超新星SN1999byの CCD 測光観測

田辺健茲・加藤伸彦*・山本勲**

岡山理科大学総合情報学部生物地球システム学科

*岡山理科大学工学研究科修士課程情報工学専攻

**岡山理科大学工学部情報工学科 (1999年11月4日 受理)

要約

我々のグループは、1999年4月30日に大熊座の銀河 NGC2841 の中に発見された 超新星 SN1999by を、岡山理科大学 21 号館屋上に設置してある田辺研究室の観測室の口径 21 cm Cassegrain 望遠鏡に冷却 CCD を取付けて BVRI フィルターで約3 γ 月にわたって測光観測を行なった。その結果、得られた光度曲線の形から I 型超新星、新しい分類では I b 型ではないかと推定される。

1. 序論

超新星(supernova、略してSN)は、肉眼で見える明るいものすなわち我々の銀河系のなかで起こったものとしては、1604 年のいわゆる Kepler の新星以後絶えて久しい。例外的に南半球で観測された大マゼラン雲(Large Magellanic Cloud)中の SN1987A が 3 等級で裸眼でも見えたことがある。この超新星は銀河系外ではあったが近距離であったため、さまざまな観測がなされ、ニュートリノの検出など大きな収穫を得た。それとともに、それ以前の超新星に対する 1938年の Zwicky の古典的な分類 1 も見直されることになった。このころから、銀河系外の超新星の捜索が主としてアマチュア観測家によって行なわれるようになり、年間の発見個数もそれ以前の 10 倍を越えるようになってきた。そのような状況のもとで、今回イギリスのアマチュア観測家たちその他 2 によってこの超新星が、比較的近距離と考えられる銀河 NGC2841 中に発見されたのである。

超新星のうち、従来 I 型とよばれ、新しい分類 3 4 では I a 型とよばれるものは、その極大の絶対等級が等しいと考えられている。ということは、このタイプの超新星は距離指標(distance indicator)として用いることが可能である。すなわち、光度曲線を測光観測から求め、もしそれが I a 型ならばその極大等級と絶対等級との差から Pogson の関係式を用いてそれが出現した銀河の距離を算出することが可能ある。そのような観点からもこの超新星の光度曲線をもとめ、その型をきめることは有意義であると考えられる。

このような測光観測は、割り当て観測時間 (machine time) の限られた国立天文台等では殆ど不可能である。その一方でこれが比較的明るい超新星であるためそれほど大口径を必要としない。今回の観測では、その半年前に完成した自前の観測施設、装置を使用した。

この観測システムの性能評価、言い換えれば変換係数についての報告は別途行う予定であるが、今回の観測は超新星の測光観測にこのシステムが有効であることを示すという点においても意義があると考えられる。

本論文の2章では、用いた装置等の紹介、3章では測光データについての説明、4章ではデータの整約の方法について、5章では得られた光度曲線およびそれにに対する解釈を述べる。最後の6章では今後の問題、特にシステムの改良に関することがらについての考察を行う。

2. 観測装置と方法

我々が使用した観測機器、装置の概要は次のとおりである:

(I) 望遠鏡

口径21cm F12、Cassegrain (Dall-Kirkham) 型 (Takahashi 製)

(Ⅱ) 駆動系

ドイツ式赤道儀(EM-200; Takahashi 製)、 自動導入機能付き

(Ⅲ) 観測装置

冷却 (Peltier 2 段) CCD ST-6 (アメリカ SBIG 社製)
Pixel 数 375×242、Pixel サイズ 2 3 μ × 2 7 μ
フィルター: Johnson-Cousins (Bessell) CCD用広帯域フィルター

(IV) 使用コンピュータ

Endeavor AT3600 (CCD 制御ならびにデータ取得用) PC9800F (自動導入用)

これらのうち、I~Ⅲは岡山理科大学 21 号館屋上のドーム内、IVは同館 7 階(最上階)の研究室に設置してある。

3. 測光データ

天文用冷却CCDによる生データは、

図1のような画像(frame)である。 画面の広さは12分角×9分角である。 このような画像をB(Blue 青)、V (Visual 実視、黄緑)、R(Red 赤)、 I(Infrared 赤外) およびN(フィル ター無し)で1日に一回撮像した。日 付は西暦およびJD(Julian Date、 ユリウス日)で記録している。観測は 5月6日から7月6日(日本標準時)の

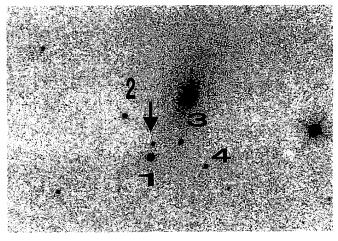


図 1 大熊座の銀河 NGC 2 8 4 1 に出現した超新星 SN1999by。1~4は測光のための比較星。

あいだで17日行った (Appendix I の J D 欄参照)。なお、この画像は dark frame (熱雑音)を引き、flat field で割った (感度むらの補正をした) ものである。

4. データの整約

データの処理のうち 1 次処理(dark frame を引き、flat field で割る)はCCDカメラに付属のソフト、CCDOPSを使用した。測光値の読みとりには、世界共通の天文データ処理ソフト IRAF(The Image Reduction and Analysis Facility)のパッケージAPPHOT(Aperture Photometry)を用いて行った。すなわち、目的星(この場合超新星)を含む円(aperture)をとり、その中に含まれる画素の記録したカウント数と、近傍の同じ半径の星を含まない aperture のカウント数との差をとる。この値を等級に換算したもの(およびその誤差)が Appendix の SN1999by および error 欄である。このときカウント数の差がゼロは等級値で26等に取ってある。

超新星の光度変化を見るためには、光度変化をしない恒星(foreground にある)を選び、その測光値(等級)との差を求めなければならない。そのため、図1の画面にある4個の恒星(比較星 $1\sim4$)の測光値も併せて求めた(Appendix の比較星 $1\sim4$ の欄)。

5. SN1999byの光度曲線

上で述べたような手順で求めた目的星(超新星)と比較星との等級差の時間変化すなわち光度曲線が図 $2\sim3$ である。このうち図2はフィルター無し(N)で、最も精度が良い。それは追尾精度等の関係で、露出(積分)時間を180秒に制限したため、フィルターあり(特にBフィルターはCCDの感度特性とずれている)に比べてカウント数を稼げるからである。参考のため、図3にそれぞれB, V, R, I を用いた光度曲線を示した。

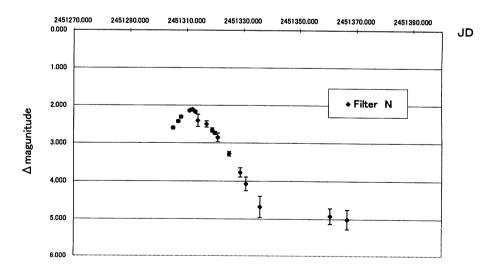


図 2 N-Filter(フィルター無し)の場合の SN1999by の光度曲線。横軸は JD (ユリウス日)、 縦軸は Appendix のΔm1をプロットしたもの。

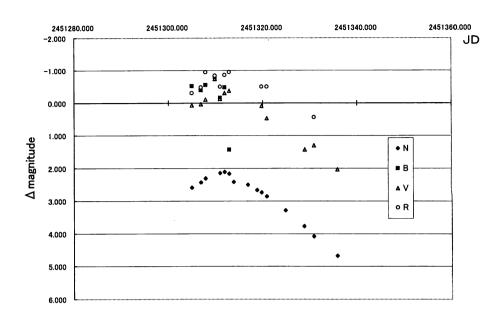


図 3 SN1999by のフィルターごとの光度曲線。N は No-Filter (フィルター無し)

6. 結論と今後の課題

図 2 の光度曲線から、この超新星は I 型であることは明らかであるが、新しい分類により $^{3)4)}$ I a か I b かを決定するには分光観測のデータを必要とする。ただ、NGC2841 の距離が比較的精度よく決まっていることから、この超新星の極大光度(絶対等級)は高々 1 8 等級であることがわかるので、 I b 型と推定できる。

今回の観測で、次の2つの問題点が判明した。

- (1) 追尾精度が3分を越えると悪くなる。
- (2) フィルターによってピントがずれる。

これらの問題点のうち(1)は原理的にはオートガイダーを取り付けることで解決できる。(2)は、その都度ピント合わせを行うか、コリメーターを制作してその中にフィルターターレットを入れるようにすれば、ピント合わせの必要がなくなると考えられる。以上のような改良を施せば、今後この種の観測をより精度よく行えると思われる。

謝辞

今回の観測ならびにデータ処理にあたっては、田辺研究室の学生、西本仁美さんならびに 太田深幸さんに大変お世話になりました。IRAFのAPPHOTの使用に関しては総合 情報学部の伊代野淳博士にご教示いただきました。また、この超新星に関する情報を提供 してくださった総合研究大学院大学(国立天文台野辺山)の中島淳一さんに感謝します。 最後になりましたが、今回使用した観測施設の屋上への設置を許可いただいた総合情報学 部のスタッフの皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- (1) F. Zwicky Phys.Rev. 53,1019 (1938)
- (2) IAU Circular No.7156 (1999.4.30)
- (3) J.C.Wheeler, Supernovae, Jerusalem Winter school for Theoretical Physics Vol.6(1990), World Scientific
- (4) J.C.Wheeler and R.P.Harkness, Type I Supernovae, Stellar Astrophysics(ed.R.J.Taylor), 157-248, (1992)

CCD Photometric Observation of the Supernova SN1999by

Kenji TANABE, Nobuhiko KATO* and Isao YAMAMOTO**

 $Department\ of\ Bioshere-Geosphere\ System,\ Faculty\ of\ Informatics$

*Graduate School of Engineering

**Department of Information and engineering, Faculty of Engineering

Okayama University of Science

Ridai-cho 1-1, Okayama 700-0005 Japan

(Received November 4, 1999)

Photometric observation of the Supernova SN1999by discovered in the galaxiy NGC2841 was performed for three months. Our device is an astronomical CCD camera and BVRI filter attached to the 21cm Cassegrain type telescope on the top of a building of the Okayama University of Science. From the obtained light curve, this supernova is suspected to be that of type Ib.

Appendices

Appendix 1

	pendix i	CNITOCOL		ル数日1		나 하 된 o	OKK -	- 比較見っ	0222	比較星4	AFFOR
Filter N	JD	SN1999by	error	比較星1	error	比較星2	error	比較星3	error		error
l	2451305.000	21.749	0.030	19.149	0.005	21.579	0.023	21.887	0.042	22.152	0.039
	2451306.917	21.675	0.028	19.248	0.006	21.653	0.028	21.854	0.035	22.355	0.049
	2451307.875	21.901	0.032	19.589	0.006	22.006	0.037	22.294	0.056	22.582	0.065
	2451310.896	21.254	0.019	19.112	0.005	21.453	0.019	21.771	0.031	22.246	0.034
	2451311.896	21.593	0.026	19.480	0.006	21.928	0.031	22.150	0.041	22.491	0.050
- 1	2451312.917	21.799	0.029	19.629	0.006	22.009	0.033	22.337	0.051	22.784	0.064
	2451313.854	23.465	0.146	21.059	0.018	23.342	0.136	24.016	0.271	24.054	0.262
	2451316.875	22.962	0.075	20.459	0.010	22.664	0.060	23.210	0.092	23.752	0.175
	2451318.875	22.331	0.049	19.670	0.007	21.976	0.036	22.402	0.055	22.922	0.076
	2451319.875	21.861	0.033	19.122	0.005	21.528	0.022	21.803	0.034	22.260	0.043
	2451320.854	23.545	0.100	20.690	0.014	23.177	0.071	23.415	0.090	24.045	0.158
	2451324.875	22.324	0.053	19.037	0.005	21.455	0.024	21.728	0.033	22.139	0.042
	2451328.875	23.077	0.115	19.302	0.005	21.771	0.033	22.026	0.042	22.421	0.053
	2451330.854	23.710	0.171	19.637	0.007	22.085	0.048	22.372	0.061	22.796	0.074
	2451335.875	24.237	0.276	19.557	0.006	21.940	0.049	22.329	0.058	22.940	0.086
	2451360.854	24.270	0.201	19.348	0.005	21.772	0.023	22.027	0.033	22.297	0.044
	2451366.854	24.363	0.250	19.356	0.005	21.729	0.022	22.033	0.035	22.455	0.039
Filter B	JD	SN1999by	error	比較星1	error	比較星2	error	比較星3	error	比較星4	error
	2451305.000	24.072	0.147	21.890	0.024	25.088	0.360	24.578	0.232	25.201	0.385
	2451306.917	23.926	0.133	21.789	0.024	24.237	0.157	24.319	0.198	25.129	0.405
	2451307.875	24.600	0.251	22.336	0.037	24.888	0.278	25.145	0.341	25.053	0.366
	2451309.875	22.947	0.059	21.083	0.014	23.682	0.112	23.729	0.135	24.260	0.195
	2451310.896	24.244	0.152	21.761	0.022	24.428	0.171	24.397	0.155	25.045	0.306
1		1	0.120	22.292	0.001	05 202	0.426	24.679	0.230		
	2451311.896	24.196	0.139	22.232	0.031	25.393	0.420	24.079	0.230		
	2451311.896 2451312.917	24.196 26.648	1.426	22.292	0.031	25.393 25.487	0.420	25.219	0.390		
	1	I									
Filter V	1	I								比較星4	error
Filter V	2451312.917	26.648	1.426	22.518	0.038	25.487	0.462	25.219	0.390	比較星4 23.602	error 0.107
Filter V	2451312.917 JD	26.648 SN1999by	1.426 error	22.518	0.038 error	25.487	0.462 error	25.219 比較星3	0.390 error		
Filter V	JD 2451305.000	26.648 SN1999by 23.080	1.426 error 0.067	22.518 比較星1 20.586	0.038 error 0.010	25.487 比較星2 23.003	0.462 error 0.061	25.219 比較星3 23.075	0.390 error 0.072	23.602	0.107
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917	26.648 SN1999by 23.080 23.083	1.426 error 0.067 0.072	比較星1 20.586 20.647	0.038 error 0.010 0.010	比較星2 23.003 23.039	0.462 error 0.061 0.059	比較星3 23.075 23.075	0.390 error 0.072 0.073	23.602 23.691	0.107 0.114
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460	1.426 error 0.067 0.072 0.093	比較星1 20.586 20.647 21.054	0.038 error 0.010 0.010 0.014	比較星2 23.003 23.039 23.562	0.462 error 0.061 0.059 0.108	比較星3 23.075 23.075 23.829	0.390 error 0.072 0.073 0.137	23.602 23.691 23.862	0.107 0.114 0.143
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112	比較星3 23.075 23.075 23.829 23.729	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135	23.602 23.691 23.862 24.245	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904	0.067 0.072 0.093 0.059 0.053	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.010	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053	比較星3 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113
Filter V	JD 2451305.000 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896 2451311.896	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023	0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.010 0.012	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212 23.719 23.542 23.242	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.112
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896 2451311.896 2451312.917	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.223	error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.010 0.012 0.014	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.068	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212 23.719 23.542 23.242 23.318	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.112
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896 2451311.896 2451312.917 2451319.875	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.223 23.162	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.065	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.010 0.012 0.014 0.010	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595 23.071	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212 23.719 23.542 23.242	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.112
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896 2451311.896 2451312.917 2451319.875 2451320.875	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.223 23.162 23.694	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.065 0.116	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.010 0.012 0.014 0.010 0.012	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595 23.071 23.210	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.068	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212 23.719 23.542 23.242 23.318	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.112
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896 2451311.896 2451312.917 2451319.875 2451320.875 2451328.917	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.223 23.162 23.694 24.785	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.065 0.116 0.331	上較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.010 0.012 0.014 0.010 0.012 0.014	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.068 0.097	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212 23.719 23.542 23.242 23.318 23.831	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.112 0.111
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896 2451311.896 2451312.917 2451319.875 2451320.875 2451328.917 2451330.854	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.223 23.162 23.694 24.785 24.712	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.116 0.331 0.272	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.010 0.012 0.014 0.010 0.012 0.014 0.010	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.408	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.068 0.097 0.087	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212 23.719 23.542 23.242 23.318 23.831 23.635	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.112 0.111 0.155 0.149
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896 2451311.896 2451312.917 2451312.875 2451320.875 2451328.917 2451330.854 2451335.875	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.223 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.116 0.331 0.272	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.010 0.012 0.014 0.010 0.012 0.014 0.010	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.408	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.068 0.097 0.087	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212 23.719 23.542 23.242 23.318 23.831 23.635	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.112 0.111 0.155 0.149
Filter V	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896 2451311.896 2451312.917 2451312.875 2451320.875 2451328.917 2451330.854 2451335.875	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.223 23.162 23.694 24.785 24.712	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.065 0.116 0.331 0.272 0.356	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.010 0.012 0.014 0.010 0.012 0.014 0.010	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.408 23.048	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.068 0.097 0.087 0.056	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212 23.719 23.542 23.242 23.318 23.635 23.399	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451311.896 2451311.896 2451312.917 2451312.875 2451320.875 2451328.917 2451335.875 JD 2451305.000	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.223 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079 SN1999by 22.924	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.065 0.116 0.331 0.272 0.356 error 0.056	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.010 0.012 0.014 0.013 0.011 error	比較星2 23,003 23,039 23,562 23,682 23,028 23,316 23,595 23,071 23,210 23,355 23,048 23,048	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.068 0.097 0.087 0.056	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.719 23.542 23.242 23.318 23.635 23.399 比較星3	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451310.896 2451311.896 2451312.917 2451312.875 2451320.875 2451328.917 2451335.875 JD 2451305.000 2451306.917	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079 SN1999by 22.924 22.847	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.065 0.116 0.331 0.272 0.356 error 0.056 0.061	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.058 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655 比較星1 20.298 20.282	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.010 0.012 0.014 0.013 0.011 error 0.008	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.048 23.048	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.068 0.097 0.087 0.056 error 0.048	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.719 23.542 23.242 23.318 23.635 23.399 比較星3	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096 error 0.069	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777 比較星4 23.212	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451311.896 2451311.896 2451312.917 2451319.875 2451320.875 2451328.917 2451330.854 2451335.875 JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079 SN1999by 22.924 22.847 22.960	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.116 0.331 0.272 0.356 error 0.056 0.061 0.073	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655 比較星1 20.298 20.282 20.688	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.010 0.012 0.014 0.013 0.011 error 0.008 0.008	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.048 23.048 比較星2 22.634 22.652 22.983	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.087 0.056 error 0.048 0.050	比較星3 23.075 23.075 23.829 23.729 23.719 23.542 23.318 23.831 23.635 23.399 比較星3 22.966 22.942	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096 error 0.069 0.062	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777 比較星4 23.212 23.316	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126 error 0.074 0.086
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451311.896 2451311.896 2451312.917 2451320.875 2451320.875 2451335.875 JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079 SN1999by 22.924 22.847 22.960 22.843	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.065 0.116 0.331 0.272 0.356 error 0.056 0.061 0.073 0.063	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.058 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655 比較星1 20.298 20.282 20.688 20.648	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.012 0.014 0.013 0.011 error 0.008 0.008 0.012	比較星2 23,003 23,003 23,562 23,682 23,028 23,316 23,595 23,071 23,210 23,355 23,048 23,048 比較星2 22,634 22,652	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.087 0.056 error 0.048 0.050 0.065	比較星3 23.075 23.075 23.829 23.729 23.719 23.542 23.242 23.318 23.831 23.635 23.399 比較星3 22.966 22.942 23.269	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096 error 0.069 0.062 0.086	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777 比較星4 23.212 23.316 23.900	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126 error 0.074 0.086 0.148
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451311.896 2451311.896 2451312.917 2451319.875 2451320.875 2451328.917 2451330.854 2451335.875 JD 2451305.000 2451306.917 2451309.875 2451309.875 2451310.896	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079 SN1999by 22.924 22.847 22.960	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.116 0.331 0.272 0.356 error 0.056 0.061 0.073	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655 比較星1 20.298 20.282 20.688	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.010 0.012 0.014 0.013 0.011 error 0.008 0.008 0.012 0.011	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.048 23.048 比較星2 22.634 22.652 22.983 23.062	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.087 0.056 error 0.048 0.050 0.065 0.068	比較星3 23.075 23.075 23.829 23.729 23.719 23.542 23.242 23.318 23.635 23.399 比較星3 22.966 22.942 23.269 23.280	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096 error 0.069 0.062 0.086 0.089	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777 比較星4 23.212 23.316 23.900 23.683	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126 error 0.074 0.086 0.148 0.121
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451311.896 2451311.896 2451312.917 2451320.875 2451320.875 2451328.917 2451330.854 2451335.875 JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451308.96 2451310.896 2451311.896	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079 SN1999by 22.924 22.847 22.960 22.843 22.760	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.116 0.331 0.272 0.356 error 0.056 0.061 0.073 0.063 0.054	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655 比較星1 20.298 20.282 20.688 20.648 20.289	0.038 error 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.012 0.014 0.013 0.011 error 0.008 0.008 0.012 0.011 0.008	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.028 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.048 23.048 比較星2 22.634 22.652 22.983 23.062 22.657	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.087 0.056 error 0.048 0.050 0.065 0.068 0.048	比較星3 23.075 23.075 23.829 23.729 23.719 23.542 23.242 23.318 23.831 23.635 23.399 比較星3 22.966 22.942 23.269 23.280 23.023	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096 error 0.069 0.062 0.086 0.089 0.067	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777 比較星4 23.212 23.316 23.900 23.683 23.255	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126 error 0.074 0.086 0.148 0.121 0.072
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451311.896 2451312.917 2451320.875 2451320.875 2451328.917 2451330.854 2451335.875 JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451310.896 2451311.896 2451311.896	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079 SN1999by 22.924 22.847 22.960 22.843 22.760 22.744	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.116 0.331 0.272 0.356 error 0.056 0.061 0.073 0.063 0.054 0.050	比較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655 比較星1 20.298 20.282 20.688 20.648 20.289 20.601	0.038 error 0.010 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.012 0.014 0.013 0.011 error 0.008 0.008 0.012 0.011	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.048 上較星2 22.634 22.652 22.983 23.062 22.657 22.947	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.087 0.056 error 0.048 0.050 0.065 0.068 0.048 0.057	比較星3 23.075 23.075 23.829 23.729 23.719 23.542 23.242 23.318 23.831 23.635 23.399 比較星3 22.966 22.942 23.269 23.280 23.023 23.357	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096 error 0.069 0.062 0.086 0.089 0.067 0.092	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777 比較星4 23.212 23.316 23.900 23.683 23.255 23.588	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126 error 0.074 0.086 0.148 0.121 0.072 0.104
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451311.896 2451311.896 2451312.917 2451320.875 2451320.875 2451328.917 2451330.854 2451335.875 JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451308.96 2451310.896 2451311.896	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079 SN1999by 22.924 22.847 22.960 22.843 22.760 22.744 22.917	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.116 0.331 0.272 0.356 error 0.056 0.061 0.073 0.063 0.054 0.050 0.060	上較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655 比較星1 20.298 20.282 20.688 20.289 20.601 20.703	0.038 error 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.012 0.014 0.013 0.011 error 0.008 0.008 0.012 0.011 0.008 0.011 0.0011	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.048 上較星2 22.634 22.652 22.983 23.062 22.657 22.947 22.091	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.087 0.056 error 0.048 0.050 0.065 0.068 0.048 0.057 0.063	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.719 23.542 23.242 23.318 23.635 23.399 比較星3 22.966 22.942 23.269 23.280 23.023 23.357 23.297	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096 error 0.069 0.062 0.086 0.089 0.067 0.092 0.079	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777 比較星4 23.212 23.316 23.900 23.683 23.255 23.588 23.856	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126 error 0.074 0.086 0.148 0.121 0.072 0.104 0.121
	JD 2451305.000 2451306.917 2451307.875 2451309.875 2451311.896 2451311.896 2451312.917 2451320.875 2451328.917 2451330.854 2451335.875 JD 2451305.000 2451306.917 2451309.875 2451310.896 2451311.896 2451311.896 2451312.917 2451319.875	26.648 SN1999by 23.080 23.083 23.460 22.947 22.904 23.023 23.223 23.162 23.694 24.785 24.712 25.079 SN1999by 22.924 22.847 22.960 22.843 22.760 22.744 22.917 22.888 22.945	1.426 error 0.067 0.072 0.093 0.059 0.053 0.068 0.075 0.116 0.331 0.272 0.356 error 0.056 0.061 0.073 0.063 0.054 0.050 0.060 0.056	上較星1 20.586 20.647 21.054 21.083 20.585 20.936 21.078 20.551 20.668 20.955 20.825 20.655 比較星1 20.298 20.282 20.688 20.289 20.601 20.703 20.250	0.038 error 0.010 0.014 0.014 0.012 0.014 0.012 0.014 0.013 0.011 error 0.008 0.008 0.012 0.011 0.008 0.011 0.009	比較星2 23.003 23.039 23.562 23.682 23.316 23.595 23.071 23.210 23.355 23.048 上較星2 22.634 22.652 22.983 23.062 22.657 22.947 22.091 22.574	0.462 error 0.061 0.059 0.108 0.112 0.053 0.076 0.106 0.067 0.087 0.056 error 0.048 0.050 0.065 0.068 0.048 0.057 0.063 0.074	比較星3 23.075 23.075 23.075 23.829 23.729 23.212 23.719 23.542 23.242 23.318 23.635 23.399 比較星3 22.966 22.942 23.269 23.280 23.023 23.357 23.297 22.878	0.390 error 0.072 0.073 0.137 0.135 0.069 0.113 0.094 0.070 0.085 0.130 0.108 0.096 error 0.069 0.062 0.086 0.089 0.067 0.092 0.079 0.058	23.602 23.691 23.862 24.245 23.773 24.162 24.246 23.749 23.677 24.071 23.980 23.777 比較星4 23.212 23.316 23.900 23.683 23.255 23.588 23.856 23.374	0.107 0.114 0.143 0.194 0.113 0.176 0.174 0.111 0.155 0.149 0.126 error 0.074 0.086 0.148 0.121 0.072 0.104 0.121 0.081

Appendix 2

N	JD	Δm1	error	Δm2	error	Δm3	error	Δm4	error
	2451305.000	2.600	0.035	0.170	0.053	-0.138	0.072	-0.403	0.069
	2451306.917	2.427	0.034	0.022	0.056	-0.179	0.063	-0.680	0.077
	2451307.875	2.312	0.038	-0.105	0.069	-0.393	0.088	-0.681	0.097
	2451310.896	2.142	0.024	-0.199	0.038	-0.517	0.050	-0.992	0.053
	2451311.896	2.113	0.032	-0.335	0.057	-0.557	0.067	-0.898	0.076
	2451312.917	2.170	0.035	-0.210	0.062	-0.538	0.080	-0.985	0.093
	2451313.854	2.406	0.164	0.123	0.282	-0.551	0.417	-0.589	0.408
	2451316.875	2.503	0.085	0.298	0.135	-0.248	0.167	-0.790	0.250
	2451318.875	2.661	0.056	0.355	0.085	-0.071	0.104	-0.591	0.125
	2451319.875	2.739	0.038	0.333	0.055	0.058	0.067	-0.399	0.076
	2451320.854	2.855	0.114	0.368	0.171	0.130	0.190	-0.500	0.258
	2451324.875	3.287	0.058	0.869	0.077	0.596	0.086	0.185	0.095
	2451328.875	3.775	0.120	1.306	0.148	1.051	0.157	0.656	0.168
	2451330.854	4.073	0.178	1.625	0.219	1.338	0.232	0.914	0.245
	2451335.875	4.680	0.282	2.297	0.325	1.908	0.334	1.297	0.362
	2451360.854	4.922	0.206	2.498	0.224	2.243	0.234	1.973	0.245
	2451366.854	5.007	0.255	2.634	0.272	2.330	0.285	1.908	0.289
		5.557	5.200		J, _	=:500	0.200	1.500	0.200
В	JD	Δm1	error	Δm2	error	Δ m3	error	Δm4	error
	2451305.000	2.182	0.171	-1.016	0.507	-0.506	0.379	-1.129	0.532
	2451306.917	2.137	0.177	-0.311	0.290	-0.393	0.379	-1.129	1
	2451300.917	2.137	0.137	-0.288	0.529	-0.545	0.592	-0.453	0.538 0.617
	2451307.875	1.864	0.288	-0.288 -0.735	0.329	-0.782	0.592	-0.453 -1.313	
	2451309.875	2.483	0.073	-0.735 -0.184	0.171	-0.782	0.194		0.254
	2451310.896	1.904	0.174	-0.18 4 -1.197	0.565			-0.801	0.458
	2451312.917	4.130	1.464	1.161	1.888	-0.483 1.429	0.369 1.816		
	2431312.917	4.130	1.404	1.101	1.000	1.425	1.010		
V	JD	Δm1	error	Δm2	error	Δ m3	error	Δm4	error
<u> </u>	2451305.000	2.494	0.077	0.077	0.128	0.005	0.139	-0.522	0.174
	2451306.917	2.436	0.082	0.044	0.131	0.008	0.145	-0.608	0.174
	2451307.875	2.406	0.107	-0.102	0.201	-0.369	0.143	-0.402	0.186
	2451309.875	1.864	0.073	-0.735	0.171	-0.782	0.194	-1.298	0.253
	2451310.896	2.319	0.063	-0.124	0.171	-0.308	0.122	-0.869	0.255
	2451310.896	2.087	0.080	-0.293	0.144	-0.696	0.122	-1.139	0.100
	2451312.917	2.145	0.089	-0.372	0.144	-0.319	0.169	-1.023	0.244
	2451319.875	2.611	0.035	0.072	0.132	-0.080	0.105	-0.587	0.249
	2451319.875	3.026	0.073	0.484	0.132	0.376	0.133	0.017	0.177
	2451328.917	3.830	0.125	1.430	0.428	0.954	0.461	0.017	0.486
	2451330.854	3.887	0.343	1.304	0.428	1.077	0.380	0.714	0.486
	2451335.875	4.424	0.263	2.031	0.339	1.680	0.452	1.302	0.421
	2401000.070	7.727	0.007	2.001	0.412	1.000	0.402	1.502	0.402
R	JD	Δm1	error	Δm2	error	Δ m3	error	Δm4	error
	2451305.000	2.626	0.064	0.290	0.104	-0.042	0.125	-0.288	0.130
	2451306.917	2.565	0.069	0.195	0.111	-0.095	0.123	-0.469	0.130
	2451300.917	2.272	0.085	-0.023	0.111	-0.309	0.123	-0.469	0.147
	2451307.875	2.195	0.074	-0.219	0.138	-0.437	0.152	-0.840	0.221
	2451310.896	2.471	0.062	0.103	0.101	-0.263	0.132	-0.495	0.184
	2451311.896	2.143	0.061	-0.203	0.102	-0.613	0.142	-0.493	0.120
	2451312.917	2.214	0.071	0.826	0.123	-0.380	0.142	-0.939	0.134
	2451319.875	2.638	0.065	0.314	0.123	0.010	0.139	-0.486	0.137
	2451320.854	2.586	0.072	0.314	0.130	0.010	0.114	-0.486	0.157
	2451320.854	3.628	0.200	2.157	0.108	1.011			
	2401000.004	0.020	0.200	J 2.107	0.203	1.011	0.291	0.444	0.303