

Giuseppe Marino

Occultazioni ed eclissi tra i satelliti di Giove: campagna Phemu09

Gruppo Astrofili Catanesi, Unione Astrofili Italiani - giumar69@gmail.com

Abstract

A new sequence of Mutual Phenomena - occultations and eclipses - between Medicean Satellites (PHEMU) are occurring during 2009, also including some visually spectacular events. The list of the events visible from Italy are presented. Photometric observations of the light drop during mutual phenomena allow to estimate central time and light flux drop; they are related with the astrometric coordinates, usefull to astronomers to check orbital and physical models. I present some suggestions to obtain light curves by electronic amatorial equipments (CCD, webcams, digital camera), including indications about timing setting. The purpose is to collect scientifically useful data to participate to the PHEMU09 international campaign.

Occultazioni ed eclissi tra i satelliti di Giove

Ad intervalli di circa sei anni ricorre l'equinozio del pianeta Giove. I suoi satelliti medicei (Io, Europa, Ganimede e Callisto) orbitano su piani quasi coincidenti con l'equatore del pianeta, piani che anch'essi, quindi, si trovano ad essere attraversati dal Sole in corrispondenza di quest'evento. In tali condizioni l'ombra di un satellite può essere proiettata su un altro, dando luogo a un'eclisse. La geometria è pure molto simile rispetto alla Terra, che attraversa i piani delle orbite in epoche mai distanti dall'equinozio. Di conseguenza, non solo i satelliti appaiono allineati col pianeta quando sono visti al telescopio, ma possono transitare l'uno di fronte all'altro: in questo caso si tratta delle occultazioni (figure 1 e 2). È da notare che l'eclisse è meglio visibile quando Sole e Terra non si trovano nella stessa direzione, ovvero lontano dall'opposizione di Giove. In queste condizioni di illuminazione "di lato", infatti, il satellite eclissato e quello eclissante si trovano ben separati quando osservati al telescopio.

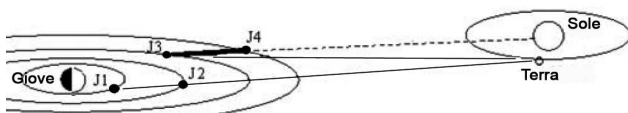


Figura 1. Schematizzazione di due PHEMU: il satellite J2 (Europa) occultata J1 (Io), J4 (Callisto) eclissa J3 (Ganimede).

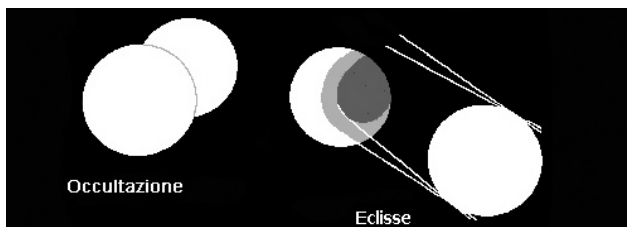


Figura 2. Rappresentazione di un'occultazione e di un'eclisse. Nell'eclisse, si distinguono l'ombra e la penombra.

Queste eclissi e occultazioni sono dette "mutue" poiché avvengono, appunto, tra satelliti. I "fenomeni mutui" rappresentano quindi degli eventi più rari rispetto ai fenomeni "classici" di eclisse e occultazione da parte del pianeta stesso.

I PHEMU del 2009

L'ultimo ciclo di fenomeni mutui tra i satelliti medicei (PHE-

MU) si è verificato nel 2003, il prossimo è atteso per il 2009. La declinazione negativa di Giove e la data della sua opposizione (che seguirà di quattro mesi il periodo di miglior giacenza della Terra sul piano orbitale dei satelliti) rendono la visibilità dei PHEMU del 2009 meno favorevole rispetto al 2003. Sul sito Internet dell'*Institut de Mécanique Céleste e de Calcul des Ephémérides - Paris* (IMCCE), all'indirizzo http://www.imcce.fr/page.php?nav=en/observateur/campagnes_obs/phemu09/prog_interactif.php, è disponibile una procedura che permette di ottenere la lista degli eventi osservabili da ogni località [1]. Le differenze nella visibilità dai diversi siti dipendono essenzialmente dall'elevazione del sistema Giove-satelliti, mentre possono essere trascurate le differenze negli istanti di inizio e fine di ogni evento. Pertanto, le predizioni riportate nella tabella 1, seppure ottenute per Catania, sono valide per tutta l'Italia, fatte salve le piccole differenze dei valori di altezza.

Perché osservare i PHEMU?

Dall'esame della tabella 1, emergono fenomeni con cali di luminosità dell'ordine di una magnitudine o più: sono eventi spettacolari già all'osservazione visuale, ed è quindi indubbio il loro valore didattico. Inoltre, la rilevazione della luminosità dei satelliti al trascorrere del tempo (fotometria) può permettere all'astrofilo di fornire un proprio contributo alla ricerca scientifica.

Sono deducibili dalla fotometria di un PHEMU:

- la diminuzione percentuale di flusso luminoso (o la corrispondente variazione di magnitudine);
- l'istante centrale di minimo.

Le suddette quantità forniscono dati astrometrici, essendo relazionate alla distanza angolare minima tra i due satelliti coinvolti e all'istante di tempo in cui si verifica tale condizione. Pertanto, il modello ottenuto dall'analisi di una curva di luce fotometrica da parte degli esperti permette di ricavare misure che si affiancano a quelle di astrometria classica per immagini, indispensabili come riscontro osservativo per affinare le effemeridi (che possono anche dipendere dalla conoscenza di effetti mareali o della struttura interna dei satelliti [2]).

Le analisi più evolute dei dati fotometrici si basano su:

- leggi di diffusione della luce solare da parte della superficie del satellite;
- leggi del moto relativo dei satelliti durante l'evento (per esempio moto rettilineo uniforme);
- mappe di albedo dei satelliti [3] ed effetti di fase.

Le coordinate astrometriche dedotte dall'analisi di curve di luce di PHEMU, anche quando non si considerano gli effetti di albedo e di fase [3], sono caratterizzate da una precisione migliore di 0.1", che è il valore tipico in astrometria classica per immagini. Ciò giustifica l'importanza dell'osservazione dei PHEMU ai fini di poter dedurre dati astrometrici di grande precisione.

L'osservazione visuale

La fotometria visuale, possibile per le eclissi con calo di almeno

0.5-1 magnitudini, può arrivare a fornire dati con accuratezza astrometrica di circa 0.06", corrispondenti a circa 220 km [4], valore non disprezzabile se si considera che ancora al tempo delle prime missioni spaziali, le posizioni dei satelliti medicei erano note con una precisione di circa 400 km. Jean-Eudes Arlot (IMCCE), coordinatore della campagna internazionale PHEMU09, considera le osservazioni visuali ancora di qualche utilità scientifica, visto che talvolta possono essere effettuate in situazioni che non consentono l'uso di tecniche elettroniche, o possono aiutare a sciogliere la riserva su dati in cui l'identificazione dei satelliti sia risultata dubbia [5]. Osservatori visuali, inclusi soci UAI, compaiono ancora tra gli autori del report della campagna PHEMU03, pubblicato sulla rivista professionale internazionale *Astronomy & Astrophysics* [6]. La tecnica visuale è basata sul confronto, ad intervalli di una ventina di secondi, tra il satellite eclissato e uno o più satelliti vicini. Per misurare la luminosità rispetto ai satelliti di confronto si possono adottare i "gradini" del metodo di Argelander, comunemente utilizzato nell'osservazione delle stelle variabili [7].

Fotometria con webcam

In occasione della campagna PHEMU03, l'uso della webcam ha permesso di ottenere curve di luce scientificamente valide, con precisione mediamente compresa tra 0.05 e 0.1 magnitudini sui singoli punti fotometrici (un esempio è mostrato nella figura 3) [6, 8].

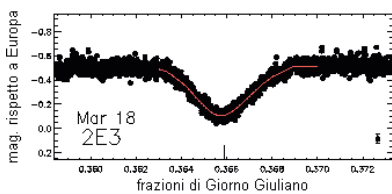


Figura 3. Curva di luce di Ganimede ("3") eclissato dall'ombra di Europa ("2") il 18 marzo 2003. Le magnitudini sono state estratte con il comando Automatic Photometry di Iris.

Le magnitudini possono essere misurate (rispetto a uno o più satelliti adottati per confronto) su immagini riprese al fuoco diretto con il tempo di esposizione più lungo consentito dalla webcam (massimo 1/25 s per le comuni webcam commerciali - esempio in figura 4). Riprendendo immagini FITS in sequenza (per esempio grazie al comando *Images acquisition* del programma *Iris*) il campionamento massimo è di circa 1.6 pose per

Tabella 1. Fenomeni mutui tra satelliti medicei (PHEMU) del 2009 osservabili dall'Italia in orario notturno.

1: Io, 2: Europa, 3: Ganimede, 4: Callisto, P: parziale, T: totale, q: eclisse di penombra, R.G.: raggi gioviani dal centro del pianeta.

La durata, se non tra parentesi, è relativa alla sola fase di ombra. Nel caso di occultazioni (OCC) il calo di luminosità è riferito all'insieme dei due satelliti coinvolti; per le eclissi (ECL), il calo è invece riferito al solo satellite eclissato.

Mese	Giorno	Evento	Centralità (Tempo Universale)	Durata (s)	Calo (mag.)	Distanza da Giove (R.G.)	Altezza Giove (°)	Altezza Sole (°)
4	17	1 OCC 3 P	03 01 23.	338	0.22	4.1	14	-16
4	20	3 OCC 1 P	03 48 02.	315	0.25	3.1	23	-6
5	14	1 OCC 2 P	03 14 32.	284	0.51	4.4	30	-7
5	27	2 OCC 1 P	00 53 19.	234	0.58	2.7	17	-25
6	2	4 ECL 2 P	01 57 59.	886	0.90	9.4	30	-17
6	15	1 OCC 2 P	01 16 52.	309	0.25	5.2	31	-21
6	16	3 ECL 1 P	01 29 16.	293	0.23	5.8	33	-20
6	16	3 ECL 1 P	23 16 21.	256	0.41	5.9	14	-29
6	19	4 ECL 3 q	23 21 43.	(814)	0.85	4.2	17	-29
6	20	1 ECL 3 q	00 57 53.	(342)	0.20	3.3	31	-23
6	24	3 ECL 1 P	02 32 04.	283	0.69	5.7	39	-11
7	16	1 ECL 2 P	21 50 54.	229	0.36	6.4	20	-29
7	16	1 OCC 2 P	23 03 53.	396	0.22	5.7	30	-31
7	23	4 ECL 2 q	23 11 29.	(457)	0.16	6.8	34	-32
7	24	1 ECL 2 P	00 15 40.	294	0.50	6.3	38	-30
7	24	1 OCC 2 P	01 14 03.	446	0.26	5.8	37	-25
7	31	1 ECL 2 P	02 43 25.	355	0.63	6.2	27	-14
7	31	1 OCC 2 P	03 25 12.	511	0.33	5.8	21	-7
8	4	3 ECL 2 P	21 52 45.	675	1.63	9.3	31	-33
8	8	1 ECL 3 A	20 42 59.	312	0.40	5.5	24	-27
8	12	3 ECL 2 P	01 52 56.	865	5.99	9.4	26	-24
8	15	1 ECL 3 P	23 53 03.	359	0.36	5.5	36	-37
8	16	1 ECL 3 A	20 44 51.	1662	0.44	5.6	29	-29
8	17	1 ECL 2 P	21 16 03.	601	0.81	5.7	32	-33
8	17	1 OCC 2 P	21 04 47.	762	0.59	5.8	31	-32
8	24	1 ECL 3 P	01 28 32.	342	0.18	6.3	21	-30
8	24	1 OCC 2 T	23 31 37.	947	0.60	5.7	34	-41
8	25	1 ECL 2 P	00 14 43.	831	0.69	5.3	30	-39
8	25	1 ECL 2 P	18 14 36.	412	0.19	6.1	12	-8
9	1	1 ECL 2 P	21 04 10.	460	0.47	6.3	36	-37
9	1	1 OCC 2 P	20 02 16.	713	0.23	5.9	31	-28
9	8	1 ECL 2 P	23 42 56.	449	0.89	6.5	26	-46
9	8	1 OCC 2 P	22 26 27.	599	0.24	5.9	33	-46
9	26	1 ECL 2 P	17 57 45.	362	1.51	6.7	29	-14
10	3	1 ECL 2 P	20 22 30.	307	1.06	6.7	34	-43
10	3	1 OCC 2 P	18 30 18.	386	0.19	5.8	34	-23
10	10	1 ECL 2 P	22 45 24.	235	0.57	6.7	14	-59
10	10	1 OCC 2 P	20 47 05.	352	0.18	5.7	30	-49
10	16	3 OCC 2 P	21 13 35.	498	0.13	8.9	24	-55
11	2	2 OCC 3 A	18 52 19.	350	0.33	3.4	33	-35
11	4	1 OCC 2 P	16 49 29.	295	0.22	5.2	35	-11
11	11	1 OCC 2 P	19 08 52.	292	0.27	5.0	28	-39
11	23	2 OCC 1 A	17 29 48.	238	0.60	2.8	34	-21
11	28	3 OCC 2 P	17 48 21.	371	0.14	7.3	31	-25
11	30	2 OCC 1 P	19 47 47.	240	0.53	3.1	14	-48
12	13	1 OCC 2 P	17 44 11.	268	0.52	4.1	26	-24

Dati in pubblicazione su *Astronomy & Astrophysics* nel report PHEMU03 [6]. La linea continua è un'interpolazione ottenuta con il programma AVALON [9].

Webcam Philips ToUcam Pro al fuoco diretto di uno Schmidt-Cassegrain da 25 cm f/10 (Gruppo Astrofilii Catanesi).

secondo. Di massima importanza è la precisa sincronizzazione dell'orologio del computer con un segnale orario standard, fattibile per esempio grazie ai *software* disponibili in Internet. La sincronizzazione deve essere effettuata appena prima delle osservazioni. Per verificare che la sincronizzazione sia avvenuta con la precisione adeguata è opportuno riprendere l'orologio del PC con la *webcam*, e confrontare lo scarto temporale tra il passaggio del secondo nell'*header* FITS e nell'immagine. Purtroppo, l'esigenza di dover assegnare a ogni immagine un istante di tempo attendibile con una precisione dell'ordine di 0.1 s, non rende facilmente attuabile, con la *webcam*, una procedura basata su riprese filmate (che pure darebbero un numero molto più elevato di *frame* per secondo). Ciò anche a causa dei "*frame duplicati*" che quasi sempre si introducono nei normali filmati AVI. Questo genere di problemi può essere superato se si dispone di un'apparecchiatura che riproduca un segnale orario sui singoli *frame*.



Figura 4. Tre riprese ottenute in occasione dell'eclisse totale di Europa da parte di Ganimede del 31 maggio 2003. Da sinistra: Europa, Ganimede, Io, Giove, Callisto. Webcam Philips ToUcam Pro al fuoco di uno Schmidt-Cassegrain da 20 cm f/10 (Gruppo Astrofilo Catanese).

Fotometria con fotocamere digitali

È possibile ottenere buone curve di luce anche con una comune fotocamera digitale *reflex* ("DSLR"). La camera deve essere impostata sulla modalità M ("manuale"), le immagini devono essere in formato RAW e il tempo di esposizione deve essere in *bulb* (posa "B"). Tra i *software* per la gestione via PC delle *reflex* digitali, l'unico a nostra conoscenza che permette di registrare l'istante di tempo con la richiesta risoluzione di 0.1 s è *Maxim DL* (versione 4.62 e successive); esso offre anche la possibilità di attivare il blocco dello specchio della fotocamera (dopo aver impostato l'opzione dal *menu* della camera) onde evitare vibrazioni al momento dello scatto. Per essere certi che il tempo registrato sull'immagine corrisponda all'effettivo istante dell'esposizione è opportuno fare dei test, preferibilmente di giorno. Per ottenere curve di luce affidabili è necessario scattare anche una decina di foto a telescopio tappato ("*dark*") con lo stesso tempo di posa usato per riprendere il fenomeno. Pure le foto di *flat field*, ottenute riprendendo un campo uniformemente illuminato (per esempio il cielo crepuscolare) contribuiscono a rendere più accurata la curva di luce. La calibrazione

delle immagini per il *dark* e il *flat* è praticamente immediata se si utilizza il programma *DeepSkyStacker*, ma vanno benissimo anche gli altri comuni *software* astrofotografici.

Fotometria CCD

Una camera CCD è caratterizzata generalmente da una precisione fotometrica sufficiente per ottenere dati di livello professionale. La necessità di un'elevata accuratezza nella registrazione dei tempi, onde ottenere dati scientificamente validi, impone alcuni accorgimenti che sono generalmente trascurati nella fotometria di stelle variabili (caratterizzate da variazioni meno repentine). Precisamente, bisogna:

- 1) stimare il ritardo tra l'istante dello "*start*" e l'effettivo inizio delle pose;
- 2) assicurarsi che l'istante di inizio posa venga registrato con una risoluzione di almeno 0.1 s (di *default* i comuni programmi arrivano a registrare il secondo);
- 3) sincronizzare il computer con un segnale orario standard, per esempio via Internet, e verificarne l'attendibilità confrontandolo con l'orario fornito da un comune orologio radiocontrollato.

Ovviamente, bisogna anche sapere se viene registrato l'istante di inizio, di metà o di fine posa. Va rilevato che, purtroppo, l'accuratezza nei tempi registrati può facilmente superare i ± 0.1 s, anche a seconda del sistema operativo e dei processi attivi.

Particolarmente valido per le calibrazioni 1) e 2) è il programma *Maxim DL*. Le relative operazioni, di seguito elencate, possono essere fatte una sola volta, preferibilmente di giorno:

- applicare al CCD un sistema di lenti (per esempio un oculare) che funga da obiettivo;
- con *Maxim DL*, focalizzare il CCD sul monitor del computer;
- dalla finestra di controllo CCD di *Maxim DL*: *Settings* --> *Options* --> *Shutter Latency Measurements*;
- seguire le istruzioni ivi presentate.

In fase di ripresa è molto importante ridurre il "tempo morto" di *download* dell'immagine tra una posa e l'altra. Questo tempo, che per una ST-10 può arrivare a una decina di secondi per via dell'elevato numero di pixel, va assolutamente ridotto selezionando l'area di interesse. Con *Maxim DL*, ciò è possibile dalla sezione *Subframe* di *Settings* e poi abilitando, in *Sequence*, l'opzione *Subframe for Settings tab*. Ovviamente, l'area scelta deve comprendere il satellite coinvolto nell'evento (o la coppia di satelliti se si tratta di occultazioni) e almeno un altro satellite di confronto. Nello stabilire la durata di ogni esposizione bisogna assicurarsi un campionamento sufficiente della curva di luce di almeno 30 punti sull'intera durata del fenomeno (anche se questo è un limite piuttosto piccolo rispetto ai comuni standard delle campagne PHEMU). D'altronde, l'elevata luminosità dei satelliti medicei (intorno alla quinta magnitudine) richiede esposizioni molto brevi (anche piccole frazioni di secondo). Evitando di saturare l'immagine, è comunque opportuno mantenersi al di sopra di 0.2 s di esposizione, per via dell'apertura non istantanea dell'otturatore. Tempi di posa molto più lunghi del secondo sarebbero da preferire per ridurre gli effetti della scintillazione atmosferica (*seeing*) sebbene, come suggerito da Arlot [13], la posa effettiva potrà essere allungata sommando (o mediando) a gruppi i dati ottenuti dall'analisi fotometrica delle immagini. Infatti, il flusso accumulato in una lunga esposizione equivale (anche in termini di "rumore" dei dati) alla somma dei flussi acquisiti in pose brevi riprese nello stesso intervallo di tempo, purché il tempo morto per il *download* di ogni posa sia molto più breve della durata della posa stessa. In

caso contrario, le singole pose lunghe sono da preferire, ma solo se si dispone di un buon inseguimento, visto che la qualità della fotometria decade con immagini mosse. In generale, è conveniente acquisire pose lunghe solo se la strumentazione è assolutamente affidabile: è meglio rovinare qualche punto dei tanti a breve posa che non un punto dei pochi a lunga posa.

Per poter effettuare pose lunghe evitando la saturazione del segnale si può utilmente agire nei seguenti modi:

- sfocare il telescopio (purché non si inquina il segnale con quello di Giove o di un altro satellite);
- utilizzare il *binning* 1;
- inserire un filtro R.

Bisognerebbe evitare - ove possibile - l'uso di diaframmi o di filtri neutri, in quanto essi riducono comunque l'ammontare del segnale in arrivo sul CCD. Il filtro R riduce gli effetti della scintillazione. Anche l'IR va bene con i CCD amatoriali, che essendo *front illuminated* non producono frange di interferenza. La figura 5 mostra una curva di luce di un PHEMU (o meglio di due PHEMU!) ottenuta da immagini CCD.

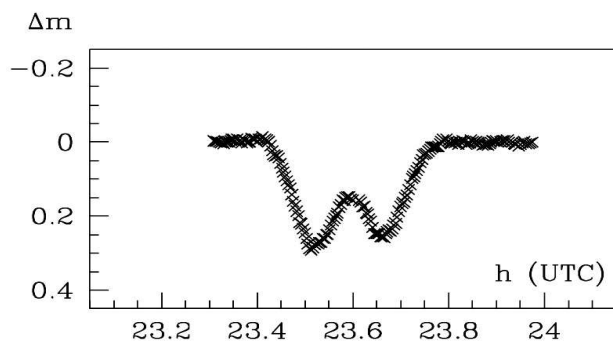


Figura 5. Occultazione ed eclisse di Ganimede da parte di Europa (3 febbraio 2003). Telescopio da 32 cm con CCD SBIG ST-6 (Osservatorio di Pulkovo – Russia). Immagine tratta dal report PHEMU03 [6].

Dalle immagini alla fotometria

Dalle immagini, già calibrate per *bias*, *dark* e *flat field*, vanno estratte le differenze di magnitudine tra il satellite coinvolto (o la coppia di satelliti - nel caso di un'occultazione) e uno o più satelliti adottati come oggetti di confronto. L'estrazione delle magnitudini può essere fatta con uno dei comuni *software* astrofotografici (*Iris*, *Maxim DL*, *Astroart*, etc.) o con programmi più specifici (*IRAF*, *AIP*, *Astrometrica*, etc.). Il metodo è quello della "fotometria d'apertura", che consiste nel ricavare l'intensità di segnale (misurata in ADU) presente in tutti i pixel all'interno di un cerchio ("apertura") centrato sulla sorgente luminosa². Alla quantità suddetta viene sottratto il contributo luminoso del fondo, stimato in una corona circolare all'esterno dell'oggetto. L'operazione viene compiuta sia sull'oggetto "variabile" (cioè il satellite eclissato o la coppia di satelliti in occultazione) che su uno o più oggetti di confronto (gli altri satelliti), così da ricavare il rapporto delle intensità (o flussi) o la differenza di magnitudine tra "variabile" e "confronto"³. I comandi necessari per la riduzione fotometrica delle immagini, molto intuitivi per i *software* più diffusi tra gli astrofili, variano da programma a programma [10-12].

Il trattamento dei dati

Per rendere disponibili i nostri dati alla comunità scientifica, essi vanno inviati a un centro di raccolta che si occuperà del trattamento e della pubblicazione. L'istante di tempo (Tempo Universale in Giorno Giuliano) e la corrispondente magnitudine relativa del satellite coinvolto (o della coppia satelliti - nel caso di occultazione) vanno riportati in un *file* di testo a due colonne, con l'accorgimento di considerare come istante di tempo quello

riferito alla metà della posa. I dati così ordinati possono essere inviati all'autore di questo articolo oppure direttamente al centro di raccolta della campagna internazionale PHEMU09 (IMCCE, PHEMU09, 77 ave. Denfert-Rochereau, F-75014 PARIS, France; arlot@imcce.fr). Ai dati bisogna allegare il rapporto osservativo, il cui modulo è scaricabile dal sito: http://www.imcce.fr/fr/presentation/equipes/GAP/travaux/phemu09/index_en.html. L'istante centrale dell'evento e la caduta di flusso, successivamente pubblicati, saranno determinati con le tecniche di *modeling* di cui si è già detto. Nondimeno, l'astrofilo può tentare una sua analisi delle curve di luce misurando l'istante di minimo con le tecniche alla propria portata. Un metodo accettato, molto utilizzato nell'analisi dei minimi di binarie ad eclisse, è quello di Kwee - van Woerden [14], che può essere applicato grazie al programma scritto da Jim Roe (AAVSO) scaricabile dal sito <http://jamesroe.com/astro/binaries.htm>, oppure grazie al *software AVE*, sviluppato da Rafael Barberá, disponibile all'indirizzo www.gea.cesca.es. Particolarmente istruttivo potrà risultare il confronto ("O-C") tra gli istanti di tempo misurati e quelli previsti (Tabella 1) in base ai calcoli delle effemeridi.

Bibliografia

- [1] Arlot J.-E., *Astron. Astroph.* **478**, 285-298 (2008).
- [2] Vienne A., *Planetary & Space Science* (submitted).
- [3] Noyelles B, Lainay V. & Vienne A., *Proceedings IAU Colloquium No. 196*, 271-278 (2004).
- [4] Arlot J.-E., *PHEMU09 Technical Note 1* (2008).
- [5] Arlot J.-E., *PHEMU09 Technical Note 4* (2008).
- [6] Arlot J.-E. et al., *Astron. Astroph.* **493**, 1171-1182 (2009)
- [7] Frosina A., *Astronomia UAI*, (6), 19 (2005).
- [8] Spampinato S.A. et al., *Astronomia UAI*, (4), 47-50 (2004).
- [9] Gaspani A., *3rd GEOS workshop on variable star data acquisition and processing*, S. Pellegrino Terme (1995).
- [10] Gruppo Astrofili Catanesi, *Le Stelle*, (6), 86-89 (2003).
- [11] Marino G., *Astronomia UAI*, (3), 6-9 (2006).
- [12] Marino G., *Le Stelle*, (58), 48-53 (2008).
- [13] Arlot J.-E., *PHEMU09 Technical Note 6* (2008).
- [14] Kwee K.K., van Woerden M., *Bull. Astron. Inst. Nether.*, **12**, 464, 327-330 (1956).

Note

¹ Ciò è vero per riprese in cui si possano trascurare (rispetto all'entità del segnale) il rumore associato alla lettura dell'immagine (*read out noise*) e quello dovuto a una non perfetta calibrazione per la "corrente di oscurità" (*dark noise*). Questi tipi di rumore, a differenza del comune rumore statistico associato all'entità del segnale luminoso e al *seeing*, si cumulano in maniera additiva, peggiorando quindi il "rapporto segnale/rumore" con l'aumentare del numero di pose e del numero di pixel su cui è sparso il segnale. I tipi di rumore non puramente statistici (seppure spesso assai rilevanti in fotometria) non dovrebbero invece inficiare la tecnica della somma/media di pose brevi. Un ulteriore piccolo degrado del rapporto segnale/rumore nei raggruppamenti di punti a breve posa è associato alla differenza tra i concetti statistici di "campione" e "popolazione"; tale effetto, semmai confrontabile con il *read out noise* e il *dark noise*, diviene trascurabile raggruppando più di 5 punti.

² Il raggio dell'apertura ottimale che massimizzi il rapporto segnale/rumore è, in condizioni ideali, $R_{opt} = 0.67 \text{ FWHM}$, il che esclude quella parte periferica della macchiolina stellare sovrastata dal rumore. In realtà, la possibile variabilità del *seeing* suggerisce raggi più prudenti di $1 - 2 \text{ FWHM}$, fatte salve le prove che ciascuno può effettuare sui propri dati (in tal senso *Maxim DL* risulta molto comodo).

³ Rapporto dei flussi (F_1/F_2) e differenza di magnitudine ($m_1 - m_2$) sono quantità perfettamente equivalenti in quanto legate dalla formula di Pogson: $m_1 - m_2 = -2.5 \cdot \text{Log}_{10} F_1/F_2$.