令和3年度 卒業論文

外層が剥がされた親星における超新星の初期観測

に基づく爆発特性の研究

広島大学 理学部 物理学科 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B180654 堀友哉

主查: 川端 弘治 副查: 岡部 信広

2022年4月7日

超新星爆発の特徴は爆発する直前の親星の状態で大きく異なり、例えば、激しい恒星風によって、ないしは 連星系中の質量交換作用によって恒星自身の外層が剥がされた状態で爆発するものがある。このような超 新星を Stripped Envelope Supernovae(SE SNe) と呼ぶ。SE SNe の代表例は Ib/c 型、IIb 型超新星が分類され ており、分厚い水素外層が存在しないことから親星の内部構造を知るのに適しており、また存在数自体が少 なく、観測が困難な 8-10M_☉ 以上の大質量星の終末期の直接的な情報を得られるという点で、未だに全容が よくわかっていない大質量星の進化についての手がかりとなりうる。

本研究では広島大学 1.5m かなた望遠鏡と京都大学 3.8m せいめい望遠鏡で得られた、SE SNe 候補であ る SN 2020acat, SN 2020aatb, SN 2020adow の可視測光・分光観測のデータから、光度曲線とスペクトルを 作成した。爆発初期の光度曲線からそれぞれの超新星の親星の外層の質量を見積もり、スペクトルの比較か ら爆発の膨張速度といった各パラメータを求め、どのような超新星であるかを把握し、親星の様子について 議論した。



図 1: SN 2020acat の可視光多バンドでの光度曲線 (図 3.1 より抜粋) 縦軸は見かけの等級を示し、横軸は V バンドの極大からの日付を表す。

概要

目次

第1章	序論	1
1.1	恒星の進化	1
1.2	超新星	4
	1.2.1 超新星の分類	5
	1.2.2 Stripped Envelope Supernovae	7
	1.2.3 shock breakout \succeq shock cooling	8
1.3	本研究の目的	9
第2章	観測とデータリダクション	10
2.1	かなた望遠鏡	10
	2.1.1 HOWPol	11
2.2	せいめい望遠鏡	12
	2.2.1 KOOLS-IFU	13
2.3	観測対象	14
	2.3.1 SN 2020acat	14
	2.3.2 SN 2020aatb	15
	2.3.3 SN 2020adow	15
2.4	データリダクション	15
	2.4.1 1 次処理	15
	2.4.2 測光	16
第3章	結果と議論	21
3.1	IIb 型超新星	21
	3.1.1 光度曲線	21
	3.1.2 スペクトル	26
3.2	Ic 型超新星	27
	3.2.1 光度曲線	27
	3.2.2 スペクトル	30
3.3	爆発の特性と親星に関する考察	31
	3.3.1 SN 2020acat	31
	3.3.2 SN 2020adow	34
第4章	まとめと今後	37

付録 A 観測測光ログ



1	SN 2020acat の光度曲線 1
1.1	p-p chain
1.2	CNO サイクル
1.3	たまねぎ構造
1.4	超新星の典型的な光度曲線
1.5	超新星スペクトル分類
1.6	単独星の場合
1.7	連星系の場合
1.8	爆発直前の親星
1.9	SN 1993J の多バンドでの光度曲線
2.1	ふたた街岩湾 10
2.1	がなた主逐號
2.2	HOWPol · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.5	HOWFOI C用いられているハントの付任 12
2.4	
2.5	SN 2020arth 0 $\#$ $\#$ $= a$ (2020/12/08 P \times \times \times \times) 16
2.0	SN 2020atto の主) = グ (2020/12/08 B ハンド) IC IC IC IC
2.1	月二八二八千平 ジ 頃 域 処 埋 後 の グ ー グ
2.0	
2.9	PSF エデル主) 引き後 19
2.10	FSF モノル左し引き後 Ic SN 2020appt と澤坦1た5つの会昭見
2.11	SN 2020acth と選切した5つの参照星
2.12	SN 2020adato と選択した5つの参照星
2.13	SIN 2020adow と選択した5つの参照生
3.1	SN 2020acat の光度曲線
3.2	SN 2020adow の光度曲線
3.3	IIb 型超新星の絶対等級の比較 25
3.4	IIb 型超新星の光度進化の比較 26
3.5	IIb 型超新星のスペクトルの比較
3.6	SN 2020adow の光度曲線
3.7	Ic 型超新星の絶対等級の比較 29
3.8	Ic 型超新星の絶対等級の比較

3.9	Ic 型超新星のスペクトルの比較	31
3.10	SN 2020acat のフィッティングの様子	32
3.11	SN 2008ax のフィッティングの様子	32
3.12	SN 1993J の shock breakout/shock cooling 時の光度曲線	34
3.13	SN 2020adow のフィッティングの様子	35
3.14	SN 1994I のフィッティングの様子	35

第1章 序論

1.1 恒星の進化

太陽のように自ら光を出して輝いている星を恒星と呼ぶ。その内部では核融合が起こっており、それに よって生み出されたエネルギーで輝いている。恒星は星間ガスが自己重力によって収縮して形成されたも ので、その際に重力エネルギーが熱に変わり温度が上昇する。中心部の温度が 10⁷[K] を超えると、水素の 燃焼過程の 1 つである p-p chain 反応が始まる。p-p chain 反応はまず 2 つの水素原子核、すなわち陽子が融 合して重水素になり、水素原子核と、生成された重水素により質量数 3 のヘリウムである ³He が作られる。 この後の反応は ppI,ppII,ppIII の 3 つに分かれるが、いずれの場合においても最終的にヘリウム ⁴He が合成 される (図 1.1)。ppI では、2 個の ³He が融合して ⁴He が合成されるのに対し、ppII と ppIII では ³He と ⁴He が融合して ⁷Be が合成される。ppII,ppIII では、ヘリウムが 2 個生成されるが、ppII では ⁷Be が電子を捕獲、 ppIII では ⁷Be が水素原子核を捕獲することにより反応が進む。温度が 3 × 10⁷[K] を超えると、4 個の水素 原子核から 1 つのヘリウム原子核が生成される反応である CNO サイクルと呼ばれる反応が起こる。CNO サイクルは触媒のようなはたらきをする炭素、窒素、酸素原子核に水素原子核が加わっていく反応であり (図 1.2)、p-p chain よりもエネルギー発生の温度依存性が高いため、中心温度が比較的高い大中質量星、す なわち 1.5M_☉ 以上の星において支配的となる [1]。

中心部での水素の燃焼がエネルギー源となっている星の進化段階を「主系列星」と呼び、恒星の寿命の約90%を占めるため、多くの恒星はこの状態にある。また、主系列星の寿命 t_{ms} は質量 M に比例し、光度 L に反比例する。光度 L は主系列星の場合は $M^a(a\sim 3.5)$ に比例するので、結果的に主系列星の寿命 t_{ms} は M^{1-a} に比例することとなり、大質量星ほど寿命が短いことになる (式 1.1)。

$$t_{ms} \propto \frac{M}{L} \propto \frac{M}{M^a} \propto M^{1-a} \tag{1.1}$$

主系列星の中心部での水素がすべて燃え尽きるとヘリウムが中心部に残されて、ヘリウムコアと水素の 多い外層の複合構造となる。この状態となった直後はコアの温度がヘリウムの燃焼温度に達していないた め、コアは重力収縮をして、高温高圧になっていく。一方で、ヘリウムコアのすぐ外側で CNO サイクルに よって水素が燃焼が続いており、この部分では温度と圧力はほぼ一定の値を保っているため、コアと外層の 境界付近の圧力勾配はきつくなり、非常に高圧のコアが外層全体を強く押し出し、外層は希薄な状態とな る。このような星の進化段階を「赤色巨星」と呼ぶ。ヘリウムコアが収縮を続けて温度が 2×10⁸[K] にな ると3 個のヘリウム原子核が融合して炭素原子核になるトリプルアルファ反応が始まる (式 1.2)。さらに生 成された炭素の一部はヘリウムと反応して酸素が合成される (式 1.3)。このようにヘリウム燃焼の結果、恒 星の中心部には C+O コアが形成される。

$${}^{4}\text{He} + {}^{4}\text{He} \Longrightarrow {}^{8}\text{Be}, \qquad {}^{8}\text{Be} + {}^{4}\text{He} \Longrightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$$
(1.2)



$${}^{12}C + {}^{4}He \longrightarrow {}^{16}O + \gamma \tag{1.3}$$

図 1.1: p-p chain[2]



図 1.2: CNO サイクル [2]

中小質量星の進化

恒星の質量が 8M_☉ より小さい場合は、C+O コアの質量が 1.07M_☉ という炭素燃焼の臨界質量よりも小 さく、電子が縮退するため炭素が燃焼する温度まで上昇しない。このとき、恒星は中心から電子が縮退した C+O コア、ヘリウム燃焼殻、ヘリウム層、水素燃焼殻、希薄で広がった外層という構造をとる。また、外層 は重力による束縛が弱いため、星間空間へほとんどが放出されてしまい、C+O コアが剥き出しとなる。こ のような中心核だけとなった星の進化段階を「白色矮星」と呼び、核融合反応が終わってしまったために、 放射によってエネルギーを失ってゆっくりと冷えて一生を終える。

大質量星の進化

質量が 8-10M_☉ より大きい場合は、コアの質量が大きいため電子が縮退することがなく、コアは重力収 縮を続けてどんどん高温高圧になり、それに伴う核融合反応によって様々な元素が作られていく。まずは、 C+O コアの中心部で炭素燃焼が起き、炭素が全て消費されると、O+Ne+Mg コアが形成される。次にネオ ンが燃焼するまで重力収縮し、ネオン燃焼が始まる。同様にしてネオンが燃え尽きてしまった後は、酸素、 合成されたケイ素の燃焼が起こり、温度が 5×10⁹[K] を超えると、エネルギーの最も低い鉄原子核 ⁵⁶Fe が 作られる。鉄は最も結合エネルギーが小さく安定な原子核であるので、これ以上核融合反応は進まない。こ うして、大質量星は進化の最終段階で中心部から順に鉄のコア、ケイ素や硫黄の層、酸素・ネオン・マグネ シウムの層、炭素層、ヘリウム層、水素層といった「たまねぎ構造」をとる (図 1.3)。



図 1.3: たまねぎ構造 [2]

1.2 超新星

超新星とは、恒星がその最期に起こす爆発の総称で、爆発のエネルギーは 10⁵¹[erg] 程度とされ [3]、そ の膨大なエネルギーにより明るく輝くため、銀河系外で起こったものも観測することができる。我々の銀河 系内では可視光では 17 世紀前半に現れたもの以降新たに発見されておらず、現代の観測対象となっている 超新星は銀河系外のものである。また、この論文では超新星爆発を起こす星のことを親星と呼ぶ。

超新星を特徴付けるものの一つに、図 1.4 のような光度が時間的にどのように変化しているかを表す光度 曲線がある。典型的に超新星の光度曲線は爆発してから 10-20 日ほど後に極大と呼ばれる明るさがピークに なる時期を迎え、その後だんだんと暗くなっていく。超新星が明るくなる原因は爆発時に生成された ⁵⁶Ni だとされている [3]。⁵⁶Ni は放射性元素であり、崩壊することにより ⁵⁶Co となり、さらに崩壊して ⁵⁶Fe と なるときにガンマ線が放射される。このガンマ線が星間ガスに吸収され、ガスが温められることによって可 視光で明るくなる。以降、この論文では可視光での観測について主に記述する。



図 1.4: 超新星の典型的な光度曲線

1.2.1 超新星の分類

超新星には様々なタイプがあることがわかっていて、主に分光観測によって得られるスペクトルから分 類される (図 1.5)。最も基本的な分類として、超新星の明るさが最も明るくなる極大期において、スペクト ル中に水素の吸収線が見られるかで分けられる。吸収線とは、原子が特定の波長のみを吸収することによっ てスペクトル中に現れる、強度の低い部分で、吸収する波長は原子によって特有なので、吸収線の存在に よって元素の有無を調べることができる。水素の吸収線がないものをI型超新星、水素の吸収線があるもの をII型超新星と呼ぶ。また、I型の中でも、ケイ素の吸収線が顕著なものが Ia型、ケイ素が弱くヘリウムの 吸収線が強いものが Ib型、ヘリウムの吸収線も弱いものが Ic型と分類されている [4]。この II 型を含めた 4 つの型の中で、Ia 型以外は主に星生成が活発な渦巻銀河などで発見されており、それに対して Ia 型は楕 円銀河を含む、あらゆる型の銀河で発見されている。楕円銀河は星形成があまり行われておらず、年老いた 恒星が多いので、寿命の短い大質量星はほとんど存在しないと考えられている。このことから、Ia型は中小 質量が進化した白色矮星が、それ以外の型は大質量星が爆発したものだと考えられている [1]。また、超新 星のスペクトル線は大抵が実験室波長からズレた位置に現れる。これは宇宙膨張に起因してドップラー効 果によって観測される波長が長波長側にズレる赤方偏移と、超新星爆発によって吹き飛ばされたイジェクタ が高速で観測者側に向かってくることにより、観測される波長が短波長側にズレる青方偏移によるものであ る。これによりスペクトルのズレから吸収線速度を求めることで超新星の膨張速度を求めることができる。



図 1.5: 超新星スペクトル分類 [4]

(a),(b),(c),(d) はそれぞれ Ia 型、II 型、Ic 型、Ib 型に対応する。また、赤く囲まれた部分はそれぞれの型の スペクトルで特徴的な部分である。

重力崩壊型超新星

大質量星は §1.1 にあったように中心部では最終的に鉄のコアが形成される。鉄は安定なので核融合反応 が起きず、中心部からのエネルギーの供給が止まる。すると鉄のコアは重力収縮をはじめ、コアが高温に なっていき、5×10⁹[K] という相対論的な温度に達すると (式 1.4) のように鉄がヘリウムに分解され、続い て中性子と陽子に分解される光分解反応が起こる。この反応はわずか 0.1 秒というほんの一瞬の間に起こる ことであり、圧力が急激に低下することにより、コアは支えを失い恒星は自身の重力によって潰れていき、 「爆縮」と呼ばれる激しい重力崩壊を起こす。コアでは、密度が原子核密度である 10¹⁴[g/cm³] を超えるま で収縮が止まらない。密度がこの程度になると、コアは重力崩壊に対し安定となり、反跳するコアバウンス により外側へ向かう衝撃波が発生する。この衝撃波が恒星の表面まで到達すると超新星爆発となるとされ ている。しかし、現状のシミュレーションでは、発生した衝撃波が恒星の表面まで伝播することなく消えて しまったり、衝撃波が恒星の表面まで到達したとしても、実際に観測された爆発エネルギーと比べるとかな り小さくなってしまっているという点があり、爆発のメカニズムの全容はよくわかっていない。

$${}^{56}\text{Fe} \longrightarrow 13\,{}^{4}\text{He} + 4\,n - 124.4\,[\text{MeV}], \qquad {}^{4}\text{He} \longrightarrow 2\,p + 2\,n - 28.3\,[\text{MeV}] \tag{1.4}$$

1.2.2 Stripped Envelope Supernovae

大質量星は、もともと個数割合でみるとわずかであり、かつ寿命も短く (太陽の 100 分の 1 以下)、存在 場所も星生成領域近傍に限られることが多い。それに加え、先ほどの爆発のメカニズムについてなど、進化 の過程もよくわかっていない部分が多い。そのような大質量星の、特に終末期の状態を推測することの一助 となる天体に Stripped Envelope Supernovae(SE SNe) がある。SE SNe とは名前の通り、外層が何らかの理由 で剥がされた親星が起こす超新星爆発で、光学的に分厚い水素外層が薄い、もしくはほとんど存在しないた め、親星のコア付近を直接観測することができる。外層が剥がされるメカニズムとして主に 2 通り考えられ ている [5]。1 つ目は、親星が単独星の場合で、親星を取り囲んでいる水素の燃焼核での放射圧で発生する 恒星風により、重力的な束縛が弱い大質量外層が吹き飛ばされるというものである (図 1.6)。水素の燃焼殻 の質量が大きくなるほど放射圧は大きくなり、それに伴って恒星風も強くなり、外層を剥がすはたらきが大 きくなるため、親星の質量が大きいほどより外層が剥がされやすい [6]。2 つ目は、親星が連星系を成して いる場合である。連星系での等ポテンシャル面をロッシュローブと呼び、図 1.7 のように主星と伴星を取り 囲む 8 の字型をしている。このロッシュローブのくびれた部分をラグランジュ点 (L1 点) と呼び、星からの 重力が釣り合う点である。連星系の場合では、この点から、主星である親星が膨張しロッシュローブを満た した際に、伴星の重力によって主星の質量が伴星に奪われ、外層が剥がされるというものである (図 1.7)。

SE SNe の代表例として IIb 型、Ib 型、Ic 型があり、爆発する直前の親星の状態、すなわち外層の剥がさ れ度合によって型が異なる。大質量星でも水素外層が豊富な状態で爆発したものが、水素の外層を持つ II 型の中でも水素外層が厚いと言われる IIP 型である。そこから水素外層が薄く残った状態で爆発したものが IIb 型、水素外層が完全に剥がされた状態で爆発したものが Ib 型、ヘリウム外層まで剥がされた状態で爆発 したものが Ic 型だと考えられている (図 1.8)。



図 1.6: 単独星の場合



図 1.7: 連星系の場合



図 1.8: 爆発直前の親星

Ib/Ic 型超新星

Ib 型超新星は親星の水素外層が完全に剥ぎ取られた状態で爆発したものであり、それに対して Ic 型超新 星は水素外層に加え、ヘリウム外層まで剥ぎ取られた状態で爆発したものである。それぞれ水素、ヘリウム が存在しないという特徴はスペクトルの分類とも一致する。また、それぞれの親星の1つとして、ウォル フ・ライエ星が挙げられる。ウォルフ・ライエ星は初期質量がおよそ 40M_☉ の以上であり、高温かつ高輝 度の星である。ウォルフ・ライエ星はスペクトルによって、WN、WC、WO の 3 つに分けられる。WN 星 はヘリウムと窒素の輝線が顕著で、WC 星はヘリウムと炭素の輝線が顕著で、WO 星は酸素の輝線が強いと いう特徴がある。親星が WN 星、WC 星の場合は Ib 型超新星、親星が WO 星の場合は Ic 超新星になると 予想されている [1]。

IIb 型超新星

IIb 型超新星は親星の水素外層が薄く残った状態で爆発したと考えられている。IIb 型という名の由来が、 スペクトル中に初期は水素線が見られていたが、時間とともにそれが弱まっていき、代わりに Ib 型に見ら れるようなヘリウム線や酸素線が卓越してくるようなスペクトルの特徴を持つことにある [1]。また、IIb 型 には、親星が extended なものと compact なものがあるとされているが、この型で最初に発見された超新星 は SN 1993J であり、理論が確立したのが比較的最近であるため、良質なデータセットを持つサンプル数が 少ない。

1.2.3 shock breakout \succeq shock cooling

図 1.9 は先述した IIb 型超新星に分類される SN 1993J の光度曲線であり、極大の前にもう一つ光度が大 きくなっている部分がある [7]。このように SE SNe の中には、光度曲線においてメインとなる極大の前に 別の山が観測されるものがある。この現象を shock breakout ないしそれに続く shock cooling と呼び、超新 星爆発の際の衝撃波が恒星の表面に達することで、数秒から数時間のタイムスケールで X 線や紫外線の明 るい閃光が発生し、その後1日のタイムスケールで膨張かつ冷却した外層から可視光の放射が起こるとさ れている。shock breakout 後の数日間は、噴出されたイジェクタが膨張するにつれて温度が下がるため、光 度が徐々に下がっていく。この部分を shock cooling と呼ぶ。超新星の光度曲線の初期部分はこれらの shock breakout と shock cooling に支配されている [8]。また、この現象は IIb 型超新星以外でも起こっているとさ れているが、爆発の際の衝撃波が星周物質や外層を加熱し、可視光で明るくなるので、星周物質が少なく外 層が薄い状態での超新星爆発では、shock breakout と shock cooling は数分から数時間という非常に短い継続 時間となり観測するのが困難である [9]。SN 1993J は shock breakout と shock cooling が数日にわたり観測 されたことから、親星の外層が厚めの extended な IIb 型超新星だと考えられている。



図 1.9: SN 1993J の多バンドでの光度曲線 [7] 初期の方に shock breakout と shock cooling が確認できる。

1.3 本研究の目的

大質量星は存在数が少なく、特に終末期の観測は困難であり、進化過程の全容はよくわかっていない。SE SNe は分厚い水素外層が存在せず、超新星の親星のコアの近くを直接観測することができ、また初期観測を することにより shock cooling での光度に依存するパラメータである外層の半径を見積もることができる。 これにより爆発する直前の親星の状態を推測することができ、大質量星の進化のメカニズムの解明の一助 となり得る。

本研究では、近傍で発見された SE SNe 候補天体を対象としている。初期の光度曲線やスペクトルの比較を得て解析し、親星の状態や膨張速度などのパラメータを求め、各超新星が SE SNe の中でどのような位置づけになるかを議論し、今後追観測すべきかどうかを検討する。

第2章 観測とデータリダクション

2.1 かなた望遠鏡

東広島天文台に設置されているかなた望遠鏡は、広島大学宇宙科学センターが所有する口径 1.5m の光学 赤外線望遠鏡である (図 2.1)。この 1.5m という口径は国内に設置されている望遠鏡の中では 5 番目の大き さであり、方位軸まわりが 6 度/秒、高度軸まわりが 3 度/秒という素早い駆動速度を誇るため、突発的な現 象に対して他の多くの望遠鏡よりも早急にアプローチすることができる。かなた望遠鏡はカセグレン焦点 とナスミス焦点の 2 つの焦点を持ち、それぞれに HONIR と HOWPol という観測機器を取り付けて運用し ている。表 2.1 にかなた望遠鏡についての主な仕様を示す。



図 2.1: かなた望遠鏡1

¹広島大学 HP 宇宙科学センター https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/abstract

表 2.1: かなた望遠鏡の主な仕様 ¹			
項目	仕様		
光学系	Ritchey-Chretien 光学系		
主鏡の有効径	1200mm		
主鏡材	ULE(Ultra Low Expansion; 超低膨)ガラス		
合成 F 値と焦点距離 f	F/12.3 f=18501.7 mm		
視野	直径 15 分角 (=0.25 度)		
焦点面スケール	11.148 秒角/mm		
架台	経緯台 最大角速度 方位軸まわり6度/秒 高度軸まわり3度/秒		
搭載可能重量	カセグレン焦点 500kg ナスミス焦点 1000kg		

2.1.1 HOWPol

ー露出型偏光撮像装置 HOWPol はかなた望遠鏡のナスミス焦点の1つに取り付けられている装置である (図 2.2)。ガンマ線が数秒から数時間の間に爆発的に放射されるガンマ線バーストの即時光放射の観測を主 目的として設計された。撮像観測モード、偏光観測モード、分光観測モードの3つのモードがあり、本研 究では撮像観測と分光観測でのデータを用いる。図 2.3 は HOWPol に取り付けられているバンド (フィル ター)の特性で、縦軸が透過率、横軸が波長となっている。バンドとは特定の波長以外の光を通さないもの で可視光観測においてはよく使用され、例えば B バンドが可視光で短波長側の青い光をよく透過するとい うようになっている。今回の研究では B(blue), V(visual), R(red), I(infrared) バンドを用いた。また、表 2.2 に HOWPol についての主な仕様を示す。



図 2.2: HOWPol²

²かなた望遠鏡用観測装置一覧 http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/summary.html



図 2.3: HOWPol で用いられているバンドの特性²

表 2.2: HOWPol の主な仕様 ²				
項目	仕様			
波長域	0.45-1.03µm			
視野	撮像:15分角			
	偏光撮像(広視野):7分×7分			
偏光撮像 (狭視野):15 分×1 分				
分光:2.3 秒×15 分				
フィルター	B,V,R,I,z',Ha			
グリズム	420/mm,R~400			
CCD 完全空欠乏型 2k-4kCCD2 台				
限界等級	撮像:19.2 等 (R バンド、10 分露出), σ=0.1 等			
	偏光撮像:16.0 等 (10 分露出), σ=0.1%			

2.2 せいめい望遠鏡

岡山天文台に設置されているせいめい望遠鏡は、京都大学が所有する口径 3.8m の光学赤外線望遠鏡であ る (図 2.3)。この 3.8m の主鏡というのは国内だけだなく東アジア最大級の大きさで、2019 年に観測を開始 した。また、主鏡は小さな鏡を 18 枚組み合わせてできた分割鏡となっており、日本では初めて分割鏡が採 用された望遠鏡となっている。せいめいという名の通り、系外惑星の探査を1つの科学目標としている。2 つのナスミス焦点を持ち、現在は下記の可視分光撮像装置 KOOLS-IFU と可視光三色同時撮像装置 TriCCS が取り付けられている。表 2.3 にせいめい望遠鏡についての主な仕様を示す。



図 2.4: せいめい望遠鏡3

項目	仕様
光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡の有効径	3780mm
鏡材	クリアセラム-Z
焦点距離 (口径比)	22692 mm (F/6)
視野	直径 12 分角
焦点面スケール	9.09 秒角/mm
架台	経緯台 駆動速度 方位軸まわり 4 度/秒 高度軸まわり 3 度/秒
焦点	ナスミス焦点 ×2

表 2.3: せいめい望遠鏡の主な仕様3

2.2.1 KOOLS-IFU

可視分光撮像装置 KOOLS-IFU はせいめい望遠鏡のナスミス焦点に取り付けられたファイバーフィード 型分光器である (図 2.4)。また、KOOLS-IFU は岡山天体物理観測所で開発された可視撮像低分散分光装置 である KOOLS に面分光ユニットが付いた状態の装置となっている。面分光とは、空間 1 次元と波長 1 次元 の情報を得ることができるスリット分光とは異なり、空間 2 次元と波長 1 次元の情報を同時に得ることが できる分光方法である。一度に 3 次元分の情報を得ることができるので、時間効率が良く、特に広がりを持

³京都大学 岡山天文台 HP https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/general/facilities/okayama/researcher/seimei_spec/

つ天体の観測に適している。KOOLS はロングスリット分光器であり元々は岡山天体物理観測所 188 cm 反 射望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられていた。表 2.4 について KOOLS-IFU について主な仕様を示す。



図 2.5: KOOLS-IFU⁴

表 2.4: KOOLS-IFU の主な仕様 ⁴					
項目	[目 仕様				
ファイバー	イバー 直径 100µm,本数 127 本				
視野	1 ファイバー 1.87 秒角 全ファイバー 30.4 秒角				
波長範囲 透過型グレーティング: 4200-6700 Å (R~500) ,5450-8350 Å					
VPH グレーティング:4300-5600 Å (R~1200) ,6200-8000 Å (R~1200)					

2.3 観測対象

かなた望遠鏡で複数夜の多バンド観測を実施し、並びにせいめい望遠鏡で複数夜にわたり分光観測が実 施された3つの超新星の解析を行った。

2.3.1 SN 2020acat

SN 2020acat は世界時で 2020 年 12 月 9 日に ATLAS (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System) プロ ジェクトグループによって発見された。また、ePESSTO+(the Public ESO Spectroscopic Survey of Transient Objects) グループにより z=0.00793 の IIb 型超新星に分類された⁵。母銀河は PGC 037027 で、かなた望遠鏡 の HOWPol で 2020 年 12 月 10 日から 2021 年 4 月 20 日までの 20 夜観測を行った。またこの天体は HOWPol の分光モードで 2020 年 12 月 22 日にスペクトルを 3 枚取得し、せいめい望遠鏡の KOOLS-IFU で 2020 年 12 月 12 日から 2021 年 4 月 5 日までの 7 夜分光観測を行った。。

⁴国立天文台 岡山観測所全史 ⁵TRANSIENT NAME SERVER https://www.nao.ac.jp/study/oao/telescope/kools.html https://www.wis-tns.org/

2.3.2 SN 2020aatb

SN 2020aatb は世界時で 2020 年 11 月 23 日に ALeRCE(Automatic Learning for the Rapid Classification of Events) によって発見された。また、Dr. Regis Cartier 氏により z=0.009954 の II 型超新星に分類された⁵。母 銀河は NGC 1906 で、かなた望遠鏡の HOWPol で 2020 年 11 月 23 日から 2021 年 3 月 13 日までの 12 夜観 測を行った。また、せいめい望遠鏡の KOOLS-IFU で 2020 年 11 月 23 日から 2021 年 3 月 3 日までの 6 夜 分光観測を行った。

2.3.3 SN 2020adow

SN 2020adow は世界時で 2020 年 12 月 26 日に ASAS-SN(All-Sky Automated Survey for Supernovae) に よって発見された。また、Prof. Giuliano Pignata 氏により z=0.007505 の Ic 型超新星に分類された⁵。母銀河 は KUG 0830+278 で、かなた望遠鏡の HOWPol で 2020 年 12 月 28 日から 2021 年 5 月 5 日までの 17 夜観 測を行った。また、せいめい望遠鏡の KOOLS-IFU で 2021 年 1 月 10 日から同年 2 月 19 日までの 4 夜分光 観測を行った。

2.4 データリダクション

HOWPol で取得した生データに対し、天文データリダクション用のソフトウェアである IRAF(Image Reduction and Analysis Facility)を用いて、1 次処理、測光処理を行った。

2.4.1 1次処理

取得した生データには欲しい天体の情報が、撮像された検出器の感度特性やピクセル毎のムラによる影響を受けており、そのまま測光したり分光したりなどの科学的な解析をすることはできない。以下の1次処 理を行い、科学的な解析ができるように補正する必要がある。

オーバースキャン領域処理

オーバースキャン領域とは、データを読み出す前もしくは読み出した後に付加されるもので、電荷が無いはずの領域を CCD が電荷輸送を行って読み出した部分であり、後述のバイアス成分をその画像の読出し中に得ることができる。器械上、天体画像の端の領域に付随される。オーバースキャン領域のカウントをバイアスレベルと見なして、画像からカウントを差し引きをする作業を行う。図 2.9 は 1 次処理前の生データの画像であり、縦に走っている黒い部分がオーバースキャン領域である。黒い部分を結合し、オーバースキャン領域処理を行った後の画像が図 2.10 である。



図 2.6: SN 2020aatb の生データ (2020/12/08 B バンド) 縦に走っている黒い部分がオーバースキャン領域



図 2.7: オーバースキャン領域処理後のデータ

バイアス処理

バイアスとは、露出時間0秒で露光せずに撮像した際にデータ上に乗るカウントである。露出時間が無いので、カウントは乗らないと思われるが、実際には CCD から電荷を読み出す際に電圧がかけられているためバイアスが発生する。これを補正するためには、もとの天体画像から、露光せずに撮像したバイアスフレームと呼ばれる画像を差し引くという作業を行えばよい。

フラット処理

望遠鏡に一様な光を入射したとしても、CCD のピクセル毎の感度の違いに加えて光学系の収差や機器に 付着した汚れなどによって、ピクセル毎によって異なるカウントを持つ画像になる。これを補正するために は、一様な光としてフラット板にハロゲンランプなどを照射したものを撮像したフラットフレームと呼ばれ る画像によって、バイアス処理をした天体画像を割るという作業を行えばよい。

2.4.2 測光

測光とは、天体の明るさを測定することである。本研究では1次処理済みのデータに対して、まず開口 測光を行い、そして PSF 測光、並びに相対測光を行い超新星の明るさを求めた。

開口測光

天体を中心とする指定した領域内 (開口) のピクセルでのカウント値を積分することにより天体の明るさ を求めるという最も単純な測光手法である (図 2.8)。この際には、天体本来の明るさだけではなく背景光も 加算されていることになるので、開口の周辺の輪状の領域をスカイ領域としてその部分のカウント値の平 均を差し引く。



図 2.8: 開口測光 [10]

PSF 測光

対象天体と同一視野内に含まれる任意の複数の星を用いて、PSF モデルを作成し対象天体にフィッティン グすることにより天体の明るさを求める。PSF とは点像分布関数 (point spread function) のことで、点光源 であるはずの星が大気の擾乱や光学系によってある程度広がって見えてしまうことである。また PSF 測光 は、開口測光では上手く測光できないような、天体が非常に混んでいる領域などで高い精度で測光できる。 今回は PSF モデルを作成するために用いる任意の星は、後述の相対測光で用いた星に加えてさらに 2 つの 星を選択した。図 2.12 が 1 次処理済みの画像であり、その画像から PSF モデルを差し引いた画像が図 2.13 である。



図 2.9: PSF モデル差し引き前



図 2.10: PSF モデル差し引き後

相対測光

IRAF で測光したときに表示される値は、IRAF 内で設定された測光原点である zero mag を基準にして求 められた器械等級であり、本当の明るさではない。本来ならば zero mag を求めて、そこから対象天体の等 級を求めなければならないが、対象天体と同一視野内にあり、等級が既知の参照星を同時に測光することに よって相対的に対象天体の本来の明るさを求めることができる。参照星のカタログは SIMBAD を用い、較 正は以下の式 (2.1) を用いた。mobi は対象天体の実際の等級、mref は参照星の実際の等級、下付きの iraf が 付いているものは、IRAFで測光したときに表示されるそれぞれの等級である。表 2.5, 2.6, 2.7 にそれぞれの 参照星の B, V, R, I バンドの等級を示す。また、図 2.14, 2.15, 2.16 にそれぞれ SN 2020acat, SN 2020aatb, SN 2020adowの測光の際に用いた参照星と超新星の位置を示す。番号が振られていないものが超新星で、参照 星 1,2,3 が表 2.5, 2.6, 2.7 のそれぞれ c1, c2, c3 に対応し、参照星 4,5 が先述した PSF モデルを作成するとき に追加した星である。

$$m_{obj} = (m_{obg_{iraf}} - m_{ref_{iraf}}) + m_{ref}$$

$$\tag{2.1}$$

表 2.5: SN 2020acat の参照星の等級 (mag)					
参照星	В	V	R	Ι	
c 1	16.8763	16.1054	15.6258	15.1776	
c2	16.9159	16.3754	16.0575	14.9944	
c3	15.2933	15.1569	15.0764	14.9944	

- 表 2.6: SN 2020aatb の参照	星の等級 (mag)
--------------------------	--------	------

参照星	В	V	R	Ι
c1	16.927	16.2396	15.8201	15.4271
c2	16.7107	16.0065	15.6808	15.3738
c3	16.3406	15.2748	14.6101	13.9921

表 2.7: SN 2020adow の参照星の等級 (mag)

参照星	В	V	R	I
c1	16.4833	15.8781	15.4881	15.1221
c2	16.832	16.1044	15.7013	15.3233
c3	15.6182	14.6966	14.1648	13.6688



図 2.11: SN 2020acat と選択した 5 つの参照星



図 2.12: SN 2020aatb と選択した 5 つの参照星



図 2.13: SN 2020adow と選択した 5 つの参照星

第3章 結果と議論

結果は SN 2020acat が IIb 型、SN 2020adow が Ic 型であるので、IIb 型超新星と Ic 型超新星に分けて記述する。また、SN 2020aatb は II 型なので IIb 型と比較する。

3.1 IIb 型超新星

3.1.1 光度曲線

SN 2020acat

図 3.1 に §2.4.2 で記述した PSF 測光をした後、相対測光を行った結果から得られた SN 2020acat の B, V, R, I バンドをまとめた光度曲線を示す。光度曲線の縦軸は見かけの等級であり、横軸は V バンドの極大か らの日付である。極大となる日付は、極大となる付近での 2 次関数フィットをした際の頂点として求めた (フィットの方法および、様子は §3.3.1 と図 3.10 に示す)。上記のフィットから SN 2020acat は V バンドの 極大等級は 15.05 mag と推測できる。発見日から V バンドの極大まで 20 日で、赤い側になるほどこの期 間は長い。極大後は 40 日程度で約 0.05 mag/day の減光率で減光した後、減光率が変化し、その後約 0.013 mag/day で減光している。



図 3.1: SN 2020acat の光度曲線。 天の川吸収係数は補正していない。

SN 2020aatb

SN 2020acat と同様に測光した結果から得られた SN 2020aatb の B, V, R, I バンドの光度曲線を図 3.2 に 示す。SN 2020aatb は V バンドの極大等級は約 16.4 mag と推測でき、発見日から V バンドの極大まで 17 日 で、赤い側になるほど顕著にこの期間が長くなっている。極大後は 50 日程度で約 0.02 mag/day の減光率で 減光している。



図 3.2: SN 2020aatb の光度曲線。 天の川銀河吸収係数は補正していない。

他天体との比較

SN 2020acat と SN 2020aatb が IIb 型超新星の中でどのような位置づけであるかを調べるために、他の IIb 型超新星の V バンドでの 2 種類の光度曲線を作成し、比較対象として用いた。他天体との比較には絶対等 級を用いる。見かけの等級から絶対等級への変換は、距離によって明るさが暗くなることを補正する距離 指数 (distance modulus) と、母銀河や天の川銀河に存在する星間塵によって減光することを補正する吸収係 数 (extinction) を引くことによって行っている。また、比較に用いた超新星は SNe 1993J, 2008ax, 2011dh の 3 つであり、見かけの等級として Sternberg Astronomical Institute Supernova Light Curve Catalogue の値を用 いている。表 3.1 に比較として用いた超新星の極大日、赤方偏移、母銀河についてまとめた。極大日につ いては各超新星の最も明るい点での日付を記述した。また、表 3.2 に本研究で用いた各超新星の距離指数 と吸収係数をまとめる。SN 2020acat はこれまでに母銀河までの距離が測定されていないため、母銀河の赤 方偏移 $z \sim 0.00793$ より、距離指数を 32.45 mag とした⁵。この際、光速を 3.0×10^8 m/s、ハッブル定数を 73 km/s/Mpc とした。SN 2020acat は、母銀河 NGC 1906 のこれまでに測定されている距離の平均値から推定 される距離指数を 33.01 mag とした¹。これらの天体の天の川銀河の吸収係数は、それぞれ 0.064 mag, 0.219 mag である²。母銀河の吸収係数については、一般的に §3.1.2 に示すスペクトルの NaID 吸収線の強さから 判断することが多い [11]。しかしこの 2 つの天体は NaID 吸収線が明瞭に現れていないことから、本研究で は各母銀河での吸収を無視した。

¹NASA/IPAC Extragalactic Database https://ned.ipac.caltech.edu/

図 3.3 は IIb 型超新星の絶対等級の比較の光度曲線で、縦軸は超新星の絶対等級であり、横軸は各超新星 の V バンドの極大からの日付である。SN 2020acat の V バンドの極大等級は-17.5 mag となり、SNe 1993J, 2008ax, 2011dh はそれぞれ-17.3 mag, -17.3mag, -17.1mag 程度となるので、SN 2020acat は比較した超新星 の中で最も明るい。また、SN 2020aatb の V バンドの極大等級は約-16.8 mag となり、IIb 型超新星と比べる と暗いということがわかる。

図 3.4 は各超新星の極大での等級を SN 2020acat に合わせたもので、光度の進化の比較をしやすくするためのものである。縦軸は各超新星の極大からの等級差、横軸は極大からの日付である。SN 2020acat は V バンドの極大後の減光率が 0.05 mag/day で、比較に用いたどの IIb 型超新星も概ね同じであることがわかる。また、増光期に関しては、SN 2020acat は SN 1993J のような shock cooling が確認されず、SN 2008ax によく似ていることがわかる。また、SN 2020aatb は V バンドの極大後の減光率が 0.02 mag/day と明らかに遅いことがわかる。

表 3.1: 比較に用いる IIb 型超新星⁵

超新星	極大日 (V バンド)	赤方偏移	母銀河
SN 1993J	1993年4月19日	-0.000113	M 81
SN 2008ax	2008年3月24日	0.001931	NGC 4490
SN 2011dh	2011年6月21日	0.001638	M 51

我 5.2. 枪利 守极 、 9 交换所数						
超新星	距離指数	牧 (mag)	吸収係数 (mag) ²			
SN 2020acat	32.55		0	0.064		
SN 2020aatb	33.01		0.219			
SN 1993J	27.7	[12]	0.48	[13] [7]		
SN 2008ax	29.91	[14]	0.805	[14] [15]		
SN 2011dh	29.45	[16]	0.228	[17] [18]		

表 3.2: 絶対等級への変換係数

²IRSA NASA/IPAC INFRARED SCIENCE ARCHIVE



図 3.3: IIb 型超新星の絶対等級の比較



図 3.4: IIb 型超新星の光度進化の比較

3.1.2 スペクトル

図 3.5 は、かなた望遠鏡の HOWPol から得られた SN 2020acat の V バンドの極大から 6 日後のスペクト ルと、せいめい望遠鏡の KOOLS-IFU から得られた SN 2020aatb の V バンドの極大から 12 日後のスペクト ル、SNe 2008ax[19]、 1993J[13]、 2011dh[20] の比較図である。SN 2020acat は、スペクトル中に、弱い鉄 (5169Å)、ヘリウム (5876Å)、H α (6563Å)等が見られる。これらのスペクトルの特徴は、IIb 型超新星のス ペクトルの特徴に一致することから、初期の報告と同じく SN2020acat は IIb 型超新星であると推測される [4]。鉄 5169Å の吸収線速度は、SN2020acat は 8200 km/s であるのに対し、SNe 2008ax, 1993J, 2011dh は それぞれ 8900 km/s, 6700 km/s, 6800 km/s となっている。この傾向はヘリウム 5876Å でも同じことが言え、 SN 2020acat の速度は 12000km/s と、この4 天体の中では最も早い。以上より SN 2020acat は他の IIb 型超 新星と比較して、各吸収線速度が比較的速いことが特徴である。また、母銀河の星間吸収の指標である Na I D 吸収線は、SN2020acat は他天体と比べて明瞭には見られない。

SN 2020aatb のスペクトルは、他の IIb 型超新星のスペクトルと比較して、吸収線が少ないことが特徴で ある。また、Hαと Hβ に吸収線は見られず幅の広い輝線を示し、これらの輝線の波長は静止波長とほぼ等 しい。これらのスペクトルの特徴は、IIn 型超新星のスペクトルの特徴に一致する [4]。よって SN 2020aatb は IIn 型超新星であると推測される。IIn 型超新星は外層が剥がれた親星ではないことから、本研究では SN 2020aatb の議論は行わない。



図 3.5: IIb 型超新星のスペクトル比較。

SN 2008ax は V バンドの極大から 1 日前 [19]、SN 1993J は V バンドの極大から 1 日後 [13]、SN 2011dh は V バンドの極大から 4 日前 [20]、SN 2020acat は V バンドの極大から 6 日前、SN 2020aatb は V バンドの極 大から 12 日後のスペクトルである。

3.2 Ic 型超新星

3.2.1 光度曲線

SN 2020adow

図 3.6 に測光結果から得られた B, V, R, I バンドにおける SN 2020adow の光度曲線を示す。縦軸は見かけ の等級で、横軸は V バンドの極大からの日付である。極大となる日付は、SN 2020acat と同様にして求めた (フィットの様子は図 3.13 に表示)。SN 2020adow は V バンドの極大等級は 14.6 mag と推測でき、発見日か ら V バンドの極大まで 11 日である。極大後は 20 日程度で約 0.09 mag/day の減光率で減光した後、減光率 が変化し約 0.015 mag/day で減光している。



図 3.6: SN 2020adow の光度曲線。 天の川銀河吸収係数は補正していない。

他天体との比較

IIb 型超新星の場合と同様に、SN 2020adow においても V バンドにおいて他の Ic 型超新星と比較した 光度曲線を 2 種類作成した。比較には絶対等級を用いる。比較に用いた超新星は光度進化の早さがそれぞ れ普通の SN 2007gr、早い SN 1994I、遅い SN 2004aw であり、見かけの等級として Sternberg Astronomical Institute Supernova Light Curve Catalogue の値を用いている。表 3.3 に比較に用いた超新星の極大日、赤方 偏移、母銀河についてまとめた。極大日については各超新星の最も明るい点での日付を記述した。また、表 3.4 に本研究で用いた各超新星の距離指数と吸収係数をまとめる。SN 2020adow は、母銀河 KUG 0830+278 のこれまでに測定されている距離の平均値から、距離指数を 32.7 mag と推定した³。天の川銀河の吸収係数 は、0.064 mag である²。また SN 2020acat, SN 2020aatb と同様に NaID 吸収線が明瞭ではないため、本研究 では母銀河の吸収を無視した。

図 3.7 は Ic 型超新星の絶対等級の比較の光度曲線である。縦軸は距離指数や吸収係数を補正した絶対等 級になっており、横軸は各超新星の V バンドの極大からの日付である。SN 2020adow の V バンドの極大等 級は-18.1 mag と予想でき、SNe 1994I, 2004aw, 2007gr はそれぞれ-17.6 mag, -18mag, -17.3mag 程度となる ので、SN 2020adow は比較した超新星の中では明るい部類である。

図 3.8 は各超新星の極大での等級を SN 2020adow に合わせたものである。縦軸は各超新星からの極大 からの等級差、横軸は極大からの日付である。SN 2020adow は V バンドの極大後の減光率が 0.09 mag/day

³NASA/IPAC Extragalactic Database https://ned.ipac.caltech.edu/

で、SNe 1994I, 2004aw, 2007gr の減光率がそれぞれ 0.1mag/day, 0.067 mag/day, 0.05 mag/day であり、SN 2020adow は減光がやや早いということがわかる。

表 3.3: 比較に用いる lc 型超新星 ³					
超新星	極大日 (V バンド)	赤方偏移	母銀河		
SN 1994I	1994年4月10日	0.00156	M 51		
SN 2004aw	2004年3月26日	0.016	NGC 1058		
SN 2007gr	2007年8月25日	0.0017	NGC 3997		

超新星	距離指数 (mag)		ē離指数 (mag) 吸収係数 (mag)	
SN 2020adow	32.55		0.0	64
SN 1994I	29.2	[21]	1.288	[21]
SN 2004aw	34.17	[22]	0.384	[22]
SN 2007gr	29.8	[22]	1.041	[22]



図 3.7: Ic 型超新星の絶対等級の比較



図 3.8: Ic 型超新星の絶対等級の比較

3.2.2 スペクトル

図 3.9 は、せいめい望遠鏡の KOOLS-IFU から得られた SN 2020adow の V バンド極大から 5 日後のスペ クトルと、SNe 1994I[23]、2004aw[24]、2007gr[22] の比較図である。SN 2020adow は、スペクトル中に水 素、ヘリウムの吸収線が見られず、弱いケイ素 (6355Å)、酸素 (7774Å)等が見られる。これらのスペクトル の特徴は、Ic 型超新星のスペクトルの特徴に一致することから、SN2020adow は Ic 型超新星であると推測さ れる [4]。ケイ素 6355Å の吸収線速度は、SN2020adow は 10300 km/s であるのに対し、SNe 1994I, 2004aw, 2007gr はそれぞれ 8400 km/s, 9100 km/s, 4300 km/s となっている。この傾向は酸素 7774Å でも同じことが 言え、SN 2020adow の速度は 13700 km/s と、この 4 天体の中では最も早い。このことから、SN 2020adow のスペクトルは他の Ic 型超新星と比較して、各吸収線速度が速いことが特徴である。また、母銀河の星間 吸収の指標である Na I D 吸収線は、SN2020adow は他天体と比べて明瞭には見られない。



図 3.9: Ic 型超新星のスペクトル比較

SN 1994I は V バンドの極大から 1 日後 [23]、SN 2004aw は V バンドの極大から 5 日後 [24]、SN 2007gr は V バンドの極大から 6 日後 [22]、SN 2020adow は V バンド極大から 5 日後のスペクトルである。

3.3 爆発の特性と親星に関する考察

§3.2 で求めた光度曲線、スペクトルの結果から、SNe 2020acat, 2020 adow によく似た超新星と比較する ことにより、爆発の運動エネルギー、イジェクタの質量を見積もる。爆発直後からの良質な観測データが取 れた、SN 2020acat については親星の半径も推測した。また、SN 2020aatb については §3.1.2 で述べたよう に、光度曲線とスペクトルの特徴が IIn 型超新星のものと一致し、水素外層の影響を考慮しない光度曲線モ デルが適用できない可能性があり、ここでの議論では除外することにした。

3.3.1 SN 2020acat

スペクトルの特徴から爆発の光球膨張速度を求め、次に光度曲線のピークのタイムスケールを求める。 これらは、次のセクションで議論する爆発パラメータの推定に必要である。その爆発パラメータの比較対象 として、爆発の特徴が似ており且つよく研究されている SN 2008ax を用いた。

§3.1 で求めた FeII の吸収線速度は SN 2020acat では 8200 km/s, SN 2008ax では 8900 km/s である。また、 HeI の吸収線速度は SN 2020acat では 12000 km/s, SN 2008ax では 8700 km/s である。IIb 型超新星は一般的 に、FeII の吸収線速度を光球膨張速度とする [25]。SN 2020acat と SN 2008ax の速度の比は $\frac{V_{20acat}}{V_{08ax}} \propto 0.92$ となる。 光度曲線のタイムスケールについては各超新星の光度曲線の極大付近を 2 次関数フィットした際の係数 を、光度曲線のタイムスケールとして用いる。図 3.10 は SN 2020acat の V バンドの光度曲線に対し 2 次関 数 (青線) とスプライン補完 (緑線) でフィットした結果である。比較の条件を揃えるために、SN 2008ax で も同様のフィットを行った。これらのフィットの結果、SN 2020acat, SN 2008ax のそれぞれの係数が 0.0070 と 0.0082 となったので、タイムスケールの比は $\frac{\tau_{20acat}}{\tau_{08ax}} \propto 0.85$ となった。



図 3.10: SN 2020acat のフィッティングの様子 緑線はスプライン関数、青線は 2 次関数を表す



図 3.11: SN 2008ax のフィッティングの様子 緑線はスプライン関数、青線は 2 次関数を表す

爆発のエネルギーとイジェクタの質量

爆発のエネルギーとイジェクタの質量は、 $M_e \propto vt^2 \ge E_{sn} \propto M_e v^2$ [1] を変形して得られる、式 3.1, 3.2 から求めることができる。ここで、 M_e はイジェクタの質量、 $E_{sn} \propto M_e v^2$ [1] を変形して得られる、式 3.1, 3.2 から求めることができる。ここで、 M_e はイジェクタの質量、 E_{sn} は爆発のエネルギー、v は光球膨張速度、 τ は爆発のタイムスケールを表す。これらの式を SN 2020acat と SN 2008ax について立て、比をとることによって SN 2020acat の爆発のエネルギーとイジェクタの質量を求める。また、その際に SN 2008ax の爆発エネルギーとして 0.5 × 10⁵¹ erg、イジェクタの質量として 2.9M_☉ を用いた [26]。得られた SN 2020acat のパラメータは爆発エネルギーが 0.28 × 10⁵¹ erg、イジェクタの質量が 1.9M_☉ である。

$$v \propto E_{sn}^{\frac{1}{2}} M_e^{-\frac{1}{2}}$$
 (3.1)

$$\tau \propto \mathrm{E_{sn}^{-4} M_e^{4}} \tag{3.2}$$

親星の半径とその考察

§1.2 で述べたように IIb 型超新星の中には、初期観測により shock breakout と shock cooling が観測され るものがある。図 3.12 は SN 1993J の爆発初期の V バンドでのライトカーブと理論モデルのフィッティン グの様子である。Me はイジェクタの質量、Re は親星の爆発直前の半径、Esn は超新星爆発のエネルギーで ある。Me と Esn は光度曲線における幅に影響を与え (式 3.1, 3.2)、またと Esn は光度と相関があることが知 られている [27]。ここで E_{sn} は~10⁵¹[erg] 程度とされているのに対し、R_e は親星によってかなり大きく異 なる一方、光度が R_a² に比例し寄与が大きいため、shock breakout や shock cooling による光度曲線、つまり 超新星の初期観測を行うことにより親星の半径を推測することができる。親星の半径を求めるには、式 3.3 を用いる。ここで、L は光度、t_p は shock breakout のピークの爆発日からの時間を表す。親星の半径を求め るにあたり、SN 2020acat がかなた望遠鏡で一番最初に V バンドで撮像された日 (世界時 2020 年 12 月 11.8 日 MJD:59194.8)のデータを用いた。明るさは 17.418 mag で、これを絶対等級に変換しポグソンの式(式 3.4) に代入することにより、光度を求めると、3.9×10⁴¹erg/s ということがわかり、これをLとした。ここ で、m_{20acat} は SN 2020acat の絶対等級、m_☉ は太陽の絶対等級である 4.86 mag、L_{20acat} は SN 2020acat の光 度、L_☉ は太陽光度 3.85×10³³ erg/s である。また、SN 2020acat の Last non detction の日付は世界時で 2020 年12月7.6日 (MJD:59190.6) であり、発見日は世界時で2020年12月9.6日 (MJD:59192.6) であるので、そ の中間の日 (MJD:59191.6) を爆発日とすると、用いたデータは爆発日から 2.2 日後のものということがわか り、これを t_p とした。よって、式 3.3 から親星の半径を求めると ~30R_☉ となった。比較対象として用いた SN 2008ax の親星の半径が 30-50R_☉ であり [28]、また shock cooling がはっきりと観測され、親星の半径が 大きいとされる SN 1993J は親星の半径が〜400R_☉ ということから [29]、SN 2020acat は SN 2008ax と同様 に compact な IIb 型超新星であるということを示唆する。SN 2020acat の爆発エネルギーとイジェクタの質 量は、ともに SN 2008ax の値よりも小さく、SN 2008ax よりも小さい初期質量の親星が爆発したと推定さ れる。

$$L = \frac{t_e E_{sn}}{t_p^2}, \qquad t_e = \frac{R_e}{v}$$
(3.3)

$$m_{20acat} - m_{\odot} = -2.5 \log_{10}(\frac{L_{20acat}}{L_{\odot}})$$
(3.4)



図 3.12: SN 1993J の shock breakout/shock cooling 時の光度曲線 [27]

3.3.2 SN 2020adow

SN 2020acat の場合と同様にして、爆発の光球膨張速度とタイムスケールを求める。爆発の特徴が比較的 似ている SN 1994I をスケーリングの対象として用いた。

§3.2 で求めた SiII の吸収線速度は SN 2020adow では 10300 km/s, SN 1994I では 8400 km/s である。また、OI の吸収線速度は SN 2020adow では 9300 km/s, SN 1994I では 8400 km/s である。Ic 型超新星の光球膨張速度は、SiII6355Å の吸収線速度とよく一致するため、これを光球膨張速度として扱った [30]。SN 2020adow と SN 1994I の速度の比は $\frac{V_{20adow}}{V_{20adow}} \propto 1.2$ となる。

と SN 1994 の 定反のには v_{94I} ~ 1.2 C a & 。 光度曲線のタイムスケールについては、SN 2020acat と同様に光度曲線の極大付近を 2 次関数フィットす ることにより求めた。SN 2020adow, SN 1994I の光度曲線をフィットした結果を図 3.13, 3.14 に示し、それ ぞれの係数が 0.011 と 0.014 となった。タイムスケールの比は $\frac{\tau_{20adow}}{\tau_{94I}} \simeq 0.79$ である。



図 3.13: SN 2020adow のフィッティングの様子 緑線はスプライン関数、青線は 2 次関数を表す



図 3.14: SN 1994I のフィッティングの様子 緑線はスプライン関数、青線は 2 次関数を表す

爆発のエネルギー・イジェクタの質量と考察

SN 2020acat と同様にして、式 3.1, 3.2 を用いて求める。その際に SN 1994I の爆発エネルギーとして 1×10^{51} erg、イジェクタの質量として $1.2M_{\odot}$ を用いた [30]。得られた SN 2020adow のパラメータは爆発エ

ネルギーが 1.1×10⁵¹ erg、イジェクタの質量が 0.91M_☉ である。SN 2004aw の爆発エネルギーが 3.5-9×10⁵¹ erg、イジェクタの質量が 3.5-8M_☉ である [24]。SN 2007gr の爆発エネルギーが 1.5-3×10⁵¹ erg、イジェクタ の質量が 1.5-3M_☉ であることを考慮すると [22]、SN 2020adow は Ic 型超新星の中では爆発の規模が比較的 小さいということが示唆される。

第4章 まとめと今後

本研究では、SE SNe として IIb 型超新星である SN 2020acat と Ic 型超新星である SN 2020adow、SN 2020acat の比較として II 型超新星である SN 2020aatb に対してかなた望遠鏡の HOWPol で得られた撮像・ 分光データとせいめい望遠鏡の KOOLS-IFU から得られた分光データからそれぞれの光度曲線とスペクト ルを作成した。SN 2020acat については光度曲線とスペクトルの比較から、IIb 型超新星 SN 2008ax と類似 していることがわかった。スケーリングを行い超新星の爆発エネルギー、イジェクタの質量を求め、親星 の半径を求めた。SN 2020acat の親星の半径は ~30M_☉ ということがわかり、この値は SN 2008ax のもの と近い値となったので、SN 2020acat は SN 2008ax と同じく、compact な IIb 型超新星であると言える。SN 2020adow については、光度進化が比較的早い Ic 型超新星であることがわかり、同じく光度進化が早い Ic 型超新星である SN 1994I とのスケーリングにより爆発エネルギーとイジェクタの質量を求めた。その値 から SN 2020adow は Ic 型超新星の中では比較的小規模な超新星爆発を起こしたと推測される。また、SN 2020aatb については光度曲線とスペクトルの振る舞いから IIn 型超新星の可能性が高いとわかった。

SNe 2020acat, 2020adow, 2020aatb はかなた望遠鏡に取り付けられているもう1つの観測装置である HONIR でも HOWPol と別日に観測が行われている。その日の解析を行うことによって光度曲線をより密に描くこ とができるようになり、精度の高い爆発エネルギーやイジェクタの質量を得ることができる。また、スペク トルについても本研究で用いた日とは別日の KOOLS-IFU での分光データがあり、極大付近以外のフェーズ についても比較を行うことにより、より詳細な爆発の特性を調べることができる。これらの超新星は 2022 年 2 月現在、爆発から 1 年以上経過し、外層が希薄な状態となり、親星のコア付近が観測可能となってい る。この時期の超新星は非常に暗いため、すばる望遠鏡等の大口径の望遠鏡で観測をする必要があるが、放 出物質が十分に希薄となり、中心部のガスも輝線スペクトルで見通せるようになることから、爆発の非対 称性などといった爆発そのものの機構にも迫れるようになるため、初期観測と相補的なデータが得られる。 これらのデータを組み合わせて、大質量星の進化段階の末期や重力崩壊型超新星爆発についての理解を深 めたい。

付録A 観測測光ログ

観測日	MJD	B (mag)	V (mag)	R (mag)	I (mag)
2020/12/10	59193.9			$17.52 {\pm} 0.05$	$17.36 {\pm} 0.05$
2020/12/11	59194.8	$17.95 {\pm} 0.049$	$17.418 {\pm} 0.021$	$17.115 {\pm} 0.018$	$17.087 {\pm} 0.022$
2020/12/12	59195.8	$17.458 {\pm} 0.043$	$16.933 {\pm} 0.025$	$16.594{\pm}0.047$	$16.601 {\pm} 0.07$
2020/12/16	59199.9	$16.118 {\pm} 0.022$	$15.813 {\pm} 0.017$	$15.56{\pm}0.015$	$15.577 {\pm} 0.016$
2020/12/22	59205.8	$15.643 {\pm} 0.027$	$15.277 {\pm} 0.02$	$15.077 {\pm} 0.019$	$15.069 {\pm} 0.018$
2021/1/7	59221.8	$16.886 {\pm} 0.044$	$15.834{\pm}0.035$	$15.574{\pm}0.088$	$15.084{\pm}0.026$
2021/1/13	59227.8	$17.328 {\pm} 0.039$	$16.088 {\pm} 0.022$	$15.602{\pm}0.019$	$15.211 {\pm} 0.016$
2021/1/20	59234.8	$17.636 {\pm} 0.029$	$16.43 {\pm} 0.018$	$15.876 {\pm} 0.015$	$15.457 {\pm} 0.014$
2021/1/25	59239.8	$17.9{\pm}0.066$	$16.585 {\pm} 0.025$	$16.05 {\pm} 0.018$	$15.607 {\pm} 0.014$
2021/2/3	59248.7	$18.25 {\pm} 0.157$	$16.96 {\pm} 0.099$	$16.292 {\pm} 0.046$	$15.762 {\pm} 0.036$
2021/2/19	59264.7	$18.255 {\pm} 0.036$	$17.096 {\pm} 0.024$	$16.532{\pm}0.017$	$16.001 {\pm} 0.017$
2021/3/3	59276.7	$18.5{\pm}0.15$	$17.445 {\pm} 0.069$	$16.818 {\pm} 0.043$	$16.232{\pm}0.031$
2021/3/8	59281.7	$18.524{\pm}0.119$	$17.407{\pm}0.0305$	$16.842{\pm}0.018$	$16.259 {\pm} 0.013$
2021/4/1	59305.6	$18.583 {\pm} 0.045$	$17.69 {\pm} 0.028$	$17.283 {\pm} 0.048$	$16.644 {\pm} 0.013$
2021/4/7	59311.7	$18.698 {\pm} 0.052$	$17.773 {\pm} 0.019$	$17.256{\pm}0.015$	$16.671 {\pm} 0.013$
2021/4/10	59314.6	$18.822{\pm}0.047$	$17.915 {\pm} 0.018$	$17.333 {\pm} 0.012$	$16.736 {\pm} 0.01$
2021/4/15	59319.6	$18.945 {\pm} 0.07$	$17.984{\pm}0.019$	$17.394{\pm}0.014$	$16.946{\pm}0.014$
2021/4/20	59324.6	$18.97 {\pm} 0.076$	$18.085 {\pm} 0.024$	$17.443 {\pm} 0.017$	$16.916{\pm}0.018$

表 A.1: 測光結果 (SN 2020acat)

観測日	MJD	B (mag)	V (mag)	R (mag)	I (mag)
2020/11/23	59176.7	17.451±0.03	$17.056 {\pm} 0.033$	16.727±0.026	16.627±0.027
2020/12/1	59184.7	$17.276 {\pm} 0.071$	$16.649 {\pm} 0.058$	$16.3 {\pm} 0.03$	$16.178 {\pm} 0.034$
2020/12/3	59186.7		$16.57 {\pm} 0.069$	$16.119{\pm}0.017$	$16.005 {\pm} 0.018$
2020/12/4	59187.7	$16.986{\pm}0.098$	$16.601 {\pm} 0.033$	$16.278 {\pm} 0.041$	$16.127 {\pm} 0.047$
2020/12/8	59191.6	$17.133 {\pm} 0.058$	$16.465 {\pm} 0.039$	$16.128 {\pm} 0.027$	$15.972{\pm}0.029$
2020/12/16	59199.6	$17.342{\pm}0.047$	$16.593 {\pm} 0.03$	$16.137{\pm}0.026$	$15.951{\pm}0.026$
2020/12/30	59213.6			$16.349 {\pm} 0.097$	$15.963 {\pm} 0.066$
2021/1/17	59231.6	$17.836 {\pm} 0.082$	$17.195{\pm}0.052$	$16.681 {\pm} 0.037$	$16.336{\pm}0.034$
2021/1/25	59239.5	$18.14{\pm}0.194$	$17.265 {\pm} 0.084$	$16.783 {\pm} 0.064$	$16.47 {\pm} 0.056$
2021/1/31	59245.5	$18.032{\pm}0.089$	$17.518 {\pm} 0.049$	$17.001 {\pm} 0.062$	$16.629 {\pm} 0.053$
2021/2/22	59267.5		$17.552{\pm}0.076$	$17.076 {\pm} 0.056$	$16.628 {\pm} 0.035$

表 A.2: 測光結果 (SN 2020aatb)

表 A.3: 測光結果 (SN 2020adow)

観測日	MJD	B (mag)	V (mag)	R (mag)	I (mag)
2020/12/28	59211.6	$15.709 {\pm} 0.048$	15.353±0.027	15.278±0.025	15.178±0.025
2020/12/30	59213.7	$15.239{\pm}0.092$	$14.916{\pm}0.043$	$14.881{\pm}0.035$	$14.709 {\pm} 0.051$
2021/1/2	59216.6	$15.186{\pm}0.05$	$14.781{\pm}0.023$	$14.66 {\pm} 0.018$	$14.491 {\pm} 0.016$
2021/1/13	59227.9	$16.309 {\pm} 0.035$	$15.34{\pm}0.019$	$15.028 {\pm} 0.017$	$14.672 {\pm} 0.017$
2021/1/14	59228.7	$16.382{\pm}0.021$	$15.414{\pm}0.013$	$15.096{\pm}0.013$	$14.731{\pm}0.013$
2021/1/17	59231.6	$16.664 {\pm} 0.04$	$15.635 {\pm} 0.022$	$15.28{\pm}0.018$	$14.875 {\pm} 0.018$
2021/1/25	59239.5	$17.287 {\pm} 0.069$	$16.266 {\pm} 0.027$	$15.931{\pm}0.023$	$15.401{\pm}0.018$
2021/2/3	59248.6	$17.57 {\pm} 0.037$	$16.682{\pm}0.023$	$16.331 {\pm} 0.023$	$15.749 {\pm} 0.019$
2021/2/22	59267.6	$17.952{\pm}0.115$	$17.155 {\pm} 0.052$	$16.896 {\pm} 0.048$	$16.244 {\pm} 0.038$
2021/3/14	59287.6	$18.172 {\pm} 0.073$	$17.563 {\pm} 0.046$	$17.252{\pm}0.039$	$16.783 {\pm} 0.052$
2021/4/2	59306.6	$18.47 {\pm} 0.069$	$17.904{\pm}0.05$	$17.552{\pm}0.051$	$16.979 {\pm} 0.045$
2021/4/10	59314.6	$18.503 {\pm} 0.051$	$18.167 {\pm} 0.05$	$17.674 {\pm} 0.053$	$17.12 {\pm} 0.044$
2021/4/11	59315.5	$18.564{\pm}0.068$	$18.154{\pm}0.046$	$17.682 {\pm} 0.048$	$17.164 {\pm} 0.047$
2021/4/24	59328.5		$18.405 {\pm} 0.068$	$17.96 {\pm} 0.059$	$17.425 {\pm} 0.1$
2021/5/5	59339.5	$18.817 {\pm} 0.08$	$18.391{\pm}0.072$		



本研究を行うにあたり、多くの人に助けていただきました。まず、指導教官である川端先生には、お忙 しい中でも週に1回可視赤外線観測に関するゼミを開いていただいたり、またご自身が大変な状況下であっ ても提出したスライドや論文に速やかに目を通してくださり、丁寧な指摘をたくさんいただきました。同じ く指導教官である中岡先生からは、超新星についてや実際に手を動かしながら解析の方法について丁寧に 教えてくださり、特に研究や論文執筆に関しては具体的にいつまでに何を行うかを示してくださったので、 中々火が点かず進捗が遅い自分でも研究を進められたと思っています。次に小部屋のみなさん、いつ行って も誰か必ずいらしたおかげで、この時勢の中で孤独を感じず研究を進めることができました。ありがとう ございました。以上、拙い文章ですが、これを謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] シリーズ現代の天文学7野本憲一・定金晃三・佐藤勝彦編 「恒星」 2009. 日本評論社
- [2] Dr. Hannu Karttunen, et al. 「Fundamental Astronomy fifth edition」 2006 Spinger
- [3] 物理の世界地球と宇宙の物理3野本憲一編「元素はいかにつくられたか」 2007. 岩波書店
- [4] AlexeiV. Filippenko 1997, Annu. Rev. Astron. Astrophy 35:309-55
- [5] K. Maeda, et al. 2019, Nature Astronomy
- [6] Detelef Schonberner 1983, The Astrophysical Journal, 272:708-714
- [7] Richmond, et al. 1996, The Astrophysical Journal, 112 732-741
- [8] Eli Waxman & Boaz Katz 2017
- [9] C. Barbarino, et al. 2017, MNRAS 471 2463-2480
- [10] 岡村定矩編 「天文学辞典」日本評論社
- [11] Schlafy, E. F., & Finkbeiner, D. P. 2011, ApJ, 737, 103
- [12] P. J. Benson, et al. 1994, The Astrophysical Journal, 107: 1453-1460
- [13] Barbon, et al. 1995, Astronomy and Astrophysics Supplement, 110 513-519
- [14] A. Pastorello, et al. 2008, Not. R. Astron. Soc. 389, 955–966
- [15] Tsvetkov, et al. 2009, Variable Stars(Peremennye Zvezdy), 29
- [16] W. Murphy, et al. 2011, The Astrophysical Journal, 742:L4-L9
- [17] Sahu, et al. 2013, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 433 2-22
- [18] Brown, et al. 2014
- [19] S. Taubenberger, et al. 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 413 2140-2156
- [20] M. Ergon, et al. 2013, A&A 562 1-38
- [21] Kohichi Iwamoto, et al. 1994, The Astrophysical Journal, 437: L115-L118
- [22] S. Valenti, et al. 2008, The Astrophysical Journal, 673: L155–L158

- [23] Alejandro Clocchiatti, et al. 1996, The Astrophysical Journal, 462: 462-468
- [24] S. Taubenberger, et al. 2006, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 371 1459-1477
- [25] Peter Nugent, et al. 2006, The Astrophysical Journal, 645:841-850
- [26] P. W. A. Roming, et al. 2009, The Astrophysical Journal, 704:L118-L123
- [27] Anthony L. Piro 2015, The Astrophysical Journal Letters, 808:L51(5pp)
- [28] Gaston Folatelli, et al. 2015, The Astrophysical Journal, 811:147(13pp)
- [29] Timothy R. Young, E. Baron & David Branch 1995, The Astrophysical Journal, 449:L51-L54
- [30] D. N. Sauer, et al. 2006, Mon. Not. R. Astron. Soc. 369 1939-1948