O-23

超新星の光度曲線のモンテカルロシミュレーション

Monte Carlo Simulation of the Supernova Light Curve

○広野美貴[1]，宮﨑龍一[1]，岩本弘一[2]
*Yoshitaka Hirono[1], Ryuichi Miyazaki[1], Koichi Iwamoto[2]

Abstract: Supernova is the explosion of a massive star in the final phase of stellar evolution. We study the light curve of supernova by means of the Monte Carlo simulation and compare the results with the analytic solution based on the diffusion equation.

１．　はじめに

超新星爆発とは太陽質量の 8 倍以上の恒星が進化の最終段階に起こす宇宙最大規模の爆発現象である．超新星爆発には，進化した星の中心部の鉄のコアが重力崩壊を起こして生じる重力崩壊型と，連星系中の白色矮星の表面に伴星からの物質が降り積もり質量が増加しチャンドラセカール質量を超えることで生じる熱核反応型の 2 つのタイプがある．超新星爆発の光源として考えられるのは，,爆発時の元素合成で生成される放射性元素^{56}Ni と^{56}Co の崩壊で放出される核ガンマ線や陽電子によるガスの加熱である．本研究では,流体力学シミュレーションで得られている超新星の爆発モデルに基づき,モンテカルロ法を用いて超新星物質中での放射輸送を数値的に解き[1]，光度曲線（光度の時間変化）を計算する．また，その結果を拡散近似のもとで光子の拡散方程式から得られる解析解と比較し，数値計算コードのチェックを行う．

２．　超新星モデル

超新星のモデルを球対称であると設定し,パラメータを以下のように仮定する．

(1) 密度分布

超新星の密度構造は一般的に中心コア部分と外層部分にわけられ,半径rの関数として以下のように書ける．

$$\rho(\mathrm{r}) = \begin{cases} \rho_c & (r \le r_c) \\ \rho_c \left(\frac{r}{r_c}\right)^{-n} & (r_c < r < r_s) \end{cases} \quad (1)$$

ここで r_c はコアの半径，r_s は星の最外部の半径，n=8~10 である．星の質量をM とすると

$$M = \int_0^r 4\pi r^2 \rho dr \quad (2)$$

から中心密度ρ_cを求めることができる．ここでM =10$M_\odot$($M_\odot$:太陽質量)と仮定する．

(2) 速度分布

超新星物質は一定の速度で膨張するので 爆発からの経過時間をt とすると，超新星内部のどの部分でも

$$r = vt \quad (3)$$

が成り立つ.ここで v は超新星物質の膨張速度である．v は超新星のエネルギーEより

$$E = \frac{1}{2}\int_0^R \rho v^2 4\pi r^2 dr \quad (4)$$

から求めることができ，E =10^{51}erg と仮定する．

３．　モンテカルロ法による光度曲線

超新星の光度の変化は星の内部から放出された光子が表面に到達した時の総量の変化であるので,光度曲線を作成するためには単位時間に表面を通過する光子数をカウントし,その時間変化を追えばよい．このために以下のようなモンテカルロ法での計算ステップを考える．このとき光子は光学的に厚い媒質中を進むと仮定し拡散近似を用いて計算を行う．

１：日大理工・院(前)・物理，２：日大理工・教員・物理

(1) 光子の発生位置と個数の設定する．このとき光子はモデルの中心から発生させ，座標は極座標を用いて位置と方向を決定する．

(2) 光子が散乱されるまでに進む距離を(0,1)の一様乱数 z を用いて決定する．光子が進む光学的厚さ τ を

$$\tau = -\log(1-z) \tag{5}$$

により計算する．このように τ を決めれば，確率分布 $P(\tau) = e^{-\tau}$ に従う τ がランダムに得られる．

(3) 散乱されて進む方向を乱数により決定する．

(4) 光子の位置における密度 ρ と吸収係数 κ から，光子の進む距離 $\Delta l = \tau/(\kappa\rho)$を求め,光子を動かす．

(5) 光子が表面に到達した場合，その時刻を記録する．

これらの手順を繰り返して得られたモンテカルロ計算の結果を，拡散方程式から得られる解析解と比較する．

4．　拡散近似のもとでの解析解

シミュレーション結果を検証するために，光子の拡散方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} n(r,t) = \frac{c}{3\kappa\rho} \nabla^2 n(r,t) + N\delta(r)\delta(t) \tag{6}$$

から得られる解析解を考える．ここでn は光子の数密度，Nは発生させた全光子数, κ は吸収係数である．(6)の解$n(r,t)$は

$$n(r,t) = \frac{N}{(2\pi)^3} \left(\frac{3\kappa\rho}{ct}\right)^{\frac{3}{2}} exp\left(-\frac{3\kappa\rho r^2}{4ct}\right) \tag{7}$$

と表され，この $n(r,t)$から単位時間に原点を中心とする半径rの球面を通過する光子数は

$$L = -4\pi r^2 \frac{c}{3\kappa\rho} \frac{1}{r^2} \int_0^r r^2 \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right) dr \tag{8}$$

と求められる．fig.1 にモンテカルロ計算の結果と解析解の比較を示す．　解析解は拡散近似を用いているため，シミュレーションと解析解は光学的に厚い条件でよく一致し，光学的に薄い場合はずれていることが分かる．

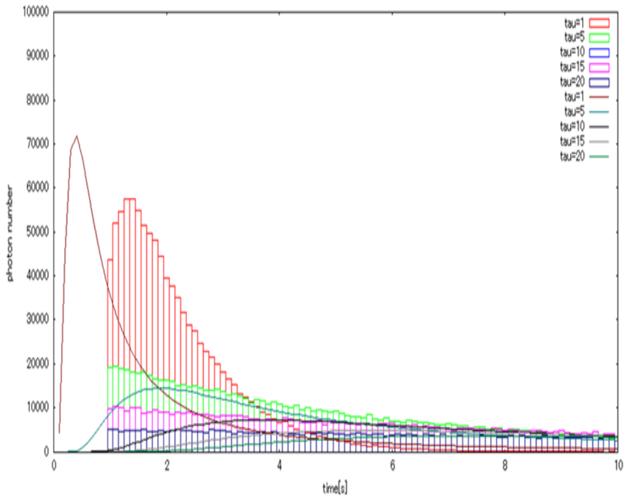

Figure 1 photon number counts per unit time. Boxes are result of simulation and lines are analytical solutions to diffusion equation

5．　今後の課題

今回はテスト計算として一様密度を仮定し,ある時刻に原点で光子を発生させる場合について計算を行った.今後,流体力学シミュレーションで得られている現実的な爆発モデル[2]を用いて,光度曲線の計算を行いたい．近年の観測で,超新星爆発の非球対称性[3]や超新星とガンマ線バーストとの関係性が示唆されている．特に,非球対称な爆発モデルに対して光度曲線を計算し,視線方向によって光度がどのように変化するか，また光度曲線から超新星内部の密度分布や組成についてどのような情報を抽出することができるかを検討していきたい．

6．　参考文献

[1]P.A.Mazzali and L.B.lucy, Astron. Astrophys., Vol.279, p.447, 1993

[2] Y.Sekiguchi and M.Shibata, The Astrophysical Journal, Vol.737:6, p.28, 2011

[3] K.Maeda et al. Science, Vol.319, p.1220, 2008