

宇宙初期での超新星残骸の熱的・化学的進化

○長倉 隆徳 (東京大学)、大向 一行 (国立天文台)、細川 隆史 (国立天文台)

Abstract:

宇宙再電離や我々の銀河ハローで多数発見されている金属欠乏星の起源を探る上で、初期宇宙の星形成を調べることは重要である。星の質量は、星形成ガス雲が収縮して分裂するスケールと関係があり、分裂のスケールは重元素の影響を受けると考えられている。種族IIIの星形成では、重元素がないため、ガスの分裂スケールは数 $10\sim$ 数 $100\text{ M}_{\odot}$ 程度であることが多くの研究から示されており、重元素汚染が進むにつれ低質量星が形成されると考えられる。一方、近年発見された $[\text{Fe}/\text{H}]<-5$ の超金属欠乏星は、金属量が小さいにもかかわらず、質量は小さくその形成起源は未だはっきりと解明されていない。我々は、低質量星形成シナリオとして、宇宙初期に微量の重元素汚染された状況で、超新星爆発によってできるshellの進化を球対称一次元流体コードを用いて化学反応とともに数値シミュレーションした。

Conclusions:

重元素が太陽組成の 10^{-4} 程度以下では、重元素はshellの冷却に効かないが、 10^{-3} 程度では水素分子の冷却が効かなくなる数百K程度から[OI]の冷却が効いてくることが分かった。shellの分裂には、supernovaのエネルギーと周囲の密度の影響が大きく、重元素量はエネルギーが小さい場合に影響がでることが分かった。また、ガスの分裂片は、最大成長モードが十分成長すると仮定すると、 $\sim 10^4\text{ M}_{\odot}$ となり、この段階では分裂片はかなり大きくなることが示唆される。

Model:

基礎方程式系

$$\begin{aligned} \text{質量保存} \quad & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v) = 0 \\ \text{運動量保存} \quad & \frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v^2) + \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \\ \text{エネルギー保存} \quad & \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(v^2 + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \left(p v + \frac{1}{2} \rho v^3 + p v \right) \right] = -\dot{M}(v, r) \\ \text{状態方程式} \quad & p = \frac{k_B \rho T}{\mu m_H} \end{aligned}$$

冷却過程

Compton cooling, Bremsstrahlung,
(H, He) collisional ionization, collisional excitation, recombination
(H₂, HD) ro-vibrational line,
([CII],[CIII],[OI],[OII]) fine structure line, meta-stable line

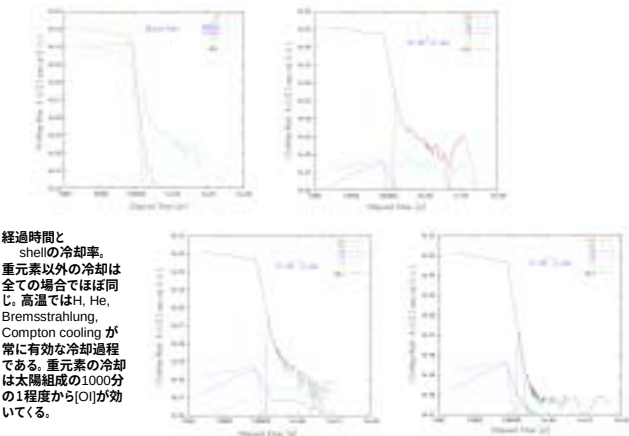
$$\text{化学反応} \quad \frac{d n_i}{dt} = -n_i \sum_j k_{ij}(n_j) + \sum_j k_{ji}(n_j) n_i$$

primordial, CII recombination, OII recombination

初期条件

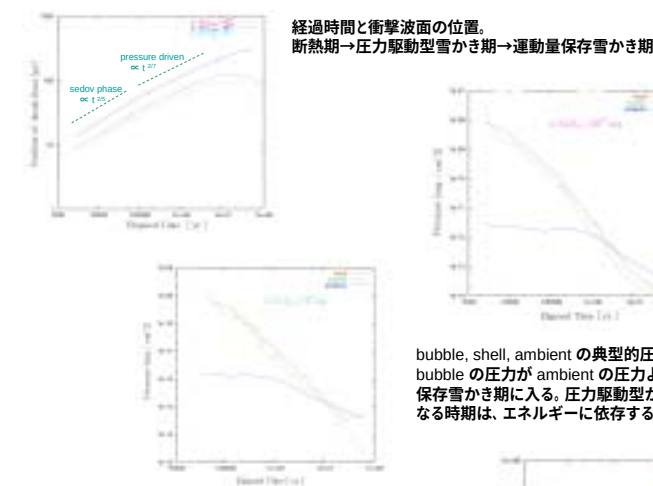
簡単のため、密度、温度、化学組成は一樣。
密度は背景宇宙の約1000倍、温度は 10^4 K 。
化学種は完全電離状態を仮定。
redshift, SNのエネルギー、重元素量はパラメータ。
redshift $z=15.20$, SN energy = $10^{51}, 10^{52}\text{ erg}$
重元素量 $\log_{10}(Z/Z_{\odot}) = -2, -3, -4, -\infty (\text{metal-free})$

結果2: shellの冷却率



経過時間と
shellの冷却率。
重元素以外の冷却は
全ての場合でほぼ同
じ。高温ではH, He,
Bremsstrahlung, Compton cooling が
常に有効な冷却過程
である。重元素の冷却
は太陽組成の1000分
の1程度から[OI]が効
いてくる。

結果1: 超新星残骸の膨張則, shellの圧力、温度

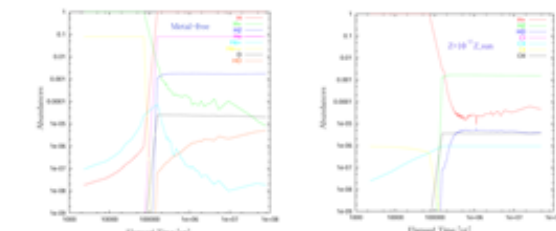


経過時間と衝撃波面の位置。
断熱期→圧力駆動型雪かき期→運動量保存雪かき期

bubble, shell, ambient の典型的圧力。
bubble の圧力が ambient の圧力より、小さくなると運動量
保存雪かき期に入る。圧力駆動型から運動量保存雪かき期に
なる時期は、エネルギーに依存する。

$\log_{10}(Z/Z_{\odot}) < -3$ ではshell温度進化はほとんど同じ。温度は圧
力駆動型雪かき期の間、水素分子によって数百Kまで下がる。
その後はshellの膨張によって冷却されていく。
 $\log_{10}(Z/Z_{\odot}) \sim -2$ 程度になると、圧力駆動型雪かき期の間に[OI]
により100K以下に冷却される。その後は、他の場合と同様に、
shellの膨張により冷却されていく。

結果3: shellのabundance



shellの冷却時間が膨張の時
間よりも短くなると、冷却が効
いて急速にrecombinationが
進む。これは、sedov phase
から圧力駆動型雪かき期に
移行する時期に対応する。

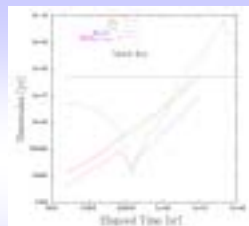
分裂の必要条件とその可能性:

膨張も回転もしない平板上のガスは重力的に不安定であるが、超新星shell
の場合、膨張により方位角方向の摂動とガスの流入による柱密度の摂動に
より、ガスは安定化する。Elmegreen(1994)の線形解析によると、不安定な
モードは存在する。

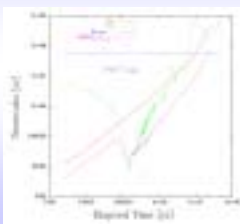
shellの分裂の必要条件:

$$(t_{\text{exp}} t_{\text{cross}})^{1/2} \gg t_{\text{ambient}}$$

分裂するためには、この条件を満たす最大成長モードが十分成長しな
ければならない。



$Z=15$, $E_{\text{SN}}=10^{51}\text{ erg}$ の場合の経過時間と各時間尺度。
 $\log_{10}(Z/Z_{\odot}) < -3$ の場合は分裂の必要条件を満たさないが、 $\log_{10}(Z/Z_{\odot}) \sim -2$
だと分裂の必要条件を満たす。もし、最大成長モードが十分成長するとす
ると、分裂の質量は $\sim 2.9 \times 10^4\text{ M}_{\odot}$ 程度となる。



爆発のエネルギーが大きい場合に
は、metal-freeの場合でも分裂が起
こる。逆に、密度が低い場合には、
分裂は起こりにくくなる。

Discussions:

重元素量が太陽組成の1000分の1程度になると、shellの冷却にprimordialとの違いが現れてくる。ただし、今回の計算は、周囲の密度は背景宇宙の平均密度の1000
倍程度で固定した結果である。ガス密度が今回の場合よりも小さい場合、重元素が太陽組成の100分の1程度あったとしても、始原組成との冷却率の違いは現れない。
したがって、冷却が効いて低温になるかどうかは、重元素量以外の爆発のエネルギーと周囲の密度に大きく影響されるので、どのような初期条件が実現されるのかを
調べることも重要となってくる。よって、超新星爆発前のHII領域の詳しい情報を計算する必要がある。これと今回の計算を合わせることが今後の課題である。
一方、重元素量の違いでshellの分裂に何らかの影響がでるかどうかは今後詳しく調べる予定である。