

論文内容の要旨

論文題目 : Supernova Rate Studies

with the Subaru/XMM-Newton Deep Survey

(すばる望遠鏡・XMM-Newton 望遠鏡深宇宙探査における超新星発生率の研究)

氏名 井原 隆

1. 超新星とその分類

超新星とは、星の一生の最後に起こる爆発現象であり、観測的には、数週間から数ヶ月程度の変光を示す天体として検出される。超新星は、そのスペクトルや光度曲線の様子から、いくつかの型に分類される。スペクトルに水素が見られない超新星は、I型と分類され、その中でSiが見られるものがIa型と呼ばれ、Siが見られないものはIb型(Heあり)またはIc型(Heなし)と分類される。超新星のスペクトルに水素が見られるものは、II型と分類され、光度曲線の形やスペクトルの特徴によって、II-P, II-L, II-nなどの種族に分類される。超新星の爆発メカニズムも、超新星の種族によって異なる。Ia型超新星は、連星系から生じると考えられており、白色矮星の主星と主系列星または赤色巨星の伴星からなる連星系中で、伴星から主星に質量が降り積もっていき1.4太陽質量に近づくと爆発するという“SD model”、または、ふたつの白色矮星からなる連星系中で、ふたつの白色矮星が合体し、爆発するという“DD model”が考えられているが、まだ観測による確証は得られてなく、今もなお議論が続いている。一方、Ib/c型およびII型超新星は、単独の高質量星(約8太陽質量以上)が、元素合成反応を続け、自重を支えきれずに崩壊し、爆発するというメカニズムが考えられており、これらをまとめて、重力崩壊型超新星と呼ぶ。

2. 超新星発生率の研究の現状

近年の、宇宙論パラメータの決定を目的としたIa型超新星の大規模探査によって得られた超新星を用いて、超新星の発生率を調べる研究が注目され始めた。超新星発生率と星生成率を比べることで、星生成から超新星爆発までの間の時間差“deley time”を測定することが出来、これは超新星起源の解明において重要

な観測量のひとつである。母銀河の種族ごとに超新星発生率を調べたり、超新星の発生率の進化と星生成史を比較したりすることによって、Ia型超新星の delay time は単一ではなく、~0.1-10Gyr 程度の幅広い分布があることがわかってきた。特に、高赤方偏移($z > 1$)の超新星発生率を求めていくことで、delay time が短い超新星の存在について調べられる。先行研究では、Dahlen+2008 や Poznanski+2007 が、高赤方偏移の超新星発生率を求めているが、超新星が画一的な測光観測から得られたものではなかったり、超新星の観測情報が乏しかったりするので、誤差の大きな結果となっている。一方で、重力崩壊型超新星は、星生成から短い時間差で爆発すると考えられているので、超新星発生率が星生成史を追うと予想される。しかし、大規模サーベイで画一的に観測されている重力崩壊型超新星は少ないので、超新星発生率を赤方偏移ごとに追った結果は、未だに得られていない。

3. 本研究の超新星探査と特色

本研究では、すばる望遠鏡・XMM-Newton 望遠鏡深宇宙探査(SXDS)によって得られた観測結果を用いて、Ia型超新星およびII型超新星(重力崩壊型)の発生率を、近傍から高赤方偏移まで測定する研究を行った。2002年に、SXDSにおいて、すばる望遠鏡の広視野撮像装置・Suprime-Camを用いて、約1平方度の領域を、複数回に渡って深撮像を繰り返し、各測光点の限界等級が、約25.5mag (i'-band)に達する観測を行った。近傍から高赤方偏移にわたり、約1000個の変光天体を検出し、またそれらの密な光度曲線を得ることができた。光度曲線の情報を生かし、今回は、50個のIa型超新星を、17個のII型超新星を分類することができ、画一的な測光観測の中から、近傍から高赤方偏移までの超新星のデータセットを得た。

4. 超新星発生率を求める手順

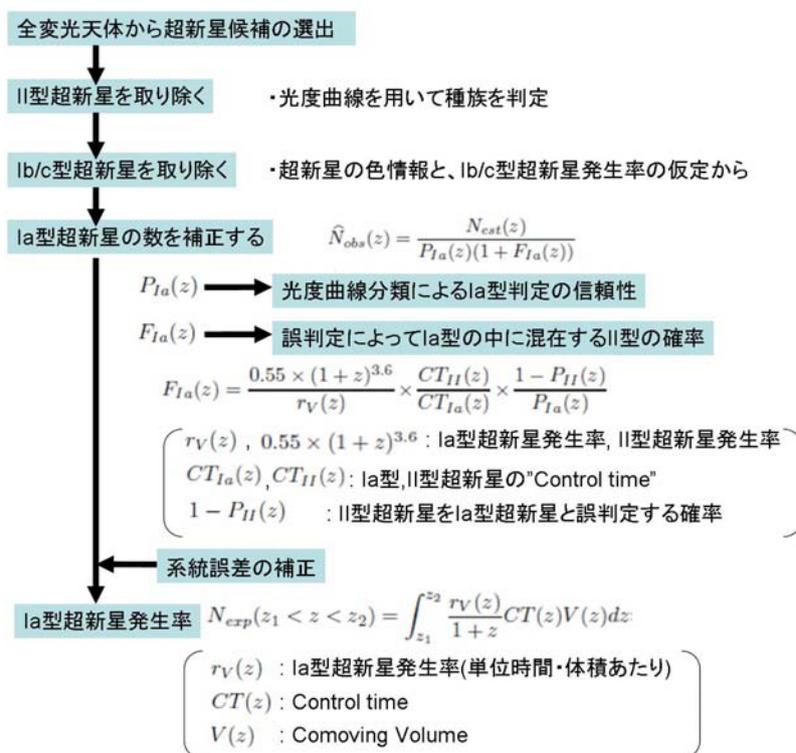


図 1 : Ia型超新星の発生率を求めるための手順

図 1 に Ia 型超新星発生率を求めるための手順を示した。まず最初に、全変光天体の中から超新星候補を絞る。超新星は短期変動の変光天体なので、2002年以降に変光が確認された天体は、超新星ではないとみなす。また、突発的な変光現象や、変光成分の誤検出を除くため、2002年に3点以上有意な検出が見られ

た変光天体のみをこの段階で選ぶ。次に、光度曲線を用いて、I型超新星とII型超新星を、分類する。ただし、II型超新星の光度曲線は、直線的であるために、同じく直線的な(長期的な)変光を示す活動銀河核(AGN)の混在も見込まれる。AGNでは急激な変化は稀なので、II型超新星の分類には、観測開始日には検出限界以下であり、以降の観測で、急激な変光を検出という条件を加える。超新星の赤方偏移に関しては、超新星母銀河の赤方偏移が分光観測から得られていた場合には、その情報を用いる。ない場合には、測光観測から得られた赤方偏移情報(Photo-z)と光度曲線判定を組み合わせる。この時点でI型超新星が選り出されるが、Ia型とIb/c型は光度曲線が似ているので、光度曲線から判定することは出来ない。そこで、色情報をもつ超新星からIa型とIb/c型の存在率を仮定して、Ia型超新星の数を見積もる。このIa型超新星の判定法は、スペクトルを調べての判定法と異なり、判定誤差が生じるので、この誤差をシミュレーションによって見積もり、Ia型超新星の検出数に補正をかける必要がある。

また、超新星の検出可能時間(Control Time)を求めるために、仮想的な超新星の光度曲線を、モンテカルロシミュレーションによって作成する。仮想超新星の構築に当たって、他の近傍の大規模超新星探査(SDSS-II SN survey)によって得られた超新星の分布を用いる。またIa型超新星に関しては、近傍から高赤方偏移に向けて、超新星の分布は変化していると予測されるので、この効果も加える。一方、II型超新星においては、単一の超新星探査による大量のII型超新星の観測結果が得られていないので、Ia型超新星に比べて系統誤差が多くなる。このようにして得られた光度曲線から、各赤方偏移ごとに観測可能時間を計算し、Control Timeを計算する。一方で、光度曲線を用いた超新星の型決定の信頼性も、このシミュレーションによって作成された光度曲線を使って行い、光度曲線判定で求められた超新星数に補正をかける。これらのControl Timeの計算および超新星判定の信頼性のシミュレーションの際には、超新星の分布の仮定など、様々な不定性が含まれるので、これらは系統誤差として評価する必要がある。

5. 結果と考察

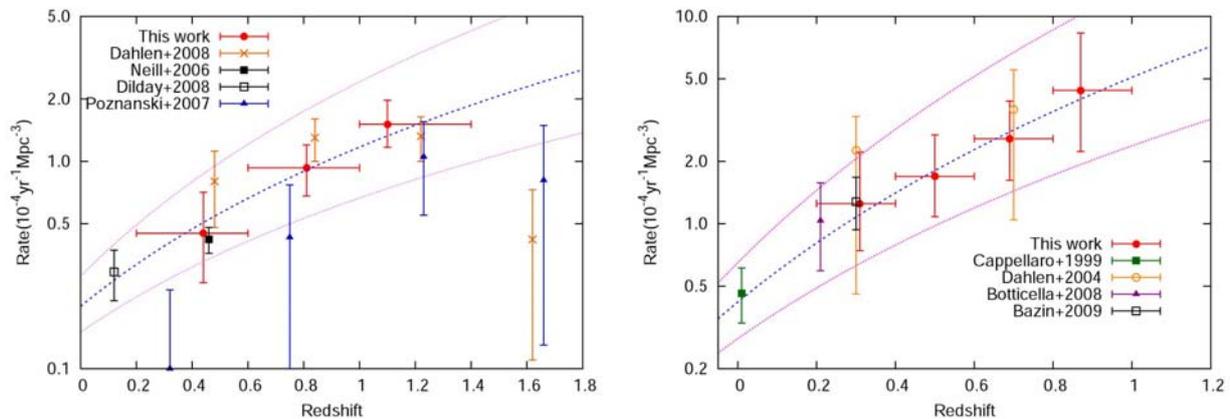


図 2 : (左) 本研究で得られた Ia 型超新星発生率(赤点)と、先行研究で得られた結果との比較。青の点線は、 $f(z) = r_0 \cdot (1+z)^\alpha$ でフィットした曲線を、紫の破線は、統計誤差と系統誤差の和の曲線を表す。
(右) 同様に、本研究で得られた II 型超新星発生率と、先行研究で得られた結果との比較を表す。

このような手順のもとに、Ia型超新星の発生率およびII型超新星の発生率が得られる。それぞれ、先行研究と比較しながら、図示すると、図2のようになる。まずは、Ia型超新星の発生率についての考察を述べる。我々の結果と、Dilday+2008とNeill+2006によって得られた近傍の結果を比べると、よく合っている。一方、Dahlen+2008によって得られた遠方の超新星発生率の結果と比較すると、Dahlen+2008では、 $z \sim 0.8-1.2$ の間で平行な値を示しているが、我々の結果では、 $z \sim 1.2$ まで上昇する結果を示した。しかし、統計誤差を考えると、両者に違いがあるとはいえない。II型超新星の発生率に関しては、先行研究の

結果と近傍から遠方までよく合った結果が得られている。しかし、近傍から遠方まで、同一の観測結果から重力崩壊型超新星の発生率を求めた結果は、本研究が始めて示した。指数関数とフィットすると、 $\alpha \sim 3.6$ と求まり、これは Hopkins & Beacon 2006 などに示されている星生成史の結果とよく合い、II 型超新星は星生成から超新星爆発までのタイムスケールが十分短いことを示した。

一方で、Ia 型超新星の指数関数フィットでは、 $\alpha \sim 2.6$ と求まり、星生成史とは差が生じている。これは、II 型超新星とは異なり、Ia 型超新星は、星生成から超新星爆発の間に、“delay time”があることを示している。ここで、先行研究によって求められた Ia 型超新星の“delay time”の分布(DTD)(図 3)と、本研究の結果を比較する。DTD と星生成史を比較することで以下の式のように Ia 型超新星の発生率が求められる。

$$r_{Ia}(t) = k_{\alpha} A_{Ia} \int_{\tau_1}^{\min(t, \tau_z)} f_{Ia}(\tau) \psi(t - \tau) d\tau$$

$r_{Ia}(t)$ は時間 t での超新星発生率を、 $f_{Ia}(\tau)$ は DTD を、 $\psi(t - \tau)$ は星生成史を示している。星生成史は、 $z > 1$ において不定性が大きいので、その不定性の中で、上限・中間・下限をとった 3 つのモデルと、先行研究の DTD のモデルから、Ia 型超新星の発生率を求めて、本研究の結果と比較する(図 5)。

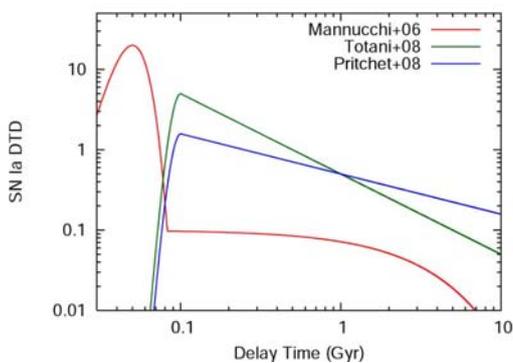


図 3：先行研究による超新星の delay time 分布

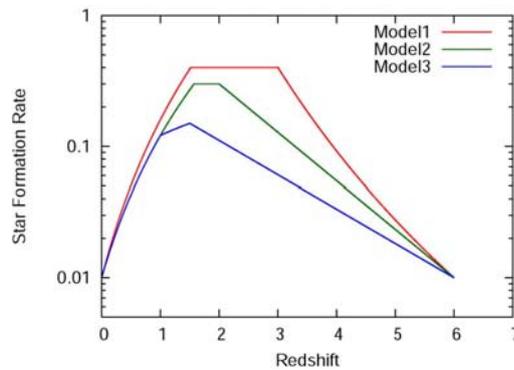


図 4：星生成史の上限・中間・下限のモデル

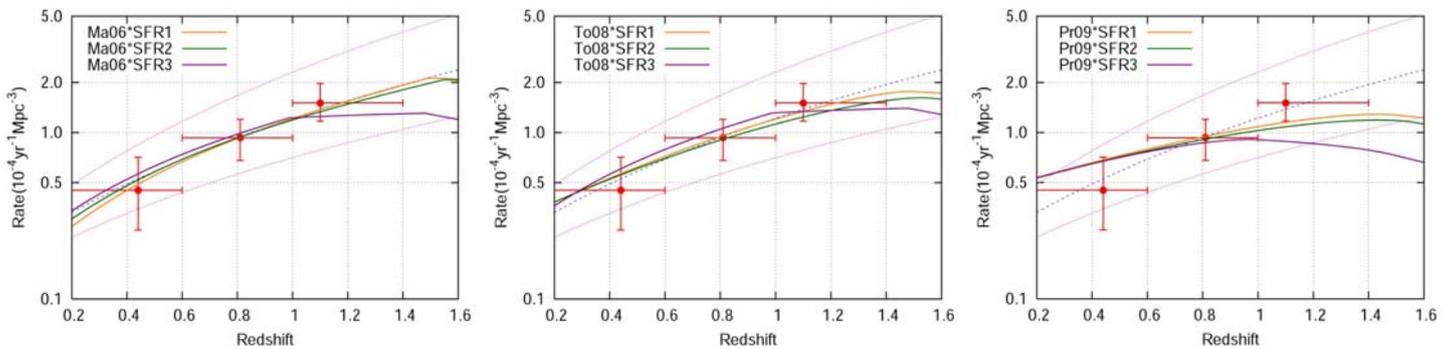


図 5：本研究の Ia 型超新星発生率と、Mannucci+2006、Totani+2008、Pritchett+2008 の delay time 分布から求めた超新星の発生率の進化を比較した図。短い delay time の超新星が多いと、我々の結果とよく合う。

この結果、delay time の短い成分 ($t < 0.1$ Gyr) と長い成分 ($t \sim 1-10$ Gyr) を考えた 2 成分モデルである Mannucci+2006 (Ma06) のモデルと、DTD が t^{-1} に比例して、減衰していく Totani+2008 (To08) のモデルは、本研究の Ia 型超新星発生率の進化と合う結果が得られた。一方、DTD が $t^{-0.5}$ に比例して減衰していく Pritchett+2009 (Pr09) のモデルとは、よく合わなかった。これは、delay time の短い Ia 型超新星が多く存在する DTD が考えられることを示している。しかし、Ma06 の 2 成分モデルと、To08 の幅広い DTD モデルのどちらが合うかは、本研究では得られなかった。星生成史の測定誤差にもよるけれども、さらに高赤方偏移 ($z > 1.4$) において、統計量の多い観測結果から超新星の発生率を求めることができれば、これらのモデルの差にも制限がつけられるだろうと、本研究から予期できる。