。重力崩壊に至るまでに 6 回 pulsation し、合計で $4.0 M_{\odot}$ の質量が放出された。2 つのモデルにおける pulsation の時間間隔、放出質量、爆発エネルギーを表 1, 2 にまとめた。

表 1: 初期質量 $250 M_{\odot}$ のモデルの結果

	Δt (year)	ΔM (M_{\odot})	E_{kin} (erg)
1 回目	-	0.55	2.90×10^{49}
2 回目	1.10×10^{-1}	4.22	3.89×10^{50}
3 回目	1.43×10^3	3.10	2.87×10^{50}
collapse	3.74	-	-

表 2: 初期質量 $140 M_{\odot}$ のモデルの結果

	Δt (year)	ΔM (M_{\odot})	E_{kin} (erg)
1 回目	-	0	0
2 回目	1.77×10^{-3}	0.25	1.26×10^{49}
3 回目	4.69×10^{-2}	1.07	3.74×10^{49}
4 回目	2.69×10^{-1}	1.18	3.83×10^{49}
5 回目	2.79×10^{-1}	0.94	2.48×10^{49}
6 回目	2.79×10^{-1}	0.55	2.99×10^{49}
collapse	4.32×10^{-2}	-	-

4 Discussion and Conclusion

初期質量 $250 M_{\odot}$ のモデルにおける 1 回目と 2 回目の pulsation の時間間隔は 1.10×10^{-1} と比較的短く、また 2 回目の方が爆発エネルギーが大きいことから pulsation 時に放出された質量同士の衝突により光る可能性がある。しかし 2 回目と 3 回目の時間間隔は 1.43×10^3 と離れすぎており、衝突は難しい。初期質量 $140 M_{\odot}$ のモデルにおける 3 回目と 4 回目、4 回目と 5 回目、5 回目と 6 回目の pulsation の時間間隔はほとんど同じであり、先の pulsation で放出された質量のうち速度の遅いものが後の pulsation で放出された質量のうち速度の速いものに追いつかれ、衝突する可能性がある。今後としては光度の計算を行うこと、他の初期質量を持ったモデルで同様の計算を行うことを目標とする。

Reference

- Woosley, Blinnikov and Heger. 2007. Nature, 450, 390
 Chatzopoulos and Wheeler. 2012. ApJ, 760, 154