

超新星爆発における放射性元素 ^{26}Al と ^{60}Fe の元素合成

堤 陵 (甲南大学 自然科学研究科)

Abstract

100 万年程度の半減期を持つ短寿命放射性同位体核種である ^{26}Al , ^{60}Fe は CGRO や INTEGRAL 衛星などの観測によって放射性崩壊時の γ 線ラインが捉えられ、 ^{26}Al は天の川銀河の円盤に分散する様に分布し、現在も活発に元素合成が行われていることを明確に示している。 ^{26}Al の生成源は重力崩壊型超新星 (ccSNe)、Wolf-Rayet 星、AGB 星、新星が提案されているが、いまだ特定するには至っていない。 ^{60}Fe は ^{26}Al と同じく ccSNe で生成されることから、 ^{60}Fe からの γ 線放射を観測することで ^{26}Al の生成源を特定できる可能性がある。 γ 線観測より $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の γ 線フラックス比が求められており、この比は ccSNe の元素合成の理論予測において重要な制限が与えられている。しかしながら、最近の元素合成の理論予測ではこのフラックス比は高くなる傾向があり、再現するような理論は少ない。私は太陽金属量をもつ $M_{ZAMS} = 25M_{\odot}$ の星について jet-induced supernova explosion モデルを用いて超新星爆発時の ^{26}Al , ^{60}Fe の生成量を計算し、このフラックス比を再現するような超新星爆発モデルを検討する。jet-induced supernova explosion モデルのパラメータであるエネルギー供給率とジェットの初期半角をそれぞれ変えてこれらの核種の生成量の変化について考えた。その結果、 ^{60}Fe の放出量はエネルギー供給率、ジェットの半角に大きく依存し、Limongi&Chieffi(2006)の結果とは異なり、explosive burning の寄与が大きいことを見つけた。 $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の生成量の比はエネルギー供給率の増加と共に大きくなり、エネルギー供給率の大きい爆発では観測の $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の γ 線フラックス比を再現することは困難である。

1 Introduction

放射性同位体核種である ^{26}Al , ^{60}Fe の半減期は共に 10^5yr 程度のオーダーである。これら核種の寿命は天の川銀河の進化の典型的なタイムスケールよりも十分短い。そのため、これら核種の観測は天の川銀河において元素合成が活発に行われている場所を明確に示す。1.809MeV の ^{26}Al からの γ 線放射の観測は、CGRO や INTEGRAL 衛星などにより行われ、その観測結果は ^{26}Al がほとんど天の川銀河の円盤に限定されることを示した。

^{26}Al の生成源は重力崩壊型超新星爆発 (ccSNe)、Wolf-Rayet 星、AGB 星、新星などが提案されているが、いまだ特定するには至っていない。 ^{60}Fe は ^{26}Al と同じく ccSNe から生成されると考えられており、 ^{60}Fe からの γ 線放射を観測することで ^{26}Al の生成源を特定できる可能性がある。しかし、 ^{60}Fe の γ 線放射は ^{26}Al に比べるとかなり弱く、 ^{26}Al のように全天の分布を表すことは困難である。 ^{60}Fe が ^{26}Al と同じ分布をすると仮定した場合の $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ のフ

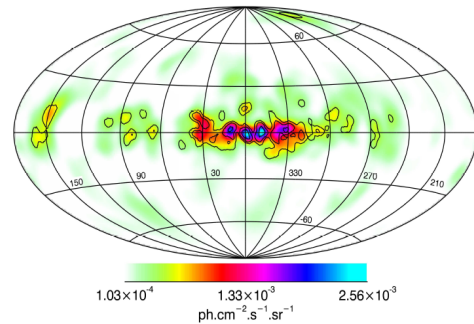


図 1: INTEGRAL/SPI 天の川銀河 ^{26}Al の 1.8MeV マップ (Bouchet et al(2015))

ラックス比が観測から求められており (Bouchet et al(2015) INTEGRAL $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al} \sim 0.12 - 0.15$)、このフラックス比は理論計算における超新星爆発の元素合成の制限となる。超新星爆発の元素合成の研究は例えば Woosley&Weaver(1995),Rauscher et al(2002), Limongi&Chieffi(2003),Limongi&Chieffi(2006) など

がある。Woosley&Weaver(1995) の $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ のフラックス比の理論予測は $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al} \sim 0.18$ とほぼ観測と一致する。しかし最近のモデル (Rauscher et al(2002), Limongi&Chieffi(2003)) では $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al} \sim 0.5 - 1.0$ と高くなり観測と一致しない。Limongi&Chieffi(2006) は標準星質量関数を使って見積もり $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al} \sim 0.185$ と再び観測と一致する値を示した。私は jet-induced supernova explosion モデルを用いて超新星爆発時の ^{26}Al と ^{60}Fe の生成量を計算する。jet-induced supernova explosion モデルのパラメータであるエネルギー供給率とジェットの初期半角を変化させて、 ^{26}Al と ^{60}Fe の生成量の変化を調べた。

2 Models

私は 2 次元相対論的流体計算と元素合成計算 (Tomimaga(2009)) を用いて、主系列星の初期質量 $M_{ZAMS} = 25M_{\odot}$ 、太陽金属量 $Z = 0.02$ (Umeda et al(2012)) での jet-induced supernova explosion を用いて ^{26}Al と ^{60}Fe の生成量を研究する。元素合成計算はポストプロセスで実行し、 ^{79}Br までを含めた 280 種の同位体の核反応ネットワークを考慮する。Thermodynamic histories はラグランジュ的質量要素を表す maker particles でトレースする。ジェットは次の 5 つのパラメータで説明される。エネルギー供給率 (\dot{E}_{dep})、エネルギー供給の総量 (E_{dep})、ジェットの初期半角 (θ_{jet})、初期ローレンツファクター (Γ_{jet})、熱エネルギーとエネルギー供給の比 (f_{th})。ジェットは半径 R_0 に対応する質量座標 M_0 での初期境界から入射させる。ジェットの密度、圧力、速度は境界条件を決めると上記の 5 つのパラメータで説明できる。計算領域でジェットは発射した後の thermodynamic histories は maker particles によってトレースする。

3 Results

explosive burning における ^{26}Al の生成プロセスは $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反応であり、破壊プロセスは (n, α) , (n, p) プロセスである。ここで $T_9 = T/10^9 \text{K}$ と定義する。衝撃波によって加熱され、典型的な

温度 $T_9 \sim 2.3\text{K}$ のオーダーのときに ^{26}Al は生成される。 ^{60}Fe については、生成プロセスは $^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}(n, \gamma)^{60}\text{Fe}$ 反応であり、破壊プロセスは (n, γ) 反応である。 ^{60}Fe は ^{26}Al と同様に典型的な温度 $T_9 \sim 2.2\text{K}$ のオーダーで生成される。

^{26}Al (図 2, 3 の上段) は爆発前に C convective shell, Ne shell に多く存在する。そのためエネルギー供給率の小さい爆発では explosive burning で生成される量は小さく、爆発前に存在する ^{26}Al はほとんど破壊されることなく放出される。エネルギー供給率を大きくしていくと C convective shell 内に $2.0\text{K} < T_9 < 2.5\text{K}$ に達する領域が拡大するため explosive burning による ^{26}Al の生成量が増加するが、 $T_9 > 2.5\text{K}$ に達する領域も同時に拡大し、 ^{26}Al が破壊される量も多くなる。そのため、あるエネルギー供給率で ^{26}Al の放出量にピークが存在する。 ^{60}Fe (図 2, 3 の中段、下段) は ^{26}Al とは異なり explosive burning により生成される場所は C convective shell 内に限らず、He shell で多く生成される。エネルギー供給率、ジェットの半角を大きくすると、 $2.0\text{K} < T_9 < 2.5\text{K}$ の領域の拡大に伴い、explosive burning による ^{60}Fe の生成も増加するため、 ^{60}Fe の放出量はエネルギー供給率、ジェットの半角と共に増加する。ジェットの半角 $\theta_{\text{jet}} = 30[\text{deg}]$ のときの爆発と球対称の爆発 ($\theta_{\text{jet}} = 90[\text{deg}]$) を比較すると、 $\theta_{\text{jet}} = 30[\text{deg}]$ の場合、衝撃波はジェットに付随して発生するので、 $2.0\text{K} < T_9 < 2.5\text{K}$ に達する領域が球対称の爆発に比べて狭い。そのため特に explosive burning による寄与の大きい ^{60}Fe はその影響を受けやすく、 $\theta_{\text{jet}} = 30[\text{deg}]$ の爆発は球対称の爆発に比べて ^{60}Fe の放出量は減少している。

$^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の生成量の比をとると、この値はエネルギー供給率の増加と共に大きくなり、エネルギー供給率の大きい爆発では観測の $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の γ 線フラックス比を再現することは困難であることがわかる。

4 Discussion

私の計算結果から観測の $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の γ 線フラックス比を再現することはできなかった。最も近いと考えられるエネルギー供給率とジェットの初期半角の

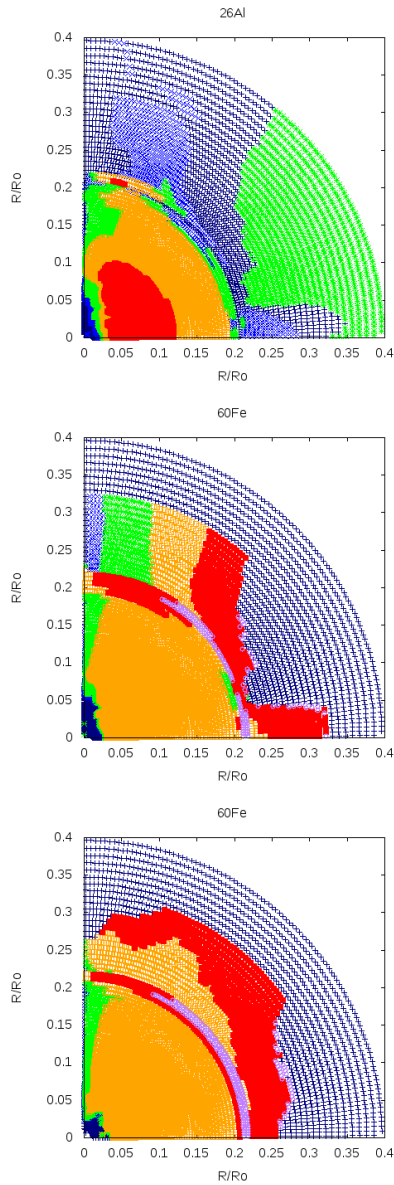


図 2: ^{26}Al と ^{60}Fe の生成場所と生成量を示す。 $\dot{E}_{\text{dep}} = 10^{52} [\text{erg/s}]$, 他は図 3 と共通して、上段は ^{26}Al 、中段、下段は ^{60}Fe について。上段、中段は $\theta_{\text{jet}} = 30[\text{deg}]$ 、下段は $\theta_{\text{jet}} = 90[\text{deg}]$ としたときである。色は核種の生成量を表し、紫 $M > 1.0^{-7}[M_{\odot}] > \text{赤} > \text{橙} > \text{緑} > \text{青} > \text{藍}$ $1.0^{-11}[M_{\odot}] < M$

組み合わせは $(\dot{E}_{\text{dep}}[10^{51}\text{erg/s}], \theta_{\text{jet}}[\text{deg}]) = (10, 20)$ である。これは、観測の $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の γ 線フラック

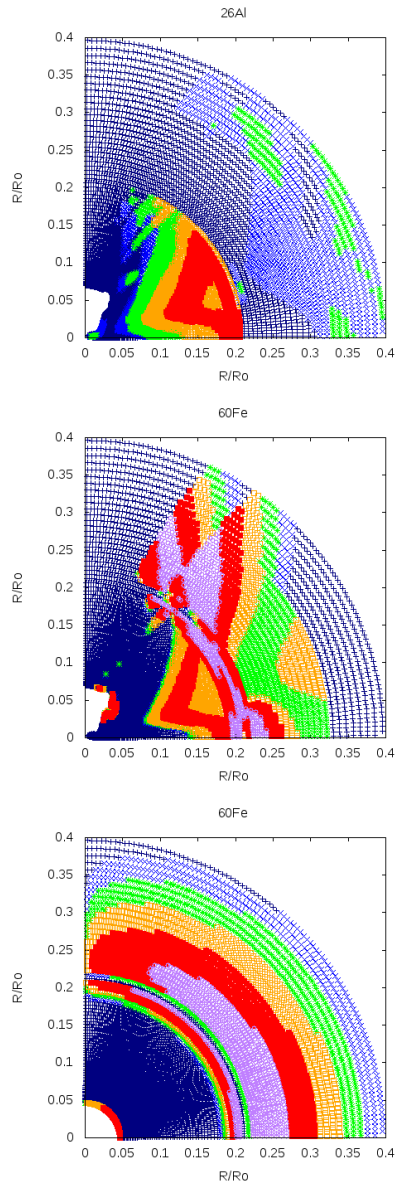


図 3: ^{26}Al と ^{60}Fe の生成場所と生成量を示す。 $\dot{E}_{\text{dep}} = 10^{55} [\text{erg/s}]$, 他は図 3 と共通して、上段は ^{26}Al 、中段、下段は ^{60}Fe について。上段、中段は $\theta_{\text{jet}} = 30[\text{deg}]$ 、下段は $\theta_{\text{jet}} = 90[\text{deg}]$ としたときである。色は核種の生成量を表し、紫 $M > 1.0^{-7}[M_{\odot}] > \text{赤} > \text{橙} > \text{緑} > \text{青} > \text{藍}$ $1.0^{-11}[M_{\odot}] < M$

ス比を再現するためには、 ^{60}Fe の放出量が少ないことが好ましいため、エネルギー供給率は小さい方がよい。また、ジェットの初期半角が小さいと C con-

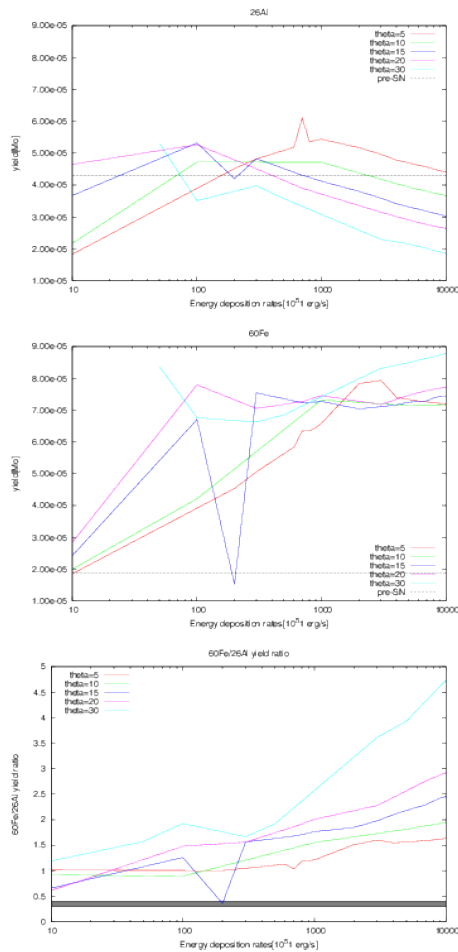


図 4: $\dot{E}_{\text{dep}} = 10^{52} - 10^{55} [\text{erg/s}]$ 変化させたときの核種の生成量を表す。赤色: $\theta_{\text{jet}} = 5[\text{deg}]$, 緑色: $\theta_{\text{jet}} = 10[\text{deg}]$, 青色: $\theta_{\text{jet}} = 15[\text{deg}]$, 桃色: $\theta_{\text{jet}} = 20[\text{deg}]$, 水色: $\theta_{\text{jet}} = 30[\text{deg}]$, 上段と中段の灰色: pre-SN, 下段の黒色: INTEGRAL/SPI(Wang et al(2007))

ective shell と Ne shell の fallback が多くなることで ^{26}Al の放出量が減少するため、ジェットの初期半角は大きい方が好ましいと考えられる。これらの核種の先行研究 (球対称の爆発) の結果と比較すると、 ^{26}Al の生成量は、Woosley&Weaver(1995),Rauscher et al(2002), Limongi&Chieffi(2006) のどの結果よりも小さい。この理由として一つ考えられるのは、C convective shell の大きさの違いに起因するかもしれない。Woosley&Weaver(1995) の C convective shell の位置は質量座標で $5.7M[M_{\odot}]$ まで広がっているのに対して、私の計算に用いた progen-

itor(Umeda et al(2012)) は、 $5.1M[M_{\odot}]$ であり、Woosley&Weaver(1995) に比べると C convective shell が小さい。そのため、explosive burning による寄与は Woosley&Weaver(1995) の方が大きいと考えることができる。また他にはここでは考慮していない ν -process で ^{26}Al は生成されることが示されている (Woosley&Weaver(1995))。このことから ν -process を考慮することで ^{26}Al の生成量が増加することが期待される。 ^{60}Fe の生成量は explosive burning の寄与により大きく異なり、エネルギー供給率の小さく、explosive burning の寄与が小さいときは Limongi&Chieffi(2006) の結果と近い値をとり、Rauscher et al(2002) の結果である比較的高い生成量はエネルギー供給率を大きくし、explosive burning の寄与を大きくすることで近づく結果となった。

5 Conclusion and Future work

私は jet-induced supernova explosion モデルを用いて超新星爆発時の ^{26}Al と ^{60}Fe の生成量を計算し、観測の $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の γ 線フラックス比を再現することを試みた。jet-induced supernova explosion モデルのパラメータであるエネルギー供給率とジェットの初期半角は変化させて $^{60}\text{Fe}, ^{26}\text{Al}$ の生成量の変化を調べると、エネルギー供給率の大きい爆発では観測の $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ の γ 線フラックス比を再現することは困難であることを見つけた。

Reference

Tominaga, N ApJ, 690, 526 (2009)
 Limongi & Chieffi ApJ, 647, 483 (2006)
 Tur et al. ApJ, 718, 357 (2010)
 Bouchet et al. ApJ, 801, 142 (2015)