

超新星からの γ 線放射強度とその検出限界との比較

Gamma ray intensity and its detection limit from supernovae

○萩原悠佳¹, 藤井紫麻見²*Yuka Hagiwara¹, Shiomi Fujii²

Abstract: A supernova is a big explosion that occurs at the last stage of stellar evolution. There were some uncertainties in the theory of supernova explosions, however, Supernova 1987A emerged in the Large Magellanic Cloud in 1987 and detailed observations confirmed the theory of X-gamma ray emission. It was the first supernova visible with the naked eye to have been observed for 383 years. The astronomical satellite ASTRO-H is planned to launch in the 2013 fiscal year and X-gamma ray radiation from other supernovae are expected to be observed. In this study, we calculate gamma ray intensity from a core-collapse supernova as Supernova 1987A and a hypernova and compare the result with the detection limit of ASTRO-H.

1. 超新星の分類

超新星は、そのスペクトルによって様々な性質を知ることができ、これによりいくつかのタイプに分類されている。スペクトルに水素の吸収がないものを I 型超新星、あるものを II 型超新星と呼ぶ。I 型は、I a 型、I b、I c 型に分けられ、I a 型はその爆発メカニズムから熱核反応型超新星、また II 型、I b、I c 型は、重力崩壊型超新星と呼ばれる。熱核反応型超新星は、連星系で、伴星から白色矮星に物質が降り積もり、核反応が暴走的に進んで星全体が爆発する。重力崩壊型超新星は、大質量星の中心核が重力崩壊して爆発する。極超新星は通常の超新星よりエネルギーの大きい重力崩壊型超新星である。

2. γ 線放射強度の導出

超新星からの γ 線放射の起源となっているのは、放射性元素が崩壊する時に発生する γ 線である。 γ 線は、主に、 ^{56}Ni が ^{56}Co に崩壊するとき、さらにその ^{56}Co が ^{56}Fe に崩壊するときに放出される。 ^{56}Ni は、半減期が約 6 日と短い、 ^{56}Co の半減期は約 77 日と長いので、爆発後数十日以降の γ 線放射の起源は、 ^{56}Co の崩壊で発生する γ 線である。また、一回の ^{56}Co の崩壊によって発生する主な γ 線のエネルギーは、847keV、1238keV などである。

爆発直後、超新星は光学的に厚く、超新星内部で発生した多くの γ 線はコンプトン散乱によって X 線になり、 γ 線として表面から放射されることはない。しかし、時間がたち、膨張が進むにつれ、超新星が光学的に薄くなるとコンプトン散乱は減り、 γ 線がそのまま放射されるようになる。このメカニズムのモデルを考え、 γ 線放射強度を導出する。

超新星の構造や ^{56}Co の分布は球対称とし、超新星をいくつかの球殻に分けて考える。 γ 線が発生する全ての球殻からの放射強度の和をとると、実際に超新星の表面から放出される γ 線放射強度が求められる。ここでは、 ^{56}Co の崩壊で発生する γ 線のみを考え、発生確率の一番高い、847keV の γ 線を導出する。超新星の表面から放出される単位面積当たりの γ 線放射強度 F は、超新星までの距離を d として、中心から j 番目の球殻（内半径 $R(j-1)$ 、外半径 $R(j)$ ）における ^{56}Co の単位時間の崩壊数 $N_{co}(j)$ に、発生確率 P_{E_0} 、エネルギーを失わずに球殻表面に到達する確率 $\exp(-\tau_j)$ をかけて次のようになる。ただし τ_j は j 番目の球殻の光学的厚みである。

$$F = \frac{1}{4\pi d^2} \left[\left\{ \sum_{k=1}^{j_{\max}-1} N_{co}(k) \cdot P_{E_0} \cdot e^{-\sum_{i=k+1}^{j_{\max}} \tau_i} \right\} + N_{co}(j_{\max}) \cdot P_{E_0} \right] \quad (1)$$

ここで、 ^{56}Co が、爆発後 t 日で、1 秒間に崩壊する数 $N_{co}(j)(t)$ は、

$$N_{co}(j)(t) = \frac{N(j)(t)}{\tau_{co} \times 24 \times 60 \times 60} = \frac{N_0(j)}{8.64 \times 10^4 \tau_{co}} e^{-\frac{t}{\tau_{co}}}, \quad N_0(j) = \frac{M_{co}(j)}{56m_p} \quad (2)$$

となる。 $\tau_{co} = 111.3$ [日] は、 ^{56}Co の平均寿命、 $N_0(j)$ は、 j 番目の球殻内に初めに存在する ^{56}Co の数、 $M_{co}(j)$ は j 殻の初めの ^{56}Co の質量、 m_p は陽子の質量である。

また, j 殻での光学的厚み τ_j は,

$$\tau_j = \sigma n_{e_j} d_j = \int_{R_{j-1}}^{R_j} \sigma n_{e_j} dr = \sigma n_{e_j} (R_j - R_{j-1}) \quad (3)$$

となり, (σ は電子 1 個のコンプトン散乱断面積, n_{e_j} は j 殻での電子数密度, d_j は j 殻の厚さ)

$$n_{e_j} = \frac{N_{e_j}}{\frac{4}{3}\pi R_j^3 - \frac{4}{3}\pi R_{j-1}^3}, \quad N_{e_j} = \frac{M_{H(j)}}{m_p} + \frac{M_{\bar{H}(j)}}{2m_p}, \quad R_j = v_j t \quad (4)$$

である. ただし N_{e_j} は j 殻の電子数, v_j は j 殻表面の膨張速度, $M_{H(j)}$ は j 殻での水素の質量, $M_{\bar{H}(j)}$ は j 殻での水素以外の質量である.

3. γ 線放射強度の数値計算と検出限界

重力崩壊型超新星, 極超新星について計算した 847keV の γ 線放射強度の時間変化を Figure 1 に示す. $M_{Co}(j)$, $M_H(j)$, $M_{\bar{H}(j)}$, v_j は, 重力崩壊型超新星については Shigeyama et al. 1987^[1], 極超新星については Iwamoto et al. 1998^[2] を用いた. また ^{56}Co の崩壊で発生する 847keV γ 線の発生確率は 1 である. 重力崩壊型超新星, 極超新星で, 生成された ^{56}Co の質量 M_{Co} はそれぞれ約 $0.075M_{\odot}$, 約 $0.7M_{\odot}$ である. ($1M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30}$ [kg])

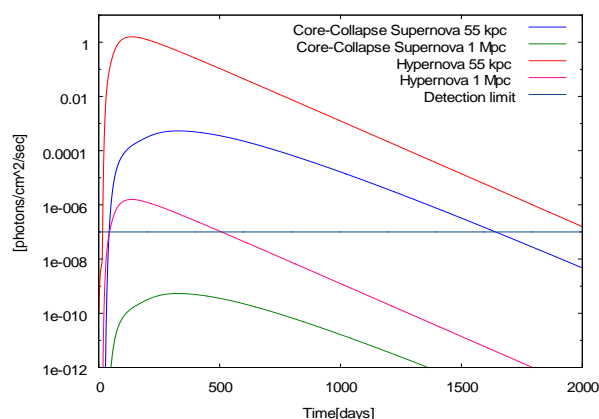


Figure 1. Gamma ray intensity from a core-collapse supernova(55kpc,1Mpc) and a hypernova(55kpc,1Mpc) and the detection limit of ASTRO-H.

Figure 1 では, 重力崩壊型超新星, 極超新星の γ 線放射強度を, ASTRO-H に搭載される軟 γ 線検出器 SGD の 847keV γ 線の検出限界 (横線)^[3] と比較したものを示す. 重力崩壊型超新星の場合, 超新星までの距離 d が超新星 1987A と同じ 55kpc のときは検出できるが, 近年観測されている多くの超新星と同程度の 1Mpc となると検出できなくなる. 極超新星の場合は, 放射強度が強いので, 1Mpc でもピークが検出できる. また, 放射強度のピークは, 重力崩壊型超新星, 極超新星がそれぞれ, 330 日, 130 日程度となっている. 十分時間がたったあとの放射強度は, 指数関数的に減少する.

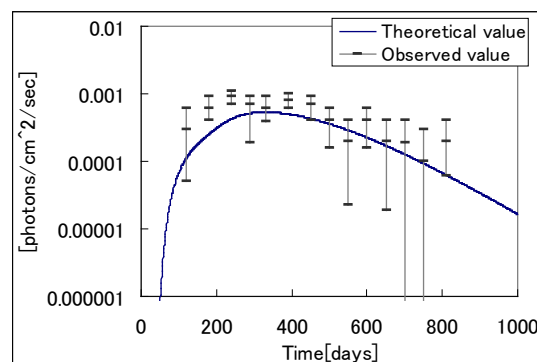


Figure 2. Comparison with the calculation result and observation of Supernova 1987A.

Figure 2 は, 重力崩壊型超新星で距離 55kpc の時の結果と超新星 1987A の 847keV γ 線観測 (Solar Maximum Mission)^[4] との比較で, よく一致していることが分かる.

4. まとめ

極超新星は, 重力崩壊型超新星より ^{56}Co が多く生成され, 外層に水素がなく, 超新星は光学的に薄い. これにより, 重力崩壊型超新星よりピークが早く, 放射強度が強い. γ 線放射強度の計算から, 極超新星の方が, より遠くの γ 線を検出できることが説明できた. 今後は, X 線についても研究し, 超新星の構造を探っていきたい.

5. 参考文献

- [1] Shigeyama et al. : Nature, 328, 320, 1987.
- [2] Iwamoto et al. : Nature, 395, 670, 1998.
- [3] Tajima et al. : Proceedings of the SPIE, 7732, 773216, 2010.
- [4] Matz et al. : Nature, 331, 416, 1988.