

# Ricerca della controparte elettromagnetica di onde gravitazionali

Luca Caiti<sup>1</sup> e Lorenzo Murari<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Istituto Piero Gobetti, Scandiano, Reggio Emilia

<sup>2</sup> Liceo Ginnasio Luigi Galvani, 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.

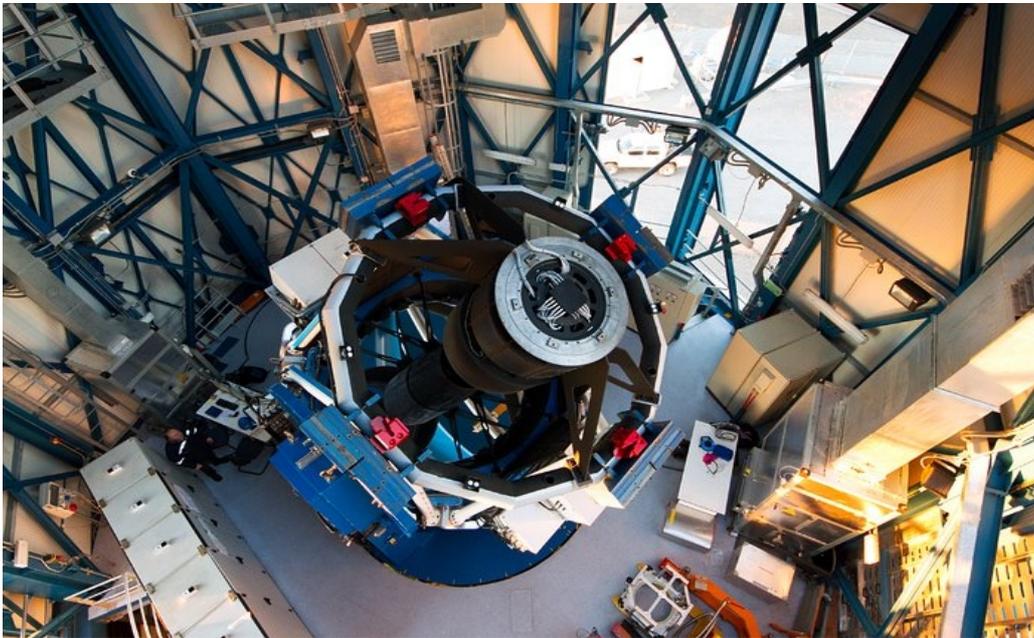
## Introduzione

Le onde gravitazionali (GW), predette dalla teoria della Relatività Generale di Einstein (1915) e scoperte grazie agli interferometri del progetto LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) nel settembre 2015 (GW150914), sono perturbazioni del campo gravitazionale, che si propagano come onde alla velocità della luce e sono generate da particolari movimenti e variazioni di massa, che modificano il tessuto spazio-temporale dell'Universo.

Queste interagiscono debolmente con la materia, pertanto possono viaggiare attraverso regioni molto dense, senza subire significative alterazioni, contrariamente alle onde elettromagnetiche, che subiscono numerose perturbazioni dal loro stato iniziale, perché vengono assorbite e diffuse in mezzi densi. Di fatto quando arrivano all'osservatore risultano aver perso energia, quindi informazioni importanti sul loro progenitore.

Le osservazioni gravitazionali e quelle elettromagnetiche sono due modi complementari di guardare lo stesso fenomeno, permettendo una comprensione molto più approfondita dei fenomeni fisici in atto. La localizzazione dei segnali di onde gravitazionali con gli attuali strumenti è poco precisa: le zone di probabilità di provenienza del segnale GW coprono infatti centinaia di gradi quadrati. È importante però osservare un segnale elettromagnetico da un evento gravitazionale perché permette di ottenerne una localizzazione accurata, di identificare la sua galassia ospite, caratterizzarne le proprietà dell'ambiente e di inserire in un contesto astrofisico il fenomeno che si sta osservando. Infine sia l'osservazione gravitazionale che quella elettromagnetica permettono di calcolare la distanza cui avviene il fenomeno.

L'Italia è fortemente coinvolta nella ricerca e nello studio delle onde gravitazionali. In particolare notevole è il ruolo dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) che finanzia l'European Gravitational Wave Observatory (EGO) e l'esperimento Virgo, grazie al quale ha un accordo con la collaborazione scientifica LIGO, finalizzata alla ricerca delle GW.



*Fig. 1: Il telescopio VST.*

Trovare la controparte elettromagnetica di un segnale di onde gravitazionali attraverso survey ottiche è una notevole sfida, date le enormi regioni di cielo da osservare e il grande numero di transienti non associati agli eventi di onde gravitazionali, che sono quindi da escludere. In questo un ruolo importante è svolto dall'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), che possiede una vasta e storica esperienza in questo campo. Forti di questa esperienza è stato creato nel settembre 2015 il team GRAWITA (GRAVitational Wave Inaf TeAm, <https://www.grawita.inaf.it/>), impegnato nella ricerca delle controparti EM degli eventi GW utilizzando diversi telescopi sparsi nel mondo, in particolare il

VLT Survey Telescope (VST, fig. 1).

Una parte cruciale di questo progetto è dedicata allo sviluppo di algoritmi e procedure in grado di ridurre i tempi di elaborazione delle immagini e della conseguente analisi, obiettivo raggiunto attraverso lo sviluppo di software e hardware, in particolare delle tecniche di “machine learning” e lo sviluppo di strumenti estremamente performanti nell'elaborazione dei dati.

Nel nostro lavoro la procedura è stata volutamente esente dall'utilizzo di quanto appena detto, procedendo passo per passo.

Gli scopi sono stati:

1. Identificare eventuali sorgenti variabili e/o transienti.
2. Scoprire ed investigare sorgenti sconosciute e se queste possono essere state l'origine delle onde gravitazionali osservate.

Il report si strutturerà nel seguente modo: di seguito saranno descritte le osservazioni, il capitolo successivo sarà dedicato all'analisi dei dati, e l'ultimo ai risultati e alle conclusioni/considerazioni finali.

## 1. Descrizione osservazioni

Il telescopio utilizzato, come sopra detto, è stato il VST, un telescopio a grande campo con apertura di 2.6 metri, operativo presso l'Osservatorio ESO (European Southern Observatory) di Cerro Paranal, in Cile, nella stessa area in cui è presente il Very Large Telescope (VLT).

Il VST presenta un FOV (Field of View) di un grado quadrato e ha analizzato, attraverso un totale di 400 esposizioni (~200 GB di dati/notte), 90 gradi quadrati, coprendo la zona con più alta probabilità di trovare la controparte elettromagnetica di GW150914 (zone viola in fig.2). Le zone di puntamento sono quadrati di 3x3 gradi (vedi fig. 2), <https://www.grawita.inaf.it/highlights/>.

Il filtro utilizzato è stato il filtro “r”, essendo un ottimo compromesso tra buona sensibilità e cielo piatto con poco rumore di fondo. Il tempo di osservazione è stato di 40 secondi. Il rivelatore dello strumento utilizzato è composto da 34 CCD.

Poichè questi sono separati tra loro da un piccolo spazio, che provocherebbe un buco nella copertura del cielo osservato, si è utilizzata una tecnica di *dither*, cioè ogni zona di cielo è stata osservata con due immagini leggermente spostate fra loro.

La strategia osservativa è legata al fatto che non si conoscevano gli oggetti e il loro tempo di possibile variazione; si è quindi scelto di coprire la regione di massima probabilità facendo puntamenti vicini ma casuali. Le notti di osservazione sono state 10 (16,17,21,24,30 di settembre 2015, 2,13 di ottobre 2015 e 15,16,17 di novembre 2015).



Fig. 2: Le zone di cielo con più alta probabilità di provenienza degli eventi GW e le regioni osservate con VST (quadrati gialli).

Abbiamo utilizzato la pagina (<https://www.grawita.inaf.it/VSTbrowse/>) del progetto GRAWITA come punto di partenza per la nostra analisi e analizzato le immagini centrate alle coordinate riportate in tabella 1.

Tabella 1

<b>Regione1</b>	<b>Regione2</b>
04:04:45.1	07:58:29.9
-59:59:24.52	-66:43:13.95
800x800 px	500x500 px
0.214 arcsec/pixel	0.214 arcsec/pixel

## **2. Analisi dati**

Il procedimento eseguito è stato il seguente:

1. Prelievo delle immagini alle coordinate determinata con VSTbrowse.
2. Utilizzo del programma “ds9”, per un confronto visivo delle immagini.
3. Utilizzo del programma “GAIA”, per ottenere informazioni sugli oggetti presenti (es. magnitudine).
4. Utilizzo del programma “TOPCAT”, per costruire le curve di luce.

### **2.1 Estrazione immagini**

Utilizzando VSTbrowse, abbiamo selezionato e scaricato le piccole regioni di cielo intorno alle coordinate (Tab. 1). Abbiamo notato che le regioni scelte non sono state osservate tutte le notti. In Tabella 2 sono riportate le notti in cui esiste l'immagine.

Tabella 2

<b>notte</b>	<b>Regione1</b>	<b>Regione2</b>
16/09/2015	X	✓
17/09/2015	✓	✓
21/09/2015	✓	✓
24/09/2015	✓	✓
30/09/2015	✓	✓
02/10/2015	X	X
13/10/2015	X	✓
15/11/2015	✓	X
16/11/2015	X	X
17/11/2015	X	X

### **2.2 Confronto visivo**

ds9: attraverso questo programma abbiamo lavorato sulle immagini scaricate precedentemente e, variando il contrasto, abbiamo cercato di trovare ad occhio nudo sorgenti variabili, mettendole parallelamente in ordine cronologico. La fig. 3 mostra le due regioni, intorno alle coordinate riportate in Tabella 1, alle varie epoche di osservazione.

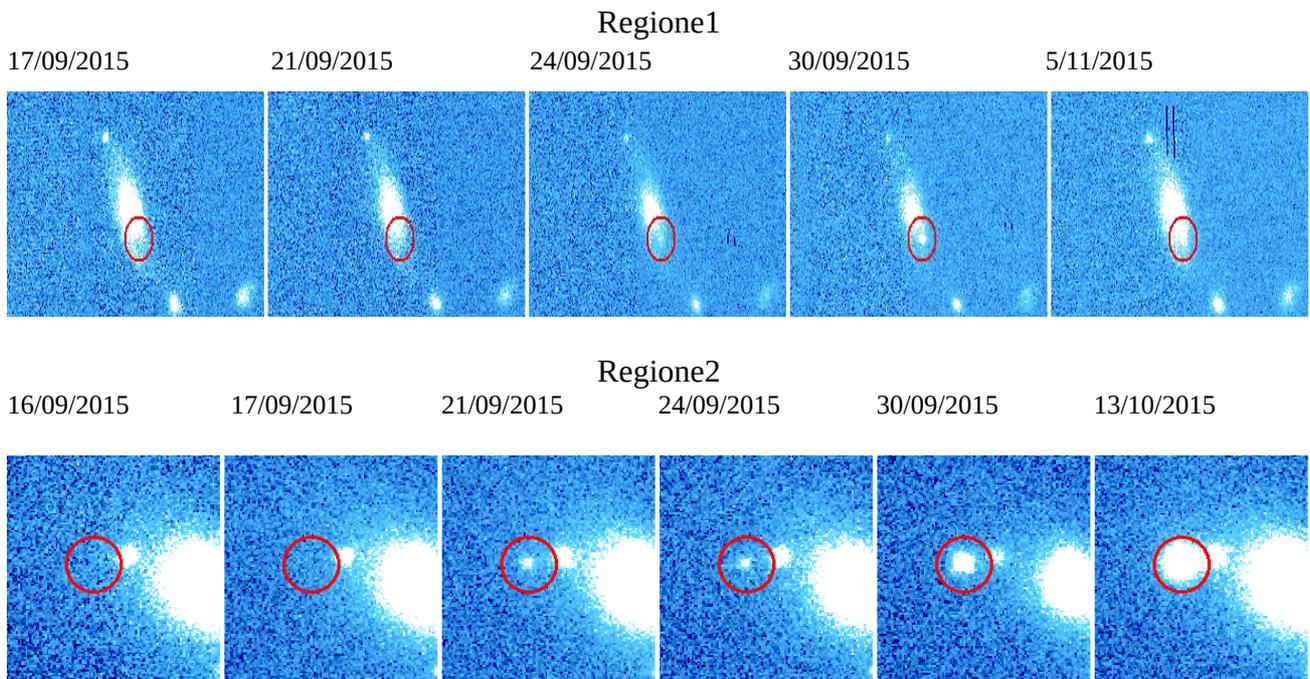


Fig. 3: Cerchiate di rosso sono due sorgenti in cui è evidente a occhio la variazione di luminosità tra le diverse notti di osservazione.

## 2.3 Misura magnitudini

GAIA: questo programma (fig. 4) è utilizzato 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.

1. Abbiamo scelto come riferimento l'immagine migliore tra quelle delle varie notti, trovando in essa un numero preciso di oggetti.
2. Abbiamo calcolato la media tra le loro FWHM (Full Width Half Maximum).
3. Abbiamo utilizzato la formula  $(\Gamma / 2.354) \times 3 = 3\sigma$  per determinare l'aperture size,  $\Gamma$  indica la FWHM.
4. Abbiamo inserito lo zero point (ZP) della magnitudine, ovvero il numero che indica, per lo strumento utilizzato, il punto zero della fotometria (cioè della misura dell'intensità della radiazione emessa dall'oggetto considerato). La magnitudine di un corpo celeste si ottiene con l'equazione di Pogson,  $m = -2.5 \times \log(\text{conteggi}) + ZP$ , prendendo lo ZP dall'header dell'immagine.
5. Abbiamo quindi ordinato al programma di eseguire la ricerca degli oggetti celesti.

Il programma crea così una tabella contenente le informazioni scelte nel catalogo per ogni oggetto. Partendo dall'immagine di riferimento, le altre immagini sono state analizzate nello stesso modo. Solo lo ZP è stato ricavato invece in maniera differente, a causa di un seeing peggiore (il seeing è un insieme di fenomeni dovuti principalmente all'atmosfera terrestre che peggiorano l'immagine astronomica).

1. Abbiamo calcolato per ogni immagine la media delle magnitudini delle stesse stelle considerate nel calcolo dell'aperture size.
2. Abbiamo sottratto ogni media a quella ottenuta dagli oggetti dell'immagine di riferimento.
3. Abbiamo sommato la differenza allo ZP dell'header (30.0) ottenendo il nuovo ZP da usare nel calcolo delle magnitudini.
4. Abbiamo avviato di nuovo la ricerca degli oggetti.

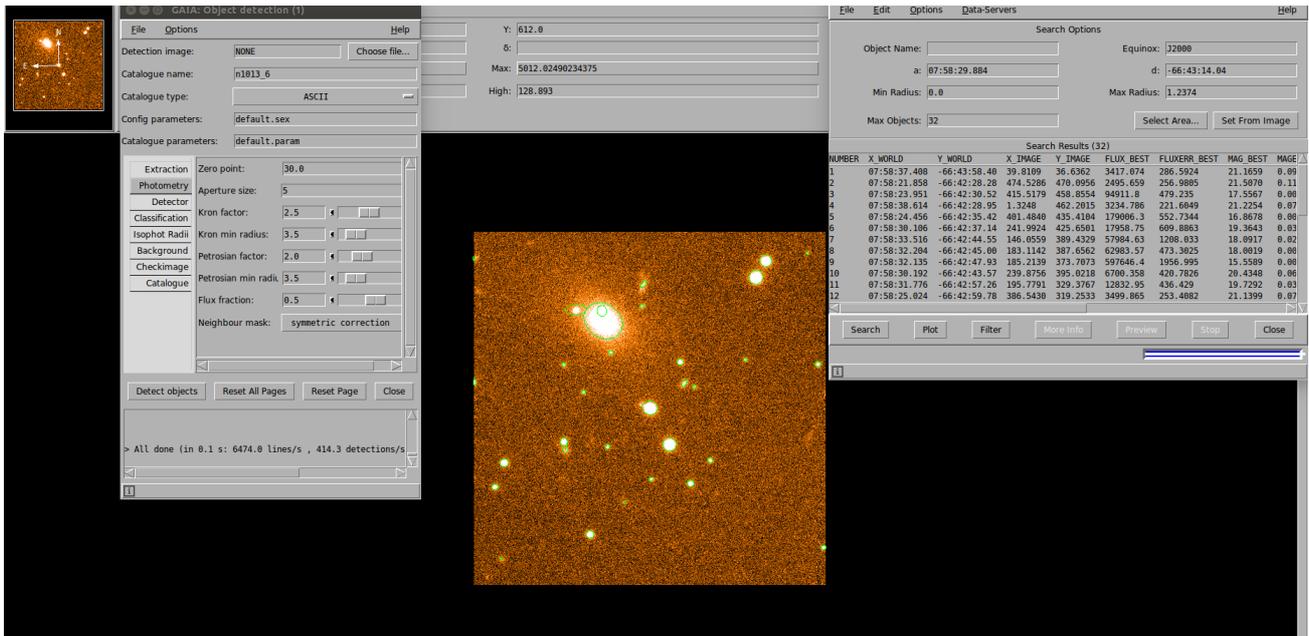


Fig. 4: Il programma GAIA in azione.

## 2.4 Costruzione curve di luce

Abbiamo utilizzato TOPCAT (fig. 5) in primis per trasportare i dati raccolti in tabelle.

1. Abbiamo inserito le tabelle, aventi le informazioni relative agli oggetti, prodotte con GAIA.
2. Abbiamo, attraverso un *match*, trasportato i dati delle tabelle ottenute in una unica.
3. Abbiamo selezionato, creando una nuova tabella, solo "RA" (ascensione retta), "Dec" (declinazione), magnitudine e relativo errore, aggiungendo il  $\Delta t$  rispetto alla data della prima notte di osservazione, ovvero i giorni passati tra la prima osservazione e le altre.
4. Abbiamo ordinato la tabella per ogni oggetto in modo cronologico (secondo il  $\Delta t$ ).

Questo ci ha permesso di confrontare gli oggetti in comune (*match*) tra le varie tabelle e di vedere gli oggetti comparsi o scomparsi.

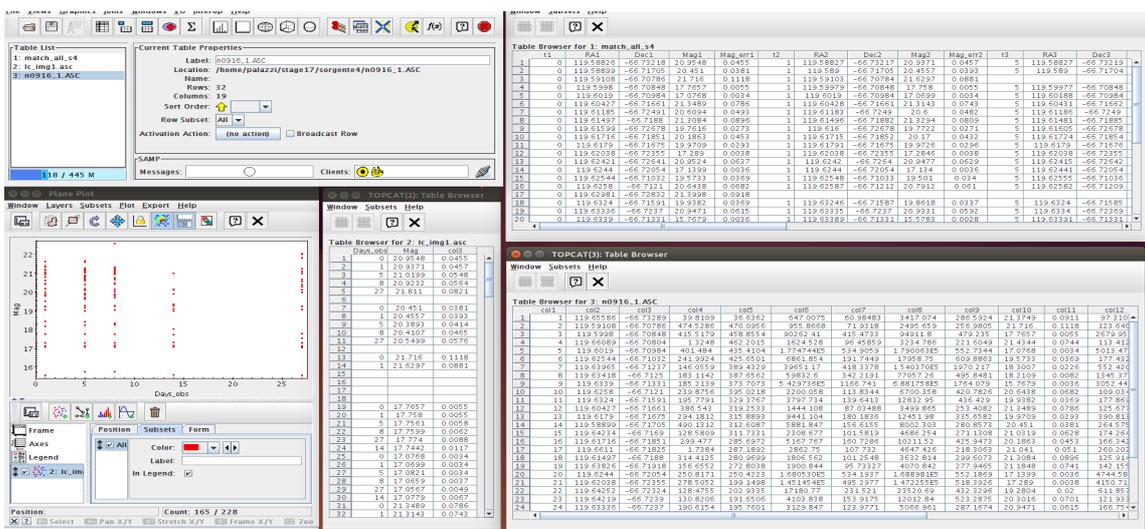


Fig. 5: Alcune finestre del programma TOPCAT.

Successivamente abbiamo fatto un grafico che, per ogni oggetto, ha sull'ascissa il giorno di osservazione (0 corrisponde alla prima notte di osservazione, il 16 Settembre 2015) e sull'ordinata il

valore della magnitudine, con il relativo errore. Poiché, per come sono definite le magnitudini (vedi formula di Pogson precedente) alle luminosità inferiori corrisponde una magnitudine maggiore, i grafici sono stati fatti invertendo l'ordine dei valori sull'asse delle ordinate (cioè dai valori maggiori a quelli minori).

Abbiamo ottenuto così, per ogni oggetto, la relativa curva di luce, di cui due esempi sono riportati nelle figure 6 e 7.

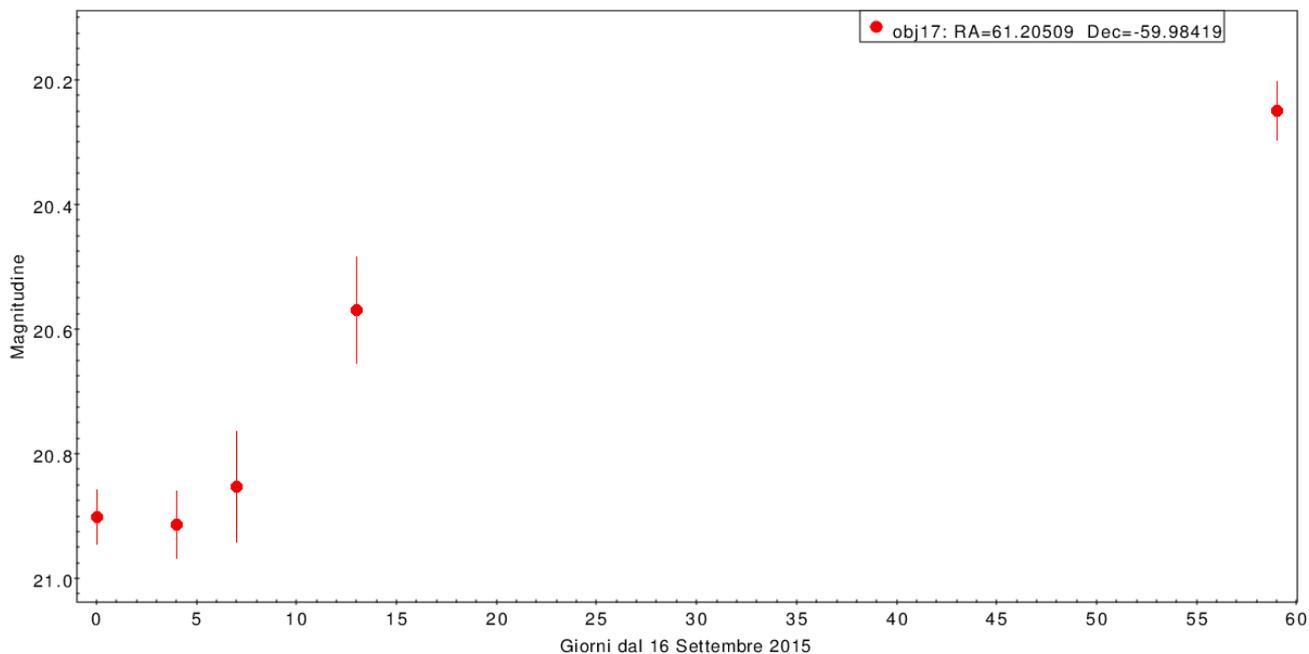


Fig. 6: Curva di luce di una sorgente presente nella Regione1.

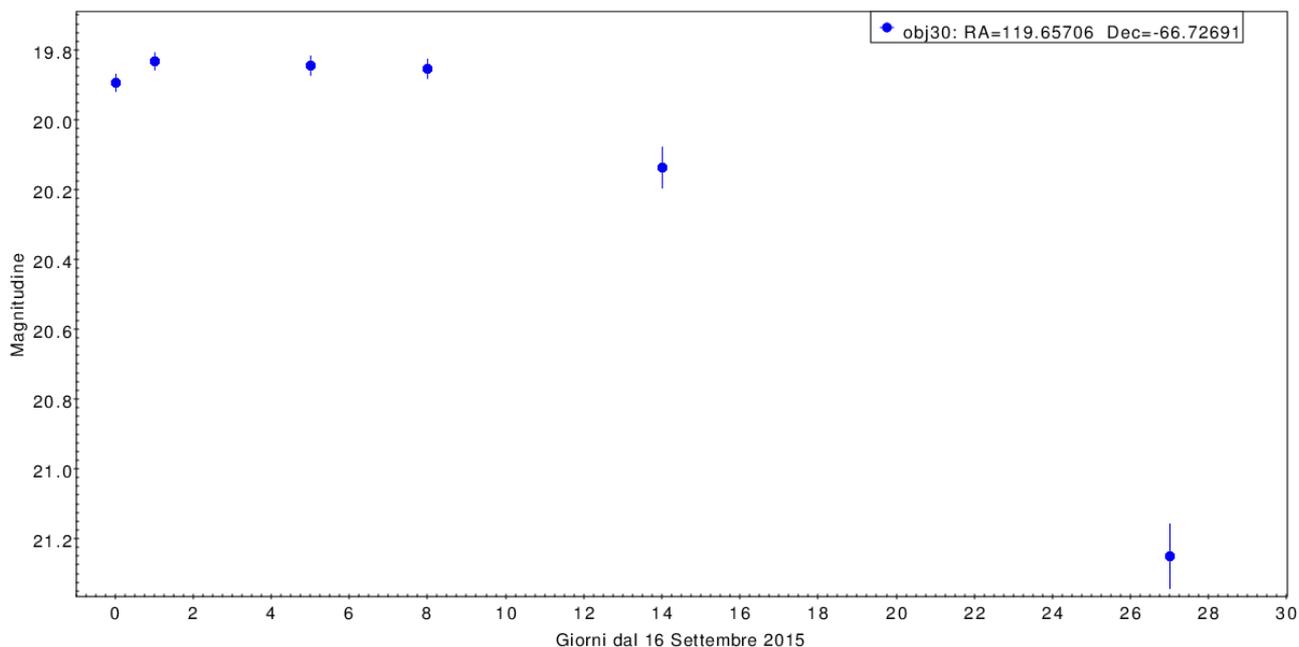


Fig. 7: Curva di luce di una sorgente presente nella Regione2. Notare l'intervallo temporale di 30 giorni invece dei 60 della figura precedente.

### **3. Risultati e Conclusioni**

Finito il lavoro abbiamo osservato tutte le curve di luce ottenute, notando che, solo alcune erano interessanti; nella maggior parte dei casi le magnitudini degli oggetti rimanevano quasi invariate, entro gli errori di misura. Alcuni oggetti mostravano invece significative variazioni di magnitudine (superiore all'errore associato) e quindi sono da considerarsi candidati sorgenti variabili e/o transienti.

Tra tutti quelli che sembravano variare in modo significativo, abbiamo selezionato i due riportati in fig. 6 e fig. 7. Per questi due oggetti la variazione è molto evidente, in particolare il secondo è da ritenersi una probabile supernova a causa della forma tipica della curva di luce. Notare che queste curve non si riferiscono ai due oggetti della figura 3 per i quali la variazione di luminosità nel tempo era apparsa evidente ad una ispezione visiva. Le loro coordinate celesti sono riportate nella legenda.