

Giuseppe Marino<sup>1</sup>, Claudio Arena<sup>1</sup>, Lorenzo Barbieri<sup>2</sup>, Claudio Lopresti<sup>3</sup>, Emilio Lo Savio<sup>1</sup>, Alessandro Marchini<sup>4</sup>, Gianluca Masi<sup>5</sup>, Raffaele Maulella<sup>3</sup>, Christian Napoli<sup>1</sup>, Fabio Salvaggio<sup>1</sup>, Gerardo Sbarufatti<sup>6</sup>, Concetto Sciuto<sup>1</sup>, Nello Ruocco<sup>7</sup>, Renzo Ruisi<sup>8</sup>, Antonio Sofia<sup>1</sup>, Eri- berto Tontodonati<sup>9</sup>, Roberto Zambelli<sup>3</sup>

## Occultazioni ed eclissi tra i satelliti medicei: i risultati della campagna PHEMU09 in Italia.

<sup>1</sup> Gruppo Astrofili Catanesi - [giumar69@gmail.com](mailto:giumar69@gmail.com)

<sup>2</sup> Associazione Astrofili Bolognesi

<sup>3</sup> Istituto Spezzino Ricerche Astronomiche

<sup>4</sup> Osservatorio Astronomico, Dipartimento di Fisica, Università di Siena

<sup>5</sup> Virtual Telescope – Osservatorio Astronomico Bellatrix

<sup>6</sup> Gruppo Astrofili di Piacenza

<sup>7</sup> Astrocampania, Sez. Stabia – Penisola sorrentina

<sup>8</sup> Organizzazione Ricerche e Studi di Astronomia – Palermo

<sup>9</sup> Associazione Iblea Divulgazione Astronomica - Ragusa

---

### Abstract

*Results of photometry of mutual phenomena (occultations and eclipses) between Galilean satellites are presented. The observations were performed in Italy during the international campaign PHEMU09.*

*From the light curves, minimum's light instant and flux drop are derived.*

*Relevant deviations (O-C) with respect to the expected central instants are present for many events. Taking into account the relative satellites' longitudinal velocity, longitudinal discrepancies in km (and arcseconds) are also computed. However, additional corrections or analytical models of the light curves could be still necessary to extract reliable physical meaning in strict sense.*

*The discrepancies with respect to the expected flux drops during the occultations are apparently uncorrelated with the O-C on timing (and longitudinal deviations in km); moreover, for eclipses they seem greater than for occultations.*

*The photometric light curves have been sent to the international collection centre, to be published on a professional refereed journal and modelled to improve the satellites' motion parameters.*

---

### Introduzione

Lo sviluppo di modelli relativi al moto dei corpi celesti, per esempio dei satelliti naturali dei pianeti, deve necessariamente confrontarsi con misure della loro effettiva posizione. Misure precise di posizione possono ottenersi dall'esame del calo di luce rilevato in occasione di mutue occultazioni o eclissi tra i satelliti (in un'occultazione un satellite passa dietro il disco di un altro, in un'eclisse ne attraversa il cono d'ombra); la posizione lungo la linea di moto  $x$  dei due satelliti coinvolti in un fenomeno mutuo può essere ricavata in base all'istante di tempo in cui si verifica il minimo di luce, mentre la posizione nella direzione  $y$ , perpendicolare al moto, è legata alla profondità del calo di luce (si veda la Figura 1).

Osservazioni fotometriche in grado di evidenziare i minimi di luce con sufficiente accuratezza sono oggi alla portata della strumentazione amatoriale media [1]; la precisione raggiungibile nel dedurre la posizione dei satelliti a partire dalle curve di luce fotometriche, incluse quelle

ottenute dagli astrofili, è spesso maggiore rispetto alle tradizionali tecniche astrometriche dirette [2].

Nelle numerose campagne promosse dagli astronomi (aperte anche agli astrofili) per l'osservazione dei fenomeni mutui tra i satelliti, sono state evidenziate rilevanti discrepanze tra osservazioni e previsioni (si vedano per esempio le discrepanze "O-C" relative ai tempi di minimo presentate nella Tabella 4 di [3] o il presente lavoro). È quindi evidente come questo tipo di osservazioni possa contribuire allo sviluppo dei modelli di meccanica celeste, nonché allo studio di certi effetti di accelerazione dei satelliti dipendenti dalla loro struttura interna [4].

Fino alla fine degli anni '90 del secolo scorso tre gruppi di astronomi hanno lavorato sui metodi per estrarre informazioni astrometriche dall'analisi delle curve di luce dei fenomeni mutui (si vedano le citazioni nell'introduzione di [5]). Oggi l'approccio più accurato è quello seguito da Nikolay V. Emelyanov e collaboratori [5] [6], basato su un algoritmo che genera curve di luce teoriche e che ricava le effettive coordinate dei satelliti sulla base del confronto con le curve di luce osservate.

Molti dei dati osservativi acquisiti negli ultimi anni in tutto il mondo possono essere consultati liberamente grazie al *Natural Satellites Database* (NSDB) [7], sviluppato nell'ambito del *Natural Satellites Data Center* (NSDC), un servizio professionale disponibile in Internet ([http://prod.imcce.fr/hosted\\_sites/saimirror/nssnsdce.php](http://prod.imcce.fr/hosted_sites/saimirror/nssnsdce.php)) che include informazioni ed effemeridi aggiornate su tutti i satelliti naturali conosciuti.

In questo lavoro sono presentati i dati fotometrici dei fenomeni mutui tra i satelliti medicei (PHEMU) ottenuti in Italia nel 2009, ed è stata effettuata una loro analisi finalizzata a evidenziare le discrepanze tra le osservazioni e le previsioni delle effemeridi.

### La campagna PHEMU09

Come già nel precedente ciclo del 2003 [8], anche nel 2009 sono stati numerosi gli astrofili italiani che hanno osservato i fenomeni mutui tra i satelliti medicei. Le osservazioni qui presentate sono state coordinate nell'ambito della campagna internazionale PHEMU09, promossa da Jean-Eudes Arlot, dell'IMCCE - *Institut de Mécanique Céleste e de Calcul des Ephémérides* (Parigi). A livello nazionale, gli osservatori hanno potuto organizza-

zarsi, scambiare suggerimenti e condividere le osservazioni iscrivendosi a una *mailing list* appositamente attivata, accessibile dalla pagina Internet [www.astrofiliatanesi.it/phemu09.php](http://www.astrofiliatanesi.it/phemu09.php) ospitata dal Gruppo Astrofili Catanesi, l'associazione che ha curato la raccolta, l'elaborazione e l'invio all'IMCCE delle osservazioni fotometriche.

Sono stati osservati 37 eventi per un totale di 83 osservazioni di minimi di luce. Gli osservatori sono stati 17.

### Osservazioni e riduzione dati

I dati qui presentati sono stati ottenuti con telescopi di diametro compreso tra 10 e 41 cm. Nella grande maggioranza dei casi le osservazioni sono consistite in sequenze di immagini CCD riprese al fuoco diretto, da qualche minuto prima dell'inizio a qualche minuto dopo la fine di ciascun evento, con pose comprese tra qualche frazione di secondo ad alcuni secondi. È stato incoraggiato uno standard comune intorno ai 5-6 s di esposizione per ciascuna immagine evitando, ove possibile, pose più brevi di 1 s, sia per smorzare la dispersione fotometrica introdotta dalla scintillazione atmosferica, sia perché il campionamento temporale delle riprese è comunque limitato dal tempo di scaricamento di ciascuna immagine. In diverse occasioni, onde ridurre il tempo di scaricamento, si è selezionata solo una parte del sensore (*subframe*). Per evitare la saturazione dell'intensità dei satelliti, nelle esposizioni superiori a 1 s è stato necessario sfocare l'immagine, evitando comunque la contaminazione della luce diffusa di Giove, tipicamente all'interno del campo di ripresa.

La sincronizzazione del PC, indispensabile al fine di soddisfare gli obiettivi scientifici della campagna, veniva effettuata poco prima dell'inizio di ogni evento e spesso controllata alla fine dell'evento. Nella quasi totalità dei casi si è proceduto mediante sincronizzazione via Internet utilizzando un apposito *software*, quale Atomic Clock Sync ([www.onlinedown.com/detail/3668.htm](http://www.onlinedown.com/detail/3668.htm)), Astralarm ([www.astrogb.com/downloads.htm](http://www.astrogb.com/downloads.htm)) o TimeMemo ([www.astrosurf.org/astrocp/timememo/index.html](http://www.astrosurf.org/astrocp/timememo/index.html)). Con questo sistema la precisione è compresa tra 0.1 s e 0.5 s. In alcuni casi è stata effettuata la sincronizzazione manuale utilizzando un orologio radiocontrollato, pervenendo così a una precisione di circa 0.5 s.

Gli osservatori e gli strumenti utilizzati sono elencati nella Tabella 1, insieme alle altre informazioni descritte nei paragrafi che seguono.

Nella maggior parte dei casi, prima dell'analisi fotometrica, le singole immagini CCD sono state trattate per il *dark* e il *flat frame*.

La fotometria dei due satelliti coinvolti in ogni evento (o del solo satellite eclissato), effettuata sulle singole immagini, è di tipo differenziale, adottando come oggetto di confronto un satellite presente nello stesso campo inquadrato; la fotometria è stata effettuata quasi sempre con i programmi Maxim DL e Iris, rispettivamente grazie alle opzioni *Photometry* e *Automatic Photometry*. Nel caso di Maxim DL è stato necessario un allineamento preventivo delle immagini in quanto il moto dei satelliti durante ogni evento (di durata compresa tra qualche minuto e una ventina di minuti) faceva fallire la procedura automatica di identificazione degli oggetti luminosi sull'immagine. Nel caso di Iris, per ogni evento è stato necessario effettuare due volte l'allineamento, prima sul satellite eclissato (o sulla coppia dei satelliti occultati/eclissati se indistinguibi-

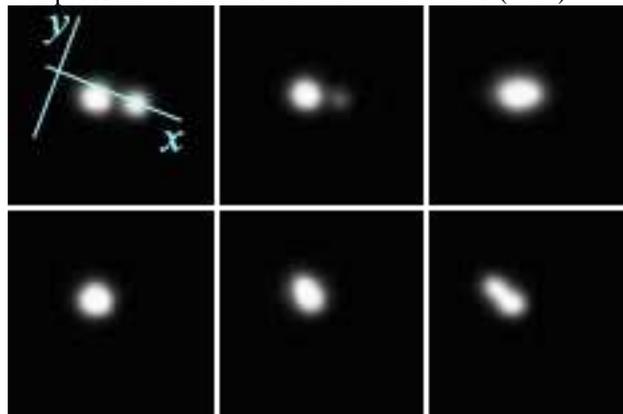
li tra loro) e poi sul satellite che veniva scelto di volta in volta come oggetto di confronto. In diversi casi è stato possibile aumentare la precisione fotometrica utilizzando due satelliti di confronto invece di uno.<sup>1</sup> Le curve di luce così ottenute sono presentate nelle Figure 4-72. Nel sito [www.astrofiliatanesi.it/phemu09.php](http://www.astrofiliatanesi.it/phemu09.php) gli stessi dati sono riportati in una scala flussi/magnitudini comune per tutti gli eventi.

### Istanti di minimo e cali di luminosità

L'analisi di ogni curva di luce è consistita in:

- stima del tempo di minimo (ToM);
- stima del salto di magnitudine tra il massimo di luce (satelliti fuori evento) e il minimo.

Per determinare il ToM è stato utilizzato il metodo di Kwee – van Woerden (KW) [9]. Il metodo è stato applicato grazie a un programma DOS pubblicamente disponibile in ambito AAVSO. Nel caso in cui il tempo di campionamento era inferiore ai 3 s i punti fotometrici sono stati raggruppati mediandone i flussi, cioè sia per ridurre la dispersione (e rendere così più facile la convergenza del programma per la ricerca del ToM), sia per tentare di uniformare i dati dei diversi autori. Nell'utilizzare il suddetto programma sono stati selezionati, per ogni curva di luce, i punti fotometrici aventi una distribuzione apparentemente simmetrica rispetto al minimo ed escludendo i dati prossimi all'inizio o alla fine dell'evento ("ali").



**Figura 1.** Eclisse e successiva occultazione di Europa (satellite a destra) da parte di Ganimede il 12 agosto 2009. Con *x* è indicata la traiettoria di Europa rispetto a Ganimede. *y* è la direzione perpendicolare. Il filmato completo è visibile all'indirizzo [www.astrofiliatanesi.it/phemu09](http://www.astrofiliatanesi.it/phemu09). (Gianluca Masi – Virtual Telescope)

Per la stima del salto di magnitudine, su ogni curva di luce è stata prima individuata una regione stabile fuori evento onde ottenere la magnitudine per il massimo di luce; a questo valore è stata quindi sottratta la stima di magnitudine del fondo del minimo<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> È interessante notare che in due casi, utilizzando una CCD SBIG ST-7, la fotometria non differenziale del solo oggetto variabile ha fornito misure migliori rispetto alla consueta fotometria differenziale. Ciò è stato reso possibile dalle particolari condizioni di stabilità atmosferica e dall'altezza costante del sistema Giove-satelliti durante quegli eventi.

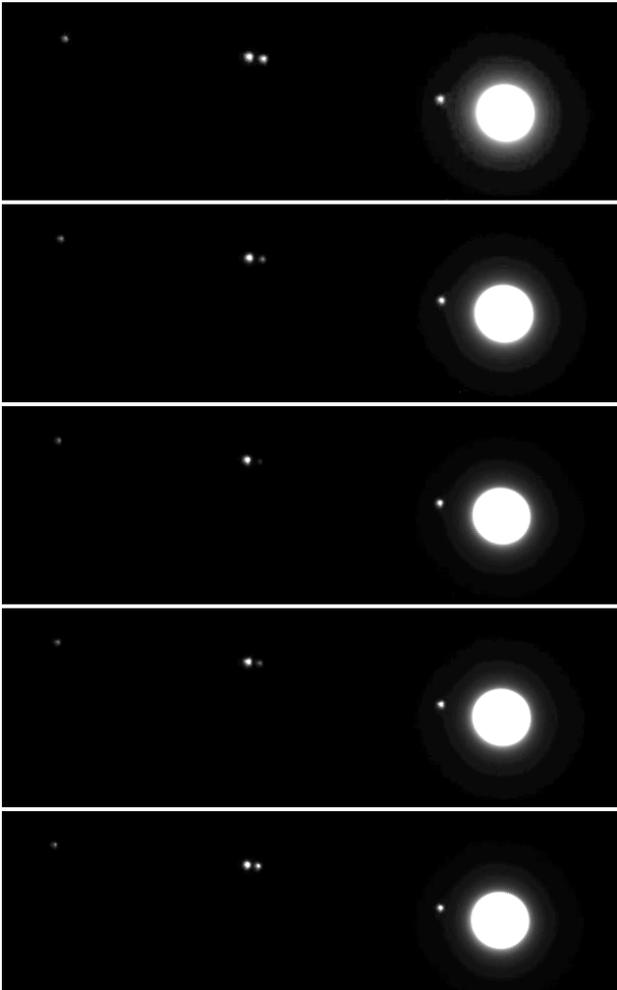
<sup>2</sup> Per ottenere le magnitudini medie riferite al massimo e al minimo di luce, sono stati mediati i valori dei flussi. Ricordiamo che magnitudini (differenziali) *m* e flussi (relativi) *F* sono legati dalla formula

$$m = -2.5 \cdot \log_{10} F$$

oppure dalla sua inversa

$$F = 10^{\frac{1}{2.5} m}$$

Gli istanti di minimo e i salti di magnitudine sono riportati nella Tabella 1. Gli O-C (“osservato” – “calcolato”) rappresentano il confronto tra i ToM dedotti dalle osservazioni e quelli teorici previsti in base alle effemeridi.



**Figura 2.** Eclisse di Europa da parte di Ganimede del 5 agosto 2009. Il filmato completo è visibile all'indirizzo [www.astrofilicatanesi.it/phemu09](http://www.astrofilicatanesi.it/phemu09). (Gerardo Sbarufatti – Gruppo Astrofili di Piacenza)

### Errori di misura sul tempo di minimo

Nella Tabella 1 sono riportate due stime dell'incertezza (errori) sul tempo di minimo (ToM): “err.1” è l'errore ottenuto direttamente con il metodo KW (che è prodotto dal software come *output* insieme al tempo di minimo), “err.2” è stato invece ottenuto applicando la formula

$$\text{err.2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta m} \cdot \sigma_m,$$

corrispondente al metodo adottato da Arlot in [3], con in più il fattore  $1/\sqrt{2}$ , per tenere conto del fatto che sull'incertezza del tempo di minimo concorrono sia la rapidità ( $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ ) del ramo discendente che quella del ramo

ascendente della curva di luce (oltre alla dispersione  $\sigma_m$  dei punti fotometrici). “err.1” è un errore “interno”, cioè un errore statistico ideale calcolato in base all'applicazione formale dell'algoritmo di KW; esso tipicamente sottostima l'effettiva incertezza sul ToM, in quanto considera una dispersione dei dati avente natura puramente statistica, senza altri effetti quali errori sistematici, effetti di correlazione tra i punti adiacenti, etc.



**Figura 3.** Due degli autori durante l'evento dell'11 novembre 2009, ripreso al fuoco Cassegrain del telescopio da 41 cm del GAC, situato nel Liceo scientifico “Archimede” di Acireale (CT).

In entrambe queste stime di errore, “err.1” ed “err.2”, il campionamento dei dati (e quindi anche il tempo di esposizione in fase di ripresa) non viene adeguatamente tenuto in conto, per cui gli errori su eventi diversi, o anche su curve diverse dello stesso evento, non sono tra loro direttamente confrontabili, a meno che il campionamento temporale e il numero totale di punti fotometrici acquisiti durante il minimo non siano gli stessi.

Esaminando la Tabella 1 risulta evidente che “err.1” è quasi sempre decisamente minore sia di “err.2”, sia dell'effettiva dispersione dei ToM ottenuti per lo stesso evento da curve di osservatori diversi. Diversamente da quanto affermato in [10], la dispersione dei ToM per osservazioni contemporanee di uno stesso evento deve essere di carattere osservativo, cioè dipendente dalla qualità dei dati, e non può essere un reale effetto fisico, dipendente per esempio dal filtro adottato. Quando si dispone di più osservazioni contemporanee dello stesso evento, la dispersione dei ToM ottenuta dalle diverse curve di luce, anche con filtri diversi, è quindi la più appropriata stima dell'incertezza sul ToM.

Volendo associare a ogni ToM un'indicazione della sua precisione, possiamo ipotizzare che l'effettivo errore debba essere compreso tra “err.1” ed “err.2”. Per assegnare a ogni ToM una barra di errore, abbiamo seguito un approccio euristico, studiando la relazione tra la dispersione dei ToM e l'errore “err.2” per gli eventi ripresi in contemporanea da più osservatori. Come già detto, nel tentativo di ridurre gli effetti introdotti dalla diversità dei tempi di posa e di campionamento, i punti delle curve aventi campionamento inferiore a 3 s sono stati raggruppati, mediandone i corrispondenti flussi, onde pervenire a un campionamento minimo dell'ordine di ~6 s. Dispersione dei ToM e “err.2” sono mostrati in relazione nella Figura 73.

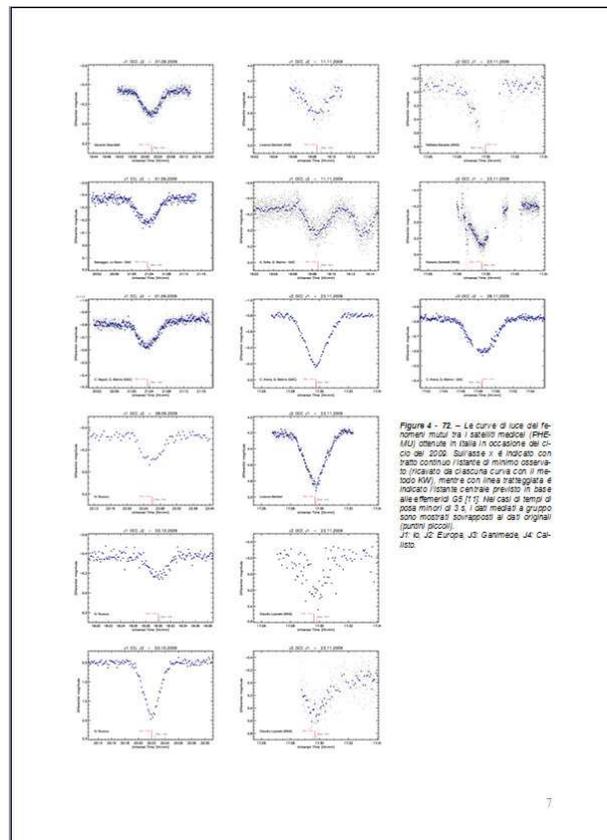
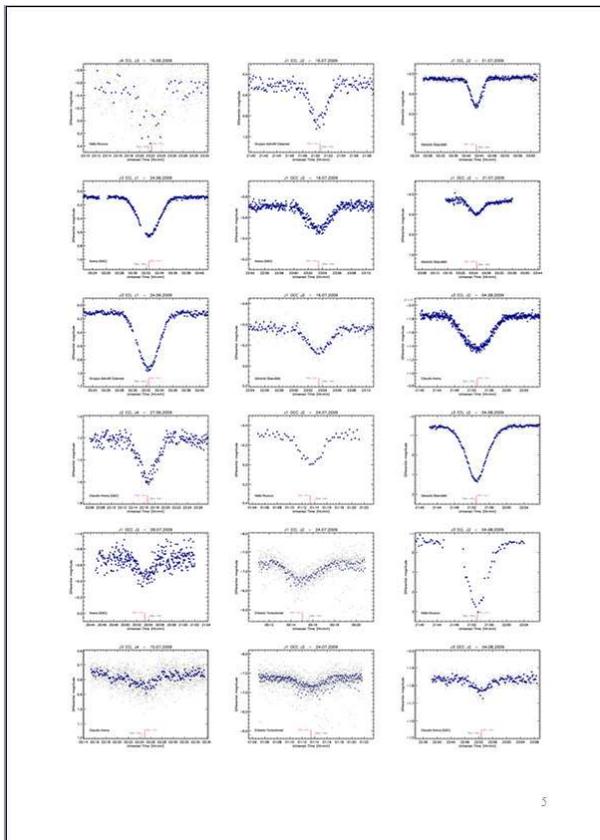
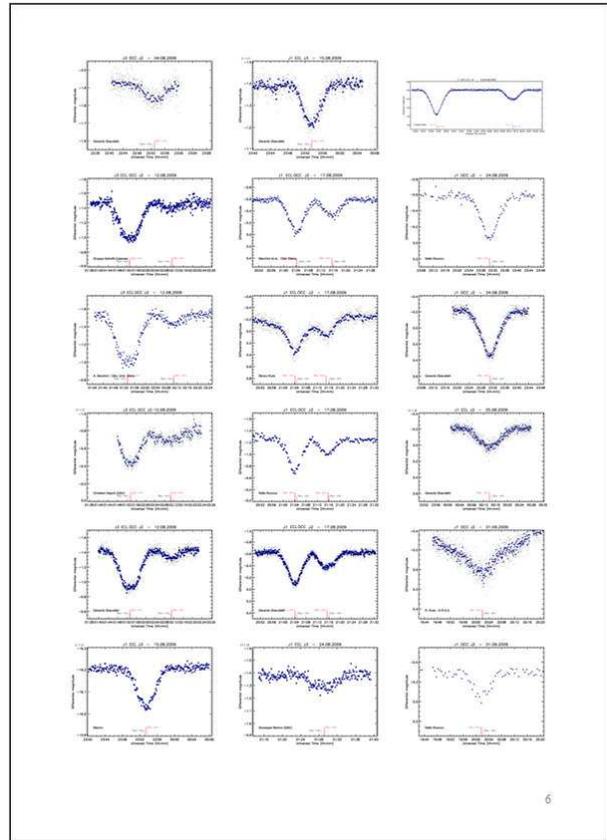
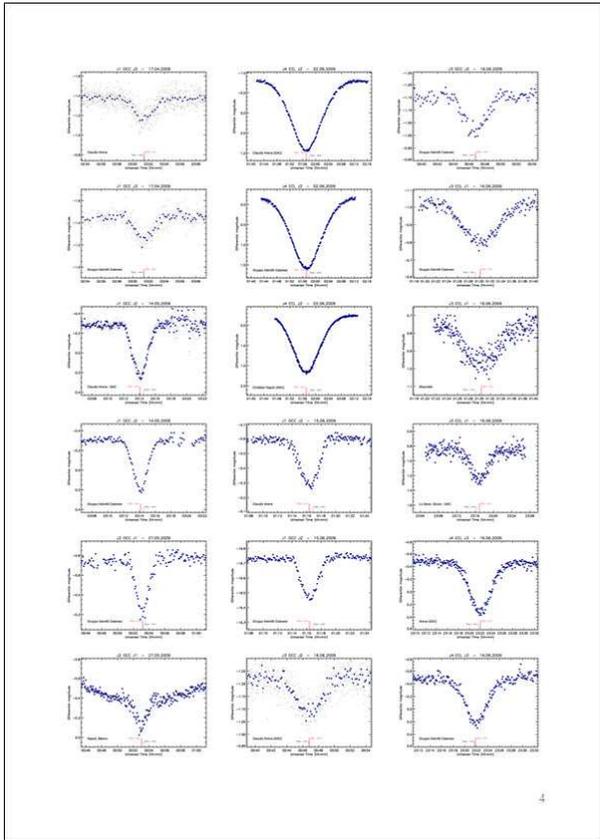
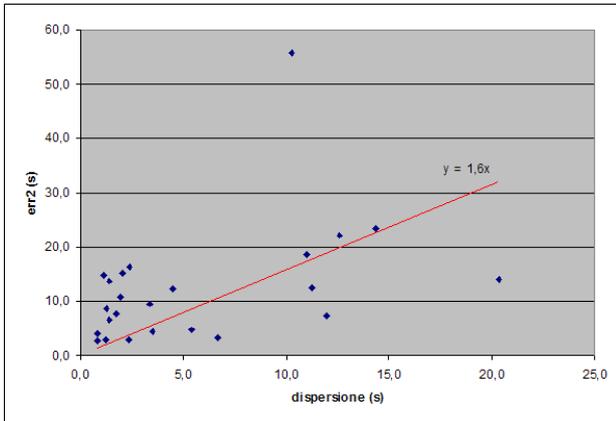


Figure 4 - 72 - Le curve di tipo del fenomeno mutu tra i salotti medici (PHE-MS) che vive in Italia in occasione del ciclo del 2020. Sulasse Y è indicato con tratto continuo l'insieme di minimo osservato (ricavato da ciascuna curva con il metodo MW), mentre con linea tratteggiata è indicato l'insieme previsto in base alle equazioni (5) (7). Nei casi di tempi di poco inferiori di 5 e 6, dai medesimi gruppi sono mostrati sovrapposti ai dati originali (punte piccoli).  
 JT lo J2 Europa J3 Giappone J4 Canada



**Figura 73.** La stima di errore "err.2" descritta nel testo rispetto all'effettiva dispersione dei ToM ottenuti per gli eventi in cui si dispone di più osservazioni contemporanee.

### Analisi dei tempi di minimo

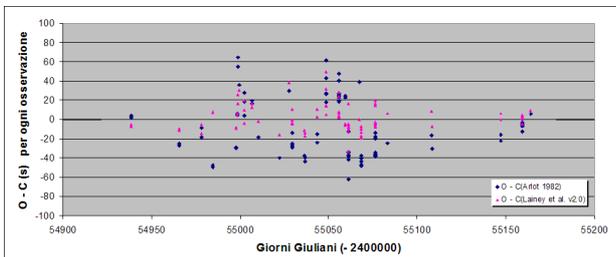
I tempi di minimo (ToM) delle nostre curve di luce sono stati confrontati con gli istanti previsti da due diversi modelli: il modello G5 [11] e il più recente modello L2 (Lainey v2.0) [12]. Le previsioni sono state reperite nei seguenti siti Internet:

<ftp://ftp.imcce.fr/pub/ephem/satel/phemu09>

[http://prod.imcce.fr/hosted\\_sites/saimirror/nssphe0he.htm](http://prod.imcce.fr/hosted_sites/saimirror/nssphe0he.htm)

Nella Figura 74, per ogni osservazione è stata riportata la discrepanza O – C dell'istante di minimo "osservato" rispetto a quello previsto ("calcolato") secondo le due effemeridi suddette.

Nella Tabella 1 sono riportati solo gli O-C rispetto alle effemeridi L2.



**Figura 74.** Differenze tra gli istanti di minimo osservati e i tempi della centralità previsti sulla base di due diverse effemeridi. È evidente che le osservazioni si accordano meglio con le effemeridi L2 (Lainey et al. v2.0).

Per l'analisi che segue, nei casi di disponibilità di più osservazioni dello stesso evento i tempi di minimo ottenuti dai diversi osservatori sono stati mediati. In tali casi, come errore su ogni ToM è stata presa l'effettiva dispersione dei ToM (deviazione standard della media) mentre per l'errore sui ToM ottenuti da osservazioni isolate si è utilizzato il valore di "err.2" diviso per 1.6, sulla base della relazione approssimata che si evince dalla Figura 73.

Per tenere conto dell'aspetto in fase dei satelliti e della legge di diffusione della luce da parte delle superfici, è stato calcolato il termine correttivo secondo il metodo indicato in [13]. L'entità di tale correzione è riportata per ogni evento nella Tabella 1; la correzione diventa rilevante per osservazioni effettuate a qualche mese dall'opposizione di Giove.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Le correzioni riportate rappresentano un "limite massimo" della discrepanza dovuta al solo effetto della fase (e della legge di diffusione luminosa) del satellite, visto che nell'applicare il metodo KW vengono

Gli O – C in secondi sono stati corretti in base al termine suddetto e convertiti in chilometri moltiplicandoli per le velocità apparenti dei satelliti durante ogni evento (tipicamente ~10 – 20 km/s). Le velocità apparenti sono state ottenute:

- per le occultazioni, in base al "parametro di impatto" e alla durata;
- per le eclissi, valutando approssimativamente la velocità di spostamento relativo dei satelliti simulato con il programma Stellarium.

Per la conversione dei km in secondi d'arco è bastato invece applicare la formula

$$Dx'' = \arctan\left(\frac{\Delta x \text{ (km)}}{\text{distanza Giove}}\right).$$

Le discrepanze Dx (rispetto alle effemeridi L2) espresse in km e in secondi d'arco (dopo la correzione per l'effetto della fase) sono riportate nella Tabella 1 e nella Figura 75; esse rappresentano lo scarto tra la posizione dei satelliti dedotta dalle osservazioni e quella prevista, lungo la direzione longitudinale x (linea di moto relativo dei satelliti sul piano del cielo).

Si può notare come l'entità delle discrepanze sia spesso all'interno degli errori. Nei casi in cui le discrepanze sono maggiori degli errori, esse sono indicative di effettive deviazioni rispetto alle previsioni delle effemeridi L2.

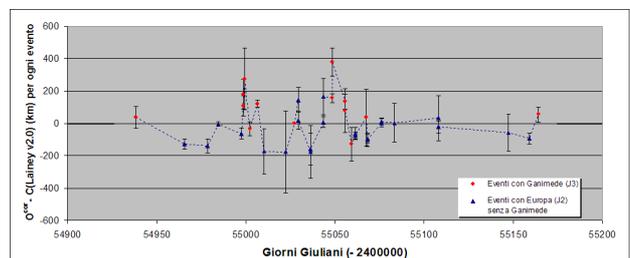
Lo scarto quadratico medio (rms) delle discrepanze in secondi d'arco risulta:

$$\text{rms degli O-C} = 0.03''$$

poco più grande degli errori medi (~0.02'').

La quantità di 0.03'' ottenuta da noi per il 2009 è minore rispetto al valore di 0.055'' ottenuto da Emelyanov [6] grazie al *modelling* di 274 curve di luce del 2003. Si consideri che Emelyanov ha calcolato le discrepanze rispetto alle effemeridi L1, precedenti alle L2 utilizzate nel nostro presente lavoro.

Confrontando i ToM con gli istanti previsti dalle vecchie effemeridi G5 abbiamo notato che i minimi in cui era coinvolto Europa (senza Ganimede) sono stati sempre in anticipo rispetto ai tempi previsti, mentre quelli in cui era coinvolto Ganimede sono stati sempre in ritardo. Tale tendenza sembra persistere, seppure in maniera molto meno marcata, anche utilizzando le effemeridi aggiornate L2 (Figura 75).

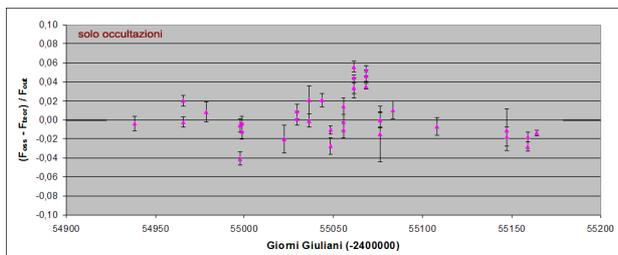


**Figura 75.** Discrepanze tra le posizioni dei satelliti (lungo la direzione del loro moto relativo) dedotte in base al ToM osservato e le posizioni calcolate in base alle effemeridi L2. I tempi osservati sono stati corretti per il possibile effetto dell'aspetto in fase e della legge di diffusione della luce dalla superficie dei satelliti.

tipicamente escluse le parti della curva di luce poste in prossimità dell'inizio e della fine dell'evento, maggiormente affette dalla fase.

### Analisi della profondità dei minimi

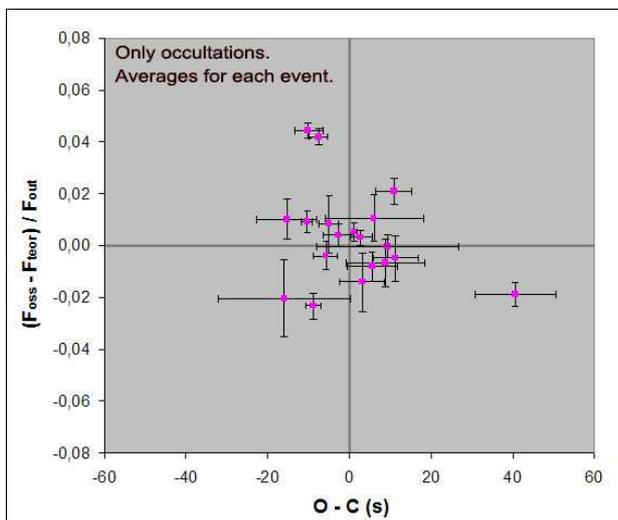
Nella Figura 76, per ogni evento è mostrata la differenza tra la diminuzione di flusso osservata (in rapporto al flusso fuori evento) e quella teorica, mediando i valori nel caso di più osservazioni contemporanee dello stesso evento. Ricordiamo che la diminuzione di flusso è direttamente collegata alla separazione dei satelliti lungo la direzione y e perpendicolare alla linea di moto dei satelliti. L'analisi è stata effettuata solo per le occultazioni, per le quali i cali di flusso osservati sono immediatamente confrontabili con quelli previsti dalle effemeridi L2.



**Figura 76.** Discrepanze tra la diminuzione di flusso osservato e quella prevista in base alle effemeridi L2. Le informazioni da osservazioni contemporanee sugli stessi eventi sono state mediate. Il grafico è riferito alle sole occultazioni.

Le discrepanze “longitudinali” (cioè lungo il moto dei satelliti) O-C espresse in secondi e quelle “trasversali” (perpendicolarmente al moto) espresse in flussi relativi sono state confrontate nella Figura 77 (per le sole occultazioni). Dall'esame del grafico non emerge nessuna relazione tra le discrepanze “longitudinali” e quelle “trasversali”.

Per le eclissi, le effemeridi L2 forniscono le previsioni del calo di flusso riferito solo alla coppia *satellite eclissante – satellite eclissato*. Il confronto tra osservazioni e previsioni, indica discrepanze molto più accentuate nelle eclissi rispetto alle occultazioni.



**Figura 77.** Discrepanze in flusso rispetto alle discrepanze nell'istante di minimo. Le informazioni da osservazioni contemporanee sugli stessi eventi sono state mediate. Il grafico è riferito alle sole occultazioni.

### Discussione sui risultati e conclusioni

L'adesione agli standard osservativi della campagna internazionale PHEMU09 ha permesso agli astrofili italiani di ottenere dati fotometrici utilizzabili dalla comunità scientifica professionale. I dati sono stati inviati all'IMCCE, centro internazionale di raccolta. Come già

avvenuto in occasione del ciclo del 2003, le curve di luce saranno pubblicate su riviste professionali internazionali e saranno utilizzate per affinare le effemeridi e i modelli di meccanica celeste.

Convertendo gli O-C sui ToM in O-C sulla posizione relativa dei satelliti, emergono discrepanze comprese tra qualche km fino a quasi 400 km nella direzione longitudinale del moto apparente dei satelliti. Per molti eventi queste discrepanze superano l'entità degli errori, e quindi indicano effettive deviazioni tra la teoria e le osservazioni. Le discrepanze da noi trovate per il 2009 rispetto alle effemeridi L2 ammontano in media a 0.03" (rms degli O-C in secondi d'arco), contro il valore di 0.055" ottenuto da Emelyanov rispetto alle effemeridi L1 nella sua sofisticata analisi delle migliori 274 curve di luce del 2003 (inclusi anche una decina di curve ottenute allora dal GAC grazie a una webcam).

Le discrepanze da noi trovate rispetto al vecchio modello teorico G5 risultano decisamente più grandi di quelle rispetto al modello L2, a riprova dei notevoli progressi compiuti dagli astronomi nella teoria dei moti dei corpi celesti.

Gli eventi in cui è stato coinvolto Europa (ma non Ganimede) sembrerebbero sistematicamente in anticipo, contrariamente al caso in cui è coinvolto Ganimede, in cui i ToM sono tendenzialmente in ritardo rispetto alle previsioni.

L'assenza di una evidente correlazione tra gli O-C dei ToM e le discrepanze dei cali di luminosità indica che tali deviazioni non sono da addebitare solo alla qualità dei dati o ad effetti strumentali.

Va notato che l'analisi qui proposta è basata sull'esame dei tempi di minimo e dei salti di luminosità, e non sull'applicazione di un effettivo modello di simulazione delle curve di luce. Quest'ultimo approccio ben più sofisticato, seguito da Emelyanov e collaboratori, sarà in grado di fornire risultati più precisi e completi.

**Tabella 1. Risultati dell'analisi delle curve di luce e lista degli osservatori.**

Note: "err.1" è l'incertezza sull'istante di minimo data dal metodo KW (errore formale interno), "err.2" è una stima dell'incertezza attesa sulla base della dispersione dei punti fotometrici e della rapidità calo/risalita, "corr. fase" è la massima correzione da apportare all'istante teorico centrale per tenere conto sia dell'aspetto in fase dei satelliti che della legge di riflessione della luce dalle superfici, "Dx" è la discrepanza tra la posizione attesa e quella dedotta in base all'istante di minimo osservato, lungo la direzione del moto relativo dei satelliti, "err." è l'incertezza su tale discrepanza. Nella colonna "strumentazione" è indicato il tipo di strumento, il diametro in cm, il tipo di camera e l'eventuale filtro. Il simbolo ":" indica misure dubbie (per esempio in relazione all'entità del calo a causa della non linearità del sensore). Il simbolo "\*" indica i casi di eclissi in cui la fotometria è riferita alla coppia satellite eclissato + satellite eclissante, in quanto non è stato possibile isolare il solo satellite eclissato durante la fotometria. I cali teorici riportati tra parentesi (eclissi in cui è stato possibile isolare il satellite eclissato) sono stati dedotti dalle effermeridi G5; i cali teorici per tutti gli altri casi e tutti i tempi di minimo teorici sono ottenuti con le effermeridi L2.

**Legenda eventi:** "J1 OCC J3" si legge come "J1 occulta J3"; J1: Io, J2: Europa, J3: Ganimede, J4: Callisto.

**Legenda osservatori:** ARE: Claudio Arena, BAR: Lorenzo Barbieri, LOP: Claudio Lopresti, LOS: Emilio Lo Savio, MXI: Alessandro Marchini, MAR: Giuseppe Marino, MAS: Gianluca Masi, MAU: Raffaele Maulella, NAP: Christian Napoli, SAL: Fabio Salvaggio, SBA: Gerardo Sbarufatti, SCI: Concetto Sciuto, RUO: Nello Ruocco, RUI: Renzo Ruisi, SOF: Antonio Sofia, TON: Eribero Tontodonati, ZAM: Roberto Zambelli.

data	evento	tempo di min. (G.G. -2400000)	err.1 (s)	err.2 (s)	(O-C) (s)	corr. fase (s)	Dx (km ("))	err. (km ("))	calo teor. (mag)	calo oss. (mag)	err. calo (mag)	strumentazione	osservatori
17.04.2009	J1 OCC J3	54938.626004	± 5.3	± 4.9	-4.8	-7	37 0.01"	± 69 ±0.02"	0.195	0.20	±0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
17.04.2009	J1 OCC J3	54938.625980	2.7	8.4	-6.8				0.195	0.20	0.01	Refl.23+ST7+R	LOS-MAR-SAL
14.05.2009	J1 OCC J2	54965.634776	1.0	3.4	-11.3	-5	-128 -0.03"	31 0.01"	0.536	0.54	0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
14.05.2009	J1 OCC J2	54965.634796	1.2	2.5	-9.6				0.536	0.50	0.01	Refl.23+ST7+R	LOS-MAR
27.05.2009	J2 OCC J1	54978.536921	1.1	3.9	-5.0	-5	-140 -0.03"	43 0.01"	0.565	0.55	0.02	Refl.23+ST7+R	LOS-SAL
27.05.2009	J2 OCC J1	54978.536812	2.2	2.8	-14.4				0.565	:0.29	0.02	Refl.20+DSI	MAR-NAP
02.06.2009	J4 ECL J2	54984.581369	1.2	2.1	7.3	8	-4 -0.00"	14 0.00"	(0.90)	1.72	0.004	Refl.20+DSI_II	ARE
02.06.2009	J4 ECL J2	54984.581381	0.6	3.5	8.3				(0.90)	1.76	0.01	Refl.23+ST7+I	LOS-SAL
02.06.2009	J4 ECL J2	54984.581363	0.9	2.8	6.8				(0.90)	:1.40	0.01	Refl.20+DSI+R	MAR-NAP
15.06.2009	J1 OCC J2	54997.553047	1.7	4.0	-8.3	-6	-64 -0.02"	34 0.01"	0.262	0.27	0.01	Refl.20+ST7	LOS-MAR-SAL
15.06.2009	J1 OCC J2	54997.553032	2.5	4.0	-9.6				0.262	0.32	0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
16.06.2009	J3 OCC J2	54998.532529	4.8	11.8	6.5	-7	181 0.05"	92 0.03"	0.125	0.14	0.01	Refl.23+ST7+I	LOS-SAL
16.06.2009	J3 OCC J2	54998.532506	4.8	15.6	4.5				0.125	0.13	0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
16.06.2009	J3 ECL J1	54998.562627	1.0	22.9	16.5	:	108 0.03"	64 0.02"	(0.23)	0.21	0.01	Refl.23+ST7+I	LOS-SAL
16.06.2009	J3 ECL J1	54998.562737	2.4	22.1	26.0				(0.23)	0.19	0.01	Refl.20+DSI+icut	SBA
16.06.2009	J3 ECL J1	54999.470108	1.9	25.2	30.3	7	275 0.07"	190 0.05"	(0.41)	0.39	0.02	Refl.23+ST7	LOS-SCI
19.06.2009	J4 ECL J3	55002.473624	1.9	6.2	10.1	11	-32 -0.01"	45 0.01"	(0.85)	0.77	0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
19.06.2009	J4 ECL J3	55002.473461	0.7	6.3	-4.0				(0.85)	0.71	0.02	Refl.23+ST7a	LOS-MAR
19.06.2009	J4 ECL J3	55002.473738	5.2	9.3	19.9				(0.85)	0.64	0.10	Refl.35+ST8+R	MAS-RUO
24.06.2009	J3 ECL J1	55006.605792	0.7	3.2	12.9	6	121 0.03"	20 0.01"	(0.69)	0.81	0.01	Refl.23+ST7	LOS-MAR
24.06.2009	J3 ECL J1	55006.605830	0.5	2.7	16.2				(0.69)	:0.56	0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
27.06.2009	J2 ECL J4	55010.428227	0.7	15.7	-1.7	11	-173 -0.05"	137 0.04"	(0.81)	0.37	0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
09.07.2009	J1 OCC J2	55022.370440	1.7	25.8	-15.9	-5	-177 -0.05"	252 0.07"	0.203	0.23	0.02	Refl.20+DSI_II	ARE
15.07.2009	J3 ECL J4	55027.600648	5.3	36.7	38.5	:	:	:	(0.20)	0.08	0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
16.07.2009	J1 ECL J2	55029.410186	1.2	8.4	10.6	1	144 0.04"	76 0.02"	(0.36)	0.33	0.02	Refl.23+ST7+I	LOS-SAL
16.07.2009	J1 OCC J2	55029.460704	1.6	10.1	-3.1	-4	21 0.01"	57 0.01"	0.232	0.23	0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
16.07.2009	J1 OCC J2	55029.460689	2.2	9.9	-4.4				0.232	0.23	0.01	Refl.23+ST7+I	LOS-SAL
16.07.2009	J1 OCC J2	55029.460735	2.0	12.2	-0.5				0.232	0.22	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
24.07.2009	J1 ECL J2	55036.510450	3.7	19.5	-11.6	2	-177 -0.05"	162 0.04"	(0.50)	0.30	0.03	Refr.8+EOS	TON
24.07.2009	J1 OCC J2	55036.550920	4.2	8.7	-17.0	-4	-158 -0.04"	97 0.03"	0.279	0.28	0.01	Refl.25+ST7+R	RUO
24.07.2009	J1 OCC J2	55036.550959	4.5	23.7	-13.6				0.279	0.25	0.02	Refr.8+EOS	TON
31.07.2009	J1 ECL J2	55043.613209	2.0	4.5	2.3	2	8 0.00"	34 0.01"	(0.63)	0.68	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
31.07.2009	J1 OCC J2	55043.642320	1.1	14.7	10.9	-3	166 0.04"	113 0.03"	0.351	0.32	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
04.08.2009	J3 ECL J2	55048.411939	2.9	9.0	14.1	1	156 0.05"	27 0.01"	0.465	0.47*	0.01	Refl.20+DSI_II	ARE
04.08.2009	J3 ECL J2	55048.411835	0.6	2.1	5.1				(1.63)	2.78	0.02	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
04.08.2009	J3 ECL J2	55048.411946	2.9	3.4	14.7				(1.63)	3.44	0.21	Refl.25+ST7+R	RUO
04.08.2009	J3 OCC J2	55048.453545	6.1	19.5	31.8	-2	379 0.11"	88 0.02"	0.058	0.07	0.005	Refl.20+DSI_II	ARE
04.08.2009	J3 OCC J2	55048.453751	8.9	24.6	49.6				0.058	0.09	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA

12.08.2009	J3	ECL	J2	55055.578745	2.5	12.5	8.5	0	135 0.04"	46 0.01"	0.465	0.52*	0.01	Refr.10+ST7+R	MXI
12.08.2009	J3	ECL	J2	55055.578690	2.9	12.0	3.8				0.465	0.48*	0.01	Refl.20+ST7+R	LOS-MAR
12.08.2009	J3	ECL	J2	55055.578723	2.2	9.9	6.6				0.465	0.49*	0.01	Refl.20+DSI+icut	SBA
12.08.2009	J3	ECL	J2	55055.578975	3.1	15.3	28.4				0.465	:0.32*	0.01	Refl.15+DSI	NAP
12.08.2009	J3	OCC	J2	55055.590875	5.2	43.5	2.1	-1	78 0.03"	136 0.04"	0.097	0.11	0.01	Refr.10+ST7+R	MXI
12.08.2009	J3	OCC	J2	55055.590885	0.7	50.5	2.9				0.097	0.08	0.01	Refl.20+ST7+R	LOS-MAR
12.08.2009	J3	OCC	J2	55055.590949	4.0	43.1	8.5				0.097	0.10	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
12.08.2009	J3	OCC	J2	55055.591131	7.9	86.0	24.2				0.097	0.10	0.01	Refl.15+DSI	NAP
15.08.2009	J1	ECL	J3	55059.495441	0.8	7.3	-5.9	0	-129 -0.04"	103 0.03"	0.442	0.18*	0.005	Refl.20+ST7+R	MAR
15.08.2009	J1	ECL	J3	55059.495461	2.7	9.8	-4.2				0.442	0.18*	0.005	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
17.08.2009	J1	ECL	J2	55061.385758	1.4	15.3	-4.5	-1	-64 -0.02"	36 0.01"	0.439	0.28*	0.01	Refl.25+ST7+R	MXI <i>et al.</i>
17.08.2009	J1	ECL	J2	55061.385431	7.4	11.6	-32.8				0.439	0.27*	0.01	Refl.25+ ToUc	RUI
17.08.2009	J1	ECL	J2	55061.385999	4.3	15.3	16.3				0.439	0.26*	0.01	Refl.25+ST7+R	RUO
17.08.2009	J1	ECL	J2	55061.385662	6.4	14.5	-12.8				0.439	0.24*	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
17.08.2009	J1	OCC	J2	55061.377899	1.3	6.6	-7.5	1	-75 -0.02"	21 0.01"	0.623	0.54	0.004	Refl.25+ST7+R	MXI <i>et al.</i>
17.08.2009	J1	OCC	J2	55061.377894	4.1	6.1	-8.0				0.623	0.56	0.01	Refl.25+ToUc	RUI
17.08.2009	J1	OCC	J2	55061.377925	4.2	10.2	-5.3				0.623	0.56	0.02	Refl.20+ST7+R	RUO
17.08.2009	J1	OCC	J2	55061.377875	1.7	7.5	-9.6				0.623	0.52	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
24.08.2009	J1	ECL	J3	55067.561936	5.5	21.3	0.3	-3	36 0.01"	173 0.05"	0.249	0.10*	0.01	Refl.20+ST7+R	MAR
24.08.2009	J1	OCC	J2	55068.479821	1.2	5.1	-9.9	3	-94 -0.03"	24 0.01"	0.626	0.56	0.005	Refl.20+ST7+R	MAR
24.08.2009	J1	OCC	J2	55068.479781	2.8	13.6	-13.4				0.626	0.53	0.01	Refl.25+ST7+R	RUO
24.08.2009	J1	OCC	J2	55068.479858	2.4	9.9	-6.8				0.626	0.54	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
25.08.2009	J1	ECL	J2	55068.509662	2.3	12.2	-18.7	-2	-101 -0.03"	42 0.01"	0.373	0.22*	0.005	Refl.20+ST7+R	MAR
25.08.2009	J1	ECL	J2	55068.509680	2.2	17.3	-17.2				0.373	0.23*	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
01.09.2009	J1	OCC	J2	55076.334477	4.0	20.3	-3.1	8	3 0.00"	26 0.01"	0.230	:0.14	0.005	Refl.20+DSI+R	MAR-NAP
01.09.2009	J1	OCC	J2	55076.334483	6.8	18.8	-2.6				0.230	0.25	0.04	Refl.25+ST7+R	RUO
01.09.2009	J1	OCC	J2	55076.334703	0.9	13.9	16.4				0.230	0.23	0.01	Refl.20+DSI_II+icut	SBA
01.09.2009	J1	OCC	J2	55076.334744	3.1	13.4	19.9				0.230	0.23	0.01	Refl.23+ST7+R	LOS-SAL
01.09.2009	J1	OCC	J2	55076.334679	0.9	27.0	14.3				0.230	:0.17	0.01	Refl.25+ ToUc	RUI
01.09.2009	J1	ECL	J2	55076.377497	1.9	13.0	-3.7	-8	11 0.00"	23 0.01"	0.312	:0.18*	0.005	Refl.20+DSI+R	MAR-NAP
01.09.2009	J1	ECL	J2	55076.377445	6.3	11.4	-8.2				(0.47)	0.54	0.03	Refl.25+ST7+R	RUO
01.09.2009	J1	ECL	J2	55076.377465	2.6	11.2	-6.5				0.312	0.19*	0.005	Refr.20+DSI_II+icut	SBA
01.09.2009	J1	ECL	J2	55076.377486	2.6	24.9	-4.7				0.312	0.18*	0.004	Refl.23+ST7+R	LOS-SAL
08.09.2009	J1	OCC	J2	55083.434752	5.8	19.4	6.1	6	4 0.00"	119 0.03"	0.234	0.22	0.01	Refl.25+ST7	RUO
03.10.2009	J1	OCC	J2	55108.270854	3.1	15.5	8.8	6	33 0.01"	140 0.04"	0.191	0.20	0.01	Refl.25+ST7	RUO
03.10.2009	J1	ECL	J2	55108.348608	1.0	3.5	-6.7	-5	-21 -0.01"	37 0.01"	(1.06)	1.40	0.04	Refl.25+ST7	RUO
11.11.2009	J1	OCC	J2	55147.297569	11.0	18.0	-0.1	6	-56 -0.01"	112 0.03"	0.275	0.29	0.03	Refl.40+CCD+R	BAR
11.11.2009	J1	OCC	J2	55147.297643	1.4	6.6	6.3				0.275	0.30	0.01	Refl.11+ToUc	SOF
23.11.2009	J2	OCC	J1	55159.228989	0.4	1.8	4.7	5	-95 -0.02"	34 0.01"	0.586	0.62	0.01	Refl.20+DSI_II+I	ARE-MAR
23.11.2009	J2	OCC	J1	55159.228963	1.2	2.0	2.4				0.586	0.64	0.01	Refl.40+DMK+R	BAR
23.11.2009	J2	OCC	J1	55159.228884	1.8	9.0	-4.4				0.586	0.44	0.04	Refl.18+ST10+R	LOP
23.11.2009	J2	OCC	J1	55159.228945	1.4	5.6	0.9				0.586	0.53	0.03	Refl.20+ToUc	LOP
23.11.2009	J2	OCC	J1	55159.229148	-	-	-				0.586	0.57	0.06	Refl.20+video	MAU
23.11.2009	J2	OCC	J1	55159.228973	0.5	3.3	3.3				0.586	0.47	0.01	Refl.25+ToUc	ZAM
28.11.2009	J3	OCC	J2	55164.241976	1.5	4.3	9.3	6	54 0.01"	49 0.01"	0.202	0.22	0.004	Refl.41+DSI_II+R	ARE-MAR

## **Bibliografia**

- [1] Marino G., *Astronomia*, (1), 5-7 (2009)
- [2] Arlot J.-E., *A&A* **478**, 285-298 (2008)
- [3] Arlot J.-E., *et al.*, *A&A* **493**, 1171-1182 (2009); la Tabella 4 è scaricabile cliccando su *Browse* all'indirizzo <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/493/1171>
- [4] Lainey V., Arlot J.-E., Karatekin Ö., van Hoolst T., *Nature* **459**, 957-959 (2009)
- [5] Emelyanov N.V., Gilbert R., *A&A* **453**, 1141-1149 (2006)
- [6] Emelyanov N.V., *MNRAS* **394**, 1037-1044 (2009)
- [7] Arlot J.-E., Emelyanov N.V., *A&A* **503**, 631-638 (2009); <http://www.imcce.fr/nsdc>
- [8] Spampinato S.A. *et al.*, *Astronomia*, (4), 47-50 (2004)
- [9] Kwee K.K., van Woerden M., *Bull. Astron. Inst. Nether.*, **12**, 464, 327-330 (1956)
- [10] Froeschlé M., Meyer C., Mignard F., *A&A* **262**, 308-314 (1992)
- [11] Arlot J.-E., *A&A* **107**, 305-310 (1982)
- [12] Lainey V., Duriez L., Vienne A., *A&A* **420**, 1171-1183 (2004)
- [13] Aksnes K., Franklin F., Magnusson P, *AJ*, **92**, 1436-1444