

論文の内容の要旨

論文題目

Revealing progenitors of type Ia supernovae
from their spectra and light curves
(スペクトルと光度曲線による
Ia 型超新星の母天体の解明)

氏名 朽名 正道

Ia 型超新星は、連星系を成した C+O 白色矮星に、もう一方の星からガスが降り積もることによって起こる爆発現象である。白色矮星の質量がチャンドラセカール限界と呼ばれる上限質量に充分近づいたとき、中心部で炭素の暴走的核融合反応が起こり、星全体が吹き飛ぶと考えられている。しかし、ガスを供給する伴星が何であるかによって、Ia 型超新星の母天体には2つのシナリオが提唱されている。ひとつは、伴星が主系列星、または赤色巨星の場合であり、Single Degenerate (SD) シナリオと呼ばれている。このシナリオでは、伴星の外層がロッシュローブからあふれだし、白色矮星の表面に積もっていく。もう一つは、伴星も白色矮星の場合であり、Double Degenerate (DD) シナリオと呼ばれている。このシナリオでは、2つの白色矮星が、重力波を放出しながら接近し合体を起こす。どちらのシナリオが、どの程度の割合で Ia 型超新星になっているのかは未だに不明である。

DD シナリオでは、爆発前に伴星が破壊されるため、爆発後には何も残らない。一方で、SD シナリオでは、外層だけが剥がされるため、爆発後に伴星が近くにいることになる。したがって、SD シナリオでは Ia 型超新星と伴星との衝突が起こる。Kasen (2010) は、この衝突で起こる衝撃波によって放出物質の一部が高温に暖められ、その領域からある立体角の方向に、爆発の初期に強い放射が出ることを示した。この放射が実際に観測されれば、その超新星が SD シナリオを起源とすることがわかる。また、衝突によって伴星の外層がはがされる。この外層の水素が超新星の放出物と充分混合されずに広がれば、Ia 型超新星を伴星を挟んで観測した場合、 $H\alpha$ 線がスペクトルに現れる可能性がある。しかし、これらの特徴が実際に観測されている例はない。この事実は、SD シナリオの発生率を制限する手段となる (Hayden et al., 2010)。制限をつけるためには、これらの特徴がどの程度の強さで、どの範囲の立体角で観測できるかを理論的に調べる必要がある。

Kasen (2010) では、局所熱平衡を仮定して計算していた。しかし、高温で光る部分は、伴星から剥がされた物質が広がる密度の低い場所であるため、光学的に薄く熱平衡に達しない。また、彼らは光度曲線への影響にのみ注目し、スペクトルの変化は考えていなかった。本論文では、SD シナリオの中からいくつかのモデルについて、2次元軸対称の輻射流体力学に基づき Ia 型超新星と伴星との衝突を計算した。さらに、得られた各時刻の物理量の分布に対して、各視線方向に輻射輸送方程式を解くことで、光度曲線とスペクトルを計算した。その結果、初期の放射は Kasen (2010) の結果よりも弱く、連星間の距離がある程度より短い場合は発生率を制限することができないことがわかった。一方で、それらの連星系の中でも約 2% のものには、スペクトルに $H\alpha$ の吸収線が見える可能性があることを示した。詳細を以下に述べる。

モデル 考えたモデルは以下の 5 つである。

- MS 伴星が $1M_{\odot}$ の主系列星であり、連星間距離が 3×10^{11} cm のモデル。伴星はロッシュローブを満たしている。
- RGa 伴星が $1M_{\odot}$ の赤色巨星であり、連星間距離が 2×10^{13} cm のモデル。伴星はロッシュローブを満たしている。
- RGb モデル RGa よりも連星間距離を離し、 3×10^{13} cm としたモデル。
- RGc モデル RGa より伴星の質量を軽くし、 $0.9M_{\odot}$ としたモデル。
- RGd 伴星の赤色巨星はロッシュローブを満たさず、代わりに恒星風によって質量降着を起こすモデル。近い将来 Ia 型超新星爆発を起こすと考えられる代表的な連星系 RS Oph に似せて、伴星の質量を $1M_{\odot}$ 、連星間距離を 2×10^{13} cm、伴星の半径を 0.2×10^{13} cm とした。

光度曲線 伴星を挟んで超新星を見たときの視線方向を $\theta = \pi$ とおく。各モデルについて、この方向から見たときの光度曲線を計算すると、図 1 のようになった。Kasen (2010) と比較して、初期の放射は弱くなることがわかった。これは、非平衡にした効果によって光球の温度が下がったためである。爆発 1 日後の光度は、モデル RGa が 2.1×10^{42} erg sec $^{-1}$ 、モデル RGb が 3.0×10^{42} erg sec $^{-1}$ 、モデル RGc が 1.9×10^{42} erg sec $^{-1}$ となった。Hayden et al. (2010) によると、Kasen (2010) にある $6M_{\odot}$ の主系列星のモデルのもつ光度 ($= 2 \times 10^{42}$ erg sec $^{-1}$) よりも大きい場合、

初期の放射がすでに観測された Ia 型超新星の中で見えてなければならない。モデル RGa, RGc は、この閾値のあたりにある。一方で、モデル RGb はこの閾値を超えてしまう。そのことから、

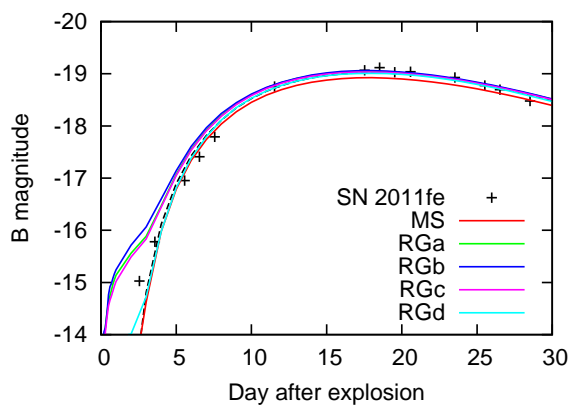


図 1 $\theta = \pi$ から見たときの光度曲線 (B バンド)

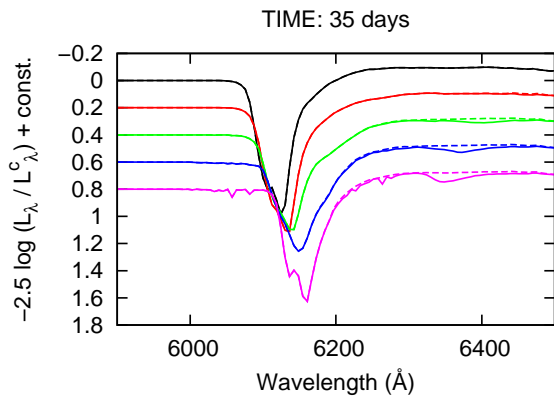


図2 モデル RGe の 35 日後のスペクトル

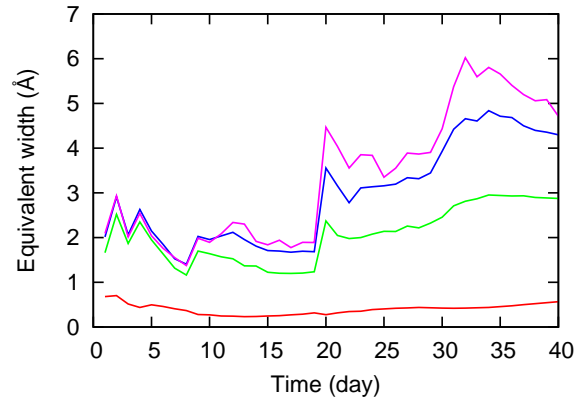


図3 モデル RGe の Hα の等価幅の時間変化

連星間距離が 2×10^{14} cm 以下の連星系は，Ia 型超新星の母天体として棄却できないことがわかった．

また，SN 2011fe の光度曲線と比較して，この母天体が，モデル RGe, RGb, RGc を $\theta > 5\pi/6$ の視線方向から観測したものではないことがわかった．

スペクトル 図2に，爆発後35日後のモデル RGe のスペクトルを示す．黒線，赤線，緑線，青線，紫線は，それぞれ $\theta = 0, 2\pi/3, 5\pi/6, 11\pi/12, \pi$ の方向から見たスペクトルである．破線と実線に分かれている部分が，Hα の吸収を表している．図3は，モデル RGe の Hα の等価幅の時間変化である．モデル MS, RGe, RGb, RGc では，Hα の等価幅が，爆発後30日以降に 6 \AA 以上になる．しかし，モデル MS は伴星から剥がれた物質を先行研究と比較して多く出しすぎているため，吸収は本当はもっと弱いはずである．一方で，RGe, RGb, RGc モデルでは，Hα 線が $\theta > 11\pi/12$ の範囲で見えるはずである．つまり，これらのモデルを起源とする Ia 型超新星の2%には，これが見えるはずである．一方，観測されているスペクトルにはこのような Hα の吸収は見えない．もし十分な数のスペクトルを良い SN 比でとり，Hα 線があることを確認できれば，ロッシュローブを満たした赤色巨星を伴星とする連星系は Ia 型超新星の母天体の候補から外れることになるだろう．

Si II の吸収線の中心波長は視線方向によって異なっている．もし1つ以上のライトエコーが一つの Ia 型超新星に対して見つければ，異なる視線方向のスペクトルを同時に取得することになる．そして，視線方向によるケイ素の速度差を見積もることができる．モデル RGe 以外では，この速度の差は 1000 km/sec ほどであり，対応する波長の分解能は 20 \AA である．ライトエコーを分解するには，より細かい分解能が必要になる．これには現在の観測技術では難しい．モデル RGe では，速度差は 600 km/sec ほどになり，余計に難しくなる．よって，RS Oph のような連星系では，視線方向による違いをスペクトルから得ることができない．

以上で述べたように，初期の放射では，連星間距離の短い連星系について制限することはできないことがわかった．一方で，スペクトルを使えば，これらの出現率を制限できる．また，Hα 線は，各超新星の母天体についての追加情報となる．超新星はいつどこで起こるか分からないため，初期

の放射を見つけるのは難しい。X線衛星がたまたまその領域を見ていたときにだけである。それに対して、 $H\alpha$ 線は最大光度の後に強くなる。もしその超新星を継続的に分光観測していれば、決して見逃すことはない。これは優れた利点である。

参考文献

Hayden, B. T., Garnavich, P. M., Kasen, D., et al. 2010, ApJ, 722, 1691

Kasen, D. 2010, ApJ, 708, 1025