

# 論文内容の要旨

## 論文題目

### Observational Studies on Spectroscopic Properties of Supernovae at Intermediate and High Redshift Ranges

(スペクトルを用いた中及び高赤方偏移超新星の諸性質に関する観測的研究)

氏 名 時 田 幸 一

---

本研究では、主にスペクトルを用いて、中及び高赤方偏移超新星の性質を議論する。超新星とは、星の進化の最終段階において起こる大爆発のことである。近年では観測技術の発達や、いくつもの超新星探索プロジェクトによって、近傍から遠方まで多数の超新星が発見、観測されている。超新星は、スペクトルや光度曲線の特徴からいくつかの型に分類されている。まず大きく分けて、スペクトル中に水素のラインが検出されない I 型と検出される II 型が存在し、それぞれの型の中でさらに Ia、Ib、Ic、II-P、II-L、II-n 型といったサブグループに分けられる。Ia 型超新星は連星系にある白色矮星が爆発したものであり、その他の型(Ib/c、II 型)は重力崩壊型超新星と呼ばれ、太陽の 8 倍以上の質量を持つ大質量星が重力崩壊を起こして生じると考えられている。Ia 型超新星は、個々の明るさがほぼ同じであるという特性から、標準光源として観測的宇宙論の分野で利用されている。1990 年代後半に Ia 型超新星を使って宇宙が加速膨張しているという結果が示され、現在では近傍から遠方までの多数の Ia 型超新星を用いて、宇宙論パラメーターの精密決定が行われつつある。一方、重力崩壊型超新星は寿命の短い大質量星の爆発であるため、星生成のトレーサーとして使われたり、Ca や Mg といった中間質量元素の供給源として注目されている。超新星研究の関連分野は多岐にわたるが、超新星を用いて研究を行うためには、まず発見された超新星の型や赤方偏移( $z$ )、最大光度から何日後であるかという epoch( $t$ )を調べる必要がある。

本研究ではまず、様々な型や epoch の近傍超新星やモデルスペクトルから成る超新星のテンプレートと、観測された超新星スペクトルとの比較を行い、両者の一致の度合いを reduced  $\chi^2$  を指標として定量的に評価するコードを開発した。一般に観測された超新星スペクトルは、母銀河の光や塵による減光の効果にも影響されるため、型や赤方偏移、epoch に加えて、母銀河の寄与、塵による減光をパラメーターとし、reduced  $\chi^2$  が最小となるような最適解を見つけるというものである。この手法を SDSS-II Supernova Survey (SDSS 超新星サーベイ) で発見された中遠方 ( $z=0.05-0.4$ ) の超新星と、Supernova Cosmology Project (SCP) の一環として、2001 年から 2007 年にかけて Subaru 望遠鏡の FOCAS で分光観測した、 $z>0.5$  の遠方の超新星に適用した。その結果、SDSS 超新星については、ほとんどの天体に対して型や赤方偏移、epoch の決定に成功した。一方  $z>0.5$  の遠方超新星に対しても、S/N の悪いスペクトルを除いた数天体について型を決定することができ、この手法が遠方の超新星についても有効である事を示すことができた。

次に SDSS 超新星のスペクトルを用いて、Ia 型超新星の多様性について調べる。先に述べたように、個々の性質や明るさのばらつきが小さいことで知られている Ia 型超新星だが、必ずしも性質が完全に一様ではない。現在一般的には、Ia 型超新星を標準光源として使用する場合、最大光度の明るさと光度曲線の形が相関を持つという経験則（明るい超新星ほど緩やかな増光減光を示す）に従って、個々の Ia 型超新星の明るさを補正している。このときに用いられるパラメータは光度曲線の解析手法によって異なるが、本研究では「stretch 法」及び「stretch factor (sf)」を用いる。しかしながら、この補正だけでは十分に明るさをそろえることができないことがわかってきた。最近では、Ia 型超新星のスペクトルにおいて、静止系紫外から可視光にかけての波長域で特に個々の多様性が顕著に見られるという結果が報告されている。宇宙論パラメータ決定のためには  $z > 1$  の遠方の超新星を観測する必要があるが、そうした遠方では、可視光で観測した際に静止系紫外の波長域を見ていることになるので、静止系紫外域での Ia 型超新星の多様性を理解することが非常に重要である。また一方で理論モデルの観点からは、progenitor の金属量や、爆発時の外層の密度構造などが Ia 型超新星の明るさやスペクトルの feature を変える、という予測がされており、特に静止系紫外から可視光の波長域で金属量の違いが大きく寄与するという計算結果もある。そこで本研究では、中赤方偏移の超新星のスペクトルを使って、静止系紫外から可視にかけての波長域での Ia 型超新星の多様性を議論する。

今回用いるのは、SDSS 超新星サーベイで発見され、Subaru 望遠鏡で分光観測した超新星サンプルである。SDSS 超新星サーベイがターゲットとしているのは、 $z=0.05-0.40$  であるが、その中でも Subaru 望遠鏡は  $z > 0.2$  の超新星を主に分光しており、可視光の短波長域における Ia 型超新星の多様性を議論するのに適している。今回は Subaru 望遠鏡で分光した Ia 型超新星の中から、最大光度付近 ( $-5 < t < 5$  day) に撮られたスペクトル 20 個を使用する。母銀河成分や天の川銀河の塵による減光等を補正したスペクトルを使って、U-B vs B-V の color-color diagram (2 色図) を作成し、Ia 型超新星の分布を調べたものが図 1 である。黒い点が個々の Ia 型超新星、青いシンボルは平均値でエラーバーはサンプルの分散を表す。赤い矢印は母銀河の塵による赤化を示している（長さは  $A_v=1.0\text{mag}$ ）。水色の四角は Ia 型超新星のスペクトルテンプレートであり、左下から右上に向かって  $t=-5\text{day}$  から  $t=+5\text{day}$  までを 1 日おきに表している。この図を見ると、今回の Ia 型超新星サンプルの分散の向きが赤化の向きと異なっている点から、この分散は母銀河の塵による赤化では説明できない、Ia 型超新星の多様性を示していることがわかる。この分散の要因として考えられるのは、まず stretch factor (sf) で補正可能な多様性、及び epoch が一様ではないために起こる時間進化による多様性である。そこで、20 個のサンプルを stretch factor ごとに 3 つのグループ ( $sf < 1.0$ ,  $1.0 < sf < 1.1$ ,  $1.1 < sf$ ) に分け、3 つのグループでそれぞれ平均スペクトルを作成する。そして、3 つのグループの各平均スペクトルが全体の平均に合うようにしてストレッチの効果で補正する。また epoch についても、20 個のスペクトルを 3 つのグループ ( $-3 < t < -2$ ,  $1 < t < 3$ ,  $3 < t < 5$  day) に分けて同様の補正を行う。こうして stretch factor と epoch の補正を行った結果を示したのが図 2 である。黒い点と灰色の点は補正前の各超新星と全体の平均、青い点と緑の点が補正後の各超新星と全体の平均である。これを見ると、全体の分散は小さくなったものの、依然としてまだ大きな分散が残っている事がわかる。これは stretch factor と epoch だけでは Ia 型超新星の分散をすべて説明することはできず、多様性の要因が他にもある可能性を示している。他の要因として考えられるのは、母銀河による塵の効果や progenitor の金属量などであり、これらが多様性の一因となっているのかを調べる。図 2 の青い点の中で、全体の平均から大きくずれたサンプルに注目し、赤い側(平均から右上)に離れて分布している 6 天体(red sample)と、青い側(左下)に分布している 2 天体(blue sample)をそれぞれ平均したスペクトルを作成する。そして red sample と blue sample の平均スペクトルのカラーが一致するように赤化補正をかけた上で両者を比較したのが図 3 である。全体のカラーを補正しても、4500 より青い側の波長域で feature に違いが見られ、塵による減光以外の要因がある事を示唆している。これらの違いが progenitor の金属量の違いで説明できるのかを調べるため、理論モデルとの比較を行った。しかしながら、今回比較した理論モデルの計算結果は図 3 に見られる結果とは一致しておらず、多様性が金属量によるものなのかどうか確かめることはできなかった。今回は、Ia 型超新星の多様性の原因を突き止めることはできなかったものの、可視の短波長域において Ia 型超新星の多様性が顕著に現れることを確認した。金属量がスペクトルに及ぼす影響については、未だ確たる理論モデルが確立されはしないが、本研究ではその手がかりとなるような多様性の定量化をある程度行うことができた。

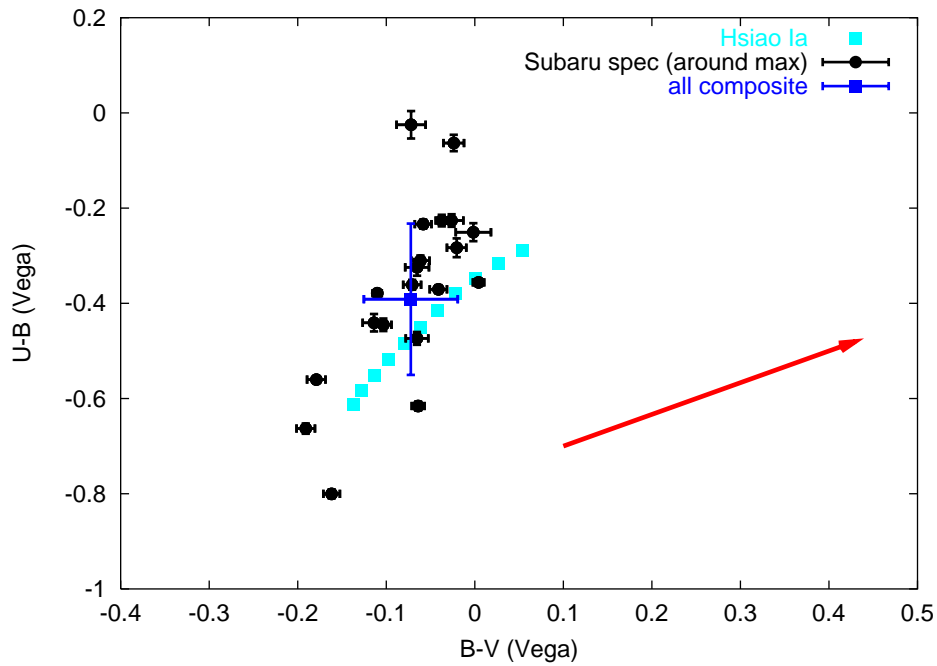


図1 最大光度付近のSDSS超新星のスペクトルを使って作成した2色図。黒い点は個々のIa型超新星、青い四角はサンプルの平均値でエラーバーはサンプルの分散。赤い矢印は母銀河の塵による赤化を示す( $A_V=1.0\text{mag}$ )。水色の四角はIa型超新星のスペクトルプレートであり、左下から右上に向かって $t=-5\text{day}$ から $t=+5\text{day}$ までを1日おきに表している。

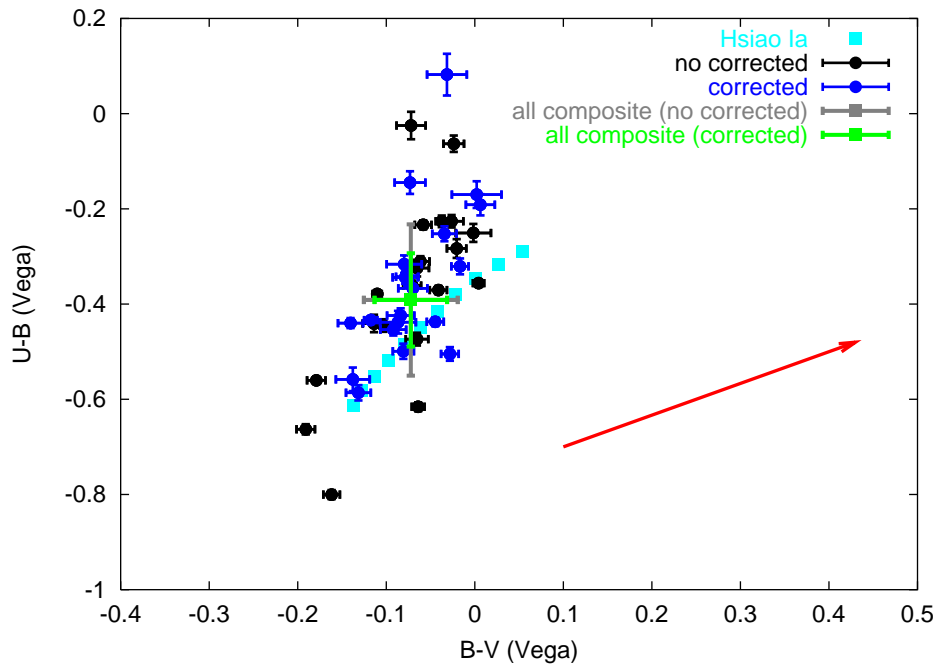


図2 stretch factorとepochの補正結果。黒い点と灰色の四角は補正前の各超新星と全体の平均、青い点と緑の四角が補正後の各超新星と全体の平均を示す。

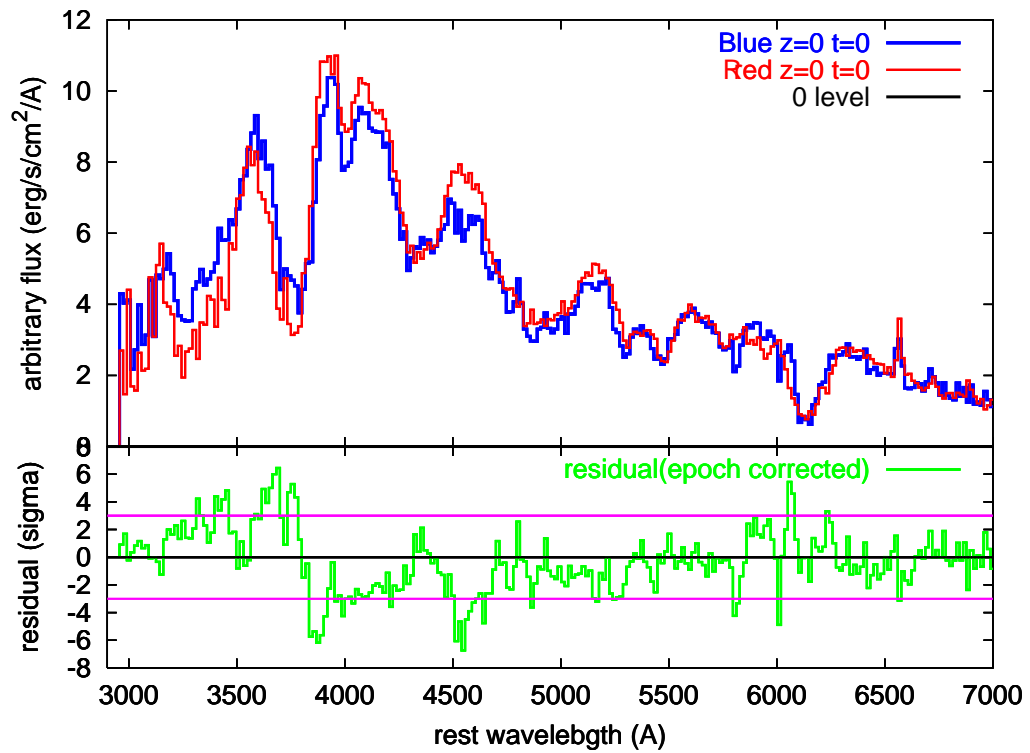


図 3 図 2 で、平均から赤い側へずれていた 6 天体の平均スペクトル(赤線)と、青い側へずれていた 2 天体の平均スペクトル(青線)の比較。下の図は両者のずれを表したものである。4500 より短波長側で、違いが見られる。