

# ダストを生成した Ibn 型超新星 SN 2006jc の 可視後期スペクトルの解析

広島大学 理学部 物理科学科  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

**B114421**

門田 三星

主査:川端 弘治

副査:志垣 賢太

## 概要

質量の大きな星(8~10 $M_{\odot}$ 以上)はその進化の最後に超新星爆発と呼ばれる大規模な爆発現象を起こす。本研究ではその超新星の中でも特殊な Ibn 型超新星 SN 2006jc の可視後期スペクトルについて解析した。

SN 2006jc は他の超新星に比べて爆発後約 60 日という早期にダストを生成した天体である。また、超新星爆発が観測された 2006 年より 2 年前の 2004 年にも大規模な爆発を起こしたことが先行研究により分かっている。この 2004 年に観測された爆発は大量の質量放出を伴い、星の周辺に非常に濃い星周物質(CSM)を作り、そして 2006 年の超新星爆発に伴う放出物質が CSM と相互作用することで早期ダスト生成を行ったと考えられている。

私はすばる望遠鏡の微光天体分光装置 FOCAS で得られた、SN 2006jc の発見後約 6 日から 183 日にかけての 6 エポックの可視スペクトルを解析した。これほど後期までこの超新星のスペクトル観測を行った例は他に報告されていない。その結果、中性ヘリウムのスペクトル輝線の赤側がダスト生成に伴い欠落し、その後回復したことを見出した。これは放出物質の中でダストが生成されたこととコンシステントである。また、後期に見られる長波長側の連続光超過成分を、炭素質のダストモデルでフィッティングし、時間経過に対するダストの質量や温度の変化を解析した。解析の結果、ダストは生成されてから徐々に冷えながら増えていることがわかった。質量については爆発から約 70~100 日以内の方がその後の 1 か月より 2~3 倍多くダストを生成していることがわかり、ダスト生成量は時間とともに減少することがわかった。

# 目次

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>第一章 背景</b>                       | <b>5</b>  |
| 1.1 超新星                             | 5         |
| 1.1.1 超新星の分類                        | 5         |
| 1.1.2 Ibn 型超新星 SN 2006jc            | 6         |
| 1.2 本研究の目的                          | 9         |
| <b>第二章 観測及びデータ</b>                  | <b>10</b> |
| 2.1 観測                              | 10        |
| 2.1.1 観測装置                          | 10        |
| 2.1.2 観測ログ                          | 13        |
| 2.2 分光データのリダクション法                   | 18        |
| 2.3 観測結果                            | 22        |
| 2.3.1 分光観測                          | 22        |
| 2.3.2 測光観測                          | 27        |
| <b>第三章 解析及び考察</b>                   | <b>32</b> |
| 3.1 フラックス較正                         | 32        |
| 3.2 ダストの熱放射の遷移                      | 35        |
| 3.3 超新星成分の寄与について                    | 37        |
| 3.4 スペクトルのフィッティング                   | 39        |
| 3.4.1 黒体放射とダストモデルによるフィット            | 39        |
| 3.4.2 ダストモデルにおける粒子のサイズ              | 41        |
| 3.4.3 ダストモデルの温度依存性                  | 43        |
| 3.4.4 He I 輝線の形状の時間変化               | 44        |
| 3.4.5 連続光スペクトルの超過成分へのダストモデルのフィッティング | 49        |
| <b>第四章 まとめ</b>                      | <b>54</b> |
| <b>謝辞</b>                           | <b>55</b> |
| <b>参考文献・資料</b>                      | <b>56</b> |

# 図目次

|   |    |
|---|----|
| 図 1.1: スペクトルによる超新星のタイプ診断([3]より転載) .....   | 5  |
| 図 1.2: すばる望遠鏡 FOCAS で撮影した SN 2006jc .....   | 8  |
| 図 1.3: SN 2006jc の可視近赤外の光度曲線(中心波長は B:4400 Å、V:5500 Å、<br>R:6600 Å、I:8100 Å、J:12200 Å、K:22000 Å) ..... | 8  |
| 図 2.1: すばる望遠鏡[10] .....   | 10 |
| 図 2.2: FOCAS[15] .....  | 11 |
| 図 2.3: 取得した生画像に寄与する成分[13] .....   | 18 |
| 図 2.4: FOCAS の比較光源のスペクトルその 1 .....  | 20 |
| 図 2.5: FOCAS の比較光源のスペクトルその 2 .....  | 21 |
| 図 2.6: SN 2006jc の 2006/10/15(6 日後)における分光観測スペクトル .....  | 22 |
| 図 2.7: SN 2006jc の 2006/11/27(49 日後)における分光観測スペクトル .....   | 22 |
| 図 2.8: SN 2006jc の 2006/12/25(77 日後)における分光観測スペクトル .....   | 23 |
| 図 2.9: SN 2006jc の 2007/01/24(107 日後)における分光観測スペクトル .....  | 23 |
| 図 2.10: SN 2006jc の 2007/02/12(126 日後)における分光観測スペクトル .....   | 24 |
| 図 2.11: SN 2006jc の 2007/04/10(183 日後)における分光観測スペクトル .....   | 24 |
| 図 2.12: SN 2006jc の 2007/02/12(126 日後)におけるスムージング処理後の<br>分光観測スペクトル .....                               | 25 |
| 図 2.13: SN 2006jc の 2007/04/10(183 日後)におけるスムージング処理後の<br>分光観測スペクトル .....                               | 25 |
| 図 2.14: SN 2006jc の計 6 日分における分光観測スペクトルと主要な輝線[7]. .....  | 26 |
| 図 2.15: J バンドにおける測光観測値[18][19]と内挿により得た値の<br>日付に対するプロット. ....  | 30 |
| 図 2.16: H バンドにおける測光観測値[18][19]と内挿により得た値の<br>日付に対するプロット. ....  | 30 |
| 図 2.17: K バンドにおける測光観測値[18][19]と内挿により得た値の<br>日付に対するプロット. ....  | 31 |
| 図 3.1: 2007/02/12 の R、I バンドそれぞれにおける平均点と測光観測点 .....  | 33 |
| 図 3.2: 補正した 2007/02/12 の R、I バンドそれぞれにおける平均点と測光観測点 .....   | 33 |
| 図 3.3: 図 2.13 の全体図 .....  | 34 |
| 図 3.4: 図 2.14 の全体図 .....  | 34 |

|   |    |
|---|----|
| 図 3.5: 水素輝線の裾を合わせるようスケーリングした 5 日分のスペクトル<br>(2006/11/27,2006/12/25,2007/01/24,2007/02/12,2007/04/10) ..... | 35 |
| 図 3.6: 水素輝線の裾を合わせるようスケーリングした 4 日分のスペクトル<br>(2006/11/27,2006/12/25,2007/01/24,2007/02/12) .....            | 36 |
| 図 3.7: 上図 3.6 を 7000 Å 以降にズームした図 .....  | 36 |
| 図 3.8: ダストの熱放射成分への超新星成分の寄与 .....  | 37 |
| 図 3.9: 黒体放射とダストモデルの曲線の形状の差(それぞれ 1400K,1500K,1600K) ....   | 38 |
| 図 3.10: 2007/01/24 のスペクトルに対する黒体放射とダストモデルによるフィッティング ...  | 39 |
| 図 3.11: 2007/01/24 のスペクトルと内挿により得た J,H,K バンドの点に対する<br>黒体放射とダストモデルによるフィッティング .....                          | 39 |
| 図 3.12: 2007/01/24 のスペクトルに対するダスト粒子サイズ別の<br>1200K のダストモデルによるフィッティング .....                                  | 41 |
| 図 3.13: 2007/01/24 のスペクトルに対するダスト粒子サイズ別の<br>1400K のダストモデルによるフィッティング .....                                  | 41 |
| 図 3.14: 2007/01/24 のスペクトルに対するダスト粒子サイズ別の<br>1600K のダストモデルによるフィッティング .....                                  | 42 |
| 図 3.15: 質量一定下の温度変化に伴うダストモデルの曲線 .....  | 43 |
| 図 3.16: 2006/10/15 のスペクトルにみられる He <sub>I</sub> 輝線(5876 Å、6678 Å、7065 Å) .....                             | 44 |
| 図 3.17: 5876 Å の He <sub>I</sub> 輝線の長波長側の欠落<br>(2006/11/27、2006/12/25、2007/1/24、2007/2/12) .....          | 45 |
| 図 3.18: 6678 Å の He <sub>I</sub> 輝線の長波長側の欠落<br>(2006/11/27、2006/12/25、2007/1/24、2007/2/12) .....          | 46 |
| 図 3.19: 7065 Å の He <sub>I</sub> 輝線の長波長側の欠落<br>(2006/11/27、2006/12/25、2007/1/24、2007/2/12) .....          | 46 |
| 図 3.20: 2007/2/12、2007/4/10 の 5876 Å の He <sub>I</sub> 輝線 .....   | 47 |
| 図 3.21: 2007/2/12、2007/4/10 の 6678 Å の He <sub>I</sub> 輝線<br>(既に輝線は弱く目立たない) .....                         | 48 |
| 図 3.22: 2007/2/12、2007/4/10 の 7065 Å の He <sub>I</sub> 輝線 .....   | 48 |
| 図 3.23: 2006/12/25(77 日後)のスペクトルに対するダストフィット .....  | 49 |
| 図 3.24: 2007/01/24(107 日後)のスペクトルに対するダストフィット .....   | 50 |
| 図 3.25: 2007/02/12(126 日後)のスペクトルに対するダストフィット .....   | 50 |
| 図 3.26: J,H,K バンドの値を加味した 2006/12/25 のスペクトルに対する<br>ダストフィット .....   | 52 |
| 図 3.27: J,H,K バンドの値を加味した 2007/01/24 のスペクトルに対する<br>ダストフィット .....   | 52 |
| 図 3.28: J,H,K バンドの値を加味した 2007/02/12 のスペクトルに対する<br>ダストフィット .....   | 53 |

# 表目次

|   |    |
|---|----|
| 表 1.1: SN 2006jc の母銀河 UGC4904 の各パラメータ[5] .....  | 7  |
| 表 2.1: すばる望遠鏡の仕様[9] .....                       | 11 |
| 表 2.2: FOCAS の仕様[11] .....                      | 12 |
| 表 2.3: 2006/10/15.6(UT)(発見から 6 日後)の分光観測ログ ..... | 13 |
| 表 2.4: 2006/11/27.5(UT)(49 日後)の分光観測ログ .....     | 13 |
| 表 2.5: 2006/12/25.5(UT)(77 日後)の分光観測ログ .....     | 14 |
| 表 2.6: 2007/1/24.4(UT)(107 日後) の分光観測ログ .....    | 14 |
| 表 2.7: 2007/2/12.5(UT)(126 日後)の分光観測ログ .....     | 14 |
| 表 2.8: 2007/4/10.3(UT)(183 日後)の分光観測ログ .....     | 15 |
| 表 2.9: 2006/11/24.4(UT) の測光観測ログ .....           | 15 |
| 表 2.10: 2006/12/25.4(UT) の測光観測ログ .....          | 16 |
| 表 2.11: 2007/1/24.4(UT) の測光観測ログ .....           | 16 |
| 表 2.12: 2007/2/12.5(UT) の測光観測ログ .....           | 17 |
| 表 2.13: 2007/4/10.3(UT) の測光観測ログ .....           | 17 |
| 表 2.14: 近赤外域(J,H,K バンド)の測光観測データ([18]より転載) ..... | 28 |
| 表 2.15: 近赤外域(J,H,K バンド)の測光観測データ([19]より転載) ..... | 29 |

# 第一章 背景

## 1.1 超新星

恒星はその質量によってさまざまな進化の過程をたどる。超新星とは、一部の恒星がその進化の過程の最期に示す大規模な爆発現象である。

超新星爆発は宇宙最大級の爆発現象であり、爆発に伴い放出するエネルギーはおよそ  $10^{51}$  erg 程で宇宙最大級である。その明るさは数十億の星が集まっている小型の銀河に匹敵するものもある[1]。また、爆発時の中心部は超高温になり、鉄よりも重い元素までの生成を行っていると考えられ、これによって作られた重元素が宇宙中に散らばっている。ちなみに超「新星」と呼ばれるのは、かつて超新星が爆発現象であることがわかっていなかった頃、宇宙に急に生まれた新しい星のように見えたからであり、今日においてもその名が使われている。

### 1.1.1 超新星の分類

超新星にも種類があり、極大光度頃の可視域のスペクトルの特徴によって大きく4つ(Ia型、Ib型、Ic型、II型)に分類される。まず水素の特徴(吸収線および輝線)の有無によって分けられ、水素のスペクトル線が有るものをII型超新星、無いものをI型超新星と呼ぶ。I型超新星の中で、ケイ素の吸収線があるものをIa型超新星と呼ぶ。またI型でケイ素の吸収線がないものの中で、ヘリウムの吸収線があるものをIb型、ヘリウムの吸収線もないものをIc型超新星と呼ぶ。

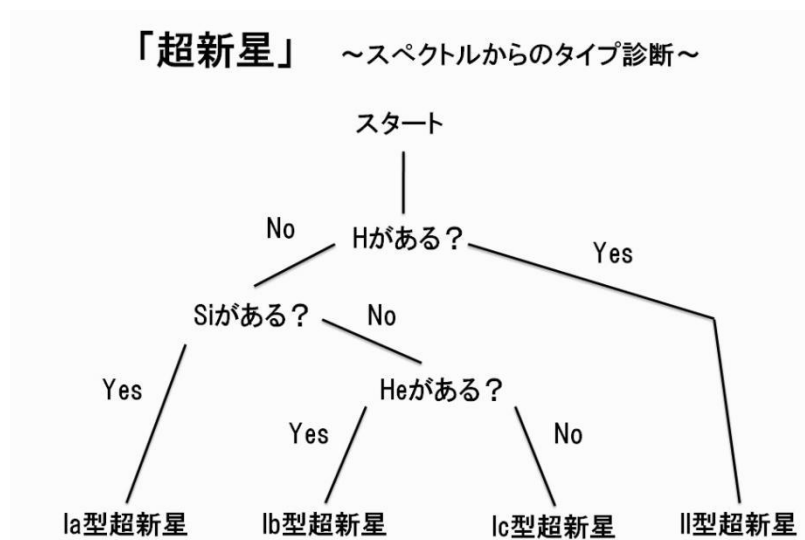


図 1.1: スペクトルによる超新星のタイプ診断([3]より転載)

**Ia**型とその他の超新星では爆発のメカニズムが大きく異なる。**Ia**型超新星は比較的小質量の星の進化が進んだ天体である白色矮星の核爆発によるものだと考えられる。これは**Ia**型超新星が星生成が行われていない楕円銀河でも発見されることと矛盾はない。大質量星はその寿命が短いことから、大質量星を起源とする場合は楕円銀河では存在し得ない。

一方**Ib**型、**Ic**型、II型超新星は8~10  $M_{\odot}$  以上の大質量星が重力崩壊を起こして爆発したものだと考えられる。これは**Ib**型、**Ic**型、II型超新星が星生成の盛んな渦巻き銀河や不規則銀河でのみ発見されるからである。重力崩壊型の中でII型超新星は、爆発直前において親星(爆発以前の星)の最外層に豊富な水素の層が存在し、それが観測スペクトルに見える水素のスペクトル線を作ると考えられる。**Ib**型、**Ic**型超新星は、爆発前に親星の恒星風や連星系の効果、その他何らかの理由により水素層、またはさらにその内側にあるヘリウム層を失ったものだと考えられる[2][3]。しかし親星の進化や超新星の爆発メカニズムはいまだ解明されていない部分がかかなり多く、今後の研究に期待がされている。

1990年代以降、超新星の観測が進展すると、上記の分類に当てはまらない超新星も数多く見つかってきている。本研究の対象となる超新星は**Ibn**型という特殊な分類をされている。**Ibn**型とは**Ib**型超新星の中で、観測スペクトルにおいてヘリウム輝線がみられるものである[4]。このヘリウム輝線は、超新星としては幅が狭い成分( $\Delta v \leq 1000$  km/s)を伴うため、狭いという意味の "n (narrow)" が添え字として使われている。

### 1.1.2 **Ibn**型超新星 SN 2006jc

本研究対象はSN 2006jcという超新星である。SN 2006jcの母銀河は25.8 Mpcの距離にあるUGC4904である[5]。このSN 2006jcは前項で述べた**Ibn**型超新星に初めて分類された超新星であり、数ある超新星の中でも特殊なケースの超新星として知られる。

SN 2006jcは2006年10月9.75日(Julian Date : 2 454 018.75)、に日本のアマチュア天文家の板垣氏らにより発見された。爆発後の日数に対するスペクトルの推移を見ると、爆発の約60日後から可視域の短い波長域では減光が急になる一方で、近赤外域では増光が見られた[6][7][8]。また、スペクトルには左右非対称な $\text{He I}$ の輝線が見られた[6]。この輝線はドップラーシフトによる長波長側が欠けた形をしており、観測点(地球)から見て、爆発の中心から遠ざかるほうへの噴出物が、その手前にある何かに遮蔽されたためと考えられる。

その遮蔽したものはダスト(固体微粒子)であると考えられる。超新星爆発による噴出物が爆発以前からあった濃いCSM(星周物質)と衝突した際に噴出物中でダストが生成され、そのダストが爆発の中心から遠ざかるほうの光を遮蔽していると考えれば説明がつく[6][7][8]。上記の近赤外の波長域における増光もこのダストによる熱放射だと考えられる。かなた望遠鏡による観測で得たSN 2006jcの近赤外域の光度曲線を見ても、発見後約60日以降にダストによる熱放射と思われる増光を示している(図 1.3)。

しかし超新星爆発に伴うダスト生成の過去の例(SN 1987A)ではダスト生成の時期は数百日スケールであり、爆発後60日という早期にダストが生成されたのは非常に珍しい。



この早期のダスト生成は爆発以前からあった濃い **CSM** との衝突によるものであると考えられる。**SN 2006jc** は実は超新星爆発が観測された 2 年前にあたる 2004 年にも大きな増光をしたことが観測されており、その時にたくさんの噴出物を星周にばらまいたと考えられる[7]。このとき放出された物質が非常に濃い **CSM** を形成し、今回の放出物質との相互作用によりダスト生成を促したと考えられる。また、この 2004 年の爆発時かそれまでに水素層を放出しきっていたため、2006 年の爆発時に水素の特徴が見られず、ヘリウムの特徴が見られたと考えられる。恒星進化の理論モデルにより、親星が元々有していた約  $40M_{\odot}$  の質量が、2006 年の爆発時には  $6.9M_{\odot}$  まで減ったと推定されており、非常に大規模な質量放出を行ったことがうかがえる[7]。2004 年の爆発は **LBV**(高光度青色変光星,**Luminous Blue Variable**)の爆発に似た現象であると言われているが、詳しいことはまだよくわかっていない。

超新星爆発に伴い生成されたダストは、炭素質ないし酸化ケイ素質であると考えられるが、**SN 2006jc** の少なくとも初期に生成されたダストは、先行研究のあかり衛星の中間赤外スペクトルの特徴などから、炭素質のものが支配的であると考えられる[9][10][12]。これについて、可視域の後期スペクトルに見られた特徴に関する項で後述する。なお、ケイ酸質よりも炭素質のダストが生成されたことから、親星の外層においては酸素原子よりも炭素原子がより豊富に存在したことが示唆される[7]。

**SN 2006jc** は超新星爆発の二年前に爆発を起こし外層を放出したことによって、早い時期にダストを生成したという非常に興味深い超新星である。

| パラメータ    | 数値                     |
|----------|------------------------|
| RA.DEC.  | 09h17m22.0s +41d54m40s |
| Redshift | 0.005571               |
| Distance | 25.8Mpc                |
| $m - M$  | 32.07 mag              |

表 1.1: **SN 2006jc** の母銀河 **UGC4904** の各パラメータ[5]

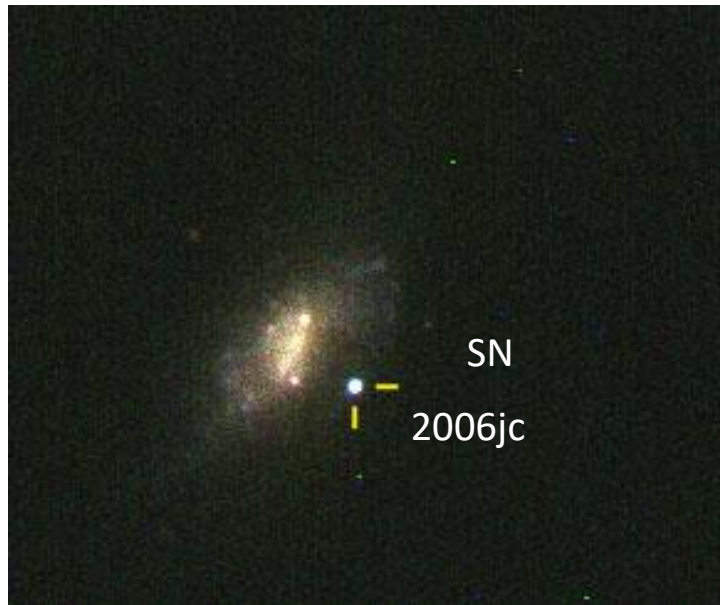


図 1.2: すばる望遠鏡 FOCAS で撮影した SN 2006jc

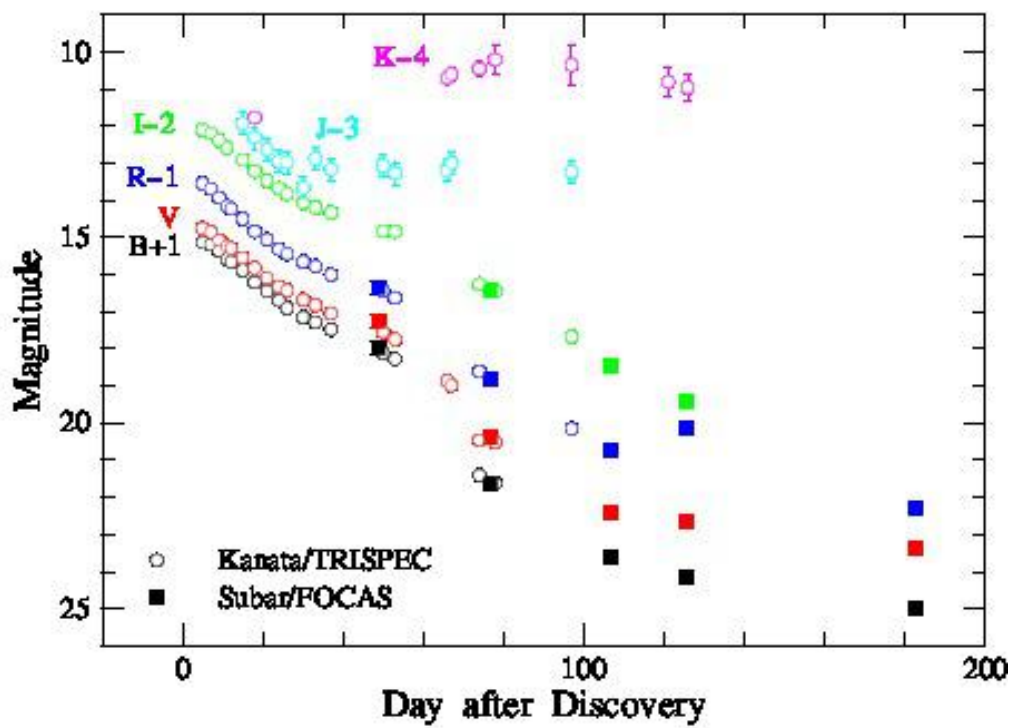


図 1.3: SN 2006jc の可視近赤外の光度曲線(中心波長は B:4400 Å、  
V:5500 Å、R:6600 Å、I:8100 Å、J:12200 Å、K:22000 Å)

## 1.2 本研究の目的

超新星は宇宙における重元素やダスト生成の主たる現場と考えられているが、ダスト生成の過程が観測された例はこれまで殆ど無かった。Ibn型超新星 SN 2006jc は、爆発後わずか約60日後に可視域で減光し、近赤外域で増光するというするというダスト生成の証拠を示した希少な例である。我々は爆発後半年以上にわたる可視スペクトル観測から、ダスト生成現場に関する知見を得ることを目指した。特に、ダスト温度やダスト質量の推移を推定することにより超新星爆発におけるダスト形成の実態について議論する。

## 第二章 観測及びデータ

### 2.1 観測

本研究で用いる分光データは、国立天文台ハワイ観測所のすばる望遠鏡並びに微光天体分光撮像装置 FOCAS により得られたものである。

#### 2.1.1 観測装置

##### 国立天文台すばる望遠鏡

すばる望遠鏡は、標高 4,200 メートルのハワイマウナケア山頂に設置された、自然科学研究機構国立天文台が保有している大型光学赤外線望遠鏡である。有効口径は 8.2m であり、これは単一鏡としては世界最大級のものである。さらに数々の新しい技術を実装している最も先進的な望遠鏡の一つである。表 2.1 にすばる望遠鏡の仕様を示す。

##### FOCAS

FOCAS(微光天体分光撮像装置)とは、すばる望遠鏡のカセグレン焦点部で運用されている多機能観測装置である。FOCAS という名称は「Faint Object Camera And Spectrograph」の頭文字を取ったものである。撮像、分光、偏光モードを有しており、可視光域で高感度の観測を行うことが可能である。表 2.2 に FOCAS の仕様を示す。



図 2.1: すばる望遠鏡[10]

| 項目       | 仕様  |
|----------|---|
| 形式       | 経緯台式反射望遠鏡   |
| 主鏡有効口径   | 8.2 メートル  |
| 基本光学系    | リッチー・クレチアン方式  |
| 焦点       | 4 箇所<br>主焦点(F 比 2.0 補正光学系含む)<br>カセグレン焦点(F 比 12.2)<br>ナスミス焦点(可視光:F 比 12.6)<br>ナスミス焦点(赤外線:F 比 13.6) |
| 高さ       | 22.2 メートル   |
| 最大幅      | 27.2 メートル   |
| 重さ       | 全回転部分 555 トン  |
| 最大駆動速度   | 0.5 度角/秒  |
| 天体の追尾誤差  | 0.1 秒角以下  |
| 観測可能仰角範囲 | 10 - 89.5 度   |
| 総合星分解能   | 0.2 秒角 (補償光学なし、2.15 マイクロメートル)   |

表 2.1: すばる望遠鏡の仕様[10]



図 2.2: FOCAS[15]

| 項目           | 仕様                                |
|--------------|-----------------------------------|
| 検出器          | 2K x 4K buttable CCDs(MIT) 2ヶ     |
| ピクセル サイズ     | 15 $\mu$ m                        |
| ピクセル スケール    | 0.104"                            |
| 視野           | 6'(circular)                      |
| ゲイン          | 1.9 - 2.1 e-/ADU                  |
| 暗電流          | < 0.1 e-/s                        |
| 読み出しノイズ      | 4 e- rms                          |
| サチュレーション レベル | 40 000 e-                         |
| 読み出し時間       | 24 s (whole CCD area, no binning) |
| 最小露出時間       | 0.5 s or 1.0 s                    |

表 2.2: FOCAS の仕様[12]

## 2.1.2 観測ログ

すばる望遠鏡で取得した SN 2006jc 及び分光標準星のデータの観測ログを以下表 2.3~表 2.9 に示す。また表 2.10~表 2.13 には測光観測のログを示す。観測日は計 6 日あり、それぞれの発見日からの経過時間は、6、49、77、107、126、183 日である。183 日という後期までのスペクトルを得ることに成功したのは、我々が知る限り本研究だけである。

| 観測天体       | フレーム ID      | 観測時間 (MJD) | 露出時間 [sec] | スリット        | フィルター | グリズム | 摘要      |
|------------|--------------|------------|------------|-------------|-------|------|---------|
| SN2006jc   | FCSA00082548 | 2454067.5  | 900        | 0".8 center | Y47   | B300 | 分光偏光モード |
|            | FCSA00082550 |            |            |             |       |      |         |
|            | FCSA00082552 |            |            |             |       |      |         |
|            | FCSA00082554 |            |            |             |       |      |         |
|            | FCSA00082556 | 2454067.6  | 900        | 0".8 center | Y47   | B300 |         |
|            | FCSA00082558 |            |            |             |       |      |         |
|            | FCSA00082560 |            |            |             |       |      |         |
|            | FCSA00082562 |            |            |             |       |      |         |
| BD+28d4211 | FCSA00082380 | 2454067.2  | 25         | 0".8 center | Y47   | B300 | 分光偏光モード |
|            | FCSA00082382 |            |            |             |       |      |         |
|            | FCSA00082384 |            |            |             |       |      |         |
|            | FCSA00082386 |            |            |             |       |      |         |

表 2.4: 2006/11/27.5(UT)(発見から 6 日後)の分光観測ログ

| 観測天体      | フレーム ID      | 観測時間 (MJD) | 露出時間 [sec] | スリット        | フィルター | グリズム | 摘要 |
|-----------|--------------|------------|------------|-------------|-------|------|----|
| SN 2006jc | FCSA00079840 | 2454023.6  | 450        | 0".8 center | Y47   | B300 |    |
|           | FCSA00079842 |            |            |             |       |      |    |
|           | FCSA00079844 |            |            |             |       |      |    |
|           | FCSA00079846 |            |            |             |       |      |    |
| G191B2B   | FCSA00079856 | 2454023.6  | 60         | 0".8 center | Y47   | B300 |    |
|           | FCSA00079858 |            |            |             |       |      |    |
|           | FCSA00079860 |            |            |             |       |      |    |
|           | FCSA00079862 |            |            |             |       |      |    |

表 2.3: 2006/10/15.6(UT)(49 日後)の分光観測ログ

| 観測天体       | フレーム ID      | 観測時間 (MJD) | 露出時間 [sec] | スリット        | フィルター | グリズム | 摘要               |
|------------|--------------|------------|------------|-------------|-------|------|------------------|
| SN 2006jc  | FCSA00083948 | 2454095.5  | 600        | 0".8 center | none  | B300 | 雲がかかったため<br>使用せず |
|            | FCSA00083950 |            |            |             | O58   | R300 |                  |
|            | FCSA00083952 |            |            |             | none  | B300 | 撮り直し             |
|            | FCSA00083954 |            |            |             | O58   | R300 | 撮り直し             |
| BD+28d4211 | FCSA00083804 | 2454095.2  | 12         | 0".8 center | none  | B300 |                  |
|            | FCSA00083806 |            |            | 0".8 center | O58   | R300 |                  |

表 2.5: 2006/12/25.5(UT)(77 日後)の分光観測ログ

| 観測天体      | フレーム ID      | 観測時間 (MJD) | 露出時間 [sec] | スリット        | フィルター | グリズム | 摘要 |
|-----------|--------------|------------|------------|-------------|-------|------|----|
| SN 2006jc | FCSA00085462 | 2454125.4  | 1800       | 0".8 center | none  | B300 |    |
|           | FCSA00085464 |            | 1200       |             | O58   | R300 |    |
| Feige34   | FCSA00085558 | 2454125.6  | 12         | 0".8 center | none  | B300 |    |
|           | FCSA00085560 |            | 20         |             | O58   | R300 |    |

表 2.6: 2007/1/24.4(UT)(107 日後)の分光観測ログ

| 観測天体      | フレーム ID      | 観測時間 (MJD) | 露出時間 [sec] | スリット        | フィルター | グリズム | 摘要      |
|-----------|--------------|------------|------------|-------------|-------|------|---------|
| SN 2006jc | FCSA00085744 | 2454144.5  | 1200       | 0".8 center | none  | B300 | 青側 2 枚目 |
|           | FCSA00085746 |            |            |             |       |      |         |
|           | FCSA00085748 |            |            |             |       |      |         |
| Feige34   | FCSA00085720 | 2454144.5  | 20         | 0".8 center | none  | B300 |         |
|           | FCSA00085722 |            | 30         |             | O58   | R300 |         |

表 2.7: 2007/2/12.5(UT)(126 日後) の分光観測ログ



| 観測天体      | フレーム ID      | 観測時間<br>(MJD) | 露出時間<br>[sec] | スリット        | フィルター | グリズム | 摘要   |
|-----------|--------------|---------------|---------------|-------------|-------|------|------|
| SN 2006jc | FCSA00087428 | 2454201.3     | 1800          | 0".8 center | none  | B300 |      |
|           | FCSA00087430 |               |               |             |       |      |      |
|           | FCSA00087432 |               | 1200          |             | O58   |      | R300 |
|           | FCSA00087434 |               |               |             |       |      |      |
| Feige34   | FCSA00087370 | 2454201.2     | 15            | 0".8 center | none  | B300 |      |
|           | FCSA00087372 |               | 20            |             | O58   |      | R300 |

表 2.8: 2007/4/10.3(UT)(183 日後)の分光観測ログ

| 観測天体      | フレーム ID      | 観測時間<br>(MJD) | 露出時間<br>[sec] | フィルター | 摘要             |  |
|-----------|--------------|---------------|---------------|-------|----------------|--|
| SN 2006jc | FCSA00082534 | 2454067.5     | 3             | R     | 等級:17.272±0.10 |  |
|           | FCSA00082536 |               |               | B     | 等級:16.989±0.10 |  |
|           | FCSA00082538 |               |               | V     | 等級:17.272±0.10 |  |
| SA98-634  | FCSA00082568 | 2454067.6     | 0.3           | R     |                |  |
|           | FCSA00082570 |               |               | V     |                |  |
|           | FCSA00082572 |               |               | B     |                |  |
|           | FCSA00082574 |               |               | 1     | R              |  |
|           | FCSA00082576 |               |               | V     |                |  |
|           | FCSA00082578 |               |               | B     |                |  |

表 2.9: 2006/11/24.4(UT) の測光観測ログ

| 観測天体      | フレーム ID      | 観測時間<br>(MJD) | 露出時間<br>[sec] | フィルター | 摘要                     |
|-----------|--------------|---------------|---------------|-------|------------------------|
| SN 2006jc | FCSA00083920 | 2454095.4     | 3             | R     | 雲がかかったため<br>使用せず       |
|           | FCSA00083922 |               | 8             | U     |                        |
|           | FCSA00083924 |               | 3             | B     |                        |
|           | FCSA00083926 |               |               | V     |                        |
|           | FCSA00083928 |               |               | I     |                        |
|           | FCSA00083930 |               | 15            | R     | 撮り直し<br>等級:19.803±0.16 |
|           | FCSA00083932 |               | 150           | U     | 等級:19.902±0.33         |
|           | FCSA00083934 |               | 15            | B     | 等級:20.399±0.16         |
|           | FCSA00083936 |               |               | V     | 等級:20.637±0.11         |
|           | FCSA00083938 |               |               | I     | 等級:18.442±0.13         |
| SA98-634  | FCSA00083910 | 2454095.4     | 2             | U     |                        |
|           | FCSA00083912 |               | 1             | B     |                        |
|           | FCSA00083914 |               | 0.3           | V     |                        |
|           | FCSA00083916 |               |               | R     |                        |
|           | FCSA00083918 |               |               | I     |                        |

表 2.10: 2006/12/25.4(UT) の測光観測ログ

| 観測天体     | フレーム ID      | 観測時間<br>(MJD) | 露出時間<br>[sec] | フィルター | 摘要                     |
|----------|--------------|---------------|---------------|-------|------------------------|
| SN2006jc | FCSA00085442 | 2454125.4     | 15            | R     | 雲がかかったため使<br>用せず       |
|          | FCSA00085444 |               | 150           | U     | 等級:21.679±0.33         |
|          | FCSA00085446 |               | 60            | B     | 等級:22.594±0.12         |
|          | FCSA00085448 |               |               | V     | 等級:22.401±0.16         |
|          | FCSA00085450 |               |               | I     | 等級:20.465±0.13         |
|          | FCSA00085452 |               |               | R     | 撮り直し<br>等級:21.745±0.16 |
| SA98-634 | FCSA00085468 | 2454125.5     | 10            | U     |                        |
|          | FCSA00085470 |               | 1             | B     |                        |
|          | FCSA00085472 |               | 0.3           | V     |                        |
|          | FCSA00085474 |               |               | R     |                        |
|          | FCSA00085476 |               |               | I     |                        |

表 2.11: 2007/1/24.4(UT) の測光観測ログ

| 観測天体       | フレーム ID      | 観測時間<br>(MJD) | 露出時間<br>[sec] | フィルター | 摘要                     |
|------------|--------------|---------------|---------------|-------|------------------------|
| SN 2006jc  | FCSA00085724 | 2454144.5     | 60            | R     | 雲がかかったため<br>使用せず       |
|            | FCSA00085726 |               | 120           | U     |                        |
|            | FCSA00085728 |               | 60            | B     | 等級:23.157±0.13         |
|            | FCSA00085730 |               |               | V     | 等級:22.680±0.17         |
|            | FCSA00085732 |               |               | I     | 等級:21.412±0.14         |
|            | FCSA00085734 |               | 150           | R     | 撮り直し<br>等級:22.137±0.17 |
| PG0942-029 | FCSA00085750 | 2454144.6     | 2             | U     |                        |
|            | FCSA00085752 |               |               |       | 雲がかかったため<br>使用せず       |
|            | FCSA00085754 |               |               | B     | 薄い<br>シラス発生            |
|            | FCSA00085756 |               |               | V     |                        |
|            | FCSA00085758 |               |               | R     |                        |
|            | FCSA00085760 |               |               | I     |                        |

表 2.12: 2007/2/12.5(UT) の測光観測ログ

| 観測天体       | フレーム ID      | 観測時間<br>(MJD) | 露出時間<br>[sec] | フィルター | 摘要                           |
|------------|--------------|---------------|---------------|-------|------------------------------|
| SN2006jc   | FCSA00087408 | 2454201.3     | 150           | R     | 等級:23.276±0.17               |
|            | FCSA00087410 |               | 120           | I     |                              |
|            | FCSA00087414 |               | 150           | U     |                              |
|            | FCSA00087416 |               |               | B     | ガイド星カウント低下<br>等級:23.998±0.14 |
|            | FCSA00087418 |               |               | V     | 等級:23.398±0.19               |
| PG0942-029 | FCSA00087394 | 2454201.3     | 2             | U     | 位置が悪い                        |
|            | FCSA00087396 |               | 10            | U     |                              |
|            | FCSA00087398 |               | 3             | B     | サチレーションを<br>起こした             |
|            | FCSA00087400 |               | 0.7           | V     |                              |
|            | FCSA00087402 |               |               | B     |                              |
|            | FCSA00087404 |               | 0.3           | R     |                              |
|            | FCSA00087406 |               |               | I     |                              |

表 2.13: 2007/4/10.3(UT) の測光観測ログ

## 2.2 分光データのリダクション法

分光観測によって得られた画像のリダクション方法について説明する。

### 一次処理

CCD を用いた観測によって得られた画像のカウントには、バイアス、ダーク、スカイ、宇宙線イベントといった天体の光以外の成分の寄与が考えられる(図 2.3)。

バイアスとは、CCD で画像を読み出す際に掛けるバイアス電圧により発生するカウントである。これは得られた画像の内、バイアス成分のみが写っている部分(オーバースキャン領域)を用いて全体から差し引くことで処理する。ダークとは、機器に発生する熱によって発生する電子のカウントである。これは CCD を十分に冷やすことで無視可能なレベルにまで下げることにより対応する。スカイとは、地球の大気や人工的な街明かりによってカウントが増加する現象である。これもバイアスと似たように、画像のスカイ成分を見積もり全体から差し引く。宇宙線イベントとは、その名の通り偶然飛来した宇宙線がたまたま検出器に入りこんでしまったものである。これは画像上におけるその形状の特徴から画像処理ソフト IRAF の `lacos_spec` というタスクで取り除くことができる。

最後にフラット補正という感度ムラ補正を行う。この補正ではまずハロゲンランプのような様な光をフラット板に当て、それを CCD で撮る。これをフラットフレームと呼び、これを画像から割り算することで補正を行う。

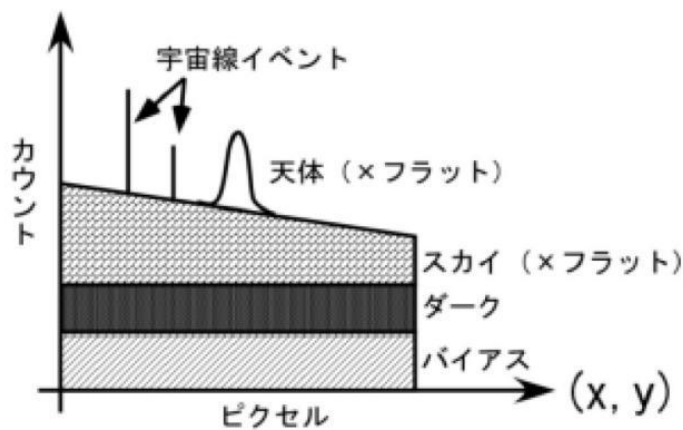


図 2.3: 取得した生画像に寄与する成分[13]

## 歪み補正

分光器を用いた観測では必ず像に歪みが生じる。この歪みは像の中心から離れれば離れるほど動径方向に大きくなる。これは IRAF の `aptrace` というコマンドで補正する。

## 波長同定

分光観測によって得られたフレームは、横軸の表記が波長表記ではなくピクセル表記になっている。これを波長表記に直す必要がある。事前ないし事後に撮っておいたコンパゾンフレーム(図 2.4, 図 2.5)により輝線の波長とフレームに写った輝線とを照らし合わせピクセルを波長に対応させていく。

## 一次元化

分光した光の空間方向について積分することで1ピクセルに縮める。全ての波長について空間方向の成分をすべて足し上げ一次元化したスペクトルを作成する。

## フラックス較正

望遠鏡や観測装置、CCD など全体の機器の波長感度特性を較正する。これにはあらかじめ明るさがよく知られている標準星を別途観測しておき、この標準星フレームから機器による誤差を見積もり、観測したフレームを補正する。

## 赤方偏移補正

母銀河のドップラーシフトによる赤方偏移を補正して、静止系における波長に補正する。赤方偏移の量を  $z$  とすると、観測データの波長に  $\frac{1}{1+z}$  を掛け算することで補正することができる。SN 2006jc の母銀河 UGC4904 の赤方偏移は  $z=0.005571$  であり、この値で補正した[5]。

## 星間吸収補正

星間星周物質による光吸収に対して、先行研究である Pastorello et al.[7] に従い、星間赤化量  $E(B-V) = 0.05$  を仮定して補正した。

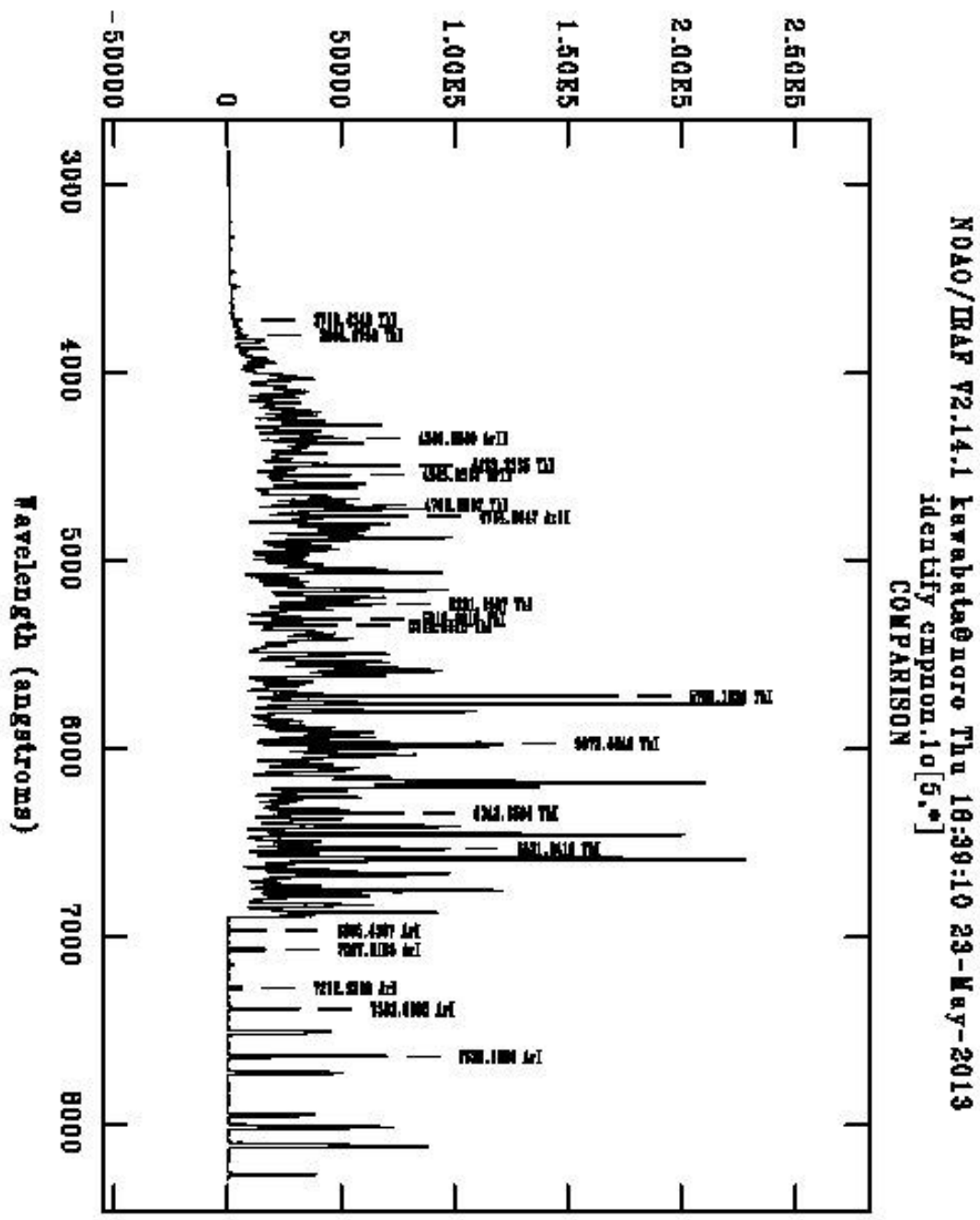


図 2.4: FOCAS の比較光源のスペクトルその 1



## 2.3 観測結果

### 2.3.1 分光観測

本研究では6日分の分光観測スペクトルを得ることができた。以下に6日分のスペクトルのグラフを日ごとに示す(図 2.6~2.11)。2007/2/12,2007/4/10 のスペクトルにおいてはノイズが多くスペクトルのカーブが読みにくいのでスムージング処理を行ったものも用いる(図 2.12,図 2.13)。また、それらのスペクトルを縦軸をlogスケールとした片対数グラフに同時にプロットしたものを主要な輝線の同定情報とともに示す(図 2.14)。

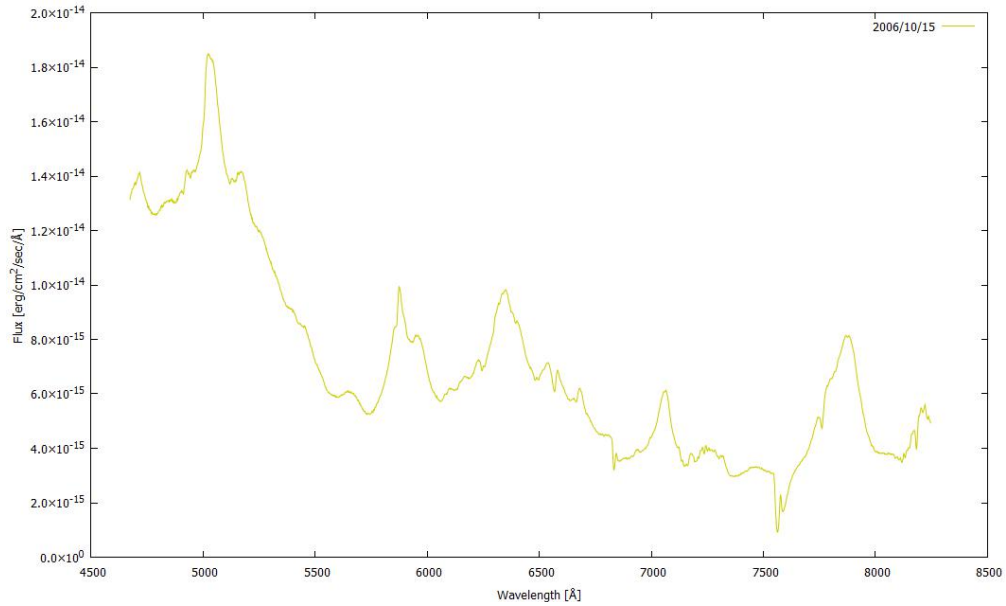


図 2.6: SN 2006jc の 2006/10/15(6 日後)における分光観測スペクトル

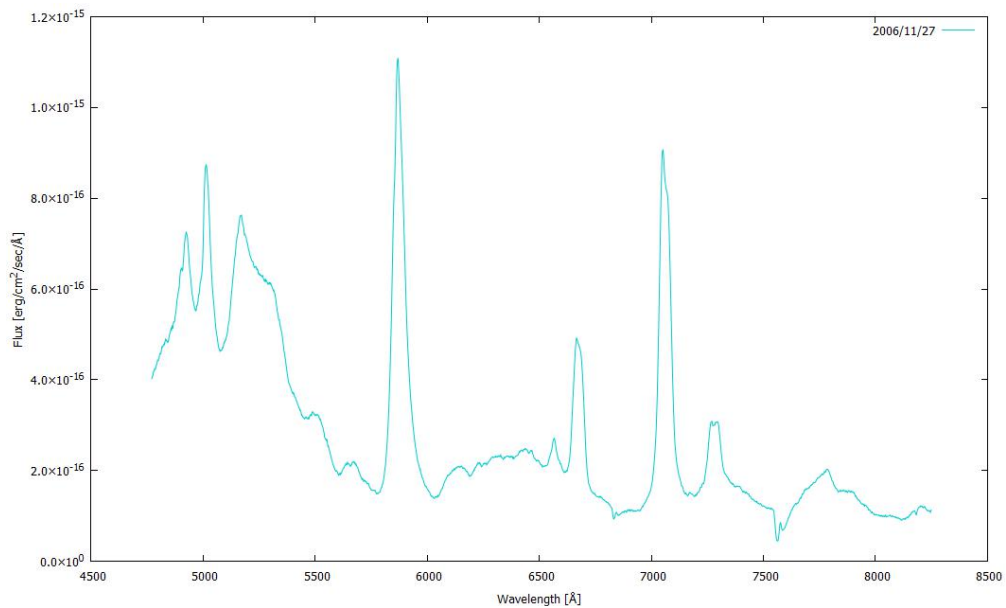


図 2.7: SN 2006jc の 2006/11/27(49 日後)における分光観測スペクトル



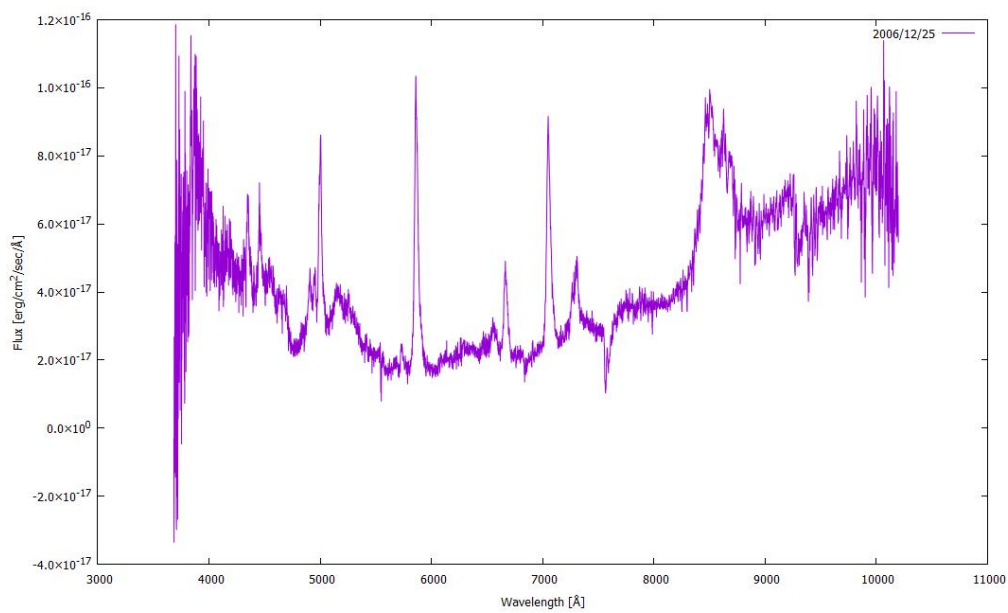


図 2.8: SN 2006jc の 2006/12/25(77 日後)における分光観測スペクトル

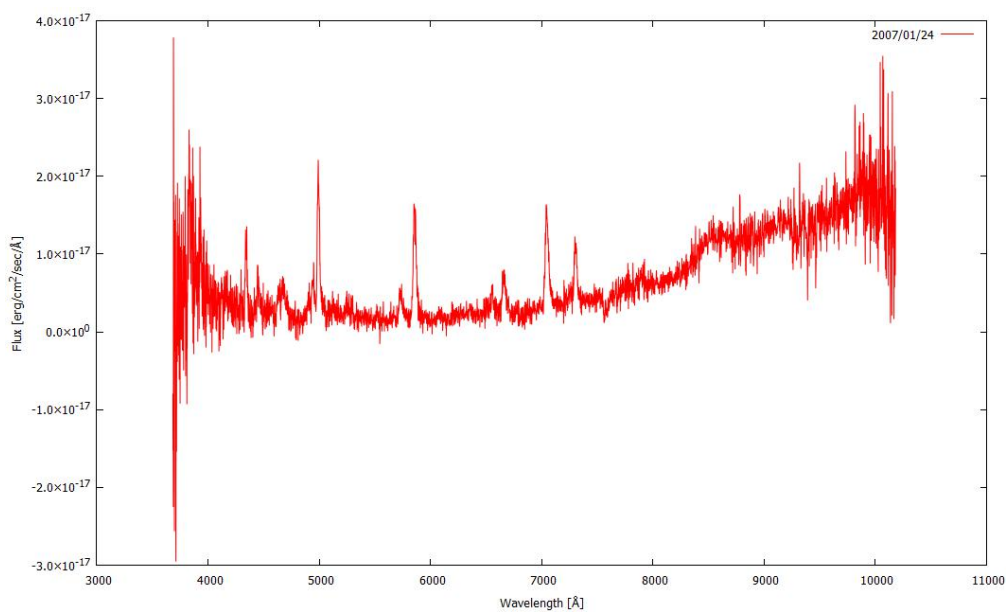


図 2.9: SN 2006jc の 2007/01/24(107 日後)における分光観測スペクトル

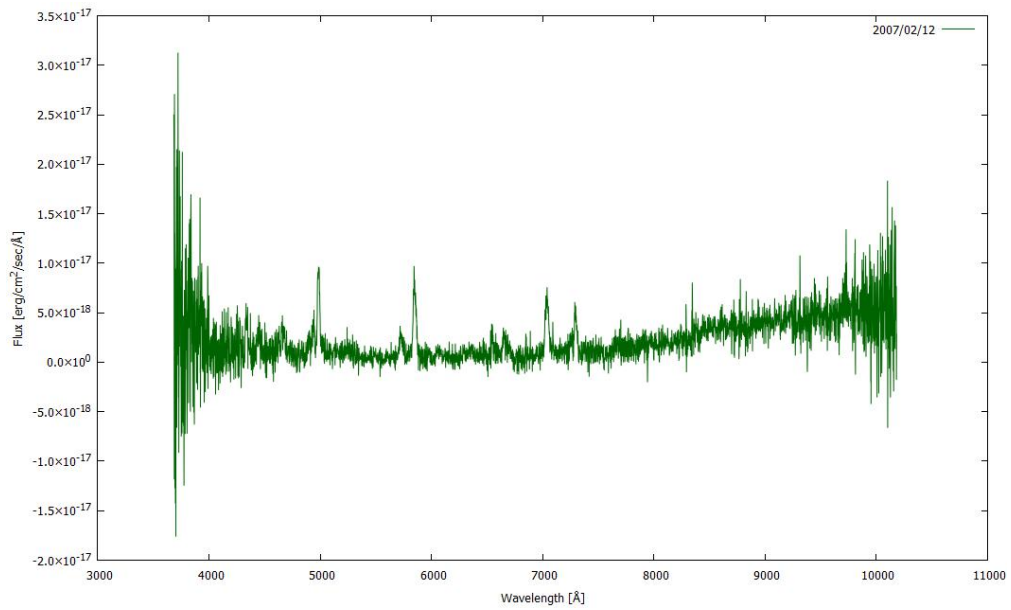


図 2.10: SN 2006jc の 2007/02/12(126 日後)における分光観測スペクトル

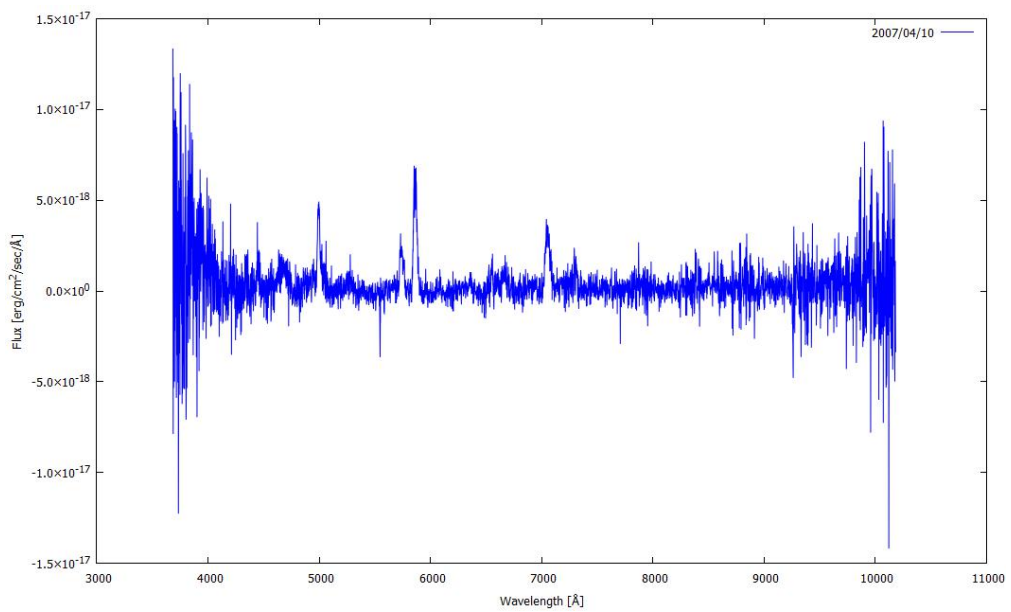


図 2.11: SN 2006jc の 2007/04/10(183 日後)における分光観測スペクトル

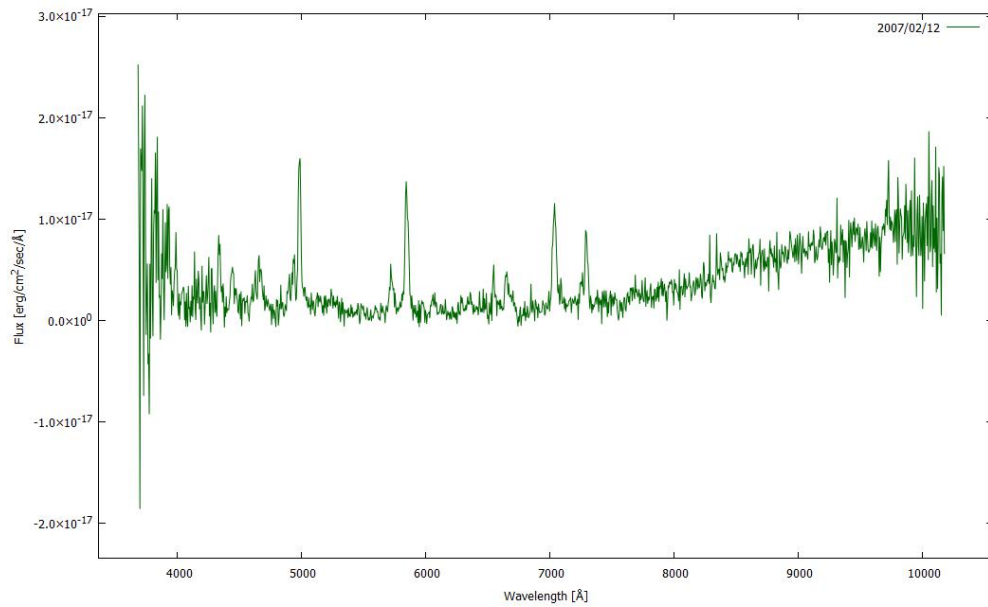


図 2.12: SN 2006jc の 2007/02/12(126 日後)における  
スムージング処理後の分光観測スペクトル

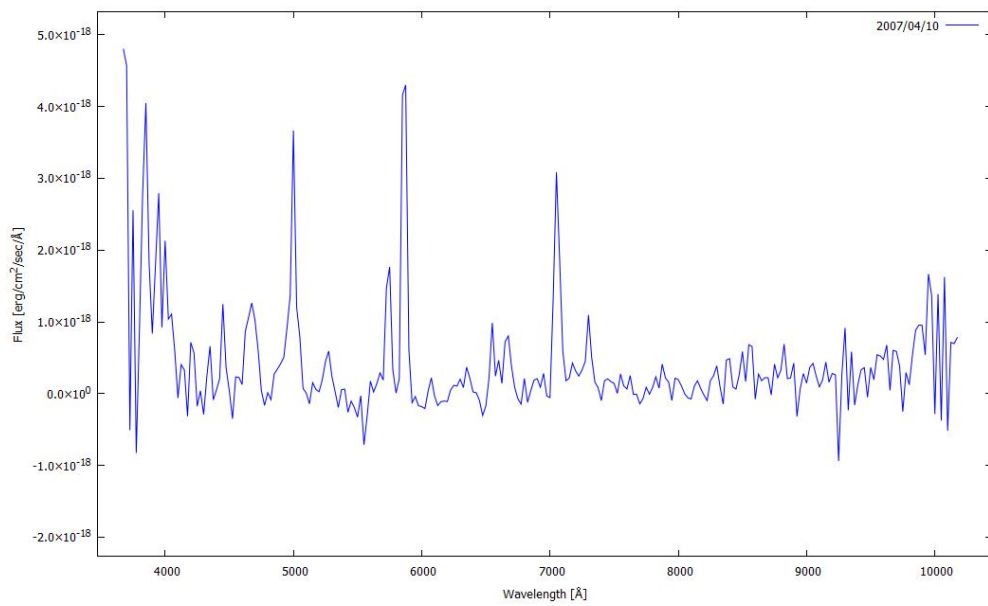


図 2.13: SN 2006jc の 2007/04/10(183 日後)における  
スムージング処理後の分光観測スペクトル

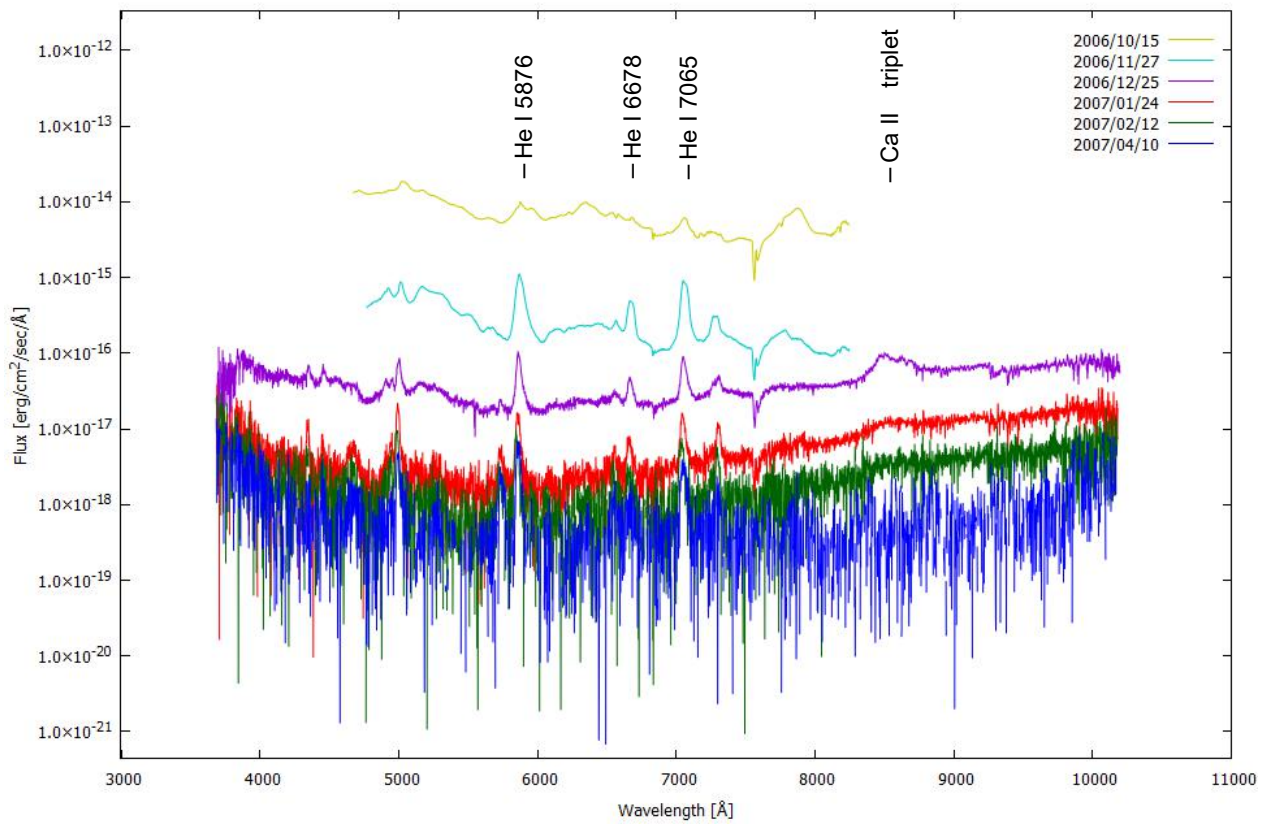


図 2.14: SN 2006jc の計 6 日分における  
分光観測スペクトルと主要な輝線[7]

### 2.3.2 測光観測

2つの先行論文から計10日分の近赤外域(J,H,Kバンド)の測光観測データを引用した[18][19]。これらのデータは我々の可視分光スペクトルの解析において、より長波長側の成分も補間するために必要である。本来であれば分光観測日と同じ日のデータが用意できれば良いが、分光観測日と同じ日のデータは見つからなかったため、変化は日スケールで緩やかであることから3日以内のものを選んだ。引用したデータを表2.14、表2.15に示す。

また、すばる望遠鏡で分光とともに観測したR,Iバンドにおける測光データも用意した。これらのデータは分光スペクトルのフラックスを補正するために用いた。

#### 分光観測日におけるJ,H,Kバンドの光度の取得

我々のスペクトルは可視域のものであるが、ダストの熱放射によるスペクトルのピークは近赤外域かそれより長波長側にあることから、スペクトル観測と同日の近赤外域(J,H,Kバンド)のデータも用意することができれば、ダストのスペクトルを解析する上でより役立つと考えられる。しかし、前述した通り、まったく同日の近赤外のデータを用意することはできなかった。そこで、引用したデータを日付順に並べ、欲しい日付を内挿することで推定することにした。後述するが2006/12/25,2007/1/24,2007/2/12のダストに関する解析を行うので、今回必要としたのはこの3日分の近赤外のデータである。図2.15～図2.17にJ,H,Kバンドそれぞれにおいて引用データと内挿して得たデータを日付に対してプロットしたものを示す[18][19]。

| Julian Date<br>(+2,454,000) | J<br>(mag) | $\Delta J$<br>(mag) | H<br>(mag) | $\Delta H$<br>(mag) | K<br>(mag) | $\Delta K$<br>(mag) |
|-----------------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|
| 54.6                        | 16.16      | 0.04                | 15.68      | 0.04                | 15.12      | 0.03                |
| 55.6                        | -          | -                   | 15.64      | 0.04                | -          | -                   |
| 62.6                        | -          | -                   | -          | -                   | 14.74      | 0.04                |
| 63.6                        | 16.03      | 0.05                | 15.54      | 0.03                | -          | -                   |
| 72.6                        | 16.12      | 0.05                | 15.24      | 0.02                | 14.45      | 0.04                |
| 75.6                        | 16.05      | 0.04                | 15.07      | 0.02                | 14.27      | 0.02                |
| 76.6                        | 16.09      | 0.05                | -          | -                   | -          | -                   |
| 77.6                        | -          | -                   | 15.00      | 0.02                | 14.17      | 0.02                |
| 82.7                        | 15.95      | 0.06                | 14.78      | 0.02                | 13.96      | 0.02                |
| 83.7                        | 15.96      | 0.04                | 14.75      | 0.02                | 14.03      | 0.02                |
| 132.3                       | 17.67      | 0.17                | 15.99      | 0.03                | 14.78      | 0.02                |
| 137.3                       | 17.64      | 0.15                | 16.23      | 0.03                | 14.94      | 0.03                |
| 159.4                       | 18.18      | 0.31                | -          | -                   | 15.22      | 0.04                |
| 162.4                       | -          | -                   | 16.75      | 0.05                | 15.46      | 0.10                |
| 164.4                       | 18.77      | 0.38                | 16.83      | 0.03                | 15.32      | 0.05                |
| 165.5                       | 18.74      | 0.33                | -          | -                   | 15.35      | 0.05                |
| 168.4                       | -          | -                   | -          | -                   | 15.42      | 0.06                |
| 172.4                       | 18.90      | 0.40                | 16.80      | 0.02                | 15.48      | 0.05                |
| 173.4                       | -          | -                   | 16.87      | 0.02                | 15.43      | 0.06                |
| 174.4                       | -          | -                   | 16.89      | 0.02                | 15.30      | 0.07                |
| 175.4                       | 18.84      | 0.48                | 17.08      | 0.04                | 15.62      | 0.12                |
| 176.4                       | -          | -                   | 16.96      | 0.03                | 15.54      | 0.11                |
| 177.4                       | -          | -                   | 17.04      | 0.02                | 15.61      | 0.09                |
| 181.3                       | -          | -                   | -          | -                   | 15.58      | 0.11                |
| 197.4                       | 18.86      | 0.50                | 17.45      | 0.17                | 15.91      | 0.09                |
| 202.3                       | 18.98      | 0.51                | 17.78      | 0.28                | 16.13      | 0.11                |
| 207.3                       | 19.06      | 0.72                | -          | -                   | 16.25      | 0.13                |

表 2.14: 近赤外域(J,H,K バンド)の測光観測データ([18]より転載)

| Julian Date<br>(+2,454,000) | J<br>(mag) | $\Delta J$<br>(mag) | H<br>(mag) | $\Delta H$<br>(mag) | K<br>(mag) | $\Delta K$<br>(mag) |
|-----------------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|
| 54.55                       | 15.87      | -                   | 15.64      | -                   | 15.01      | -                   |
| 55.55                       | -          | -                   | 15.53      | -                   | -          | -                   |
| 63.55                       | 15.93      | -                   | 15.47      | -                   | 14.64      | -                   |
| 72.54                       | 15.92      | -                   | 15.08      | -                   | 14.29      | -                   |
| 75.54                       | 15.88      | -                   | 15.01      | -                   | 14.20      | -                   |
| 85.97                       | 15.83      | 0.01                | 14.76      | 0.01                | 13.87      | 0.01                |
| 93.00                       | 16.01      | 0.01                | 14.86      | 0.01                | 13.91      | 0.01                |
| 99.88                       | 16.28      | 0.01                | 15.04      | 0.01                | 14.00      | 0.01                |
| 113.92                      | 16.85      | 0.02                | 15.43      | 0.01                | 14.27      | 0.01                |
| 121.00                      | 17.08      | 0.02                | 15.63      | 0.01                | 14.40      | 0.01                |
| 175.93                      | 19.25      | 0.15                | 17.23      | 0.04                | 15.56      | 0.03                |
| 216.73                      | -          | -                   | 18.17      | 0.08                | 16.39      | 0.03                |
| 230.74                      | -          | -                   | 18.49      | 0.12                | 16.67      | 0.05                |
| 278.74                      | -          | -                   | -          | -                   | 17.60      | 0.1                 |
| 492.97                      | -          | -                   | -          | -                   | 21.64      | 0.4                 |

表 2.15: 近赤外域(J,H,K バンド)の測光観測データ([19]より転載)

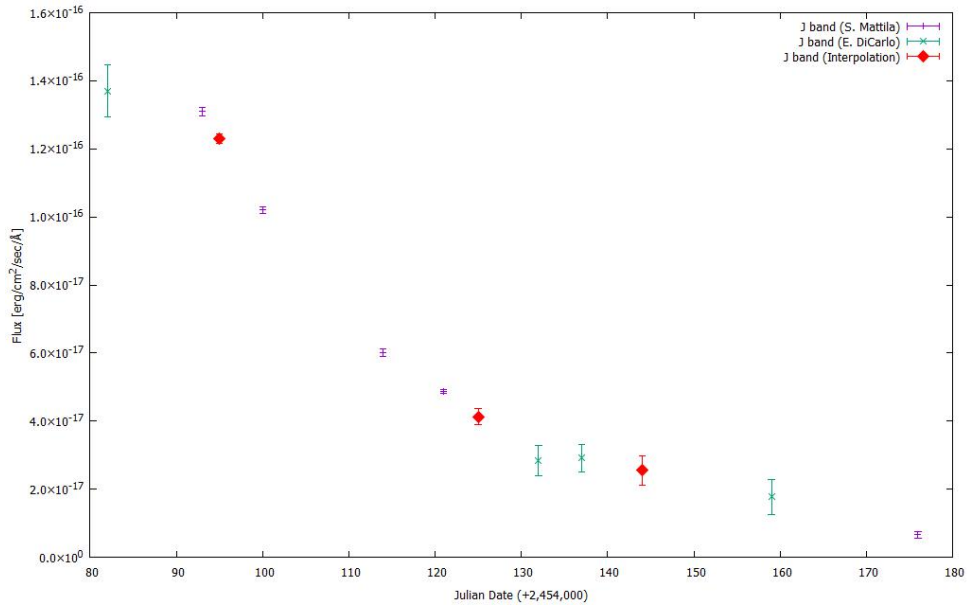


図 2.15: J バンドにおける測光観測値[18][19]と内挿により得た値の日付に対するプロット

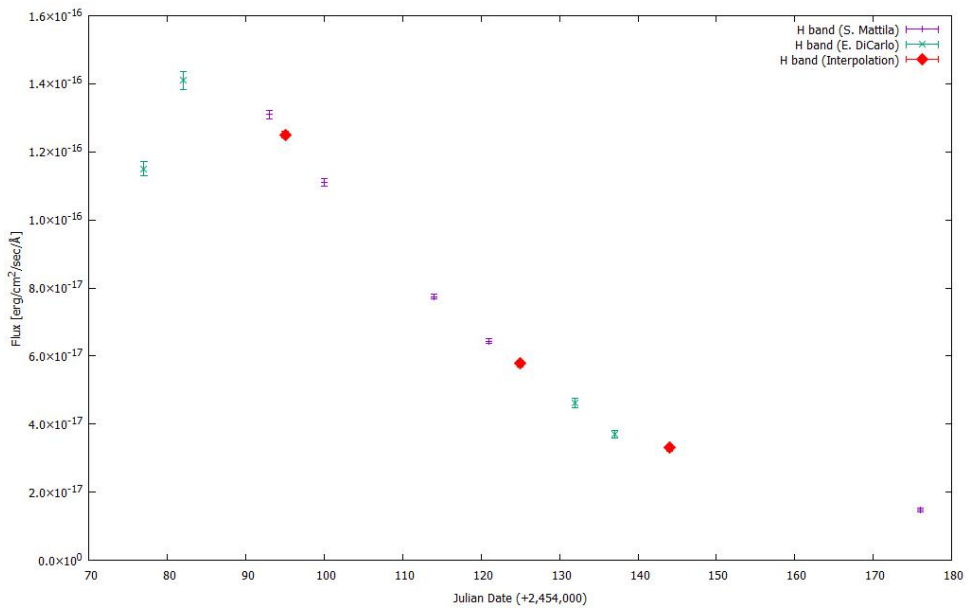


図 2.16: H バンドにおける測光観測値[18][19]と内挿により得た値の日付に対するプロット



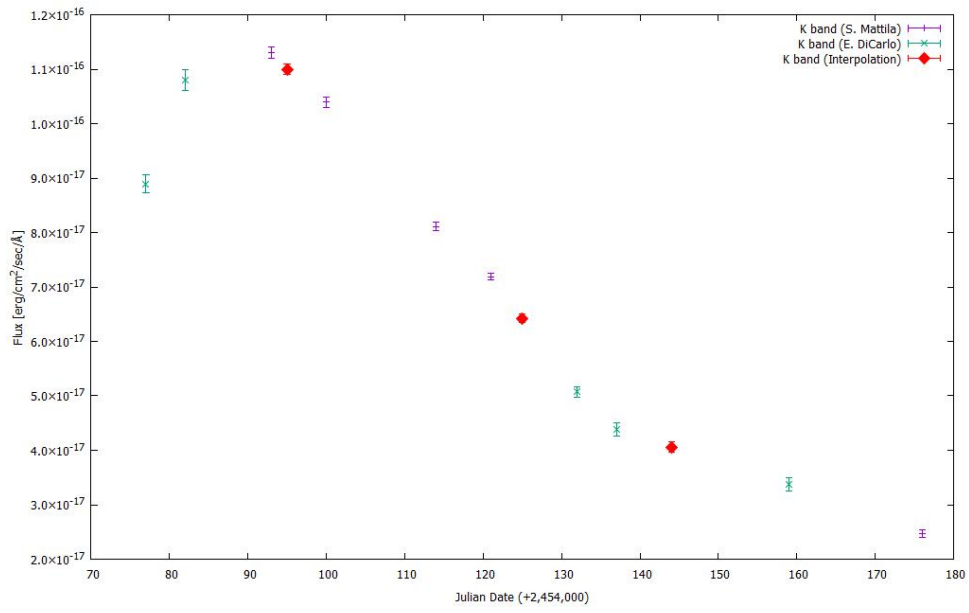


図 2.17: K バンドにおける測光観測値[18][19]と内挿により得た値の日付に対するプロット

## 第三章 解析及び考察

### 3.1 フラックス校正

分光データのフラックス値は、観測時に分光器スリットで一部遮蔽されることから、その絶対値には波長に対し一定の割合での不安定性がある。これを測光データを用いて補正する。ただし、測光観測と分光観測では画像処理(スカイ差し引き処理)を行う際、微妙に差異が生じる可能性があることにも注意が必要である。測光観測では得られた画像データの全体のスカイ成分の平均を差し引く。一方分光観測ではそもそもスリットに入ってきた光だけを見て分光するので、見えるスカイ成分は一軸方向に限られ、測光観測より少なくなってしまう。よって、銀河成分など非一様な背景成分が載っている場合にはスカイ差し引きにおける誤差が分光スペクトルに影響してしまう場合がある。

分光スペクトルに補正をかける方法として、まず分光観測と同じ日の R、I バンドの測光観測データを用意した。次に R、I バンドのフィルター透過率を分光スペクトルの波長を内挿し求め、その透過率スペクトルをフラックスのスペクトルに各波長要素ごとに掛け算し、各バンド内での加重平均をとった。得られた点と測光値により換算されるフラックス値を比べ、観測誤差内にあるかを見て、優位にずれている場合は合うように波長によらず一定値を掛け算する方針をとることにした。

ただし分光観測では観測域の長い波長側においてスカイ輝線が強いためノイズが多く乗る。したがって内挿し加重平均をとって得られた点もノイズ分だけ大きな値になることが予想される。よってここでは I バンドよりも R バンドにより重きをおいて補正する。

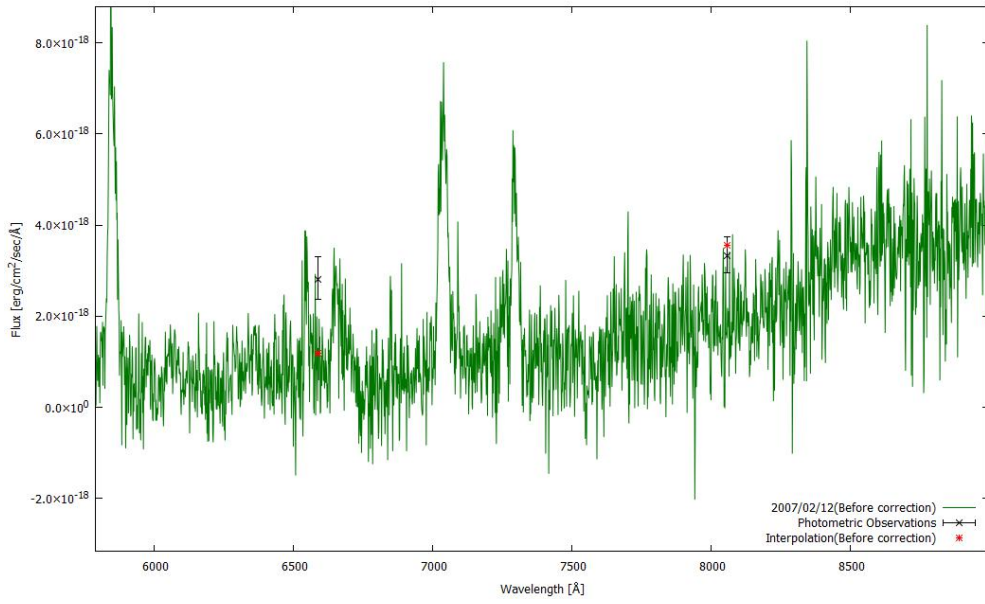


図 3.1: 2007/02/12 の  
R、Iバンドそれぞれにおける平均点と測光観測点

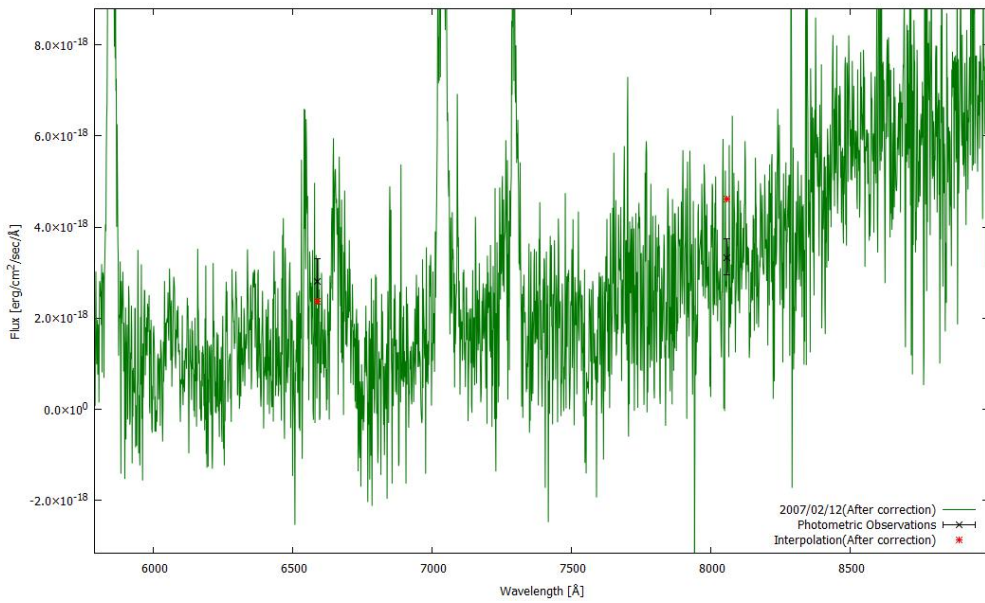


図 3.2: 補正した 2007/02/12 の  
R、Iバンドそれぞれにおける平均点と測光観測点

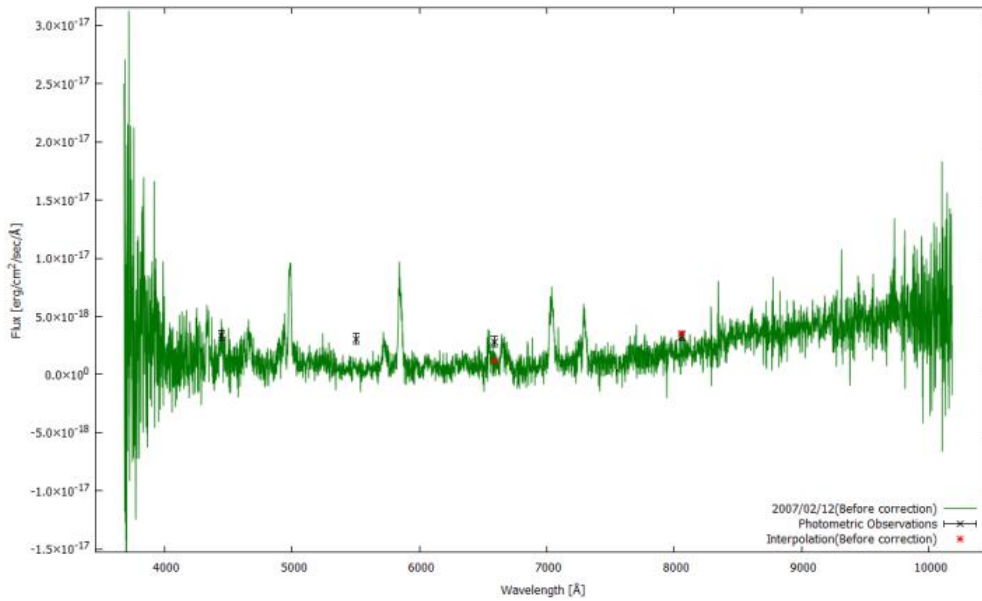


図 3.3: 図 2.13 の全体図

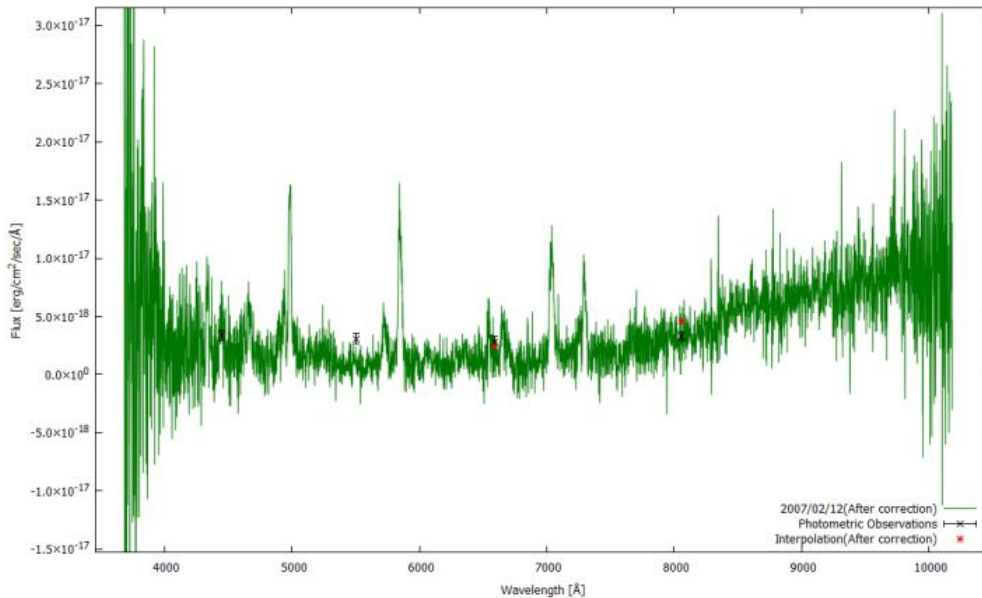


図 3.4: 図 2.14 の全体図

2007/02/12 の分光スペクトルの R バンドにおいて測光観測点の誤差外の値となったので、R バンドと I バンドそれぞれにおける測光観測値と分光観測の換算値の比をとり、得られた値の平均をスペクトル全体に掛け算することで補正した(図 3.1, 図 3.2)。I バンドにおいてはやや超過が見られるが、スカイ輝線が強いことによる誤差の影響と考えることから、誤差として許容することにした。

ほかの日付のスペクトルについては誤差範囲内だったので補正しなかった。

## 3.2 ダストの熱放射の遷移

用意した分光スペクトルにおいてダストによる熱放射成分がどのように見られるかを調べる。図 3.5 に 2006/11/27~2007/04/10 のスペクトルを、6000 Å 付近のヘリウム輝線の根元のフラックス値を合わせる形でスケールし同時にプロットしたものを示す。2006/11/27 ~ 2007/2/12 の約 3~4 か月間にかけて 7000 Å 以降の長波長領域において増光が見られる(図 3.6, 図 3.7)。2006/11/27 のデータは 8000 Å 付近までしかないが、7500~8000 Å の帯域だけ見ても一か月後には増光していることが明かである。この時期の可視域の短波長側のバンドでは減光が観測されていることなどから(図 1.3)この増光している成分が、超新星爆発において生成されたダストの熱放射の成分であると考えられる

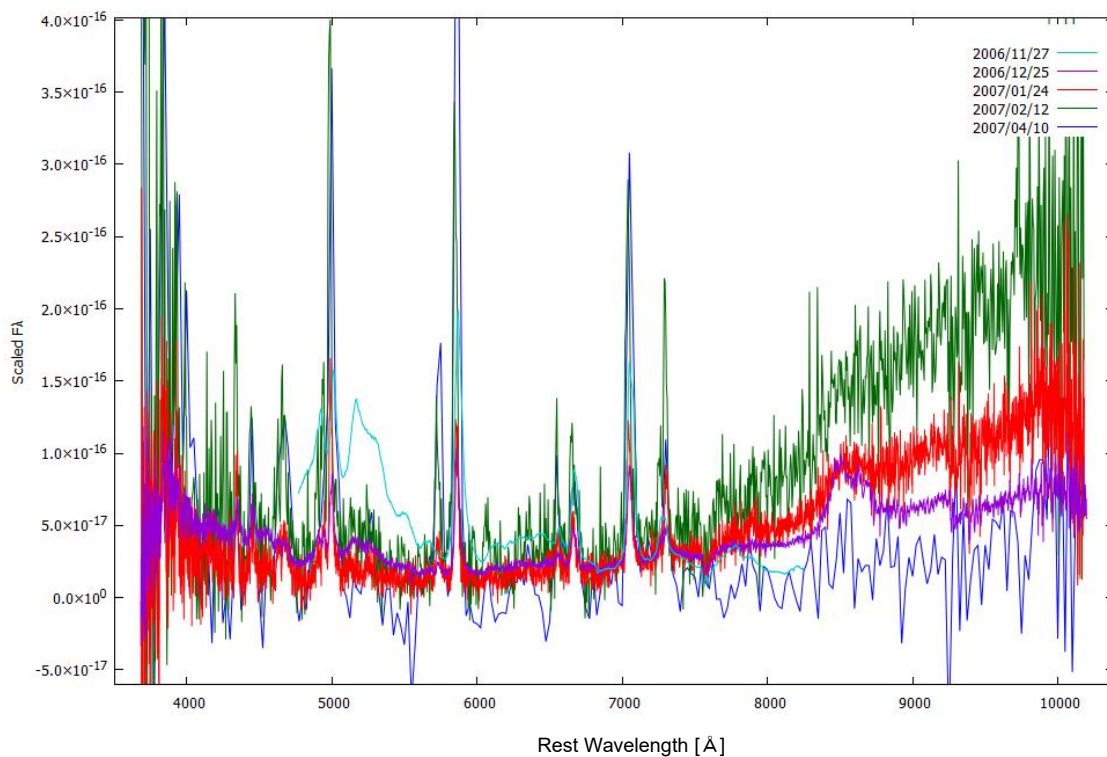


図 3.5: 水素輝線の裾を合わせるようスケールした 5 日分のスペクトル  
(2006/11/27, 2006/12/25, 2007/01/24, 2007/02/12, 2007/04/10)  
波長は静止波長系に直してある

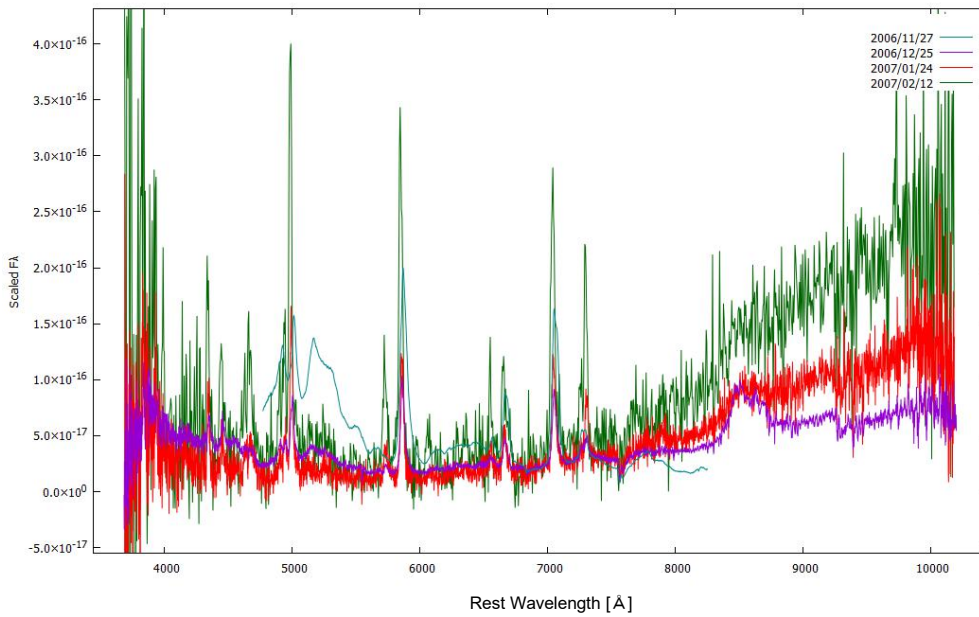


図 3.6: 水素輝線の裾を合わせるようスケリングした 4 日分のスペクトル (2006/11/27,2006/12/25,2007/01/24,2007/02/12)

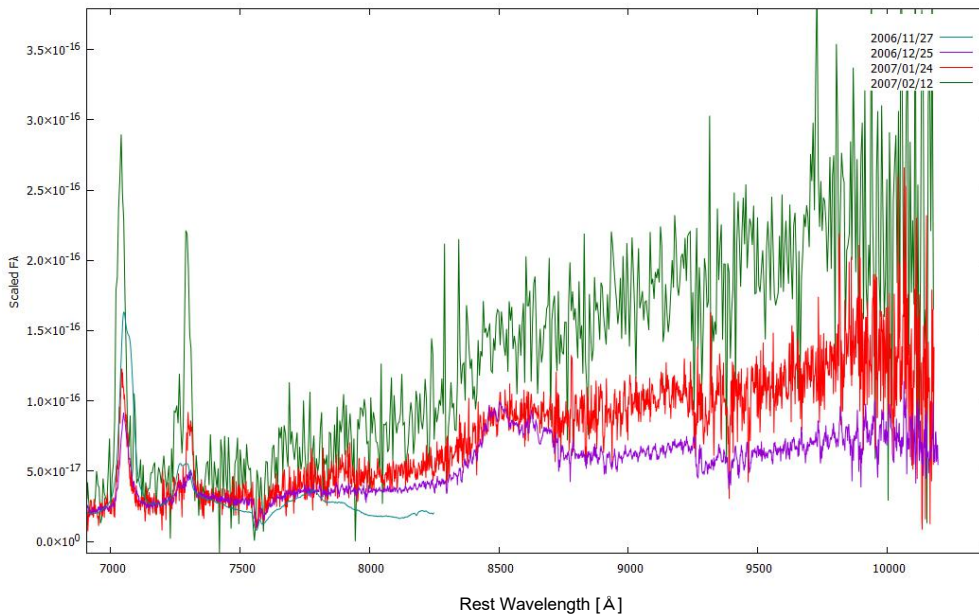


図 3.7: 上図 3.6 を 7000 Å 以降にズームした図

2007/2/12 から少し期間が空けた 2007/4/10 には減光しており、これは熱放射していたダストが放出物質の膨張に伴い、中心星から受ける放射が弱まることで冷え、光を放出しなくなったためだと考えられる(図 3.5)。

この増光が見られる領域についてダストの熱放射で説明できるかの根拠として、2 つの熱放射のモデルで説明できるか調べる。次項ではその 2 つのモデルのフィットについて説明していく。

### 3.3 超新星成分の寄与について

7000 Å 以降の長波長スペクトルにどれくらい超新星自体の成分が寄与しているかを評価したい。そこでダスト生成前、つまり超新星成分のみのスペクトルとダスト生成後のスペクトルを y 軸に対してスケールリングして同時にプロットする(図 3.8)。これにより、超新星スペクトルの特徴の時間変化はゆるいと仮定することでダスト成分に超新星成分がどれくらい寄与しているか簡易的に見る。今回はダスト生成前のスペクトルとして 2006/11/27、ダスト生成後のスペクトルとして 2006/12/25 のスペクトルを用いた。

図 3.8 を見るとダスト生成後のスペクトルでは 7000 Å 以降でだいたい 1/2~1/3 の割合を超新星成分が占めていることがわかる。また、右にいくほど盛り上がっていることから、長波長側であればあるほどダスト成分が支配的であると考えられる。

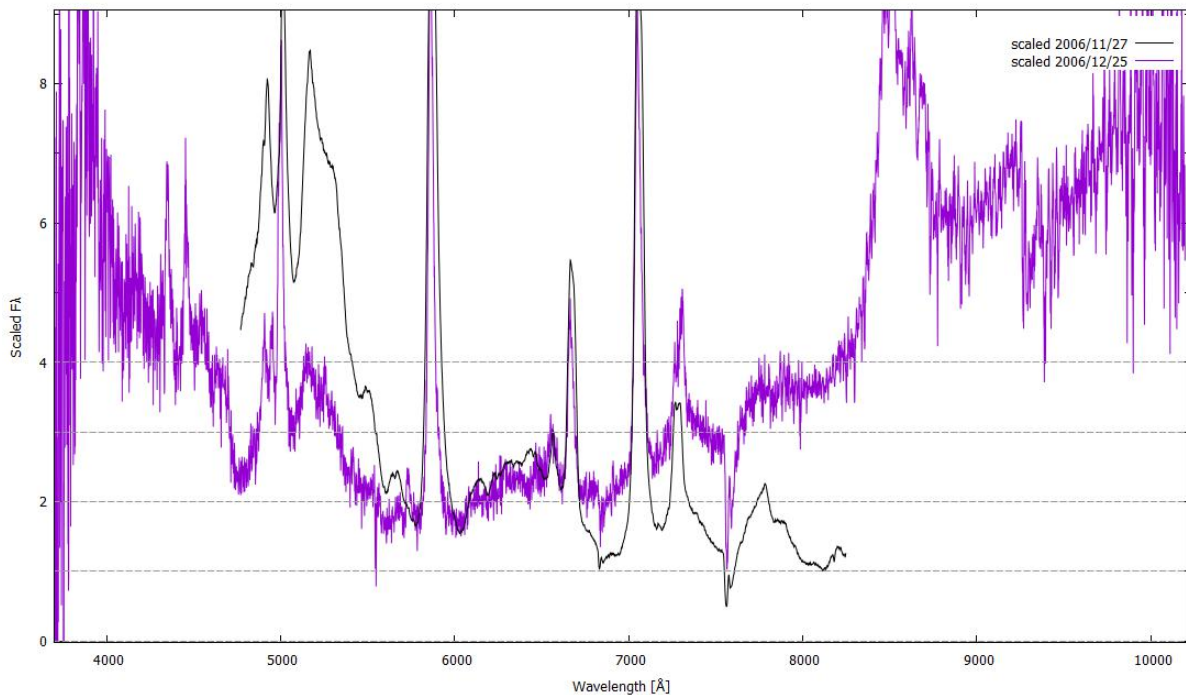


図 3.8: ダストの熱放射成分への超新星成分の寄与



## 3.4 スペクトルのフィッティング

### 3.4.1 黒体放射とダストモデルによるフィット

分光スペクトルの  $7000 \text{ \AA}$  以降を黒体放射ないしダストモデルでフィッティングしていくことでダストの温度や質量を見積もる。ダストモデルは先行研究にて使われたものを用いた[20][21]。このダストモデルで用いる光学特性はベンゼンを燃やした時のすすの実測値であり、宇宙における炭素質とのダスト成分に光学定数が近いと期待されている。また、ダストモデルでは、放射体が光の波長と同程度かそれよりも小さいことから、その粒子サイズの効果が波長依存性に効くと予想される。この予測について黒体放射とダストモデルではどちらのほうがよりよくフィットできるかを見ていく。

まず黒体放射とダストモデルのスペクトルの単純な曲線の形の違いを見る。図 3.9 に  $1400, 1500, 1600 \text{ K}$  の黒体放射の関数と、そのピークに高さをそろえた同温度のダストモデル ( $0.1 \mu\text{m}$ ) の関数を示す。これを見ると黒体放射とダストモデルではスペクトルの形が大きく異なることがわかる。具体的にはピークとなる波長がダストモデルのほうが黒体放射より  $5000 \text{ \AA}$  程短い側にあり、ピークまでのカーブの曲率が急であることがわかる。

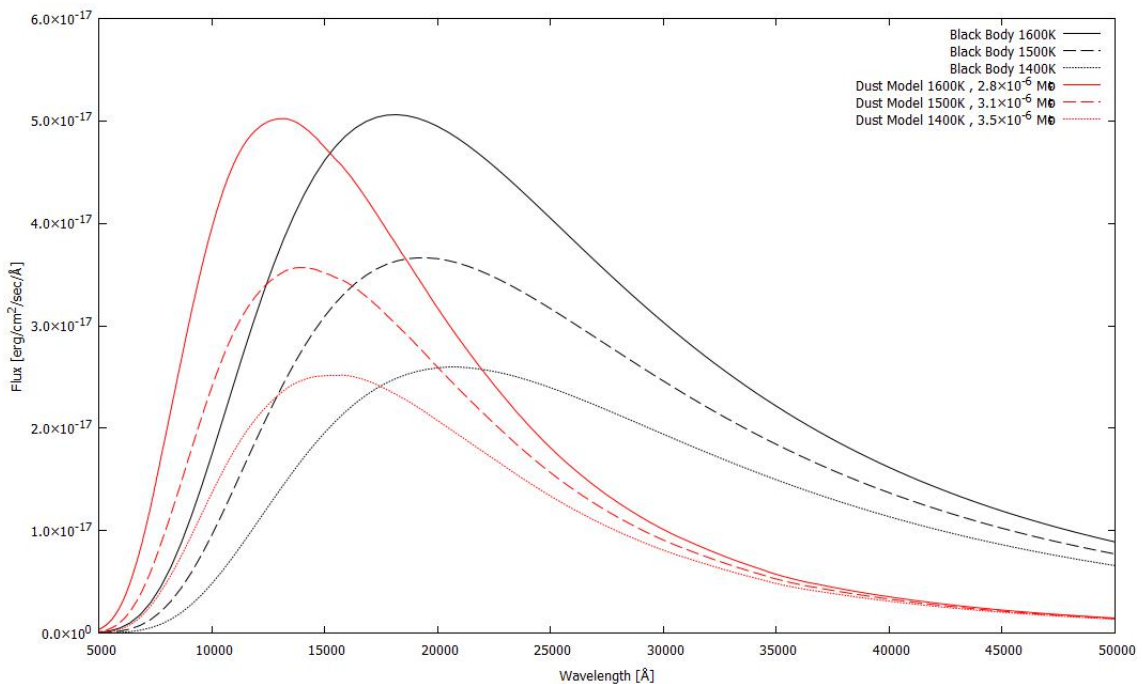


図 3.9: 黒体放射とダストモデルの曲線の形状の差  
(それぞれ  $1400 \text{ K}, 1500 \text{ K}, 1600 \text{ K}$ )



次に実際の分光観測スペクトルのダスト成分について、黒体放射とダストモデルではどちらのほうがよりふさわしいかを見ていく。ここでは例として 2007/01/24 の分光スペクトルについてフィットしていく。

まず可視光域 7000~10000 Å の波長域を黒体放射とダストモデルでそれぞれフィットした(図 3.10)。

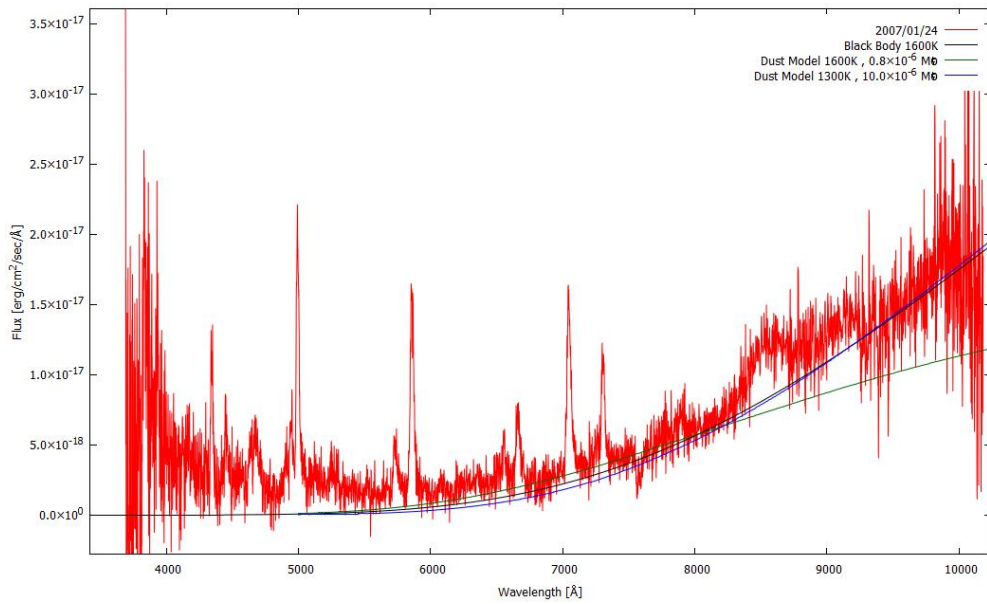


図 3.10: 2007/01/24 のスペクトルに対する黒体放射とダストモデルによるフィッティング

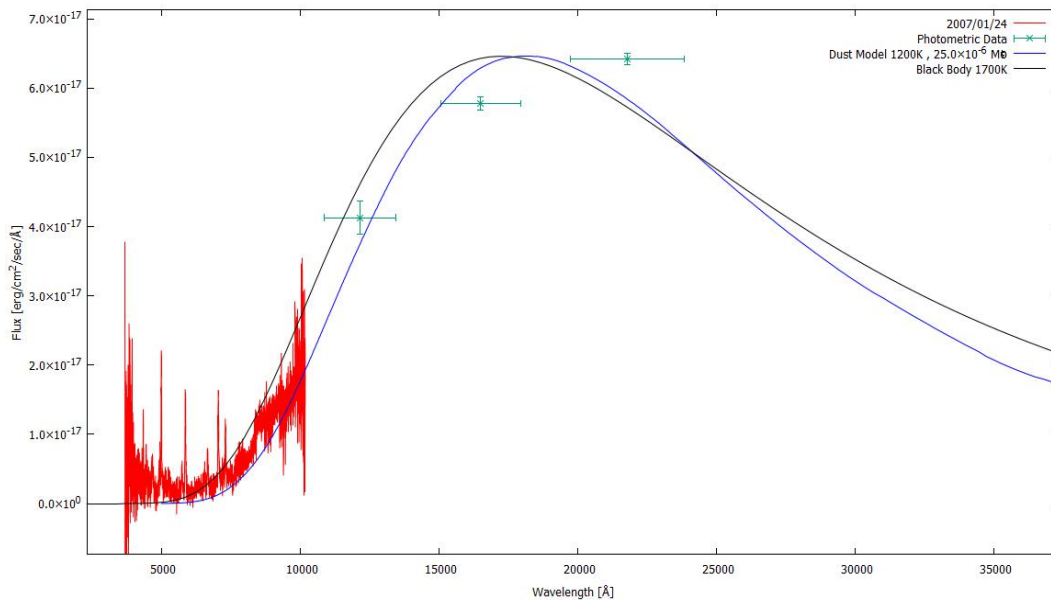


図 3.11: 2007/01/24 のスペクトルと内挿により得た J,H,K バンドの点に対する黒体放射とダストモデルによるフィッティング

これを見ると黒体については **1600K** の黒体で説明できそうだが、ダストモデルでは **1300K** でフィットでき、その差は **300K** もある。

どちらのほうがふさわしいフィッティングかより正しく判断するために、**J,H,K** バンドの **2007/01/24.4** のデータに注目してフィッティングを行う(図 3.11)。

図 3.11 より黒体では約 **1700K** で近赤外領域の **3** 点のエラーバーの領域付近に曲線が引ける。しかしダストモデルでは約 **1200K** でフィットでき、また **7000~10000 Å** の可視域に注目しなおしてみると、黒体よりもよくフィットできていることがわかる。

以降はダストモデルを用い分光スペクトルをフィッティングし解析していくことにする。

### 3.4.2 ダストモデルにおける粒子のサイズ

ダストモデルの重要なパラメータの一つにダスト粒子のサイズがある。粒子のサイズが違えば1つの粒子が放射する熱量や波長特性も変わり、ダスト全体として放射する熱量やそのスペクトルも変わってくるからである。

今回は粒子の半径を  $1.0\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.01\mu\text{m}$  の三種類でどれがフィッティングに最適かを見ていく。

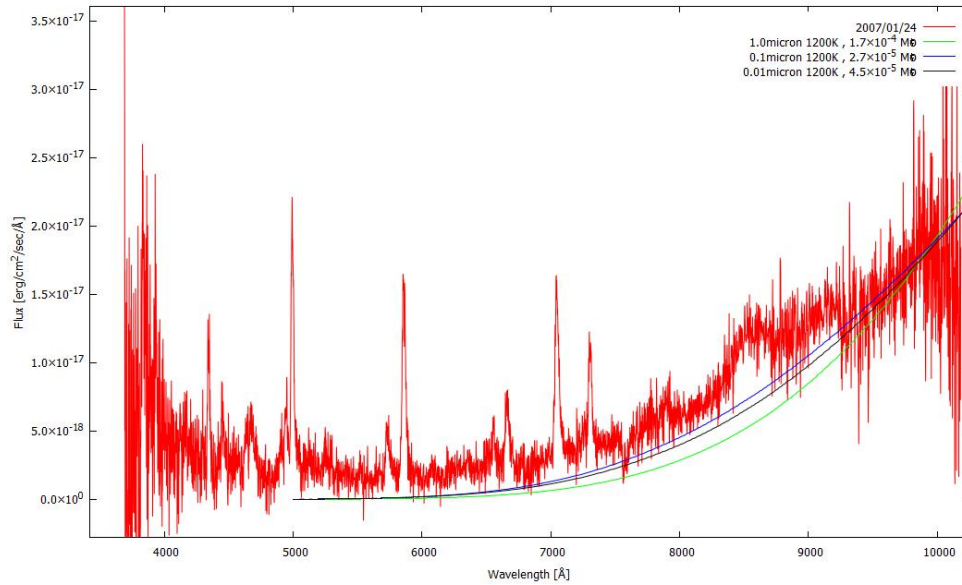


図 3.12: 2007/01/24 のスペクトルに対するダスト粒子サイズ別の 1200K のダストモデルによるフィッティング

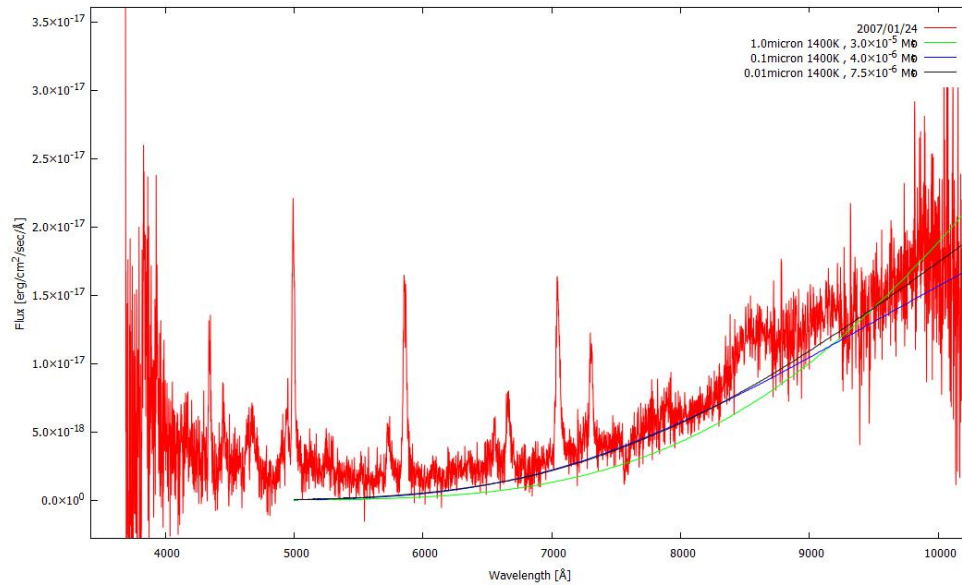


図 3.13: 2007/01/24 のスペクトルに対するダスト粒子サイズ別の 1400K のダストモデルによるフィッティング

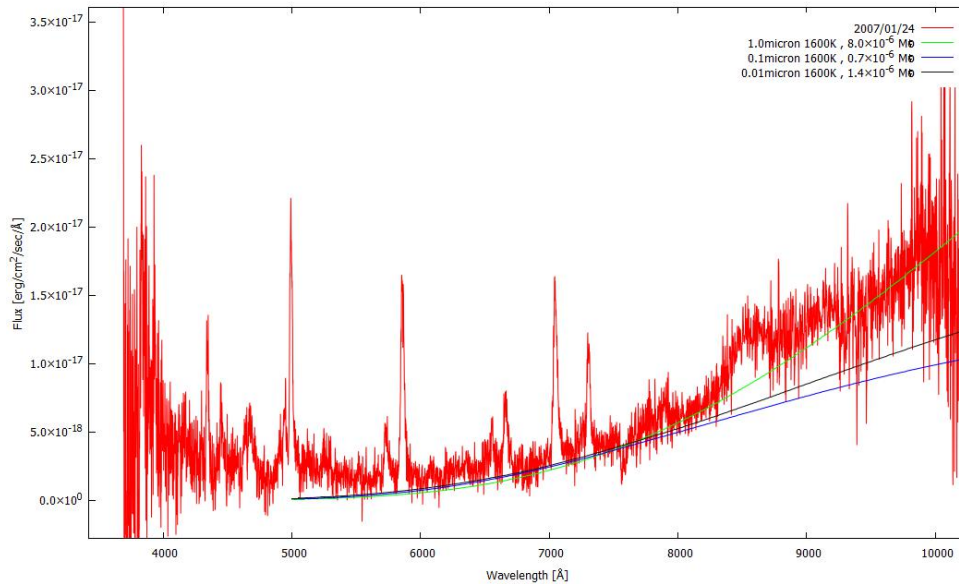


図 3.14: 2007/01/24 のスペクトルに対するダスト粒子サイズ別の 1600K のダストモデルによるフィッティング

図 3.12～図 3.14 は 2007/01/24 の分光スペクトルを 1200、1400、1600K でそれぞれ三種類のダストサイズにおけるダストモデルでフィットしたものである。これらから各温度でよくフィットできているダストモデルのダストサイズはそれぞれ異なっていることがわかる。例えば 1600K のグラフではダストサイズ 1.0 $\mu\text{m}$  のダストモデルが他二つに比べよくフィットできている。しかし 1200K のグラフについてみると 0.01 $\mu\text{m}$  のダストモデルでのフィットが最適に見える。

ダストの粒子は実際はもちろん一様に同サイズのものが分布しているわけではなく、さまざまなサイズの粒子が集まってダストを形成していると考えられる。そのさまざまなサイズの粒子の熱放射が複合的に観測されていると考えるのが自然である。今回のダストサイズの検証ではその複合的な成分を見積もることが難しく、最適なダストサイズを導き出すのは難しいという結論に至った。よって本研究では典型的な星間ダスト粒子のサイズであるといわれている半径 0.1 $\mu\text{m}$  のダストモデルを軸に扱っていくこととする。

### 3.4.3 ダストモデルの温度依存性

ダスト粒子サイズ(半径)を  $0.1\mu\text{m}$  に決定した。ここではダストの総質量を一定とした場合、温度のパラメータの変化についてどのようにダスト放射スペクトルが変化するかを簡単に見ていく。

図 3.15 は  $1200\text{K}\sim 1500\text{K}$  まで  $100\text{K}$  おきのダストモデルをプロットしたものである。ダスト質量は  $2.5\times 10^{-5} M_{\odot}$  に固定してある。スケールの比較対象として 2006/12/25 の観測スペクトルを同時にプロットしている。

もちろんのことだが温度が高くなれば高くなるほど光度が大きくなる。ピーク的位置は温度が高いほど短波長側に寄っており、ピークまでの勾配も急になっている。可視域のダストのスペクトルはこのピークまでの勾配の部分にあたり、この勾配をダスト成分に合わせていく形でフィットしていくことになる。

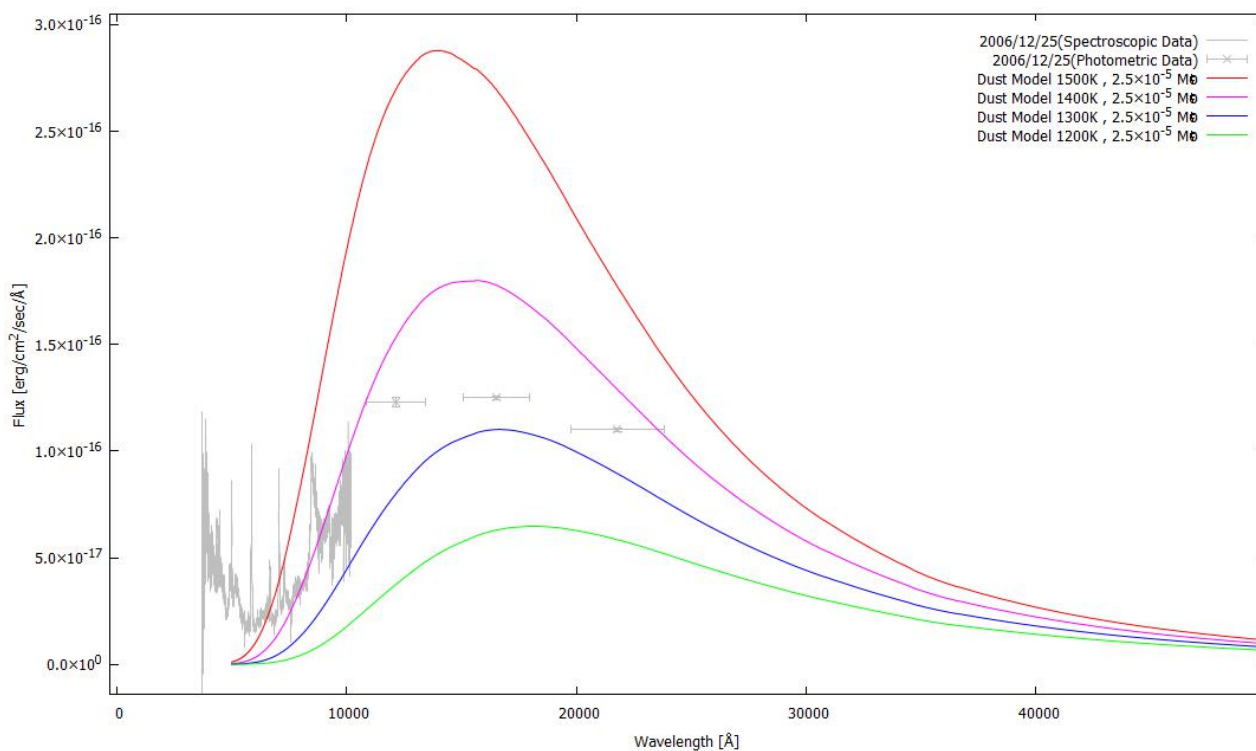


図 3.15: 質量一定下の温度変化に伴うダストモデルの曲線

### 3.4.4 He I 輝線の形状の時間変化

先行研究で SN 2006jc のスペクトルにおける He I 輝線は長波長成分が欠けた形を示していることが報告されている[8]。これは手前に生成されたダストによって光が遮られたためだと考えられる。本研究における SN 2006jc のスペクトルでも同様に He I 輝線が見られた。我々は先行研究よりもより遅い時期までの観測を行っていることから、ダスト放射成分の衰退期までの状況を調べることができる。ここでは、この He I 輝線の形状が時間経過によって変化していく様子を見ていく。

今回見ていく He I 輝線は 5876、6678、7065 Å の 3 つであり、それぞれについて輝線の時間変化を見ていく。まず爆発から間もないと考えられる 2006/10/15 のスペクトルだけを見ると、先に述べたような長波長側が欠けている様子は見られない(図 3.16)。ここから、これ以降の日付の He I 輝線スペクトルをスケールリングして同時に見ていきかけたのだが、2006/10/15 のスペクトルは He I 輝線以外の成分も卓越しており、輝線の形状を比較できなかつた。よって 2006/11/27 以降の輝線の形状を比較していく。

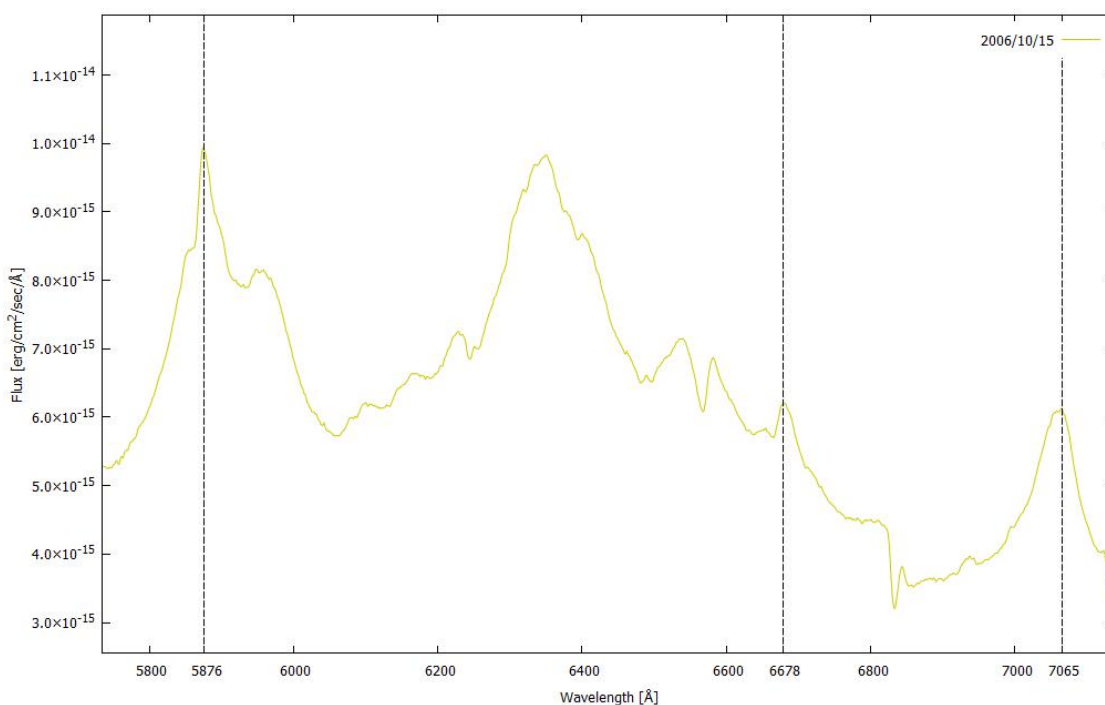


図 3.16: 2006/10/15 のスペクトルにみられる He I 輝線(5876 Å、6678 Å、7065 Å)

まず、2006/11/27(49 日後)、2006/12/25(77 日後)、2007/1/24(107 日後)、2007/2/12(126 日後)の4日間のスペクトルにおける He<sub>I</sub> 輝線の時間変化を見る。先に述べたようにスペクトルをスケールリングし He<sub>I</sub> 輝線の形状を見ていくと、時間が経つにつれ He<sub>I</sub> 輝線の中心波長より長波長側が欠けていく様子が見て取れた(図 3.17~図 3.19)。これにより先行研究と同様に、観測者側に近づく側に生成されたダストが遠ざかる側に生成されたダストの光を遮っていると考えられることから、輝線を放射する放出物質中でダストが生成されたことをサポートすることができる。

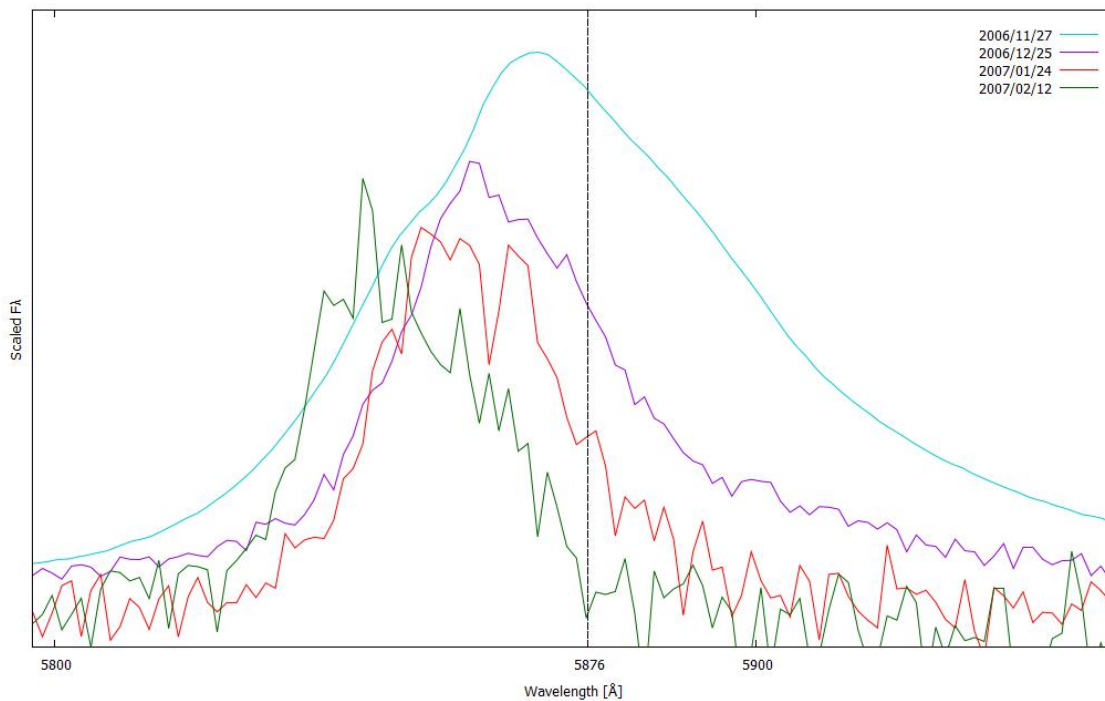


図 3.17: 5876 Å の He<sub>I</sub> 輝線の長波長側の欠落  
(2006/11/27、2006/12/25、2007/1/24、2007/2/12)



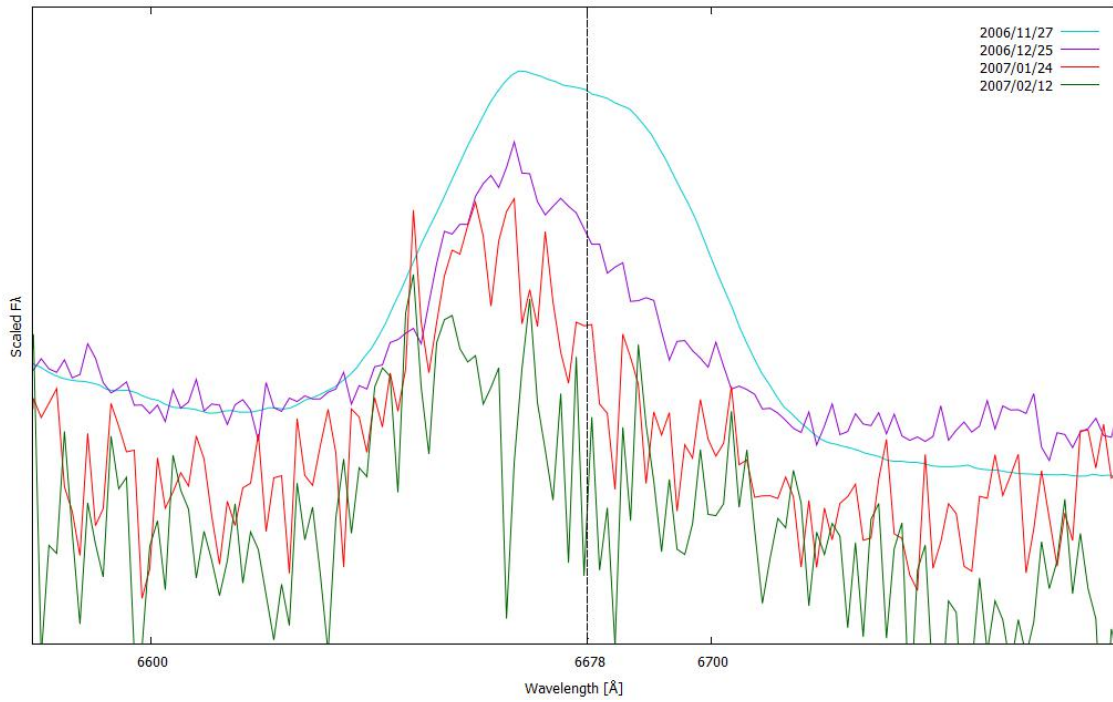


図 3.18: 6678 Å の He I 輝線の長波長側の欠落  
(2006/11/27、2006/12/25、2007/1/24、2007/2/12)

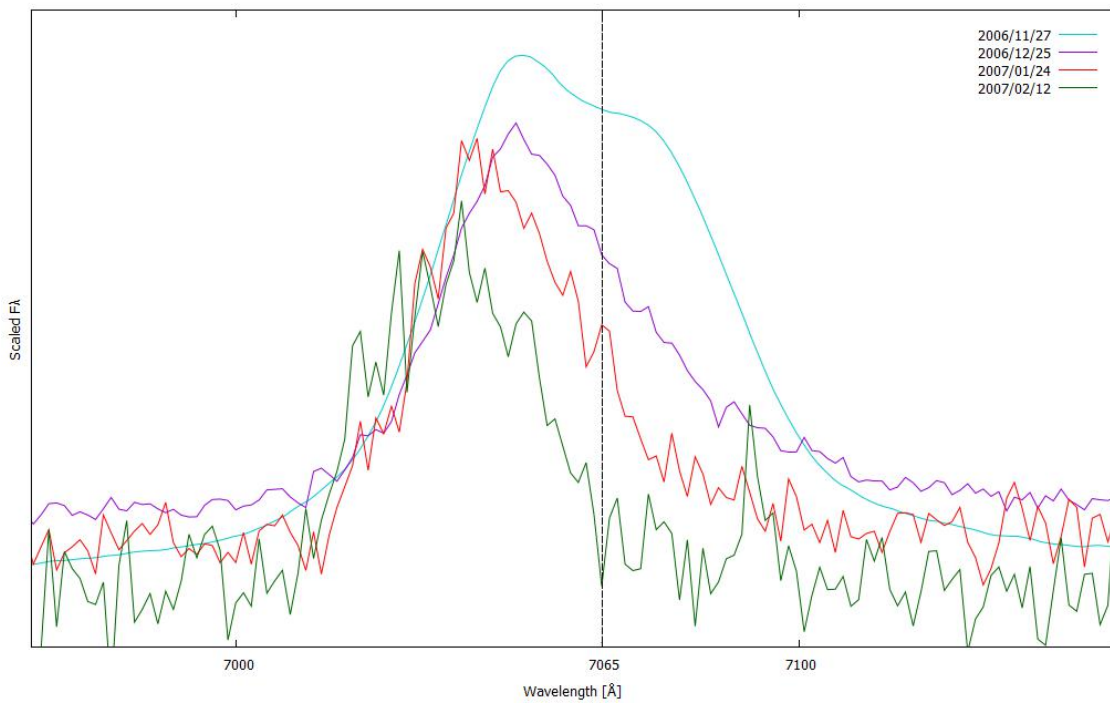


図 3.19: 7065 Å の He I 輝線の長波長側の欠落  
(2006/11/27、2006/12/25、2007/1/24、2007/2/12)



さらに、本研究では SN 2006jc 発見後約 182 日にあたる 2007/4/10 のスペクトルも用意していることから、さらに時間が経った時の輝線の形状を見ることができた。2007/2/12 と 2007/4/10 の He<sub>I</sub> 輝線を比較すると、6678 Å の輝線は既に見えなくなっていたが、そのほか 2 つの輝線については長波長側の欠落が回復している様子を見ることができた(図 3.20~図 3.22)。これは爆発から十分に時間が経過しダストが広がったことで、観測者から遠ざかる側のダストの光も見える様になったためだと考えられる。放出物質のふるまいについて、先行研究 [6] では後期の様子までとらえることができた

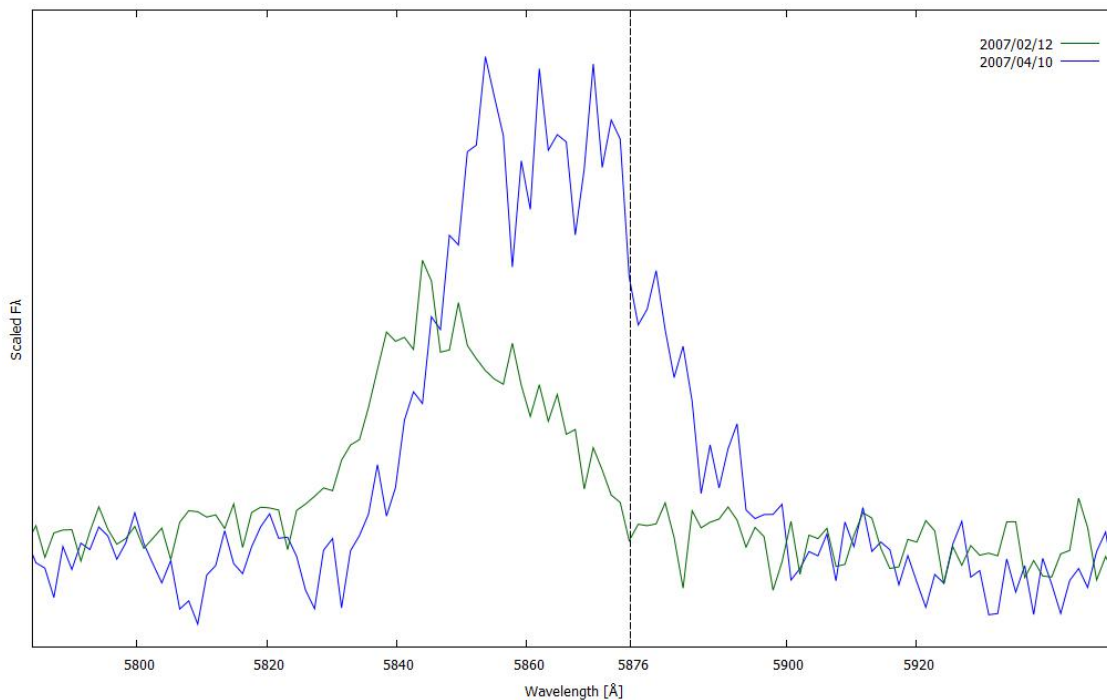


図 3.20: 2007/2/12、2007/4/10 の 5876 Å の He<sub>I</sub> 輝線

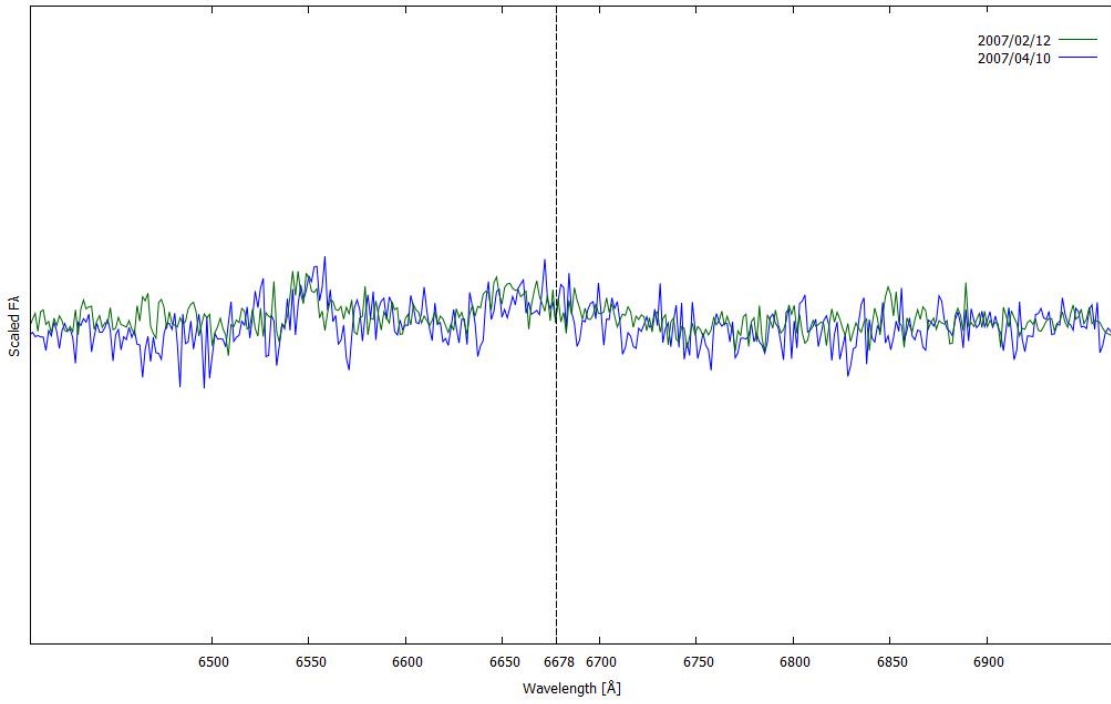


図 3.21: 2007/2/12、2007/4/10 の 6678 Å の He<sub>I</sub> 輝線  
(既に輝線は弱く目立たない)

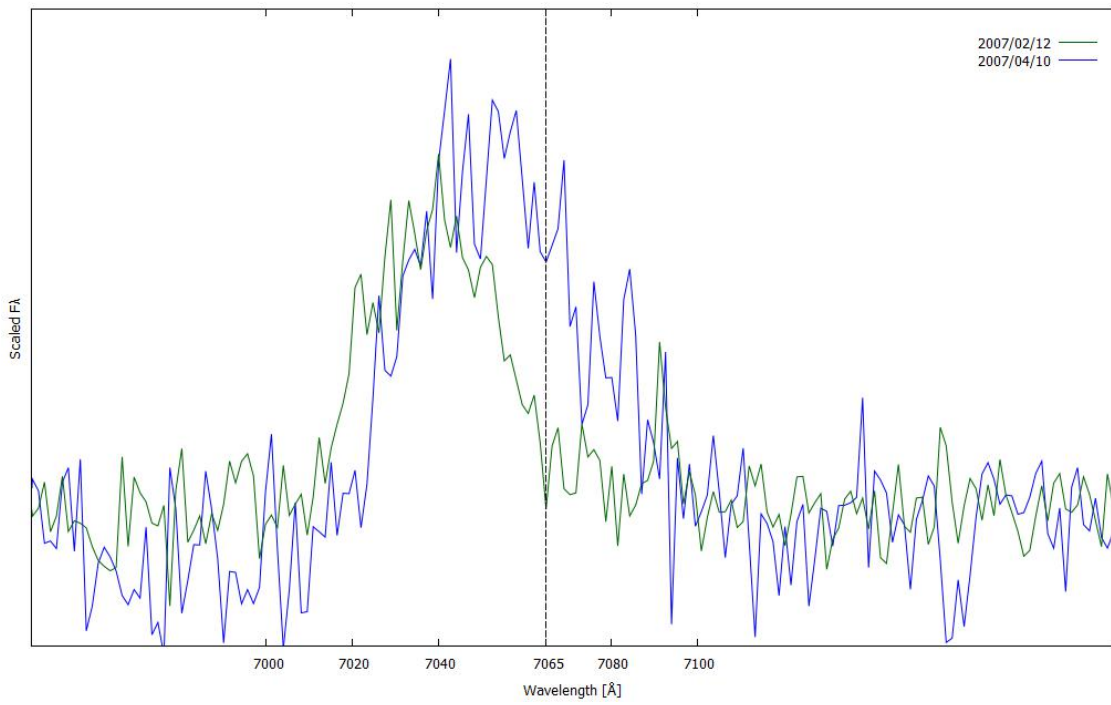


図 3.22: 2007/2/12、2007/4/10 の 7065 Å の He<sub>I</sub> 輝線

### 3.4.5 連続光スペクトルの超過成分へのダストモデルのフィッティング

我々が得たスペクトルの中で、2006/12/25,2007/1/24,2007/2/12 のスペクトルにおいて7000 Å 以降にダストの熱放射による有意な増光が見られる。この三日分についてそれぞれダストモデルでフィッティングしていく。ここで超新星の成分がダストスペクトルの領域にどれくらいかかっているか参考にするために、2006/11/27 のスペクトルをスケールして同時にプロットする。2006/11/27 の段階ではまだダストの熱放射による増光が見られず、7000 Å 付近での超新星本体の放射成分の寄与の参考になる。

2006/12/25,2007/1/24,2007/2/12 の分光スペクトルについてダストモデルでフィットしたグラフを以下に示す(図 3.23～図 3.25)。6000～8000 Å 付近の領域は超新星の成分の寄与が考えられるため、その領域まで完全に網羅したダストフィットは難しい。ただし、超新星成分の寄与は長波長側に近づけば近づくほど小さくなるため、8000 Å 付近以降のスペクトルのカーブに対して、より重点的にフィッティングを行った。

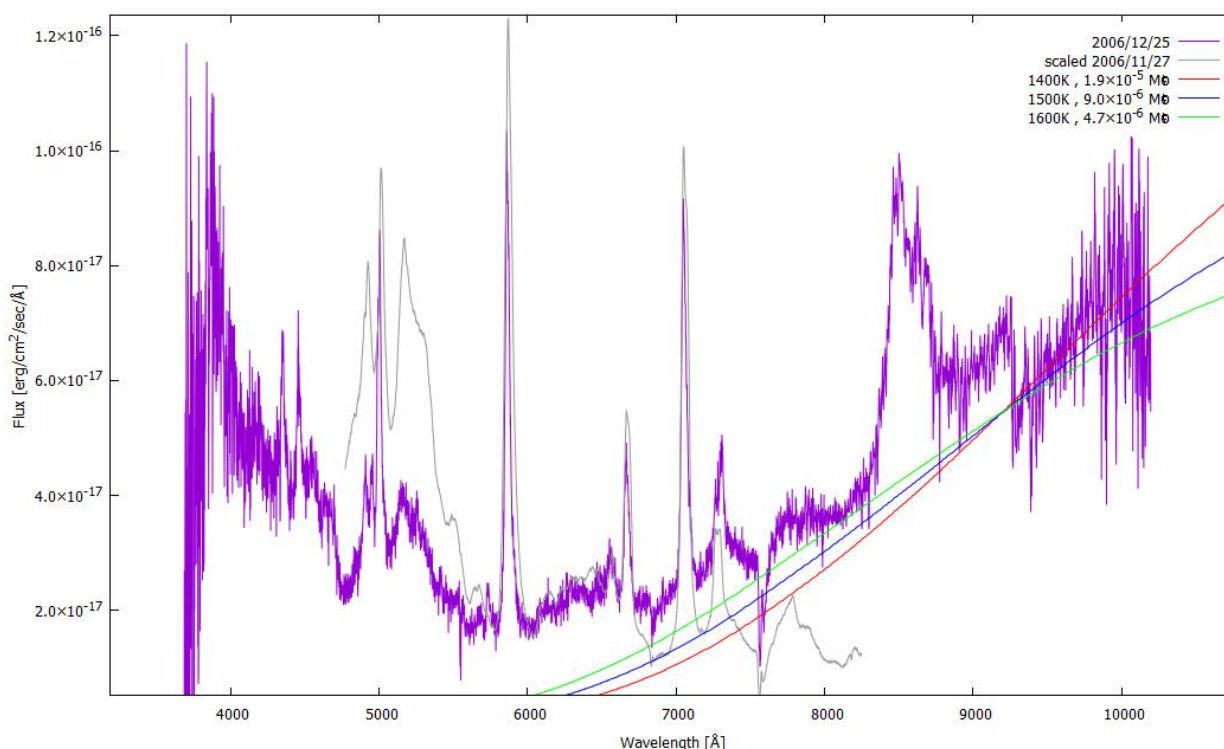


図 3.23: 2006/12/25(77 日後)のスペクトルに対するダストフィット

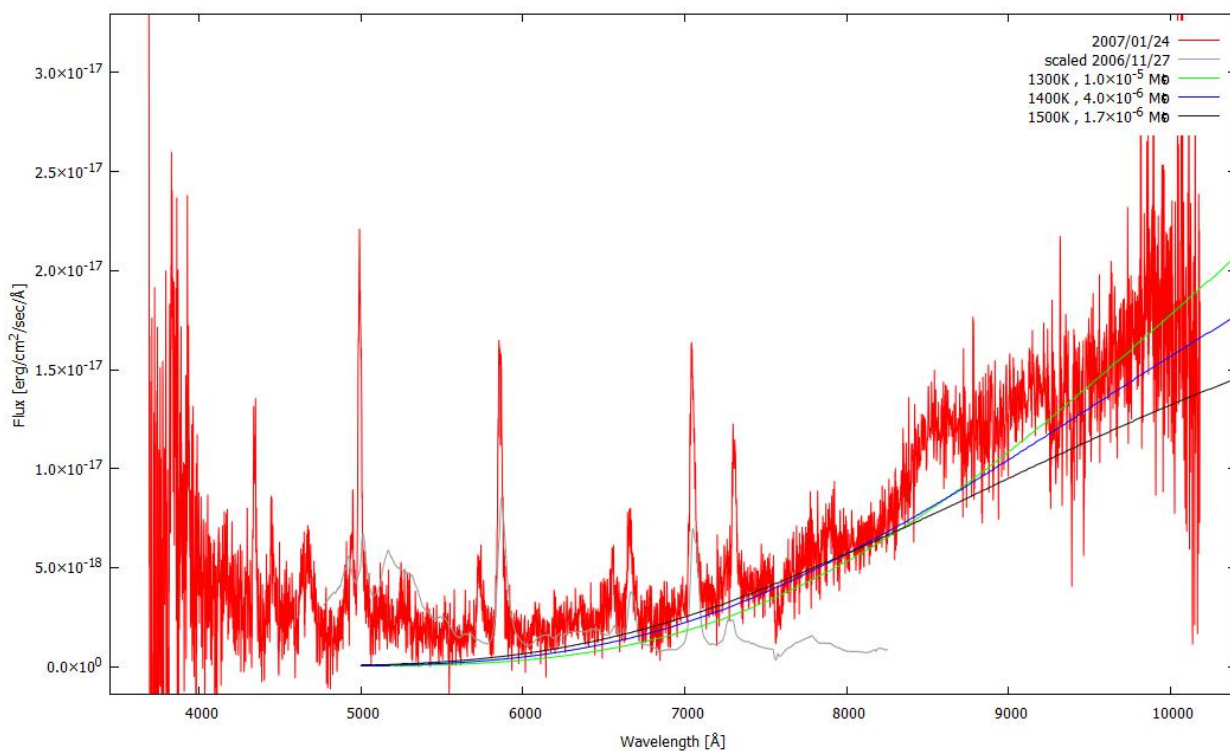


図 3.24: 2007/01/24(107 日後)のスペクトルに対するダストフィット

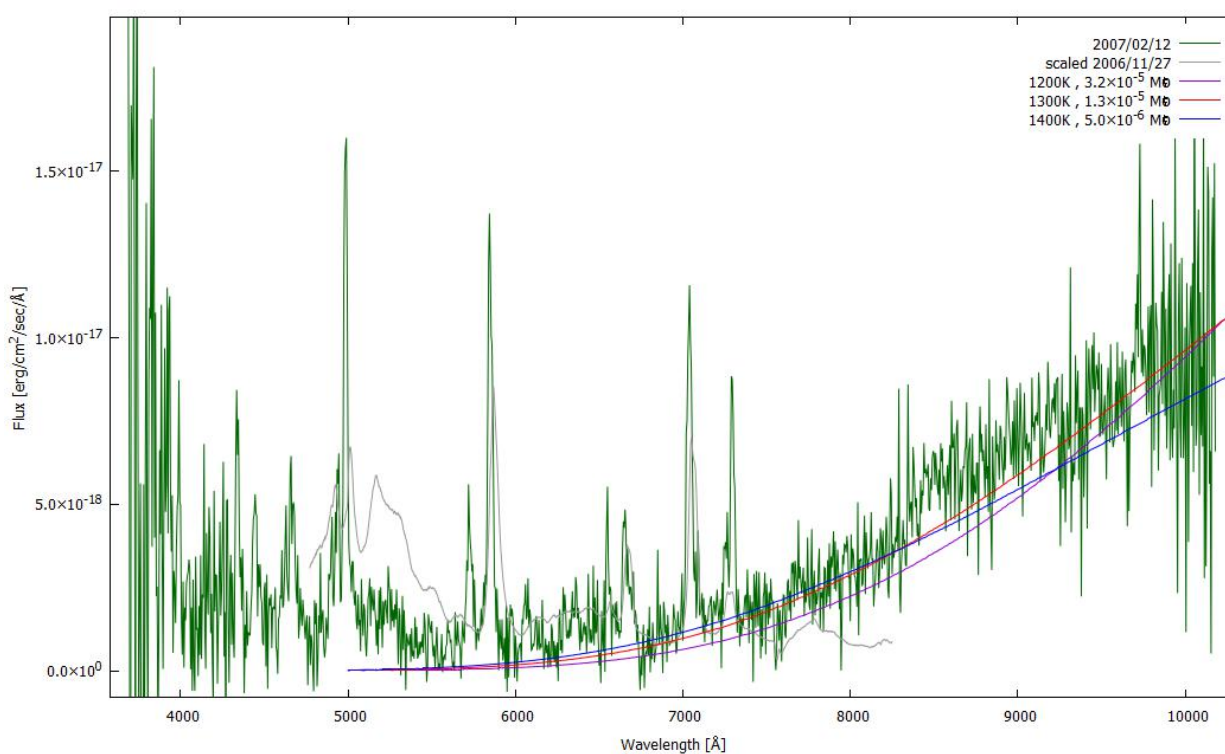


図 3.25: 2007/02/12(126 日後)のスペクトルに対するダストフィット

ダスト生成が行われた比較的初期の 2006/12/25(77 日後)のスペクトルは 1400~1600K のダストモデルでフィットできる(図 3.23)。超新星成分の寄与を推測して見ると、1600K のダストモデルは 7000~8000 Å でダストの純粋な成分を上回ってしまう可能性もある。その可能性を考慮すると、より低温の 1500K、1400K のダストモデルの方がより正確なフィッティングと言えるかもしれない。

2007/1/24(107 日後),2007/2/12(126 日後)と日が進むたびに、2006/12/25 より低い温度のダストモデルでフィッティングできた(図 3.24,図 3.25)。これはダストが生成されてからしばらくしてダスト温度が少しずつ下がっていることで説明される結果である。

さらに近赤外域(J,H,K バンド)のフラックスも同時にプロットしたものを図 3.26~図 3.28 にしめす。

近赤外域の三点に注目してみると、2006/12/25(77 日後)では 1400K、2007/1/24(107 日後)では 1200K、2007/02/12(126 日後)では 1100K のダストモデルが近赤外の三点付近を通っている。つまり、可視光スペクトルの盛り上がりだけから推定したダスト温度のフラックスだけでは近赤外のこの波長特性は説明し辛い。いこの近赤外の領域では低温のダスト成分が見えているのではないかと考えることができる。これらの温度で推移したとして質量に注目すると、 $1.9 \times 10^{-5} M_{\odot}$ 、 $6.0 \times 10^{-5} M_{\odot}$ 、 $7.5 \times 10^{-5} M_{\odot}$  と増加している。特に 2006/12/25 から 2007/1/24 の 1 か月間の質量増加量は、その後の増加量に比べて 2~3 倍多いことがうかがえる。これは時間が経てば経つほどダストが生成されなくなっていくことを示唆している。

ただし、データ密度に限りがあることから、この領域の波長特性の形状をこれ以上詳しく調べることは困難である。ここでは、ダストモデルがサイズだけでなく温度も単一ではない、ある幅をもって分布することが示唆される。

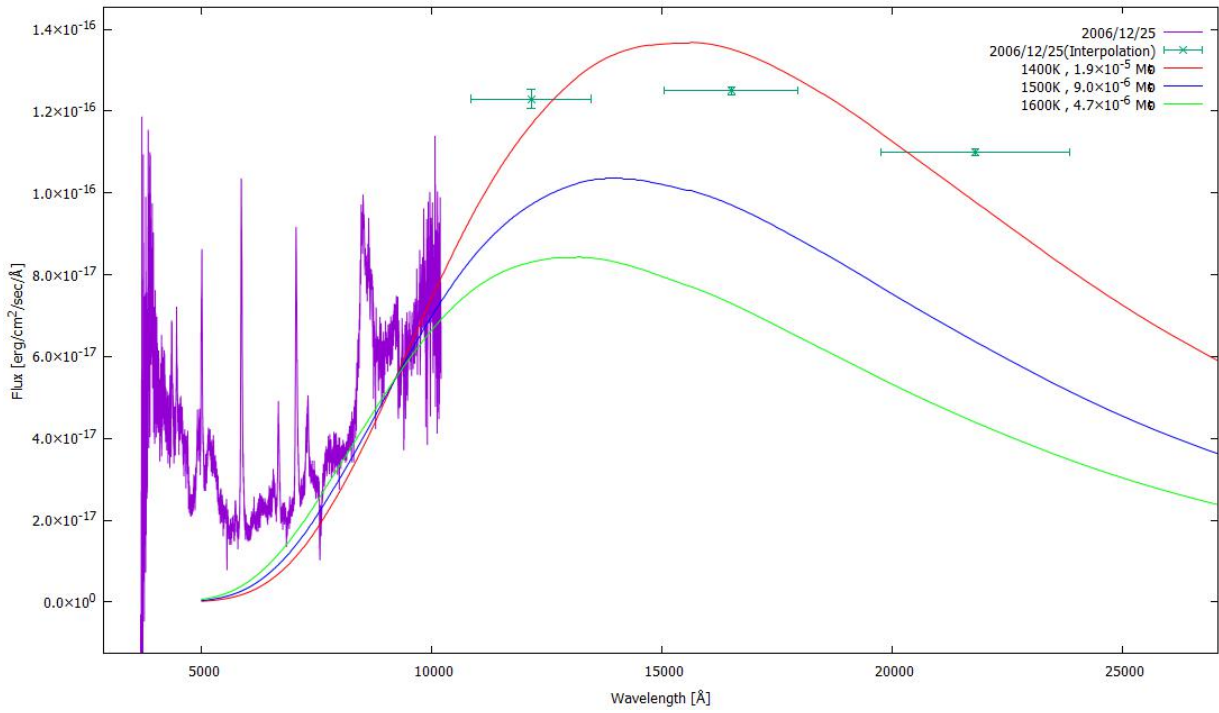


図 3.26: J,H,K バンドの値を加味した 2006/12/25 のスペクトルに対するダストフィット

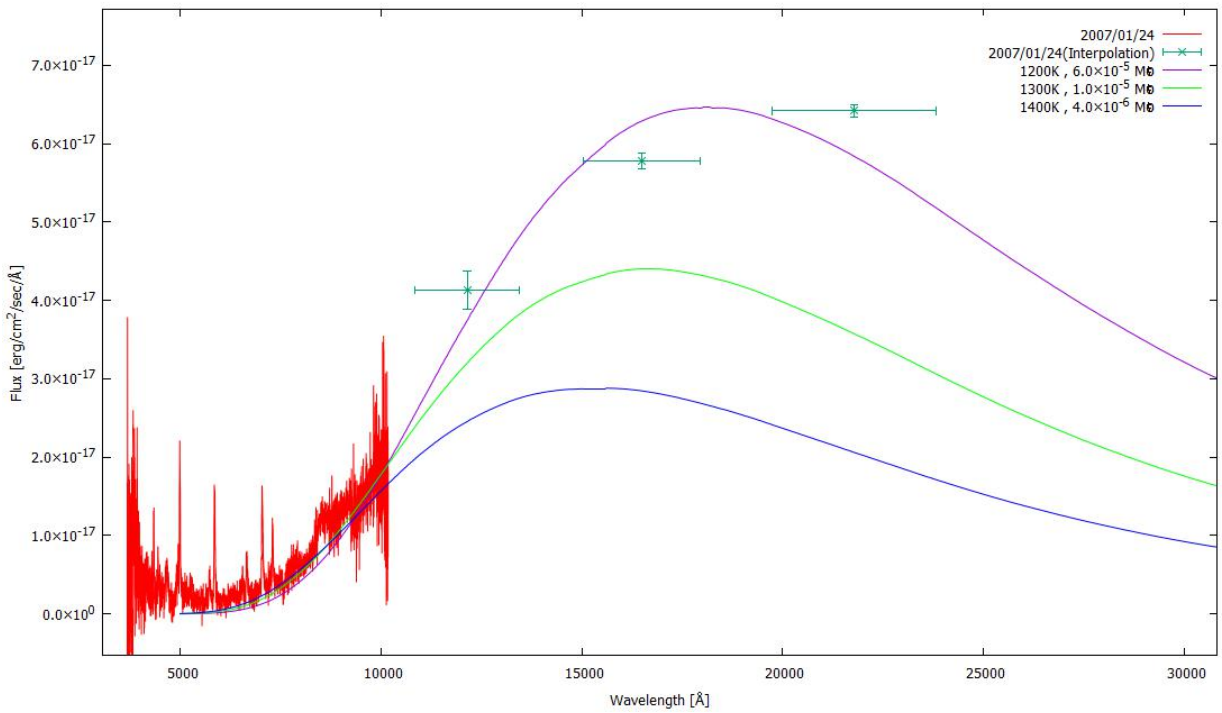


図 3.27: J,H,K バンドの値を加味した 2007/01/24 のスペクトルに対するダストフィット

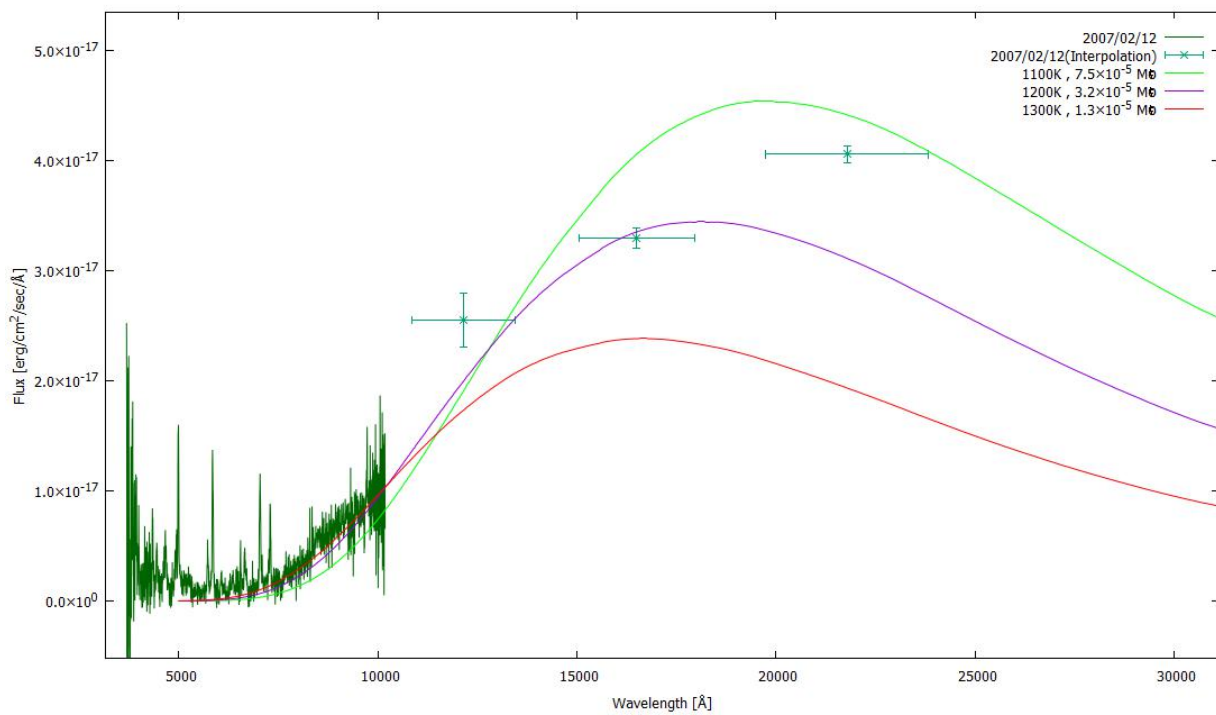


図 3.28: J,H,K バンドの値を加味した 2007/02/12 のスペクトルに対するダストフィット

## 第四章 まとめ

本研究では、早期にダストを生成した SN 2006jc についての観測データの解析を行った。

Ibn 型超新星 SN 2006jc は数ある超新星の中でも特異な存在であり、爆発後約 60 日という早期にダストを生成したと考えられている。この早期ダスト生成には超新星爆発の約二年前に起こした小規模の爆発に伴う星周物質が起因していると考えられる。

分光観測による可視後期スペクトルの時間経過を見ていくと、SN 2006jc 発見から約 77 日後の 2006/12/25 に観測した可視スペクトルにおいてダストの熱放射と思われる近赤外域の増光を確認した。その後 126 日後までの可視スペクトルにおいてはダスト成分が卓越していたものの、183 日後のスペクトルにおいてはダストの熱放射における成分は減衰していた。

また、He I のスペクトル線(5876、6678、7065 Å)に注目すると、時間とともに長波長側が欠ていく様子が見られ、これは観測者側から遠ざかる側にあるダスト成分が近づいてくる側のダストによって遮られたためであることを示唆し、放出物質中でダストが生成されたことを裏付ける材料を得ることができた。さらに時間が経過すると He I のスペクトル線の赤側の欠落が回復している様子も確認でき、ダストが十分に広がったことにより光学的に薄まり、遠ざかる側のダスト成分も見られるようになったことを示した。

SN 2006jc の長波長側のスペクトルの超過成分は炭素質のダストモデルで再現でき、ダスト質量は爆発から約 70~100 日以内の最も多くダストを生成していることが分かった。その量は後の 1 か月の 2~3 倍であった。さらにダスト温度については 1500K 程のダストモデルで再現でき、通常ダストは 2000K 以下で生成されるため、近赤外域の増光は生成されたばかりの高温のダストの熱放射であることを再確認した。



## 謝辞

すばる望遠鏡での観測研究については、服部堯様、青木賢太郎様(国立天文台)、前田啓一様(京都大)、富永望様(甲南大)、田中雅臣様(国立天文台)、野本憲一様(東京大)の各氏にお世話になりました。

また、かなた望遠鏡 TRISPEC での観測については、新井彰様、植村誠様、大杉節様(広島大)、山下卓也様(国立天文台)、木野勝様(京都大)、北川雅裕様、佐藤修二様(名古屋大)の各氏にお世話になりました。

指導教官である川端先生に深くお礼申し上げます。卒業論文のテーマを決めるときにもともと超新星に対し強い興味はありましたが、川端先生に師事したいということもあって最終的にテーマを選んだ程、憧れの気持ちがありました。先生のご指導の下で勉強させていただく中で、時に浅学な自分を恥じながらも、科学への興味をそそられる先生のお話を聞くことができとても幸せでした。また研究室長である深沢先生にもこの研究室で勉強させて頂いたことに深く感謝しております。その他にも、さまざまな方々のフォローやバックアップに大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

## 参考論文・資料

- [1] 野本憲一「元素はいかにつくられたか 超新星爆発と宇宙の化学進化 岩波講座 物理の世界」、岩波書店、2007
- [2] 野本憲一・定金晃三・佐藤勝彦「恒星 シリーズ現代の天文学 第7巻」、日本評論社、2009
- [3] Filippenko et al. 「Optical Spectra of Supernovae」  
Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1997, Vol. 35:309-355
- [4] 上野一誠「爆発1年後にダスト生成を示したIIn型超新星SN 2010jlの観測的研究」、  
修士論文、広島大学、2004
- [5] NED(NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE) HP  
  
<https://ned.ipac.caltech.edu/>
- [6] Smith et al. 「DUST FORMATION AND He II  $\lambda$ 4686 EMISSION IN THE DENSE SHELL OF THE PECULIAR TYPE Ib SUPERNOVA 2006jc」  
The Astronomical Journal, 2008, Volume. 680, pp.568-579
- [7] Pastorello et al. 「A giant outburst two years before the core-collapse of a massive star」  
Nature, 2007, Volume. 447, pp.829-832
- [8] Foley Ryan J. , Smith Nathan , Ganeshalingam Mohan , Li Weidong , Chornock Ryan , Filippenko Alexei V. 「SN 2006jc: A Wolf-Rayet Star Exploding in a Dense He-rich Circumstellar Medium」  
The Astrophysical Journal, 2007, Volume. 657, Issue 2, pp.105-108.
- [9] 左近樹・具本哲 「「あかり」がとらえた超新星と超新星残骸」  
天文月報, 2009, 第102巻, 第11号, pp.666-672

- [10] Nozawa Takaya , Kozasa Takashi , Tominaga Nozomu , Sakon Itsuki , Tanaka Masaomi , Suzuki Tomoharu , Nomoto Ken'ichi , Maeda Keiichi , Umeda Hideyuki , Limongi Marco , Onaka Takashi 「Early Formation of Dust in the Ejecta of Type Ib SN 2006jc and Temperature and Mass of the Dust」  
The Astrophysical Journal, 2008, Volume. 684, pp.1343-1350
- [11] Tominaga N. , Limongi M. , Suzuki T. , Tanaka M. , Nomoto K. , Maeda K. , Chieffi A. , Tornambe A. , Minezaki T. , Yoshii Y. , and 14 coauthors 「The Peculiar Type Ib Supernova 2006jc: A WCO Wolf-Rayet Star Explosion」  
The Astrophysical Journal, 2008, Volume. 687, Numer 2, pp.1208-1219
- [12] Sakon I. , Onaka T. , Wada T. , Ohya Y. , Kaneda H. , Ishihara D. , Tanabé T. , Minezaki T. , Yoshii Y. , Tominaga N. , and 11 coauthors 「Properties of Newly Formed Dust by SN 2006JC Based on Near- to Mid-Infrared Observation With AKARI」  
The Astrophysical Journal, 2009, Volume. 692, Numer 1, pp.546-555
- [13] Univ. of California, at Berkeley 「Massive Star Burps, Then Explodes」 2007
- [14] [https://www.naoj.org/Introduction/j\\_telescope.html](https://www.naoj.org/Introduction/j_telescope.html)
- [15] [https://www.naoj.org/Introduction/instrument/j\\_FOCAS.html](https://www.naoj.org/Introduction/instrument/j_FOCAS.html)
- [16] <https://www.naoj.org/Observing/Instruments/FOCAS/index.html>
- [17] 川端哲也 「美星天文台 101cm 望遠鏡 IRAF による分光データ整約のすすめ」、第 1.0 版、2005  
  
<http://www.bao.city.ibara.okayama.jp/koubo/manual/irafspbao0505.pdf>
- [18] Di Carlo, E. et al. 「Near-Infrared Observations of the Type Ib Supernova SN 2006jc: Evidence of Interactions with Dust」  
The Astrophysical Journal, 2008, Volume. 684, Numer 1, pp.309-355
- [19] Mattila, S. et al. 2008 「Massive stars exploding in a He-rich circumstellar medium - III. SN 2006jc: infrared echoes from new and old dust in the progenitor CSM」  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,  
Volume. 389, Issue 1, 2008, pp. 141–155

[20] Kawabata, K. S.; Ikeda, Y.; Akitaya, H.; Isogai, M.; Matsuda, K.; Matsumura, M.; Nagae, O.; Seki, M. 「Spectropolarimetry of R Coronae Borealis in 1998-2003: Discovery of Transient Polarization at Maximum Brightness"」  
The Astronomical Journal, Volume 134, Issue 5, 2007, pp. 1877-1889

[21] Wickramasinghe, N. C. in 「Light scattering functions for small particles with applications in astronomy」 London: Hilger, 1973