

高輝度赤色新星 M31 LRN 2015 の爆発前天体の観測的研究

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

B120322 廣地 諄

主査 植村 誠 副査 平谷 篤也

2016年2月10日

概要

高輝度赤色新星とは、普通の新星とは違い、爆発した後も際立った赤色を示し、かつ通常の新星より光度が高いのが特徴である星のことである。しかしながら、観測例も少なく詳しく爆発のメカニズムがわかっていない。今回 2015 年 1 月に M31 LRN (高輝度赤色新星) が爆発した。突発現象のため、爆発後は先行研究がなされているが、爆発前のデータが非常に少ない。幸いなことに、本天体の爆発前の状態がすばる望遠鏡 HSC で偶然撮られていた。今回の目的はそのデータを解析し、爆発のメカニズムの手掛かりを得ることである。

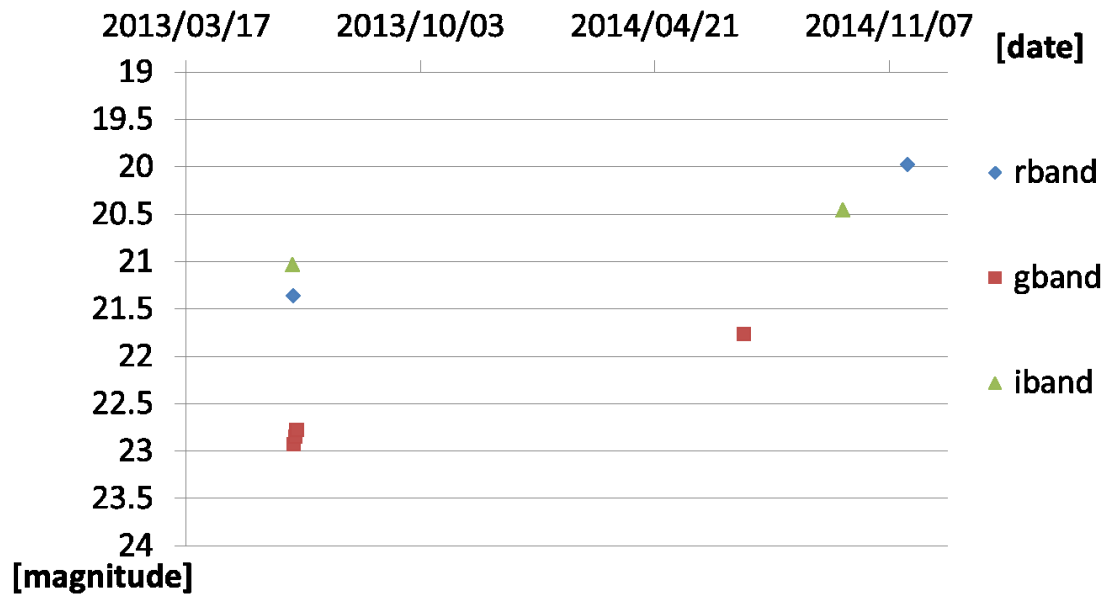


図 1: 爆発前の光度曲線

図 1 は測定した爆発前の光度曲線を示している。図 1 からわかるように、今回の研究によって爆発前、本天体は緩やかに増光していたことが明らかになった。

目次

第 1 章	研究の背景 ~ 高輝度赤色新星について ~	2
1.1	高輝度赤色新星の観測例	2
1.2	V1309 Sco の先行研究	6
1.3	本研究の対象天体 M31 LRN 2015	9
1.4	本研究の目的	12
第 2 章	データ解析	13
2.1	HSC とは	13
2.2	使用するデータについて	18
2.3	画像の一次処理	19
2.4	PSF 測光	20
2.4.1	アパーチャー測光と PSF 測光	20
2.4.2	PSF 測光の手順	22
第 3 章	結果	26
3.1	測光結果の安定性	26
3.2	PSF モデル関数による測光結果の差異	26
3.3	光度曲線	27
3.4	HR 図	29
第 4 章	考察	31
4.1	V1309 Sco 先行研究との比較	31
第 5 章	結論	32

第1章 研究の背景～高輝度赤色新星について～

ここでは、研究の背景である高輝度赤色新星について説明する。高輝度赤色新星は、普通の新星とは違い、爆発した後も際立った赤色を示し、かつ通常の新星より光度が高いのが特徴である。二つの恒星の衝突合体が一つのメカニズムとして考えられている。

1.1 高輝度赤色新星の観測例

高輝度赤色新星は2000年代前半から注目されるようになった新しい変光星の型である。よく観測された天体の数が少ないこともあり、その爆発機構はまだよく理解されていない。高輝度赤色新星について、その研究の歴史を以下にまとめる。

2002年1月、V838 Mon が他の変光星と比較して前例の無い爆発を起こした。その後、ハッブル宇宙望遠鏡により、数か月にわたり、綿密に研究された。図 1.1 に V838 Mon の光度曲線を示す。

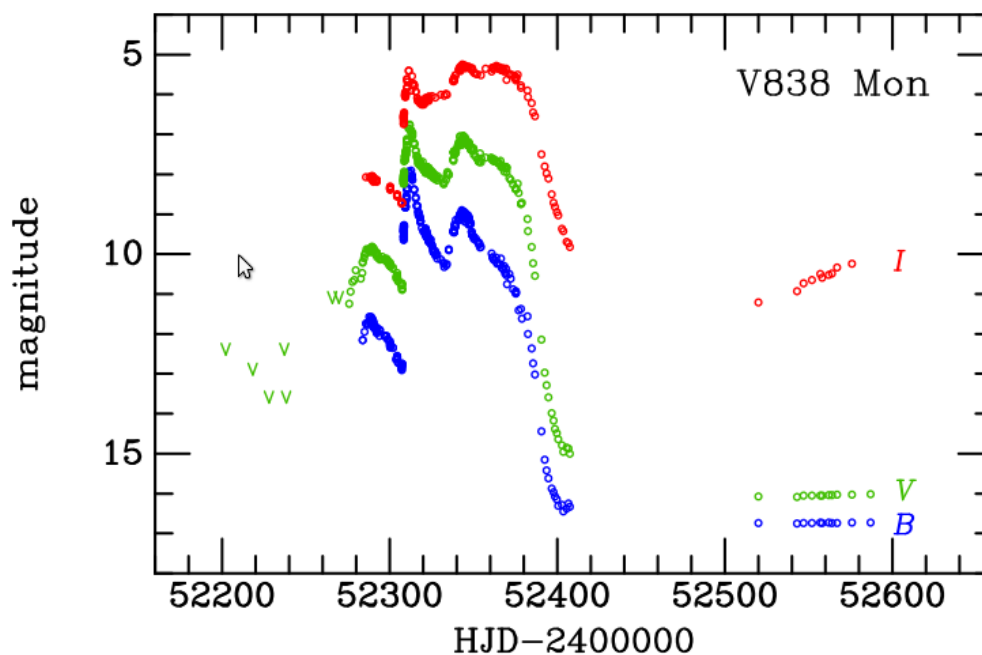


図 1.1: V838 の光度曲線 [1]

この図 1.1 からわかるように、1月に増光が発見されて以降は緩やかな減光が続いたが、2月に急激な増

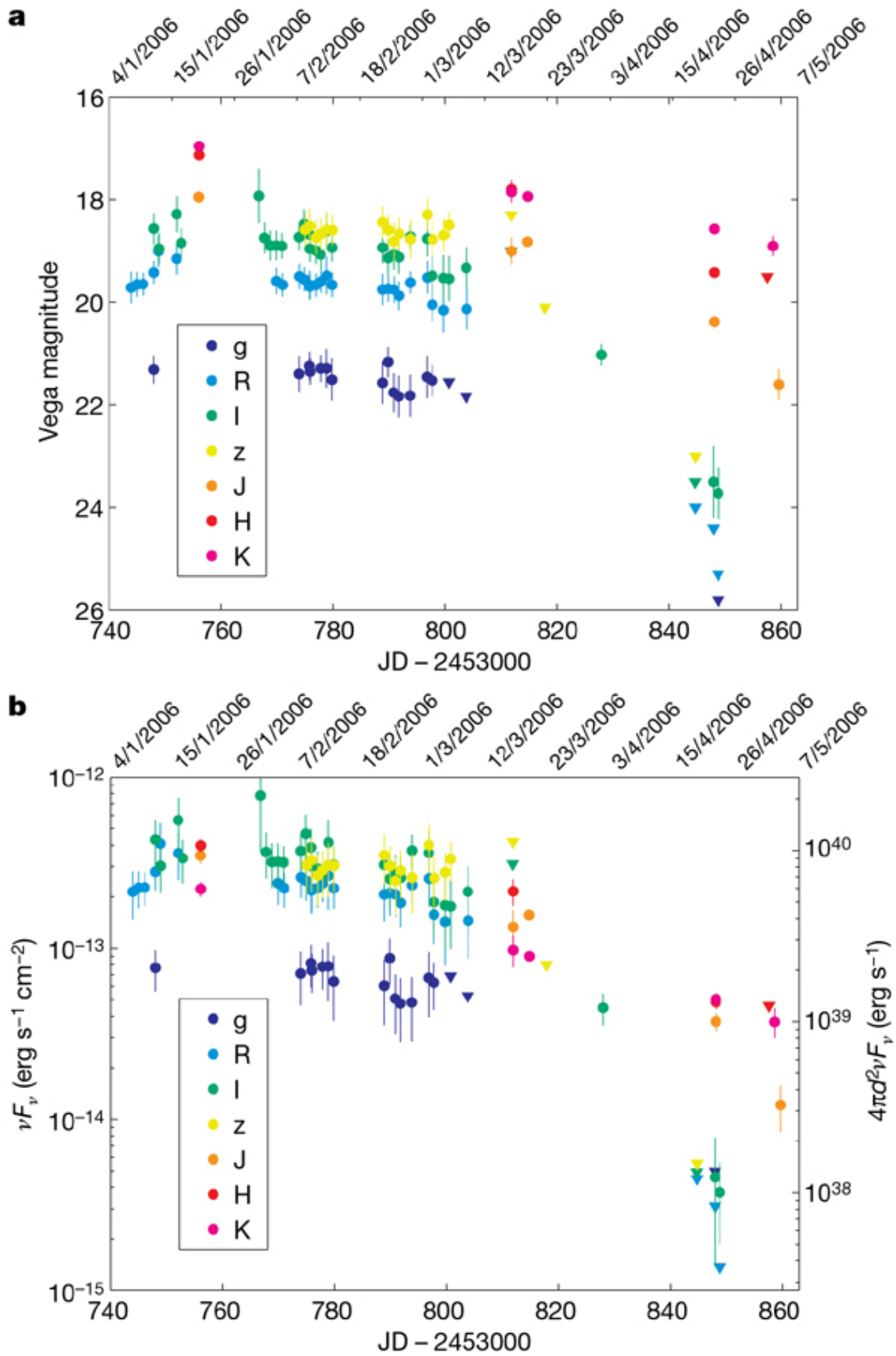
光が観測された。この極大以降、天体は急速に減光すると共に非常に赤くなり、3月には再度増光が起きた。また、4月には長波長側でのみ再び増光が見られた。V838 Mon は2002年1月6日にVバンドで極大6.75等に達した。これは絶対等級で約-9等に相当し、通常の新星（絶対等級1-7-9等）と比較しても明るい部類に属する。

また、V838 Mon を取り巻くライトエコー（急激に明るさを増す天体の光が、周囲にある星間ダストに反射することにより生じる現象）も注目された。図 1.2 で V838 Mon のイメージを載せた。V838 Mon の周りを覆うライトエコーが見える。



図 1.2: V838 Mon のイメージ [2]

以上が高輝度赤色新星が詳しく研究された経緯である。その後、V838 Mon に類似した M85 OT2006-1 が発見された。この天体はリック天文台の超新星探査で発見され、カリフォルニア大学バークレー校とカリフォルニア工科大学の天文学者によって研究された。カルクルニに率いられた研究チームは、この現象が、新星やヘリウムフラッシュ等の既知の爆発現象と異なることを確認し、高輝度赤色新星という新しい分類を提案した。以下で Kulkarni, et al. (2007) に沿って、M85 OT2006-1 の特徴を詳しく紹介する [3]。



4

図 1.3: M85 OT2006-1 の光度曲線 [3]

図 1.3 は光度曲線を示している。2006 年 1 月ごろに増光しはじめ、その後緩やかな減光が続き、3 月頃から再び増光していることがわかる。これは V838 Mon とよく似ている点である。

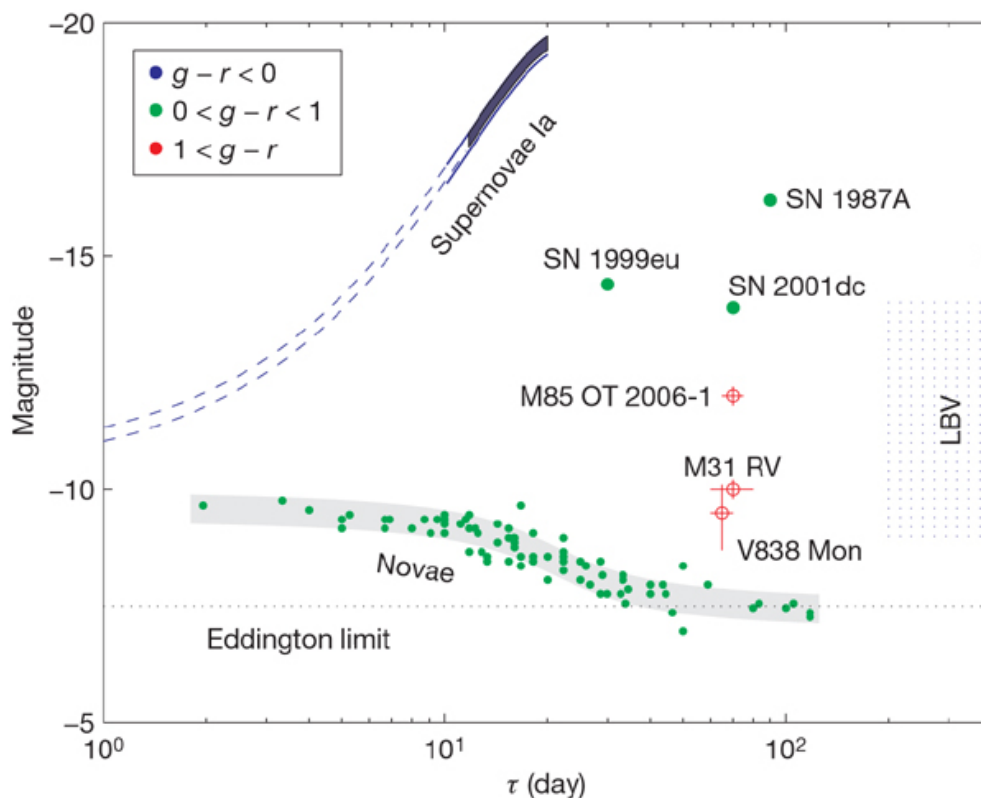


図 1.4: 新星、超新星、及び高輝度赤色新星の絶対等級と爆発のタイムスケール [3]

図 1.4 は新星、超新星、及び高輝度赤色新星の絶対等級と爆発のタイムスケールを示したものである。縦軸は R バンドの極大時の絶対等級、横軸は爆発のタイムスケールを示す。また、天体の色ごとに青 ($g-r \leq 0$)、緑 ($0 \leq g-r \leq 1$)、赤 ($g-r \geq 1$) の異なる色でプロットされている。超新星は青、新星は緑に対応する。以上のことから、これらの天体が高輝度赤色新星 (Luminous Red Nova) と呼ばれるようになった。しかし、ほかの変光星とは違う爆発のメカニズムは今も詳しくわかっておらず、過去のこの変光星と似ている星の研究が改めて見直されるようになった。表 1.1 に高輝度赤色新星の観測例を示す。

天体	文献
M31 RV	Mould(1990)[4]
M85 OT2006	Kulkarni(2007)[5]
NGC300 OT2008	Berger(2009)[6]
V838 Mon	Soker& Kashi(2011)[7], Tytenda&Soker(2006)[8], Munari(2002&2005)[9][10]
V4332 Sgr	Martini(1999)[11], Goranskij(2015)[12]
V1309 Sco	Tylen(2011)[13]

表 1.1: 高輝度赤色新星の観測例

表 1.1 にある 6 天体がこれまで高輝度赤色新星として分類されている。この内、M31 RV と V4332 Sgr は V838 Mon の発見以降に類似天体として分類が見直された天体であり、そのためデータは多くない。挙動が詳しく観測されている天体は従って 4 天体しかなく、爆発機構はもちろん、その観測的特徴もまだ確立はしていないのが現状である。

次の章では、この中でも恒星の合体説を示唆する爆発前の詳細な挙動が唯一観測された V1309 Sco について説明する。

1.2 V1309 Sco の先行研究

ここでは、高輝度赤色新星 V1309 Sco の先行研究について説明する。まずこの天体は 2008 年 1 月に爆発した。突発現象のため通常は爆発前のデータを取ることが難しい。しかしながら、変動天体サーベイプロジェクト「OGLE」の視野内に偶然含まれていたため、爆発前も観測することができていた。図 1.5 は爆発時、およびその直前数年間の V1309 Sco の光度曲線である。OGLE の観測によって爆発前の詳細なデータがとられていることがわかる。爆発前には周期約 1.4 日の周期的な変動が検出された。図 1.6 はその変動を周期で折り返した光度曲線を示している (上:2002~2006 年、下:2007 年)。2002~2006 年の期間は 1 周期に 2 つの極大を持つ光度曲線が観測された。早期には 2 つの極大が同じ等級だったが、時間と共に片方の極大が明るくなり、非対称な光度曲線の形状となった。2007 年になるとほぼ 1 つの極大のみをもつ光度曲線に変化していることがわかる。図 1.7 は周期変動の周期を表している。2002 年では周期が 1.44 日であったものが、徐々に下がり 2007 年頃には 1.42 日に下がっているのがわかる。

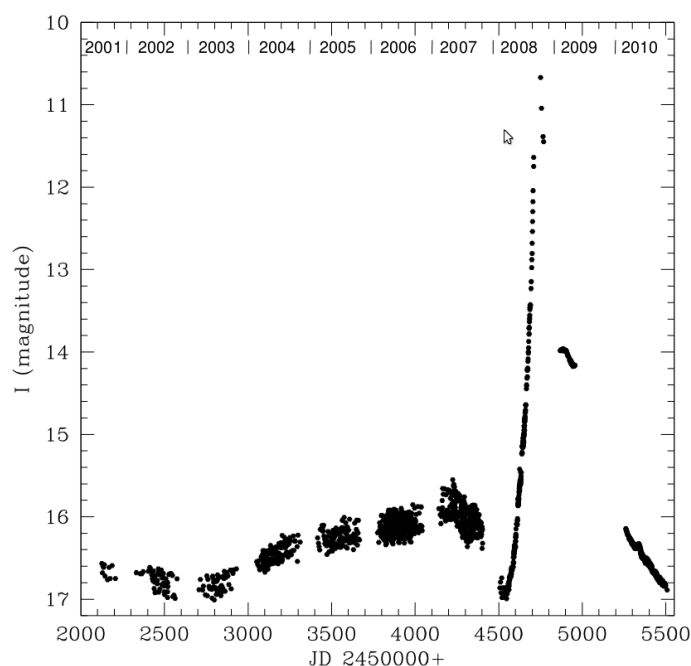


図 1.5: V1309 Sco の光度曲線 [13]

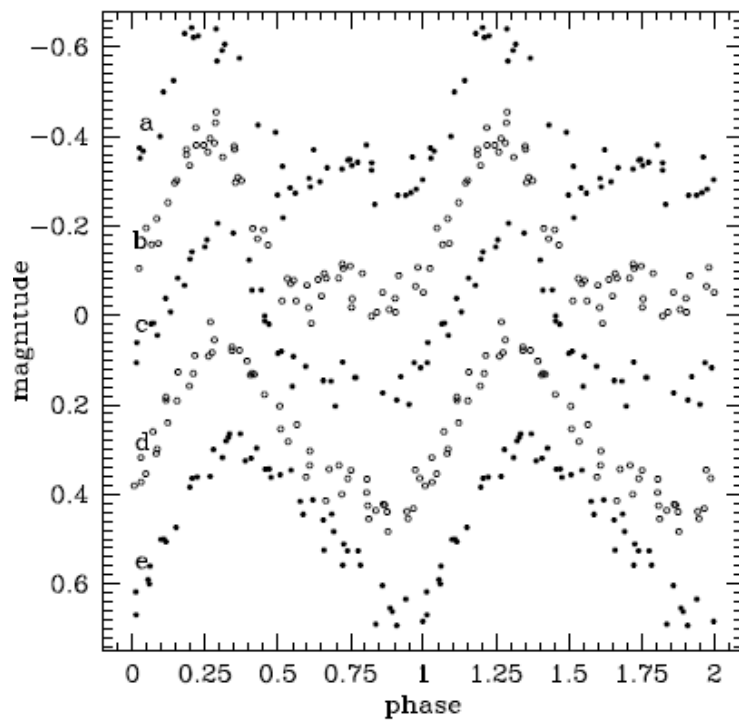
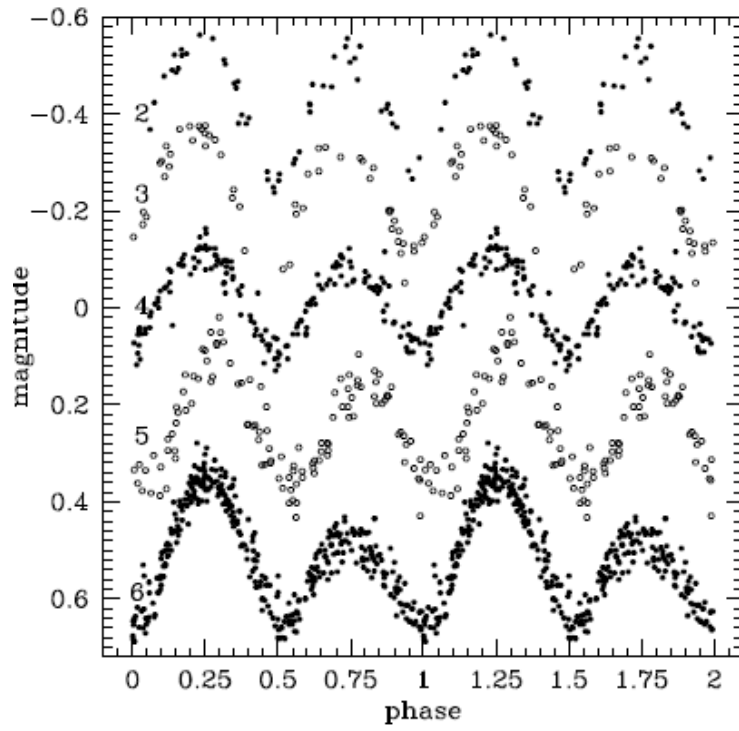


図 1.6: 爆発前の短いタイムスケールでの光度曲線 [13]

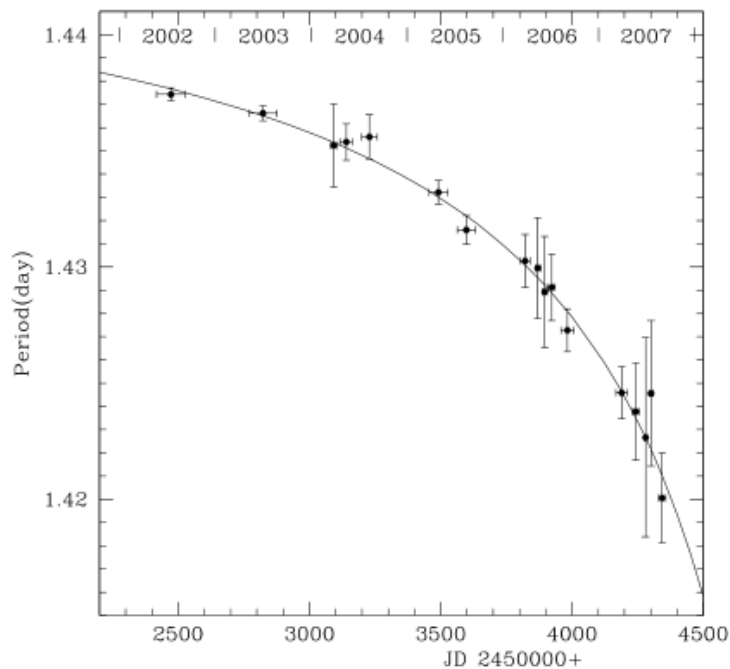


図 1.7: V1309 Sco の短期間での周期的変動 [13]

この論文では爆発前の周期変動のメカニズムについて以下の3つのシナリオを検討している。

1. 脈動

恒星が膨張、収縮の繰り返すことによって、明るさが変化する変光星を脈動星と呼ぶ。爆発前の周期変動も恒星の脈動である可能性はある。しかしながら、図 1.6 からわかるように、観測された周期変動の周期は数年のタイムスケールで急速に短くなっている。これが現代の星の脈動の理論として理解するのはとても難しいとして、このシナリオは否定されている。

2. 星の回転

低温度の恒星のなかには巨大な黒点をもつ星が知られており、そのような星が自転によって回転することで、明るさが変化して見える天体がある (回転変光星)。V1309 Sco の爆発前の周期変動がこの効果で説明できる可能性もある。図 1.6 から 2002~2006 の間は黒点 2 つあり、2007 に黒点ひとつになったと考えることができる。しかし、このように考えるためには、黒点が長期間変化しない必要があるが、回転変光星では黒点は数日~数ヶ月の時間スケールで変動することが知られている。また周期が短くなっていることも単体の星の回転で説明することが難しい。また、もし回転周期が短くなったとしても、爆発機構との関係は明らかでない。

3. 接触連星の衝突

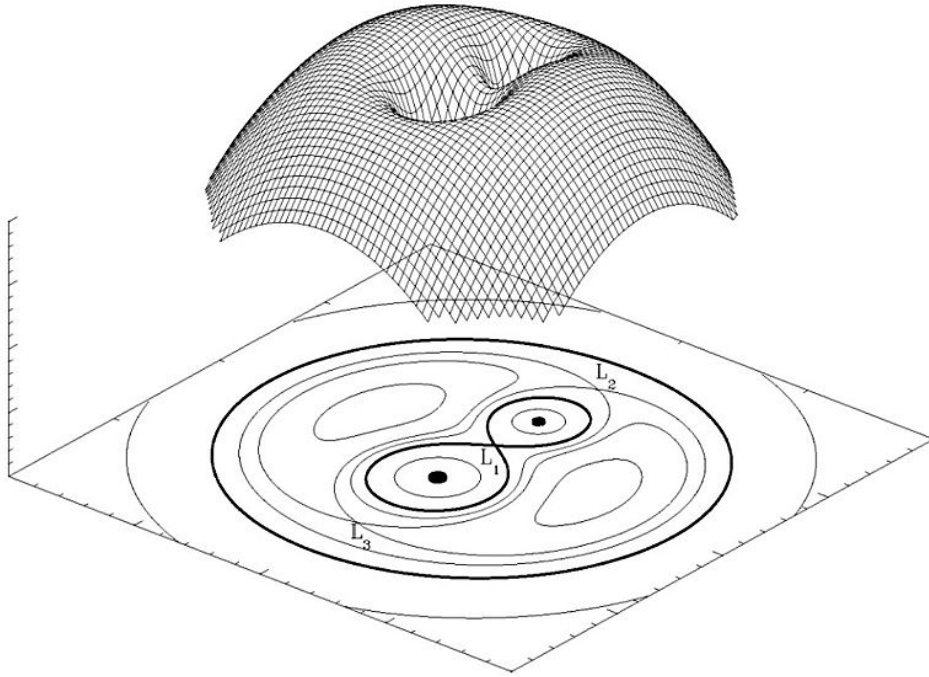


図 1.8: ロッシュローブ [14]

接触連星とは、連星系において、両方の恒星がロッシュローブ（特に L_1 ラグランジュ点を通る等ポテンシャル面のこと: 図 1.8）を満たしている天体のことをさし、それが衝突することが爆発のメカニズムとして提唱されている。接触連星の主星が主系列星から巨星へと進化する過程にある状態を考える。すると、主星が膨張してラグランジュポイント L_2 点からガスが溢れ出て、そのガスが角運動量をもって系から出て行くため、連星系全体の角運動量が減少し連星周期が短くなる。そうするとより多くのガスが L_2 点から押し出されるため、さらに角運動量を失い、連星周期も短くなる。このシナリオに基づくと、図 1.6 の 2002～2006 の周期変動は接触連星の楕円変光として解釈できる。一方で、2つの極大の明るさが異なる特徴や、2007年に1つの極大のみをもつ特徴は通常の接触連星では説明できない。この解釈として、伴星と主星の自転速度の違いによるエネルギー散逸が提唱されており、接触部分の片側だけ光ってホットスポットを作れば、非対称な形状の光度曲線が説明できる、軌道周期が短くなるほどこの効果が強まるため、次第に片方の極大が明るくなっていったという仮説を提唱している。やがて合体近くなると、ロッシュローブの形状からさらに球状に近くなって、その中にホットスポットが1つあるので、光度曲線は1つの極大のみになる。以上のことから、この論文では接触連星が衝突することで、爆発のメカニズムの説明がなされていた。

1.3 本研究の対象天体 M31 LRN 2015

今回、私が研究する天体について、先行研究がなされている [15]。このセクションでは、この先行研究について触れる。M31N LRN 2015 は MASTER-Kislovski system によって発見された。短期間で1月22日にRバンドで15.1等級のピークに達した。極大後、この天体は次第に赤くなっていった。2月末ごろには

色が大きく変化し、K 型の超巨星に似たスペクトルが観測された。それからこの天体の進化が V838 Mon に似ていることがわかった。その後この短期的爆発は高輝度赤色新星であることが発表された。

図 1.9 は M31 LRN 2015 に関する先行研究による、光度曲線である。

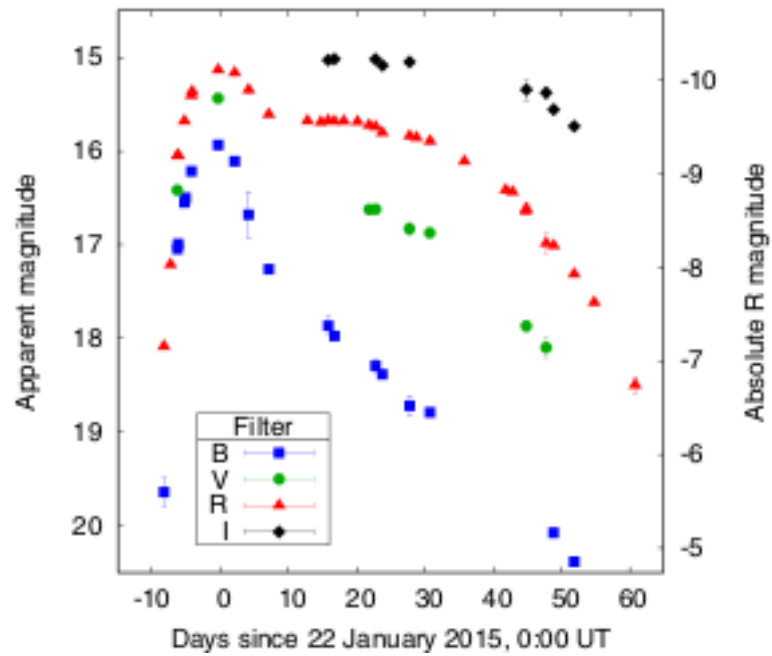


図 1.9: M31 LRN 2015 の光度曲線 [15]

光度曲線の特徴は、V1309 Sco のアウトバーストの最初の一か月とよく似ている [13]。しかし、V838 Mon のような再増光は起きていないことがわかる。

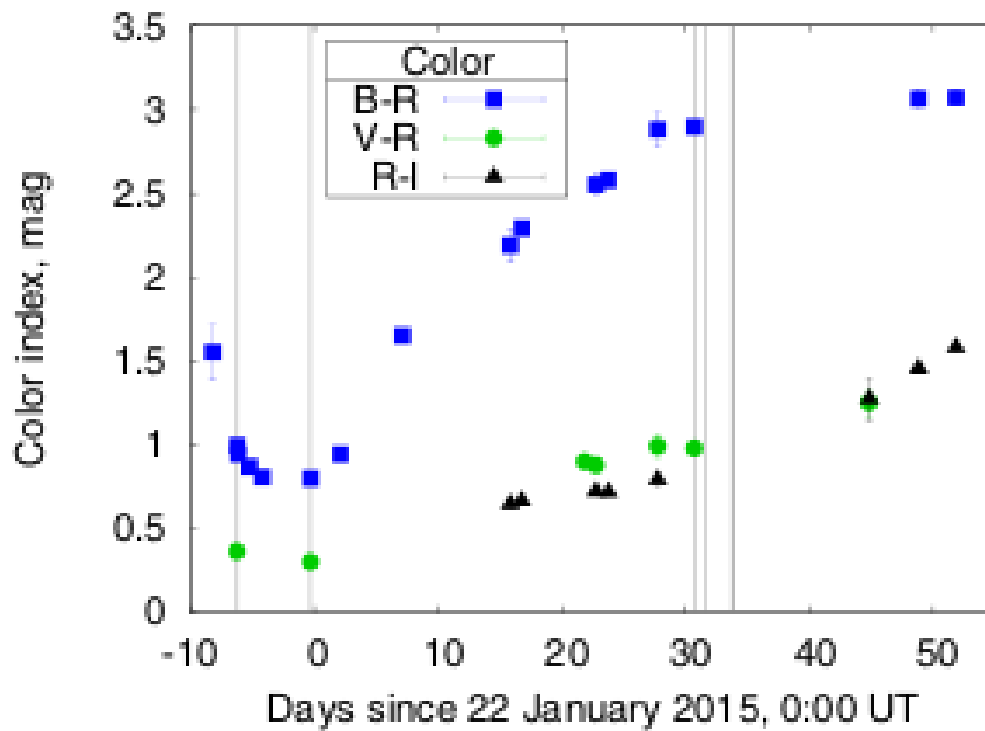


図 1.10: M31 LRN 2015 爆発後の色の变化 [15]

図 1.10 は爆発後の色の变化を示している [15]。これを見ると、はじめ色温度が上昇し、 R バンド光度曲線で極大を迎える 2 – 3 日前に色温度は極大に達している。それから徐々に下がりはじめ、そののち一か月以内に B-R index が ~ 2 等級あがっている。

図 1.11 はこれまで M31 LRN 2015 に関して報告された全ての光度曲線データを示したものである。

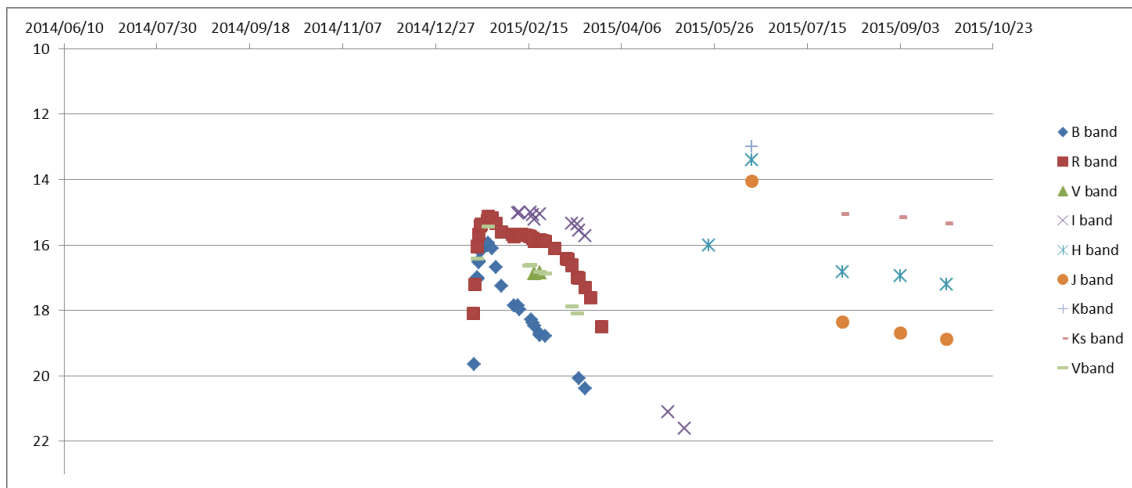


図 1.11: M31 LRN 2015 爆発後の光度曲線 [16]

これを見てわかるように爆発前の情報が非常に乏しい。このことが今回の研究の目的につながる。

1.4 本研究の目的

高輝度赤色新星のデータは少なく、特に爆発が突発的なので爆発前のデータが非常に得られにくい。本研究の目的は爆発前のアーカイブデータを解析することで、爆発メカニズム解明の手掛かりを得ることである。

今回、すばる望遠鏡の新しい観測装置「HSC」がテスト観測で、偶然 M31 を観測していた際に M31 LRN 2015 の爆発前の状態が写っていることがわかった。2 章では HSC データの解析について、3 章では解析結果である光度曲線について、4 章では高輝度赤色新星の先行研究との比較について、5 章では本研究のまとめについて、それぞれ述べる。

第2章 データ解析

この章では、HSC について紹介し、HSC で得られたデータの解析方法を説明する。

2.1 HSC とは

今回解析するデータは Hyper Suprime-Cam (HSC) で撮られたものを使用した。ここでは、HSC について紹介する [18]。

HSC はハワイにあるすばる望遠鏡に設置されているカメラであり、2012 年から試験観測が開始された。図 2.1 に HSC の全体像を示す。

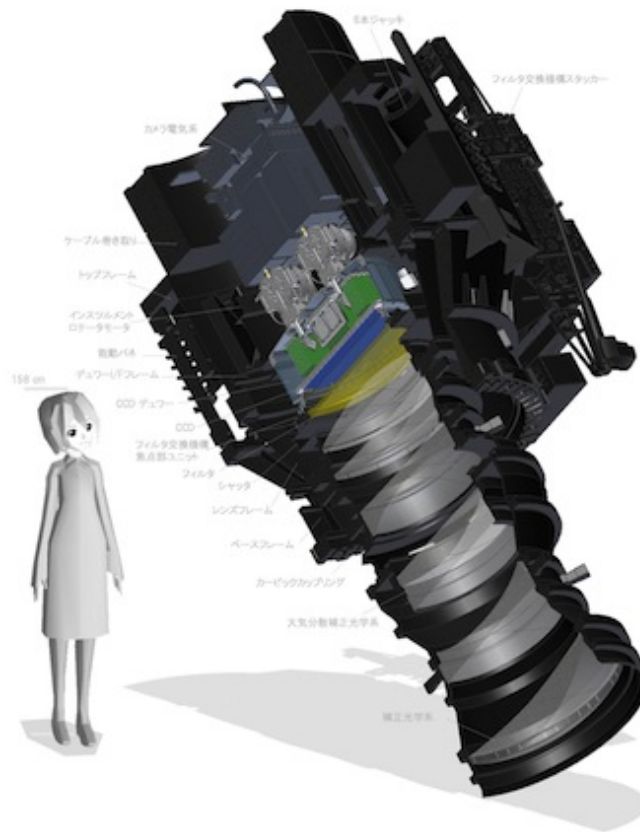


図 2.1: HSC[17]

カメラは、レンズ・フィルター・シャッター・光センサーで構成され、光センサーは新開発の高感度 CCD で、合計約 10 億画素を有している。第一レンズの直径は約 82 cm で、レンズ筒の長さは 165 cm ある。

特徴としては、視野が直径 1.5 度でとても広く、世界最大級の口径のおかげで集光力が高いという利点がある。また、シーイングが良いサイトにあるということや、7 枚の補正レンズを使うことで高結像性能を達成したという利点もあげられる。今回もこれらのおかげで M31 LRN 2015 をとらえることができた。M31 LRN 2015 は爆発前は約 22 等級と暗いが、HSC の広視野、高集光力のおかげで検出に成功した。

以下では CCD 周辺を特に説明する。図 2.2 はカメラの筐体部分の写真である。



図 2.2: HSC の CCD カメラ筐体部分 [18]

表 2.1 に HSC の主な仕様をまとめる。

大きさ	全長 1.3m、CCD デュワー直径 70cm
最大直径	1m
重さ	320kg
焦点面直径	50cm
CCD 全画素	10 億画素 (1Gpixel)
CCD 読出時間	20 秒
データ量	1 ショットあたり 2Gbyte

表 2.1: HSC の主な仕様 [18]



図 2.3: 116 枚の CCD[18]

図 2.3 は 116 枚の CCD の写真である。CCD カメラは、CCD が多数並べられた真空デュワー、CCD 読み出しなどの各種エレクトロニクスを積んだトラック、入射光を遮り、露出時間をコントロールするシャッター、特定の波長の光のみを通すフィルターから構成されている。以下でそれぞれについて説明する。

CCD デュワー

直径 50cm の焦点面に到達した光を全て検出できるように、4 面近接可能な完全空乏型 CCD が 116 枚、隣との間隔 0.3mm で焦点面をくまなく覆うように並べられている。CCD に蓄積された光は CCD 背面に置かれている CCD 読み出し回路によって電圧信号に変えられ、さらに A/D 変換されたあと、デジタル信号として 100m 以上離れた観測制御棟に置かれた制御コンピュータへと高速転送される。CCD は -100 度に冷却されることにより熱雑音が抑えられ、天体からの微弱な信号の検出が可能になっている。このために、CCD は真空に引かれた CCD デュワーの中に断熱されて置かれ、50W の排熱能力を持つパルスチューブ冷凍機 2 台で冷却されている。一方、補正光学系（HSC の一部。光学収差を補正し、シャープな星像を生み出す）の作る画像からフォーカス方向に CCD が 30 ミクロンずれてしまうため、CCD を支える構造は高剛性を保つように作られている。

エレキラック

CCD デュワーのすぐ後ろには各種制御機器が取り付けられたラックが置かれている。これがエレキラックで、CCD 駆動電源が主要コンポーネントであるが、それらに加えて、冷凍機の制御電源・温度制御コントローラー、イオンポンプの制御電源、電源管理装置、CCD カメラのステータスを把握するために取り付けられている。

シャッター

天体からくる光量を正確に測定するために露出時間を正確にコントロールできるシャッターが必要である。HSC は、2 つの膜が交互に開口することでシャッターとして機能する、取り巻き式のシャッターを採用している。一方から開口を遮っている膜が開き露光し、他方から膜が閉まり開口を遮ることによって露光を停止する。このようなメカニズムで、焦点面内での露光時間の一様性 1%、露出時間精度 0.01 秒という精

度を保ちつつ、最短露出時間 1 秒を達成している。

フィルター

観測する際に使うフィルターは、直径 60cm であることに加えて、透過中心波長一様性 $\pm 3\text{nm}$ 、50%透過波長精度 $\pm 5\text{nm}$ (r バンド) という精度で作られている。



図 2.4: HSC フィルター [18]

データ量

HSC で取得される生データは、1 ピクセルに 16bit の整数が収納され、1 CCD の生データは約 18MB のデータ量になる。CCD は 112 枚あるので、1 ショットで約 2GB のデータ量になる。HSCpipeline を用いて解析を行った後の処理済みデータは 1 ピクセルあたり、32-bit 格納されている。しかしこのデータには 32-bit 画像と 16-bit の flag 画像データも含まれるため、最終的に 1 ピクセルの容量は 80-bit にもなる。

CCD の構造

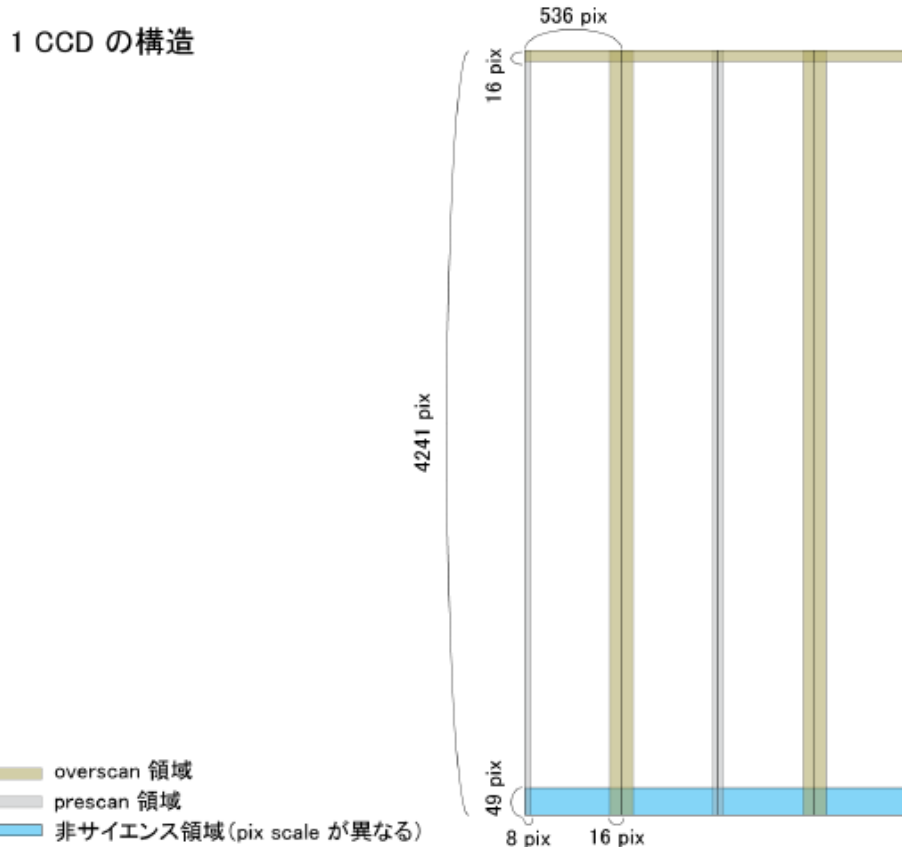


図 2.5: CCD の構造 [19]

図 2.5 は CCD の構造を表した図である。1 CCD は 2144×4241 ピクセル、4ch で構成されている。1 ch は 536×4241 ピクセルで構成され、その中にはデータ補正に使われる overscan 領域、prescan 領域そして最終画像では切り捨てられる非サイエンス領域が含まれている。最終的にサイエンスで使用出来るサイズは 1 CCD あたり 2048×4147 ピクセルになる。

2.2 使用するデータについて

HSC は 2012 年 8 月からすばる望遠鏡に取り付けられ試験観測が行われてきた。この試験観測中、M31 は HSC の広い視野での結像性能を実証するのに適した天体だったため、2013 年 6 月から 2014 年 9 月にかけて複数回、試験用に観測されてきた。その時撮られた画像に本研究の対象である M31 LRN 2015 もこの視野内に入っていた。通常の望遠鏡・CCD カメラでは視野が狭く、M31 全体を 1 度の観測で撮ることは難しいため、仮に M31 の同時期の画像が撮られたとしても、M31 LRN 2015 がその視野に入っていない可能性が高い。また、爆発前の天体の等級は約 22 等で、この明るさの天体を十分な精度で測定するためには 8-m 級の望遠鏡が必要になる。したがって、すばる HSC の M31 LRN 2015 の爆発前のデータは非常に貴重なものである。図 2.6 は実際に HSC で撮影された M31 であり、このように HSC の広い視野によって 1 回の撮像で M31 の全体像が得られることがわかる。

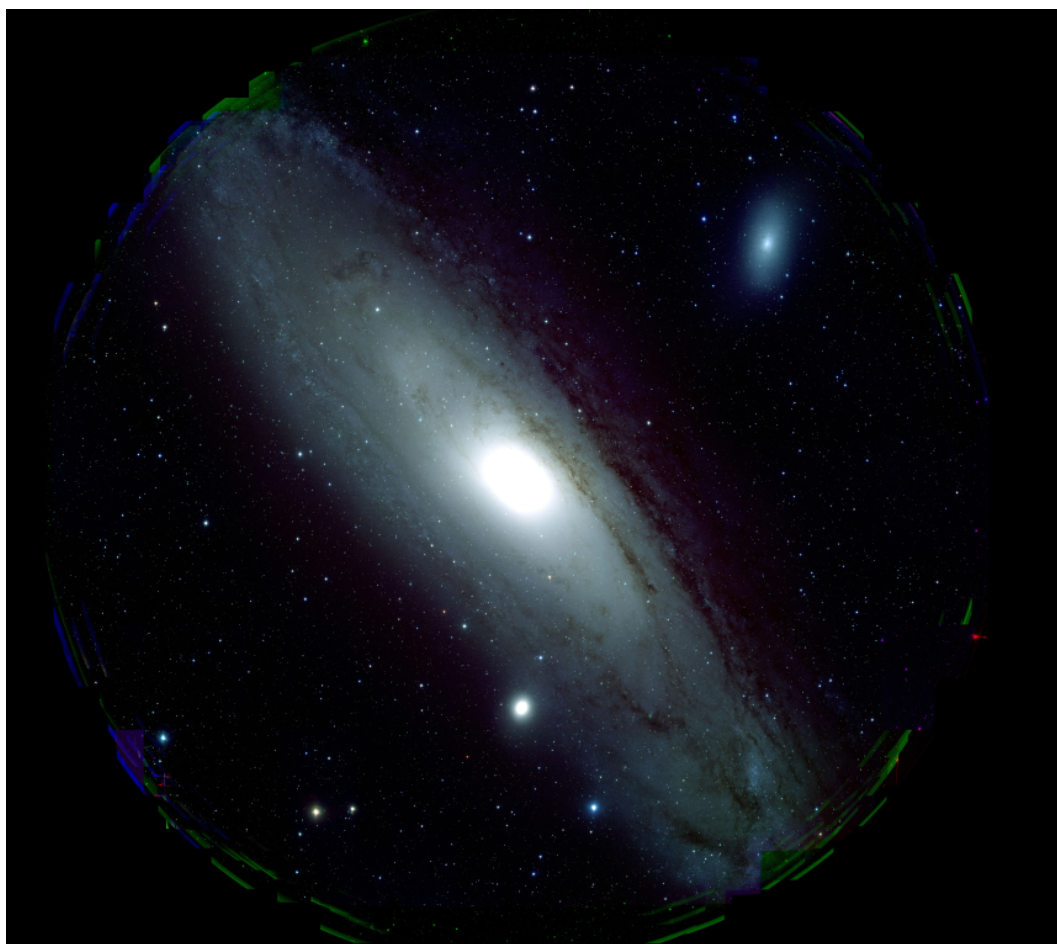


図 2.6: HSC で撮られた M31[20]

撮られたデータの日付とバンドを表 2.2 に載せる。

日付	バンド
2013-06-17	g バンド
2014-07-06	g バンド
2013-06-17	r バンド
2014-11-23 ¹	r バンド
2014-06-15	i バンド
2014-09-29	i バンド

表 2.2: HSC で撮られたデータ

2.3 画像の一次処理

HSC から得られた生データに対して一次処理を行った。以下にどのような一次処理をしたかを示す [19]。

1. バイアス信号の除去

バイアス引きとは、データ取得時に得られたバイアス信号を観測画像から差し引くことである。

2. フラット補正

フラットフレームと呼ばれる、全視野にわたって一様な輝度の入射光を撮った校正用画像を用いて、画像に生じた周辺の減光を補正する処理のことを、フラット補正と呼ぶ。天体写真に発生し易い周辺減光を補正できる。CCD の感度ムラとケラレを除くことができる。

3. スカイ引き

天体が写っていない領域から背景光を推定し、データから差し引く。

¹高田氏提供

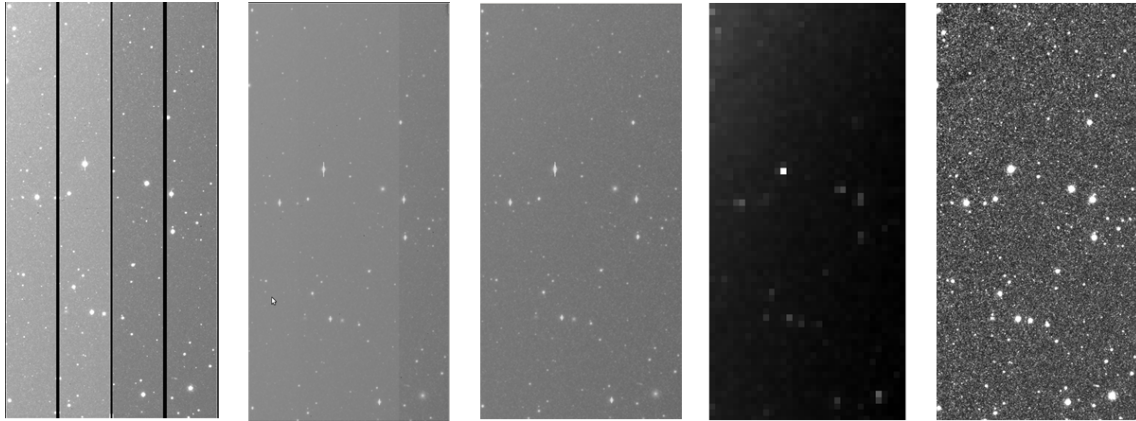


図 2.7: 生データから一次処理画像まで

図 2.7 は、左から天体の生画像、バイアス引き後天体画像、フラット補正後天体画像、スカイ画像、スカイ引き済み一次処理天体画像を表している。以上の操作をチュートリアル [21] に従って行った。その後、今回の目的天体 M31 LRN 2015 が写っている一次処理済み天体画像を利用して PSF 測光を行った。

2.4 PSF 測光

一般的に、測光の仕方には二種類ある。その二種類を最初に紹介する。

2.4.1 アパーチャー測光と PSF 測光

1. アパーチャー測光

アパーチャー測光とは、星の重心から適当な開口半径までのフラックスを計算し求める測光方法である。しかし、いりこんだ混雑している星を測定したいときには周りの星に影響されるためこの測光方法は向いていない。

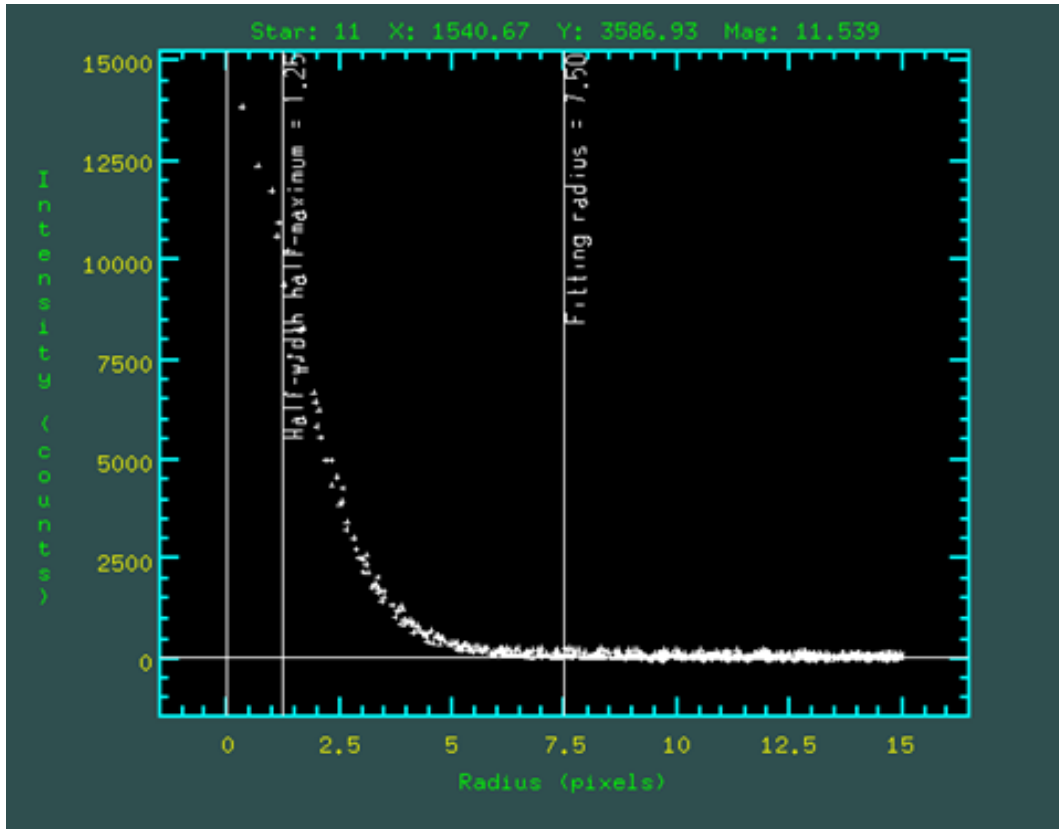


図 2.8: アパーチャー測光の例

図 2.8 は解析した画像における典型的な星の動径方向のプロファイルである。開口半径は星像の半値全幅程度を取ることが多く、この図の場合、2.5 ピクセルに相当する。

2. Point spread function (PSF) 測光

視野内の明るい星を使って Point spread function (PSF) モデルを構築し、目的の星に当てはめて測光する方法を PSF 測光という。星がいりくんで、混雑したときによく用いられる測光方法である。今回の目的天体はとても星が入り組んだところにあるため、PSF 測光で測光した。図 2.9 は M31 LRN 2015 とその周辺の画像である。この画像からわかるように、この天体の近傍に天体が多く存在していることがわかる。

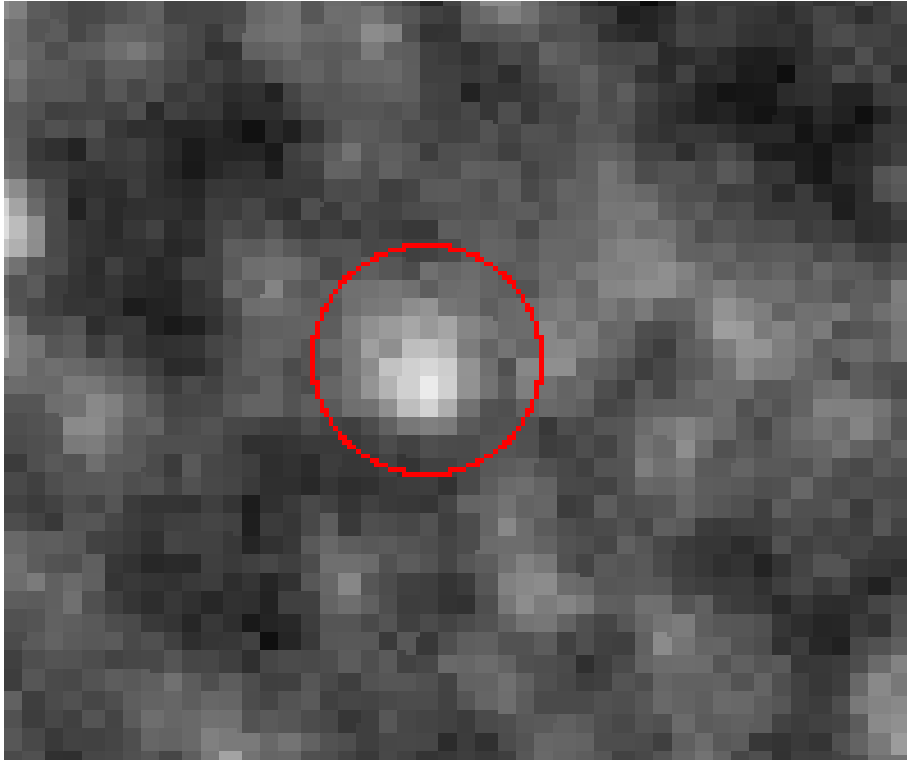


図 2.9: 本研究対象周辺の CCD 画像

2.4.2 PSF 測光の手順

今回の測光は、天文学分野で広く使用されているデータ解析ソフト IRAF の DAOPHOT パッケージを用いて行った。以下に手順を示す [22]。

1. 天体の重心位置の測定 (imexamine コマンド)

測光する位置はその星のフラックス分布の重心位置であるほうが、精度よく測光できるので、まずはじめに星の重心位置を求める。この時、本研究の対象天体とその他 7~10 天体ほど PSF モデルを作成するための天体の重心位置も求めておき、マニュアル通りにリスト化した。

2. 予備的な開口測光 (phot コマンド)

DAOPHOT の phot コマンドを実行すると、リストファイルを元に開口測光が行われる。この時、開口測光のパラメータは画像上の恒星サイズに合わせて 適切に調整する必要があり、以下の表 2.3 ように調整をした。

centerp の cbox の値	3
fitskyp の annulus の値	6
fitskyp の dannulus の値	3
photpar の aperture の値	7.5

表 2.3: パラメータの編集 1

3. 周辺の明るい星を用いた PSF モデルの作成 (PSF コマンド)

選んだ星を使って PSF モデルを作成する。PSF モデルに使用するパラメータを同様に表 2.4 に示す。

matcharad の値	3
psfrad の値	15
fitrad の値	7.5

表 2.4: パラメータの編集 2

4. PSF モデルの確認 (seepsf)

作成した PSF モデルを seepsf コマンドでチェックをした。以下の図 2.10 は *g*band で作成した PSF モデルで本対象の目的天体を例にして載せた。目的天体 (左) とその目的天体の PSF 星 (右) を表している。

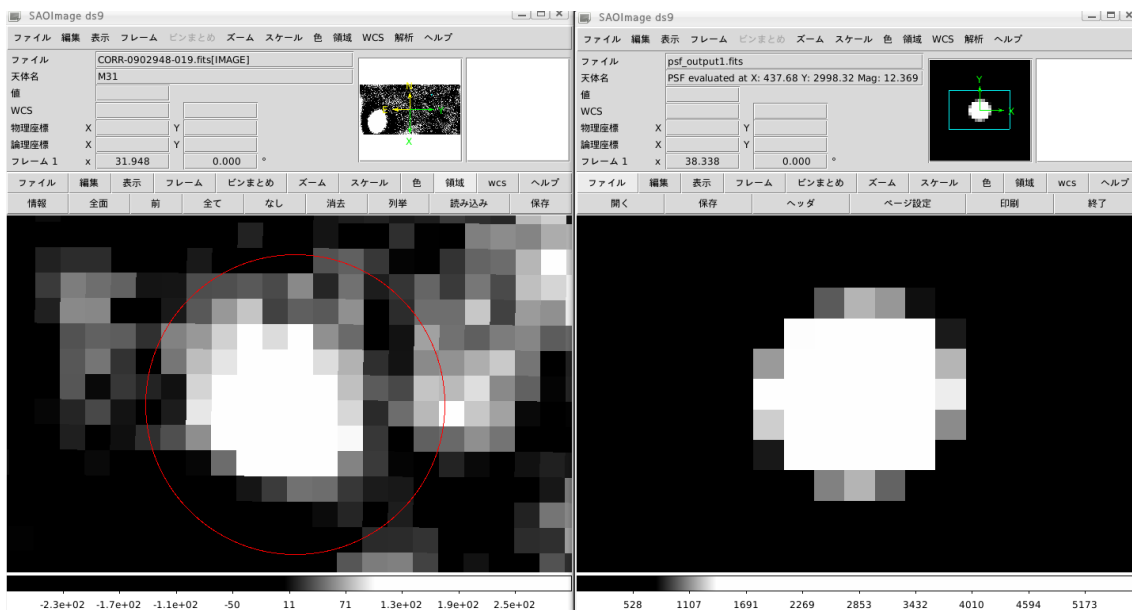


図 2.10: 本研究対象天体の PSF 星

図 2.10 から、作成した PSF モデルが実際の星のサイズとほぼ合っていることが確認でき、正しく測光

できることが期待される。

5. PSF モデルのフィッティングと測光 (allstar コマンド)

4 でうまく PSF モデルが作成されているか確認したあと、3 で PSF モデルで作成した PSF 星を allstar コマンドで測光する (PSF 測光)。

6. 元のイメージで PSF が差し引けているかチェック

最後に PSF で元のイメージが差し引かれているかチェックを行った。

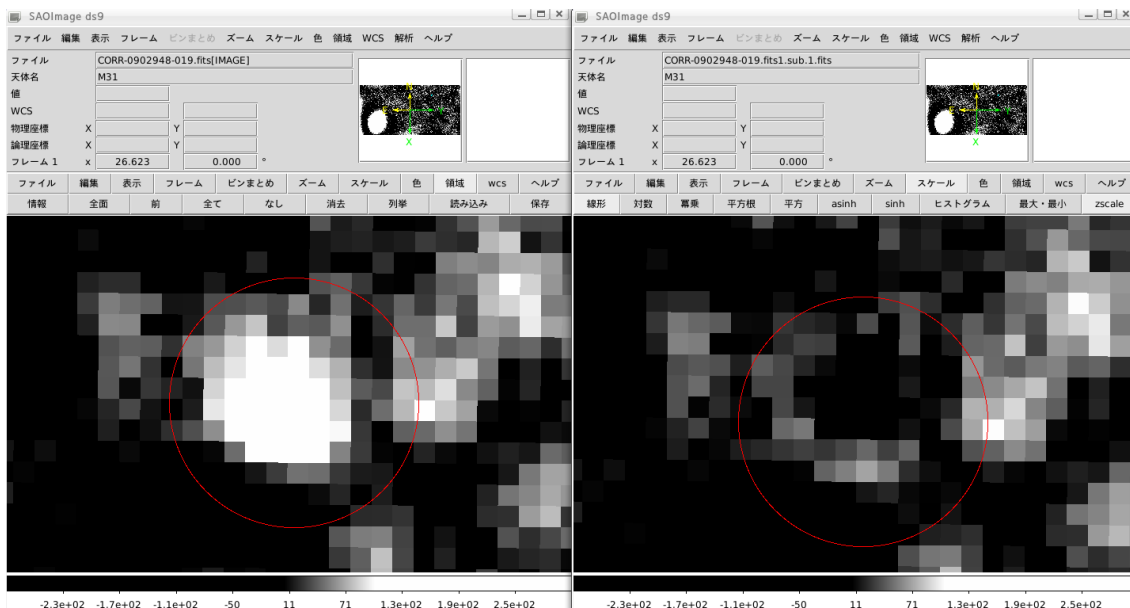


図 2.11: 試し引き

図 2.11 は目的天体のイメージ (左) と試し引き (右) を表している。図 2.11 から、引き残りや引き過ぎが見られないため、正しく測光が行われたことが確認できる。

7. 得られたカウントから等級を求める

上記の方法で求められたカウントから、等級のゼロ点を用いて等級を計算する。表 2.5 にバンドごとの FLUXMAG0 を記す。FLUXMAG0 は校正用データを用いてテスト観測時に測定され、画像ファイルに記載されているものを用いた。

8. 全面測光して HR 図を作成

また、今回は HR 図を作成するために上記の方法を用いて、同一視野内の星全てを測光した測光した [23]。以下に全面で試し引きした図 2.12 を載せる。

日付	バンド	FLUXMAG0
2013-06-16	g バンド	7.6×10^{12}
2013-06-16	g バンド	7.5×10^{12}
2013-06-16	g バンド	7.6×10^{12}
2013-06-16	g バンド	7.6×10^{12}
2014-07-06	g バンド	9.6×10^{12}
2013-06-17	r バンド	2.0×10^{12}
2014-11-23 ²	r バンド	-----
2013-06-15	i バンド	6.7×10^{12}
2014-09-29	i バンド	9.3×10^{12}

表 2.5: 今回用いた FLUXMAG0

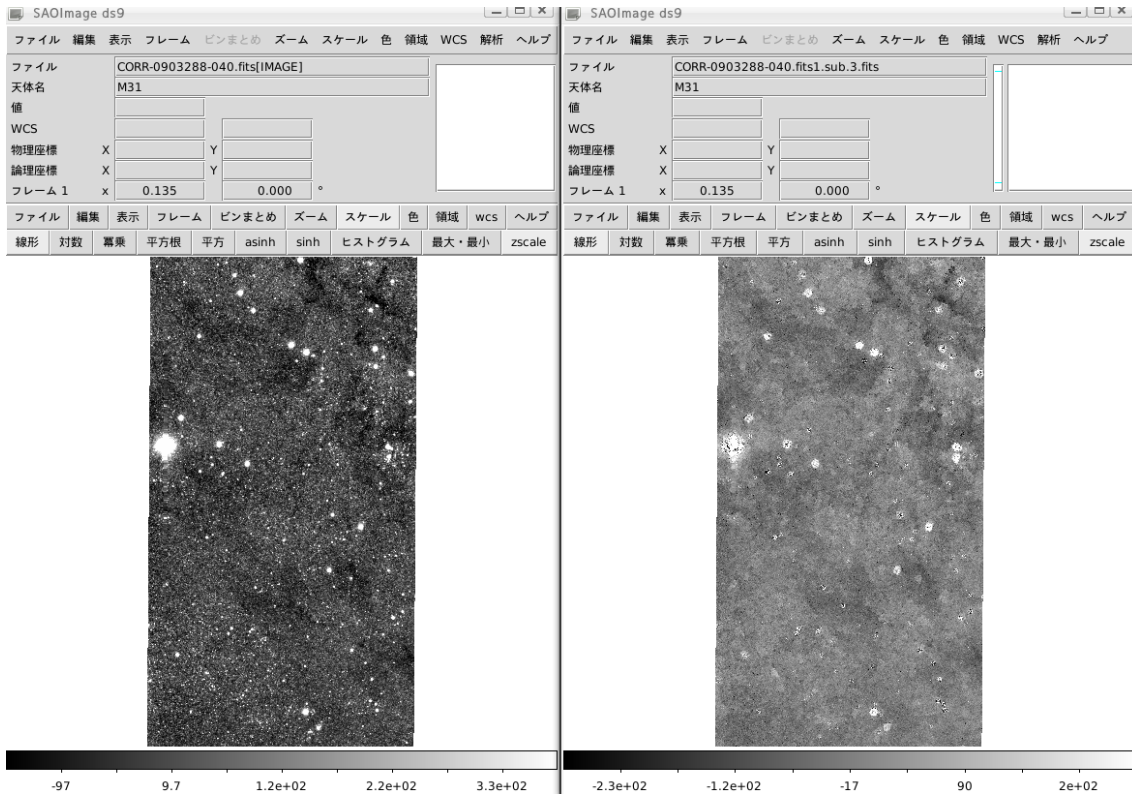


図 2.12: 全面測光の試し引き

²高田氏提供

第3章 結果

3.1 測光結果の安定性

今回測光するにあたって、その結果の安定性を調べた。2013年6月16日に約3分おきに撮られた3枚のgバンドの画像を使い、M31 LRN 2015 とその周辺にある3つの恒星を測光した。通常の恒星は数分のタイムスケールでは大きく変光しないため、測定方法が妥当であれば、これら3枚の画像で等級は有意には変化しないことが期待できる。結果を図3.1に示す。

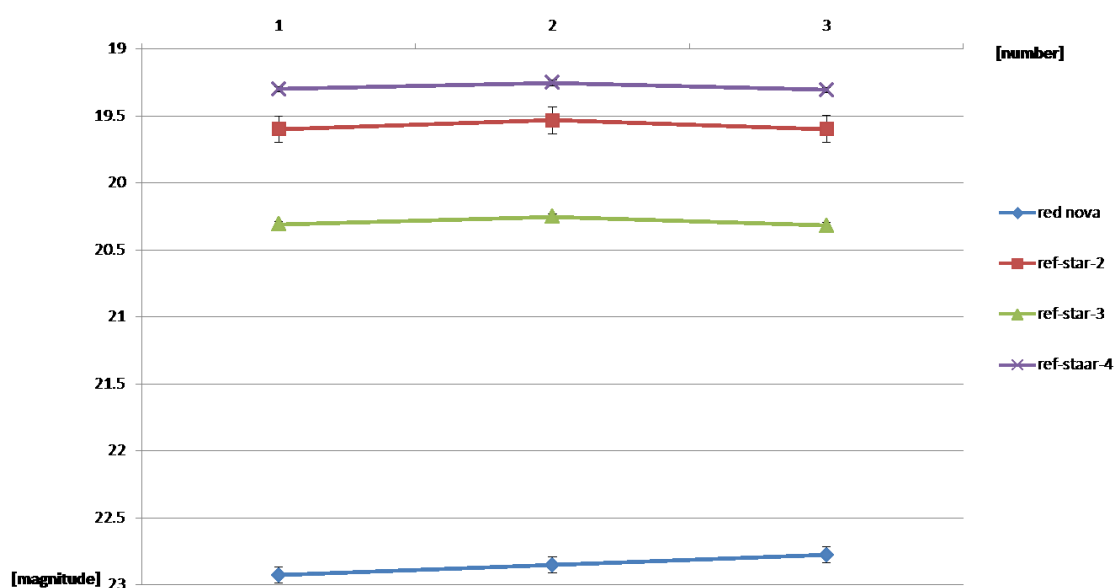


図 3.1: 測光結果の安定性

M31 LRN 2015 周辺の比較的明るい恒星は、測定誤差 0.03 mag 以下で等級の値がそれぞれ一致しており、測光結果の安定性が確認できた。一方、M31 LRN 2015 は約3分で 0.06 mag の単調増光しており、この振幅は測定誤差 0.03 mag よりも大きい。これは M31 LRN 2015 が有意な短時間変動をしていた可能性を示唆しているが、観測点数が少ないため断定はできない。

3.2 PSF モデル関数による測光結果の差異

PSF モデルの関数は、実際の解析ではデータに最適なものが自動的に判定され、それを使用した。ここではいくつかの標準的な PSF モデル関数に対して、測光結果に生じる差を調べた。

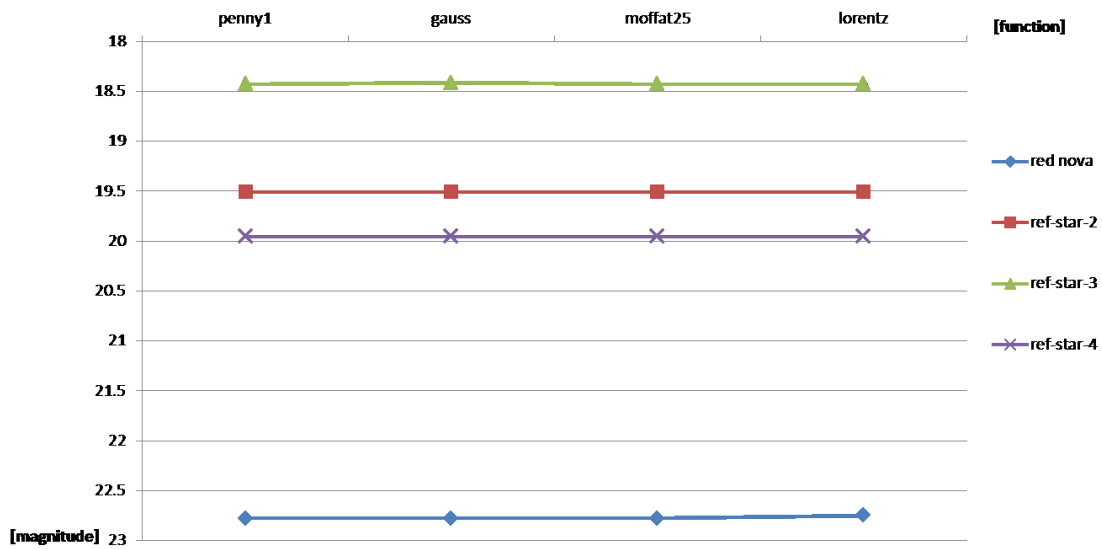


図 3.2: 関数による等級の変化

図 3.2 は前章でも使用した M31 LRN 2015 を含む 4 つの天体の星像を gauss,penny,lorentz,moffat でフィッティングし、それぞれの等級を示したものである。以下の表にそれぞれの関数を示す。

図 3.2 より、測定誤差 0.004mag 以内で等級が一致することを確認した。したがって、測光結果は PSF モ

関数	数式
gauss	$A \exp(-r^2/\sigma^2/2)$
penny	$A \exp(-r^2/\sigma^2/2) + A/(r^2/\sigma^2 + 1)$
lorentz	$A/(r^2/\sigma^2 + 1)$
moffat	$A/(r^2/\sigma^2 + 1)^\beta$

表 3.1: P S F のモデル関数 [24]

デル関数には大きく依存しないことがわかる。

3.3 光度曲線

図 3.3 で今回測定した結果を載せる。

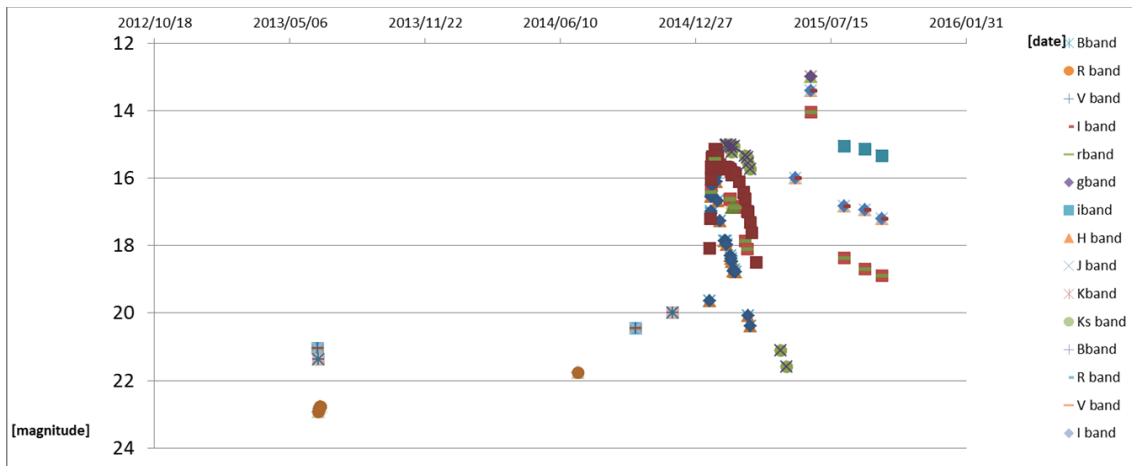


図 3.3: M31 LRN 2015 の爆発前を含む光度曲線 [16]

私が解析した HSC のデータには、 g 、 r 、 i の全てのバンドでそれぞれ 385、524、471 日間の間隔をあけて、2 日ずつデータがある。このいずれのバンドにおいても増光が見られ、増光幅は g 、 r 、 i バンドでそれぞれ 1.1、1.4、0.6mag である。M31 LRN 2015 において、爆発前にこのような緩やかな増光を検出したのは本研究が初めてである。また、[25] によると、M31 LRN 2015 は 2002—2009 年に g バンドで ~ 22.6 mag と報告されている。表 3.1 からわかるように、この値は今回測光した 2013 年 6 月の値と誤差の範囲で一致する。したがって、静穏時の等級が $g \sim 22.6$ だとすると、少なくとも 2013 年 6 月まで静穏状態が続いていたことがわかる。以下の表 3.2 に今回測定した値を記した。

日付	バンド	等級	エラー
2013-06-16	g バンド	22.9	0.1
2013-06-16	g バンド	22.9	0.1
2013-06-16	g バンド	22.8	0.1
2013-06-16	g バンド	22.8	0.1
2014-07-06	g バンド	21.8	0.1
2013-06-17	r バンド	21.4	0.1
2014-11-23 ³	r バンド	19.98	---
2013-06-15	i バンド	21.0	0.1
2014-09-29	i バンド	20.5	0.2

表 3.2: 今回測光したデータ

³高田氏提供

3.4 HR 図

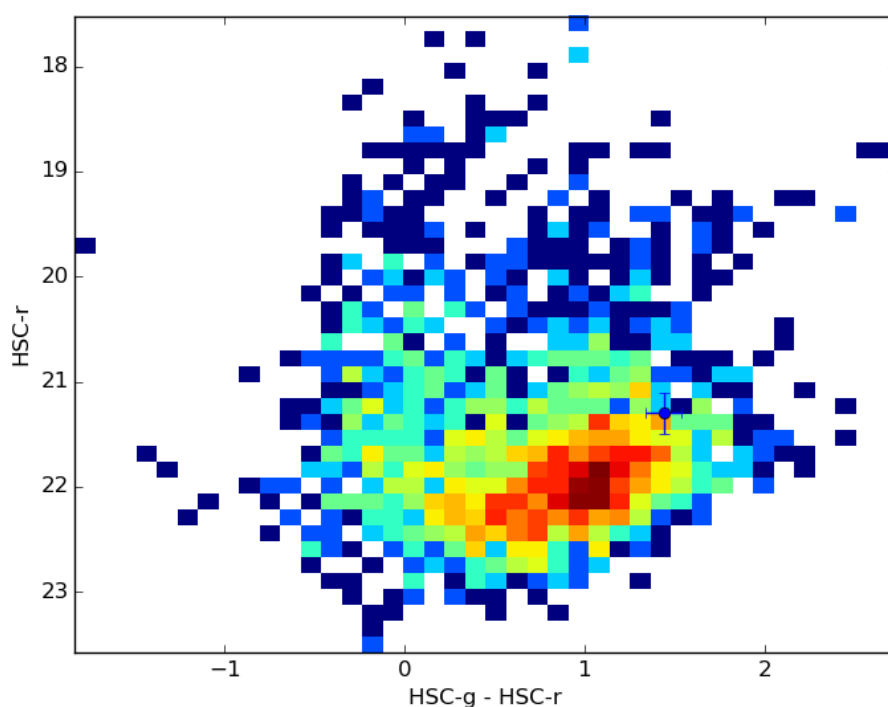


図 3.4: HR 図

図 3.4 は 2013 年 6 月 16 日に撮られた g バンド⁴と 2013 年 6 月 17 日に撮られた r バンドの画像から作成した HR 図である。図 3.4 は縦軸が r バンドの等級、横軸が色指数 $g-r$ である。M31 LRN 2015 が青点で示されている。カラーマップで示されているのは周辺の測光結果をピンごとの密度で表したものである。以下のように測定誤差を求めた。横軸は g バンド - r バンドなので表 3.2 より

$$(22.8 \pm 0.1) - (21.36 \pm 0.08) = 1.44 \pm \sqrt{0.1^2 + 0.08^2} = 1.44 \pm 0.128 = 1.4 \pm 0.1 \quad (3.1)$$

よって測定誤差を 0.1 等にした。縦軸は、表 3.2 の 2013 年 6 月 17 日の r バンドから測定誤差を 0.1 等にした。また、赤色で示されている密度の高い部分は赤色巨星分枝であり、M31 LRN2015 は爆発前、赤色巨星の中でも明るい天体に分類されることがわかった。また、2013 年 6 月 17 日の絶対等級を以下の式で求める。今回、M31 の距離を 254 万光年 (= 779 kpc) を用いて計算を行った。 M を絶対等級、 m を見かけの等級、 D を光度距離 (pc) とすると、

$$M = m - 5(\log_{10} D - 1) \quad (3.2)$$

⁴表 3.2 の 3 番目の g バンドを利用

(3.2) の式にそれぞれの値を代入すると、

$$M = 21.4 - 5(\log_{10}(7790000) - 1) \quad (3.3)$$

$$M = 21.4 - 5(5.89 - 1) = -3.05 \simeq -3.1 \quad (3.4)$$

のように求まる。

第4章 考察

4.1 V1309 Sco 先行研究との比較

本研究で得られた M31 LRN 2015 の爆発前を含む光度曲線 (図 3.3) と、先行研究で報告されている V1309 Sco の光度曲線 (図 1.6) を比較すると、両天体とも、爆発の半年前には既に静穏時よりも 1 等程度増光していることがわかる。この共通の特徴は、高輝度赤色新星がその爆発直前に同じ挙動を見せる可能性を示唆している。V1309 Sco では爆発直前に 1 等の減光が観測されているが、M31 LRN 2015 ではデータ点数が少なく、同様の現象は確認できていない。静穏期からの増光量を他の高輝度赤色新星と比較する。V1309 Sco は約 6 等級、V838 Mon は約 10 等級増光しており、今回の天体、M31 LRN 2015 は約 8 等級増光していることが確認できた。また、極大時の絶対等級は既知の高輝度赤色新星 V1309 Sco、V838 Mon、M85 OT2006-1、M31 RV でそれぞれ、-9.8、-9.5、-12、-10 等であり、M31 LRN 2015 は -10.1 等である。[3] したがって、M31 LRN 2015 は高輝度赤色新星として典型的な絶対等級をもっていることがわかる。一方で、静穏期からの増光量は各天体で比較的ばらつきが大きく、爆発前の天体の光度のばらつきが大きいことを示唆する。

M31 LRN 2015 の爆発前の天体は絶対等級 -3.1 、色指数 $g-r$ が 1.4 であった。これは比較的明るい巨星に相当する。これに対して既知の高輝度赤色新星では先行研究から以下が報告されている。まず、V1309 Sco は爆発前の天体が G 型星で赤色巨星分枝に入った直後の星を含む連星である。[13] 次に、V838 Mon は超巨星 + B 型主系列星の連星だったと報告されている。[2] これらのことから、高輝度赤色新星には、その爆発前の状態に多様性が見られ、特定の状態の恒星のみが爆発を起こすわけではないことがわかる。

第5章 結論

本研究ではすばる望遠鏡HSCによって撮られた画像を測光することで、M31 LRN 2015 の爆発前の挙動を明らかにした。爆発の約半年前に既に1等増光していた点は、別の高輝度赤色新星 V1309 Sco と類似している。しかし、爆発前の天体は明るい巨星であることがわかり、これは V1309 Sco を含む既知の高輝度赤色新星とは異なる。このことから、特定の状態の恒星や連星のみが高輝度赤色新星になるわけではないことがわかった。

謝辞

今回いろいろな方々に支えられて卒論を書き終えることができました。すばる望遠鏡 HSC のデータの権利を持っている宮崎さん、安田さん、解析のアドバイスをいただいた小池さん、hscPipe のパッケージパイナリーを与えて下さった高田さん、解析結果を与えて下さった新倉さん、所有のデータをくださった千葉さん、天文の参照をくださった Paul さん、コンピューターを使わせてくださった岡部さん、すべての方々に感謝を捧げます。また、内海先生、植村先生にはたくさんご指導頂いて特にお世話になりました。感謝いたします。本当にありがとうございました。

関連図書

- [1] Howard E. Bond, et al., 2008, The Astronomical Journal, 135, 605-611
- [2] wikipedia(V838 Mon) 参照
- [3] S. R. Kulkarni, E. O. Ofek, et al., 2007, Nature 447, 458-460
- [4] Mould, et al., 1990, The Astrophysical Journal, 1990, 353, L35-L37
- [5] Kulkarni, et al., 2007, The Astrophysical Journal, 659, 2
- [6] E. Berger, et al., The Astrophysical Journal, 699, 2
- [7] Amit Kashi, Noam Soker, 2011, astro-ph, arXiv:1011.1222v2,
- [8] R. Tytenda, N. Soker, 2006, A&A, 451, 1
- [9] Munari, et al., 2002, A&A, 389, 2,
- [10] Munari, et al., 2005, A&A, 434, 3,
- [11] Paul Martini, et al., 1999, Astronomical Journal, 118, 2
- [12] Vitaly Goranskij, et al., 2015, astro-ph, arXiv:1501.03615
- [13] Tytenda, et al., 2011, A&A, 528, 10
- [14] wikipedia(ロシア) 参照
- [15] A. A. Kurtenkov, et al., 2015, A&A, 578, 5
- [16] Srivastava, et al., 2015, The Astronomer's Telegram, No.7236
I. A. Steele, et al., 2015, The Astronomer's Telegram, No.7555
Dong Subo, 2015, et al., The Astronomer's Telegram, No.7173
Stefan Geier, Peter Pessev, 2015, The Astronomer's Telegram, No.8220
Peter Pessev, Stefan Geier, et al., 2015, The Astronomer's Telegram, No.8059
Alexander Kurtenkov, et al., 2015, A&A, 578, 5
- [17] http://www.naoj.org/Projects/HSC/j_index.html
- [18] 国立天文台ニュース 特集:すばる望遠鏡 HSC 開眼!

- [19] <http://hsc.mtk.nao.ac.jp/pipedoc/index.html>
- [20] <http://www.nao.ac.jp/news/topics/2013/20130731-subaru-hsc.html>
- [21] https://hscdata.mtk.nao.ac.jp:4443/hsc_bin_dist/tutorial4x-ja.html
- [22] IRAF/DAOPHOT を用いた PSF 測光 簡易マニュアル ver0.3b, 山中 雅之
- [23] http://www.astr.tohoku.ac.jp/~mikito/IRAF/task_phot.html
- [24] http://panisse.lbl.gov/snphot/lec8_vitaliy_PSF_fit.pdf
- [25] Dong Subo, et al., 2015, The Astronomer's Telegram, No.7173,