

RICERCA DELLA CONTROPARTE ELETTROMAGNETICA DI ONDE GRAVITAZIONALI

Andrea Corvina¹ e Riccardo Magnani²

¹ISIT Bassi-Burgatti, Cento, Ferrara

²IIS Archimede, San Giovanni in Persiceto, Bologna

SOMMARIO

In questo lavoro riportiamo il risultato sulla ricerca della controparte elettromagnetica di GW150914, ottenuto analizzando immagini ottiche acquisite grazie al team GRAWITA.

Il telescopio utilizzato è stato il VLT Survey Telescope che in seguito agli *alerts* di LIGO ha monitorato una regione di cielo di 90 gradi quadrati. Le 10 osservazioni, eseguite con il filtro “r”, si sviluppano in un periodo totale di circa due mesi. Abbiamo considerato nello specifico due regioni particolari di dimensioni limitate a qualche minuto d'arco. Nella nostra strategia operativa abbiamo utilizzato diversi programmi, ma volutamente abbiamo proceduto senza utilizzo alcuno di software automatici dedicati alla ricerca di transienti. Il risultato del nostro lavoro è stata la produzione delle curve di luce di tutti gli oggetti presenti nei campi studiati. Ultimo passo del lavoro è stata l'analisi accurata di tali curve, che ci ha permesso di identificare diversi oggetti variabili e/o transienti, nessuno dei quali risulta però essere la possibile controparte elettromagnetica di GW150914.

INTRODUZIONE

La rivelazione delle onde gravitazionali (gravitational wave, GW) ha aggiunto una nuova prospettiva attraverso la quale guardare l'universo .

La teoria della **relatività generale**, formulata da **Albert Einstein** un secolo fa, afferma che il tessuto spazio-temporale viene deformato da qualunque oggetto che abbia massa. Maggiore è la massa dell'oggetto, maggiore sarà la deformazione. Una delle previsioni più affascinanti della teoria di Einstein è che accelerando una massa, in condizioni di assenza di particolari simmetrie nel sistema, si provoca un'increspatura nel tessuto spazio-temporale, e che questa increspatura si propaga sotto forma di onde gravitazionali.

La prima rivelazione di onde gravitazionali nel settembre del 2015 (GW150914) è da attribuire agli interferometri del progetto **LIGO** (Laser International Gravitational-wave Observatory). Questi strumenti sono sensibili alla coalescenza (o *merging*) di oggetti compatti di taglia stellare come sistemi binari formati da due buchi neri, da due stelle di neutroni o da un buco nero e una stella di neutroni.

I due interferometri LIGO non sono però in grado di localizzare con precisione il sistema che ha causato la deformazione spazio temporale; la *skymap* (area di cielo in cui è più probabile vi sia la sorgente di emissione dell'onda gravitazionale) fornita è dell'ordine delle centinaia di gradi quadrati. Il passo successivo alla scoperta delle GW sarà individuare e caratterizzare le controparti elettromagnetiche (EM) del segnale di onde gravitazionali, indagando in ogni banda dello spettro elettromagnetico, dalle onde radio fino ai raggi gamma. Ci si aspetta queste abbiano un carattere transiente (o varino comunque nel tempo).

Attraverso le GW infatti si possono rivelare elementi celesti senza l'utilizzo dell'osservazione di radiazioni elettromagnetiche. E' necessario quindi ottenere un'informazione complementare tra rilevatori elettromagnetici e quelli di onde gravitazionali per avere maggiore chiarezza sulla fisica che governa i processi di emissione durante la fusione degli oggetti compatti.

Uno dei gruppi che cerca la controparte elettromagnetica delle onde gravitazionali è **GRAWITA** (GRAvitational Wave Inaf TeAm; <https://www.grawita.inaf.it/>), una collaborazione italiana di ricercatori dell'**INAF** (Istituto Nazionale di AstroFisica; <http://www.iasfbo.inaf.it/>). Per questa ricerca GRAWITA utilizza diversi telescopi sparsi nel mondo, tra cui VST (VLT Survey Telescope; Fig.1), che è in grado di coprire in una notte 100 gradi quadri di cielo con un totale di 400 esposizioni (~200 GB di dati/notte) e di analizzare le immagini in pochi giorni con procedure di analisi dati specificatamente sviluppate.

Il nostro lavoro di identificazione dei corpi transienti e della loro analisi è stato effettuato passo per passo e senza l'uso di software automatici dedicati. Utilizzando immagini estratte da quelle acquisite da VST, gli scopi del nostro stage sono i seguenti:

- identificare sorgenti variabili o transienti;
- studiarle e ricondurle se possibile alla sorgente dell' onda gravitazionale ricavata da LIGO

Il report sarà strutturato in diversi paragrafi:

1. Osservazioni
2. Analisi dati
3. Risultati e conclusioni

Fig. 1: Foto artistica di VST e dei VLT e i loghi di INAF e GRAWITA.



1. OSSERVAZIONI

Il telescopio utilizzato per osservare le zone di cielo interessate (Fig. 1) è il VST, l'ultimo telescopio installato all'Osservatorio del Paranal dell'ESO (European Southern Observatory). Questo telescopio modernissimo, di 2,6 metri di diametro, è posto insieme ai VLT (Very Large Telescope) sul Cerro Paranal, un'ubicazione perfetta per osservazioni astronomiche da terra. Possiede una gigantesca fotocamera con sensore CCD di 268 megapixel e utilizza diversi filtri fotometrici.

Come il VLT, il VST copre un'ampio intervallo di lunghezze d'onda, dall'ultravioletto all'ottico, al vicino infrarosso (da 0,3 a 1,0 micron). Ma mentre i telescopi più grandi, come il VLT (8m di diametro), possono studiare solo una piccola zona di cielo per volta, il VST è progettato per fotografare velocemente grandi aree in profondità. Con un campo di vista di $1^\circ \times 1^\circ$, largo il doppio della dimensione apparente della Luna piena, il VST è un complemento per il VLT.

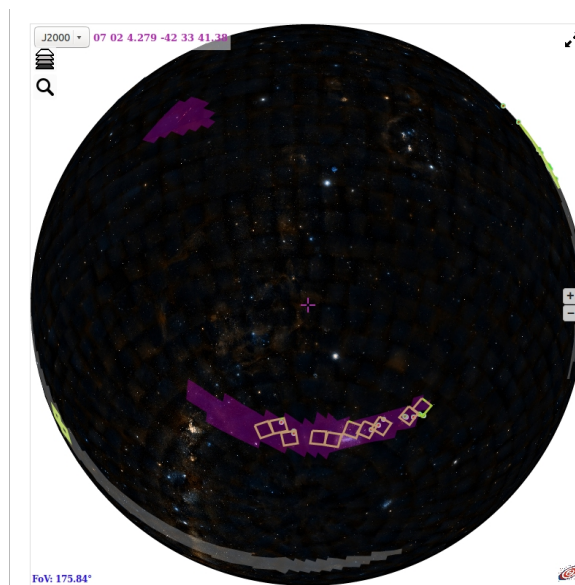
Il VST ha due specchi, il primario (M1) con un diametro di 2,62 m e un secondario più piccolo (M2) con un diametro di 93,8 cm.

Il VST è dedicato ai programmi di survey. Con la sua camera all'avanguardia, la qualità delle ottiche e le condizioni eccezionali di seeing al Paranal, il VST sta facendo scoperte importanti in molte aree di astrofisica e cosmologia. Nel campo della cosmologia, ad esempio, il VST punta alle supernove a redshift intermedio per meglio fissare la scala delle distanze cosmiche e comprendere l'espansione dell'Universo. Il VST cerca anche strutture cosmiche a redshift medio-alto, nuclei galattici attivi e quasar per migliorare la nostra comprensione della formazione delle galassie e della storia dell'Universo. Il VST è divenuto operativo nel 2011.

Fig. 2

Questa mappa mostra, in viola, le zone dove si ha la probabilità maggiore di trovare la sorgente dell'onda gravitazionale GW1509214. I riquadri bordati in giallo all'interno di queste zone sono i puntamenti eseguiti dal telescopio VST.

Fonte: <https://www.grawita.inaf.it/>



Per la ricerca della controparte EM di GW150914 le osservazioni effettuate con VST da GRAWITA hanno coperto 90 gradi quadri di cielo (Fig. 2). Per il nostro lavoro di ricerca sono state individuate 4 specifiche piccole aree di cielo attorno a coordinate prestabilite (Tab. 1). Delle 4 regioni abbiamo considerato solo le prime due per motivi di tempo.

Tabella 1

REGIONE	COORDINATE	PIXEL
1	04:04:45.1 -59:59:24.52	800×800
2	07:58:29.9 -66:43:13.95	500×500
3	04:02:13.4 -59:55:18.45	800×800
4	03:45:11.0 -57:55:00.80	500×500

Nota: ogni pixel corrisponde a 0.214 arcsec

2. ANALISI DATI

2.1 Selezione immagini

Utilizzando il sito VSTbrowse abbiamo inserito le coordinate scelte in 10 immagini diverse corrispondenti ad altrettante notti di osservazione (esempio in Fig. 3). Abbiamo verificato che le zone corrispondenti alle coordinate scelte non sono state osservate tutte e 10 le notti (Tab. 2).

Tabella 2

DATA	REGIONE1	REGIONE2
20150916	si	no
20150917	si	si
20150921	si	si
20150924	si	si
20150930	si	si
20151002	no	no
20151013	si	no
20151115	no	si
20151116	no	no
20151117	no	no



Fig. 3: 20150916 – Regione1.

2.2 Confronto visivo

Per individuare oggetti che sono variati in luminosità in maniera visiva, abbiamo confrontato le immagini ottenute nelle diverse notti con il programma ds9, evidenziando gli elementi più interessanti (Fig. 4-5).

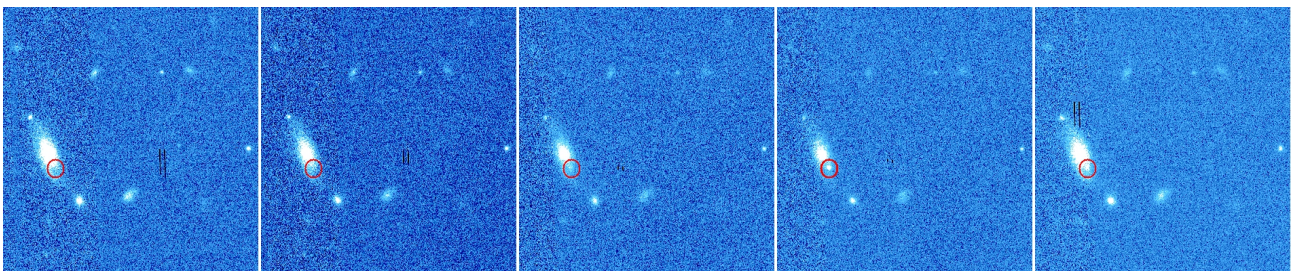


Fig. 4: Regione1: dalla terza alla sesta immagine è possibile vedere un nuovo oggetto celeste che diventa sempre più luminoso. È evidenziato col cerchio rosso.

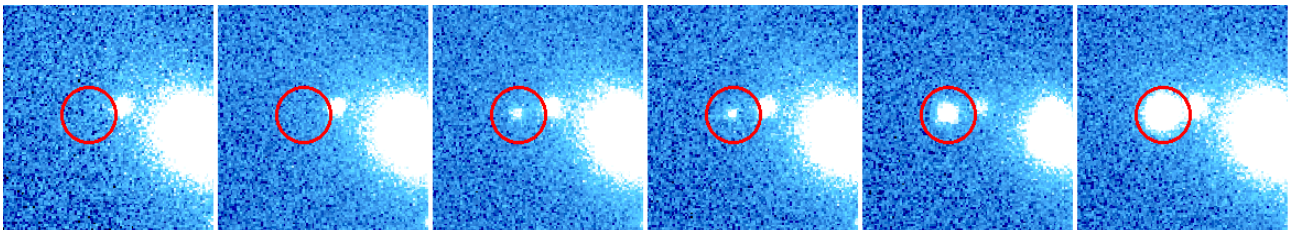


Fig. 5: Regione2: nelle ultime tre immagini è distinguibile dalla galassia un nuovo oggetto che aumenta in luminosità circoscritto dal cerchio rosso.

2.3 Misura delle magnitudini

Abbiamo utilizzato il programma GAIA per individuare e distinguere i vari corpi celesti presenti nell'immagine analizzata. Esso inoltre fornisce, per ciascun oggetto, numerose informazioni tra cui le coordinate e la magnitudine (termine che identifica la luminosità dei corpi celesti ricavata in questo caso utilizzando l'equazione 1), riportandole in una tabella.

Per poter individuare gli oggetti il programma necessita che siano inseriti alcuni parametri, tra cui il raggio di apertura del cerchio (*aperture size*) entro cui andare a sommare tutti i conteggi associati all'oggetto. Abbiamo scelto come riferimento l'immagine migliore tra quelle delle varie notti; in questa abbiamo selezionato un numero preciso di stelle.

$$M = -2,5 \times \log(\text{conteggi}) + ZP \quad (1)$$

$$(\Gamma / 2.354) \times 3 = 3\sigma \quad (2)$$

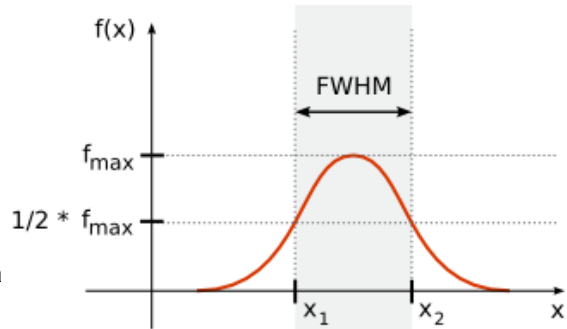


Fig. 6:
Una gaussiana con in evidenza la FWHM.

Dopo aver calcolato la media tra le loro FWHM (Full Width Half Maximum, Fig. 6) abbiamo utilizzato l'equazione (2) per determinare l'*aperture size* (3σ). Successivamente abbiamo inserito lo *zero point* (ZP, ovvero il valore che indica, per lo strumento utilizzato, il punto zero della magnitudine) prendendolo dall'*header* dell'immagine. Abbiamo quindi ordinato al programma di eseguire la ricerca degli oggetti celesti (Fig. 7).

Il programma crea così la tabella (Fig. 8) nella quale noi abbiamo poi selezionato le colonne delle coordinate e delle magnitudine col rispettivo errore.

The screenshot shows the GAIA software interface. On the left, there are various control panels for 'Object detection' and 'GAIA: Object detection (1)'. The main window displays a star field image. A 'Pick Object' dialog box is open, showing the 'Image Statistics' for a selected object. Below the image, there is a table of detected objects with columns for 'NUMBER', 'X_WORLD', 'Y_WORLD', 'X_IMAGE', 'Y_IMAGE', 'FLUX_BEST', 'MAG_BEST', 'MAGERR_BEST', 'ISOMAREA_IMAGE', 'A_IMAGE', 'THETA_IMAGE', 'FWHM_IMAGE', 'ELOWGATION', and 'ELLIPTICITY'. The table contains 31 rows of data for objects in the field.

Fig. 8:
Regione1 , 20150917 –
oggetti rivelati con GAIA.

Fig. 7
Regione1 20150917 –
GAIA Detect Object.

Partendo dall'immagine di riferimento, le altre sono state analizzate nello stesso modo. Solo lo zero point è stato ricavato invece in maniera differente a causa di un *seeing* peggiore in alcune immagini (il *seeing* dipende principalmente dalle condizioni atmosferiche durante l'osservazione). Per prima cosa, per ogni immagine, abbiamo calcolato le media delle magnitudini delle stesse stelle considerate per calcolo dell'*aperture size*. Ogni media è stata poi sottratta a quella trovata per l'immagine campione. In seguito la differenza è stata sommata allo ZP dell'*header* (30.0). Infine abbiamo avviato di nuovo la ricerca di oggetti ottenendo le magnitudini corrette per il diverso *seeing*.

2.4 Costruzione delle curve di luce

Il programma TOPCAT ci ha permesso di utilizzare i dati delle tabelle create da GAIA (vedi Fig. 8) per creare nuove strutture dati utili per produrre curve di luce.

Dopo aver caricato tutte le tabelle (una per ogni immagine) le abbiamo ridotte a solo quattro colonne: due per le coordinate, una per la magnitudine ed un'ultima per il suo errore.

Successivamente abbiamo aggiunto una quinta colonna per riportare il tempo di osservazione delle varie immagine.

Le tabelle delle diverse notti da noi modificate (Fig. 9) sono state poi sottoposte ad un processo di matching, cioè di confronto, per trovare gli oggetti in comune e quelli comparsi o scomparsi.

L' utilizzo di alcune righe di codice *script* ci ha permesso di isolare i dati (Fig. 10) di ogni oggetto in modo tale da poterli poi estrarre e andare a creare la propria curva di luce (Fig. 11).

Le curve di luce sono grafici che presentano in ascissa il tempo di osservazione (giorni trascorsi dal 16/09/2015) e in ordinata la magnitudine osservata. In particolare però, per come è definita la magnitudine (vedi equazione (1)) per cui alle luminosità inferiori corrisponde una magnitudine maggiore, abbiamo invertito l'ordine dei valori sull'asse delle ordinate che va quindi da valori più grandi a valori più piccoli.

	t1	RA1	Dec1	Mag1	Mag_err1
1	0	119.65586	-66.73289	21.3749	0.0911
2	0	119.59108	-66.70786	21.716	0.1118
3	0	119.5998	-66.70848	17.7657	0.0055
4	0	119.66089	-66.70804	21.4344	0.0744
5	0	119.6019	-66.70984	17.0768	0.0034
6	0	119.62544	-66.71032	19.5733	0.0369
7	0	119.63965	-66.71237	18.3007	0.0226
8	0	119.63418	-66.7125	18.2109	0.0082
9	0	119.6339	-66.71331	15.7679	0.0036
10	0	119.6258	-66.7121	20.6438	0.0682
11	0	119.6324	-66.71591	19.9382	0.0369
12	0	119.60427	-66.71661	21.3489	0.0786
13	0	119.6179	-66.71675	19.9709	0.0293
14	0	119.58899	-66.71705	20.451	0.0381
15	0	119.64234	-66.7169	21.0319	0.0628
16	0	119.61716	-66.71851	20.1863	0.0453
17	0	119.6611	-66.71825	21.041	0.051
18	0	119.61497	-66.7188	21.3084	0.0896
19	0	119.63826	-66.71918	21.1848	0.0741
20	0	119.6244	-66.72054	17.1399	0.0036
21	0	119.62038	-66.72355	17.289	0.0038

Fig. 9: Tabella creata in TOPCAT con solo le colonne di nostro interesse: Coordinate, Magnitudine e suo errore.

	days_obs	Mag	Mag_err
1	0	20.9548	0.0455
2	1	20.9019	0.0426
3	5	21.0199	0.0548
4	8	20.9322	0.0564
5	27	21.811	0.0821
6			
7	0	20.451	0.0381
8	1	20.3899	0.0377
9	5	20.3893	0.0414
10	8	20.4197	0.0465
11	27	20.5499	0.0576
12			
13	0	21.716	0.1118
14	1	21.7071	0.1059
15			
16			
17			
18			
19	0	17.7657	0.0055
20	1	17.7724	0.0052
21	5	17.7561	0.0058
22	8	17.7689	0.0062
23	27	17.774	0.0088
24	14	17.7442	0.0117

Fig. 10: Esempio di isolamento di un oggetto per la creazione della curva di luce.

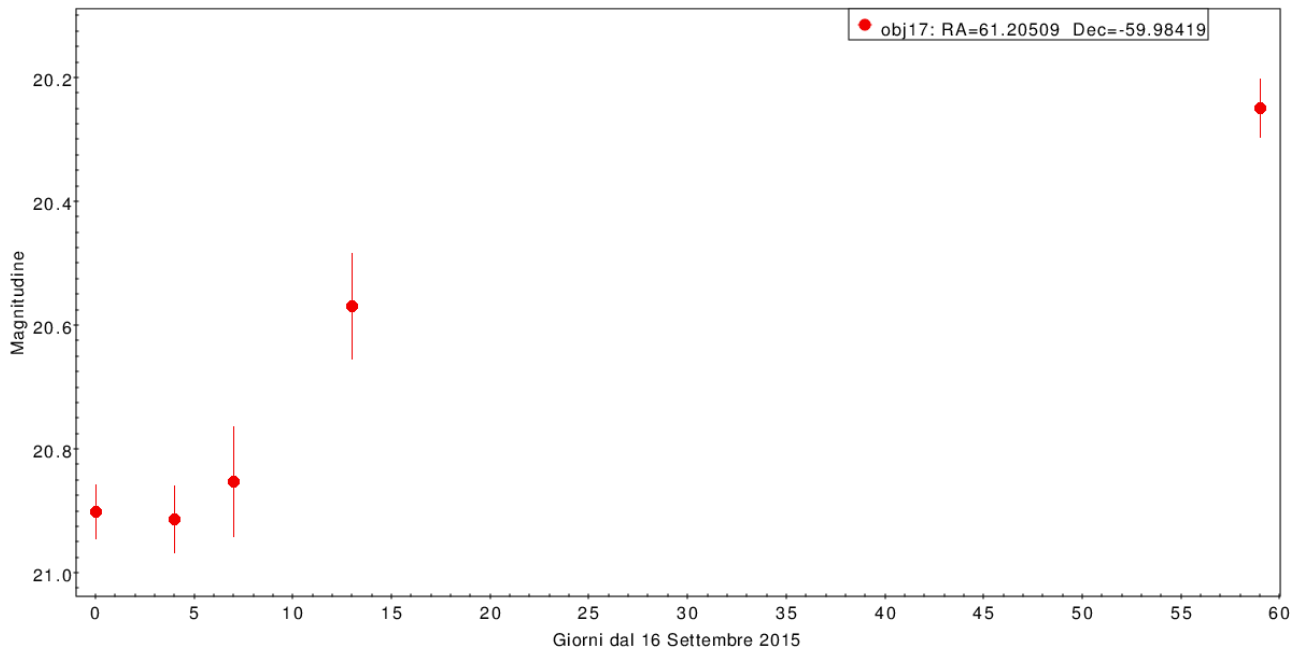


Fig. 11.1: Regione1: curva di luce di uno dei corpi celesti nel primo campo analizzato.

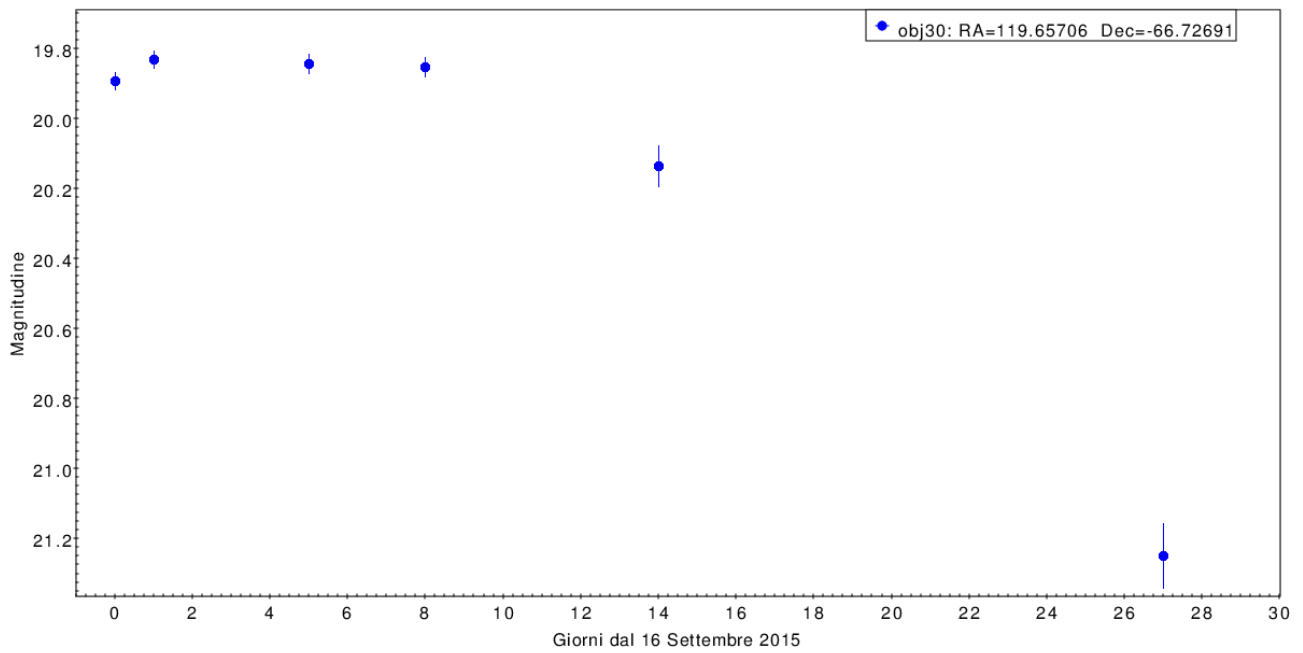


Fig. 11.2: Regione2: curva di luce di uno dei corpi celesti nel secondo campo analizzato. Notare l'intervallo temporale di 30 giorni rispetto ai 60 della figura precedente.

3. RISULTATI E CONCLUSIONI

Finito il lavoro abbiamo osservato tutte le curve di luce ottenute notando che solo alcune erano interessanti. Infatti nella maggior parte dei casi le magnitudini rimangono quasi invariate, e comunque entro gli errori. Gli oggetti interessanti mostrano significative variazioni di magnitudine (superiore all'errore associato) e quindi vanno considerati presunte sorgenti variabili e/o transienti. Abbiamo riportato in Fig. 11.1 e Fig. 11.2 due curve di luce di oggetti in cui la variazione è molto evidente, in particolare il secondo è da ritenersi una probabile supernova a causa della tipica variazione della magnitudine in funzione del tempo. Notare che queste curve non si riferiscono ai due oggetti di Fig. 4 e Fig. 5 per i quali la variazione di luminosità nel tempo era apparsa evidente ad una semplice ispezione visiva. Questo in genere non è il caso, motivo per il quale si adotta un'analisi statistica proprio costruendo le curve di luce. Nel nostro caso abbiamo però applicato solo un'investigazione visuale delle curve. Le loro coordinate celesti sono riportate nella legenda.