

**Università La Sapienza
Dipartimento di Fisica
Laboratorio G28
Fisica Solare e Astrosismologia**

**Relazione conclusiva dell'esperienza di
Laboratorio di Astrofisica**

A.A. 2006-2007

corso prof. Paolo De Bernardis

Micol Benetti

Luca Naticchioni

Supervisore: Prof. Costantino Sigismondi

Indice

Introduzione	2
1 Effemeridi lunari e solari e Delta UT1	3
1.1 Verifica effemeridi Lunari	4
Osservazione occultazione Lunare di Venere in Roma	
1.2 Verifica effemeridi solari	6
Transito solare ai solstizi sulla meridiana di Santa Maria degli Angeli in Roma	
1.3 Delta UT1	7
1.4 Altre incertezze sulla stima del tempo	7
2 Misura del diametro solare durante le eclissi	9
2.1 introduzione al metodo	9
2.2 Errori sulle misurazioni	12
2.3 Software di analisi	13
3 Analisi dati- eclisse 3 ottobre 2005	15
4 Conclusioni	17
Ringraziamenti	17
Bibliografia	18

Introduzione

La stima del diametro solare è stato argomento di ricerca fin dall'antichità, affrontato con metodologie sempre più raffinate. Un indizio che questo possa variare risale dalle considerazioni sull'osservazione condotta da Clavio relativamente all'eclisse centrale di Sole del 9 aprile 1567 a Roma da Casa Salviati. In questa occasione Clavio testimonia di aver osservato un anello intorno al disco Lunare, quando le dimensioni angolari del Sole in quella eclisse non potevano superare quelle della Luna, considerando l'attuale valore solare medio (959.63 arcsec). Da questa osservazione nacque già all'epoca un dibattito con Keplero sulla natura di tale anello. Una possibile interpretazione potrebbe essere un uso improprio del termine anello per definire la corona solare, oppure un'effettiva variazione del diametro solare.

Simulando al computer l'eclisse osservata da Clavio per mezzo del software WinOccult (che utilizza i profili Lunari di Watts [1] con correzioni Appleby Morrison, cap.2.3) per ottenere un anello non interrotto da Baily's Beads si deve correggere il diametro solare di + 2.5 arcsec, e utilizzando lo stesso software è possibile confrontare le misure temporali di comparsa di Beads ai lati nord e sud delle successive eclissi di Sole storicamente documentate, ottenendo correzioni variabili alle dimensioni angolari solari, come mostrato in tabella1:

Anno	Correzione raggio solare
1567	$\geq 2.5 \pm 0.2$
1715	-0.40 ± 0.20
1806	-0.99 ± 0.25
1831	-0.43 ± 0.25
1869	0.4 ± 0.2
1925	-0.6 ± 0.2
1966	-1.9 ± 0.2
1979	-1.3 ± 0.2

Tabella1: misure storiche della variazione del diametro solare rispetto al valore medio standard tra il 1567 e il 1979. [3] [4]

Nel XVIII secolo Halley suggerì l'idea di associare ad ogni dato di durata dell'eclissi quello della posizione dell'osservatore sulla Terra, in modo da valutare le dimensioni dell'ombra Lunare sulla superficie terrestre ed in particolare della posizione dei suoi bordi settentrionale e meridionale. I risultati pubblicati sulle *Philosophical Transactions* della Royal Society of London nel 1717 hanno consentito di identificare entro 50m le posizioni degli osservatori che si trovavano ai bordi (a Darrington e a Cranbrok), che furono spettatori di un'eclissi di durata quasi istantanea o addirittura di un Sole che si ridusse ad un punto brillante come Marte senza mai sparire del tutto.

Su una fascia di quasi 400 km, questi 50 m hanno consentito una precisione di 1 parte su 10000 nella determinazione del diametro Solare angolare di allora.

Misurazioni possibili oggi del raggio solare per mezzo delle osservazioni compiute durante le eclissi solari confrontate con misure storiche e future permetteranno di ricavare possibili variazioni cicliche o secolari delle dimensioni solari [2][3]. L'argomento risulta di notevole interesse in quanto effettive variazioni solari inciderebbero in modo determinante sul clima terrestre, con tutte le implicazioni del caso.

Rispetto al metodo del 1715 oggi si osservano i grani di Baily, che sono determinati dall'alternarsi delle montagne e delle valli del bordo lunare[2], quando queste si frappongono tra noi ed il lembo del Sole. Ciò aumenta il numero di fenomeni temporalmente determinabili, migliorando di un fattore $1/\sqrt{N}$ la precisione sulla misura del diametro solare basata solo sugli istanti di inizio e fine della totalità.

In questo lavoro ci accingiamo ad analizzare dati di recenti eclissi solari al fine di stimare l'attuale diametro del Sole.

Prima di procedere con l'analisi dati vera e propria riteniamo opportuno trattare brevemente i vari aspetti delle osservazioni in questo campo, mostrando il ruolo delle effemeridi e del timing.

Cap. 1: Effemeridi lunari e solari e DeltaUT1

Le effemeridi sono tabelle di posizioni (in ascensione retta e declinazione) di corpi celesti rispetto la Terra per dati intervalli di tempo, calcolate a partire da teorie planetarie, ovvero da modelli analitici e/o numerici del moto dei vari pianeti. Questi modelli possono differire l'uno dall'altro, specialmente se ci spingiamo a scale temporali inferiori al secondo. Moderne effemeridi planetarie utilizzano software che generano posizioni e velocità di pianeti e satelliti per ogni istante di tempo inserito, passato o futuro. L'intervallo di tempo coperto tipicamente non si estende oltre alcuni secoli e nella formulazione non sono adeguatamente considerati effetti secolari dovuti a perturbazioni varie. Per supplire a queste incertezze le effemeridi vengono ricalcolate periodicamente ogni venti anni.

Il primo passo per l'analisi delle osservazioni è quindi stimare entro che errore possiamo ritenere attendibili gli attuali valori di effemeridi lunari e solari.

Nel nostro caso si sono condotte verifiche con le osservazioni indipendenti di:

- occultazione di Venere da parte della Luna del 18/6/2007
- transiti del Sole ai solstizi sulla meridiana di Santa Maria degli Angeli in Roma [6].

1.1 - Verifica effemeridi Lunari – Osservazione occultazione Lunare di Venere in Roma.

Allo scopo di verificare la bontà delle effemeridi lunari DE405, DE406 (JPL) e VSOP87 si sono condotte osservazioni sulla scomparsa e riapparizione di Venere durante l'occultazione lunare del 18/6/2007.

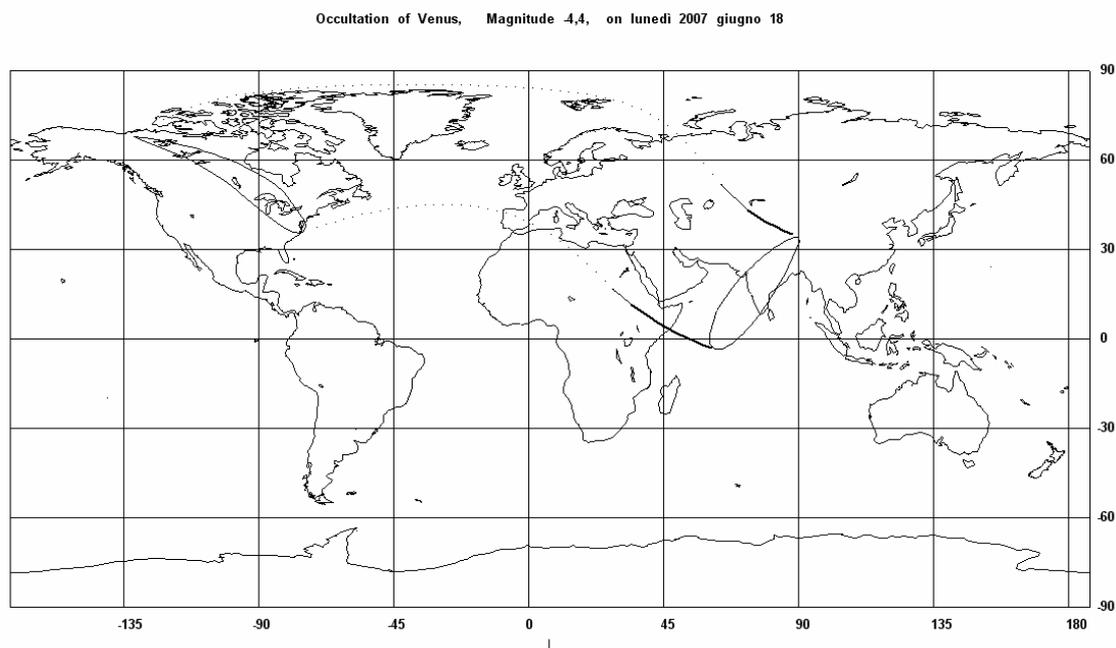


Figura1: Zona di visibilità dell'occultazione di Venere del 18/6/2007. La parte tratteggiata indica la zona in cui l'occultazione risulta diurna.[elaborata con WinOccult]

L'osservazione è stata condotta da Roma ($long:12^{\circ}27'08''.0$ est, $lat:41^{\circ}52'45''.0$ nord, $alt:65$ metri) utilizzando un telescopio Schmidt Cassegrain ($f = 2000$ mm ; $f\#10$; modello Meade 1x50EMC) dotato di oculare elettronico Meade sensibile nell'IR.

L'obiettivo era comparare il tempo di osservazione della scomparsa e della riapparizione di Venere con quello tabulato dalle effemeridi per verificare e quantificare eventuali discrepanze. Purtroppo non è stato possibile osservare direttamente l'occultazione di Venere a causa di una fitta copertura nuvolosa sopra il sito di osservazione; tuttavia grazie ad osservazioni parallele effettuate da altri siti abbiamo un set di dati supplementari da poter elaborare. Abbiamo potuto invece osservare direttamente la ricomparsa di Venere nonostante le condizioni meteorologiche non ottimali grazie al sensore IR dell'oculare elettronico. Della riapparizione disponiamo di 3 registrazioni video complete di riferimento temporale UTC. Al momento dell'osservazione Venere aveva una fase favorevole all'osservazione del primo contatto in riapparizione ma sfavorevole alla determinazione del terminatore dell'occultazione. Nella particolare occasione la Luna era illuminata per il 5% mentre Venere era di magnitudine -4,4 , illuminata per il 10%.

Il valore teorico aspettato per la ricomparsa è stato appunto dedotto dal confronto tra i dati riportati in tabella 2 per i due corpi celesti, ottenuti dalle effemeridi calcolate dall'U.S. Naval Observatory. L'istante previsto è quello in cui si ha il contatto tra i bordi dei dischi di Venere e Luna ovvero quando il centro della figura di Venere dista dal bordo lunare di un raggio venusiano (che valeva 26.9" il 18/6/2007) all'angolo di uscita previsto.

Venere:			data			orario UT1			ASCENSIONE RETTA			DECLINAZIONE		
						<i>h</i>	<i>M</i>	<i>s</i>	<i>°</i>	<i>'</i>	<i>"</i>			
2007	Jun	18	15:47:50.0	9	0	9,127			+ 18	55	28,67			
2007	Jun	18	15:47:51.0	9	0	9,129			+ 18	55	28,65			
2007	Jun	18	15:47:52.0	9	0	9,131			+ 18	55	28,64			
2007	Jun	18	15:47:53.0	9	0	9,134			+ 18	55	28,63			

Luna:			data			Orario UT1			ASCENSIONE RETTA			DECLINAZIONE		
						<i>h</i>	<i>M</i>	<i>s</i>	<i>°</i>	<i>'</i>	<i>"</i>			
2007	Jun	18	15:47:50.0	9	1	10,803			+ 18	50	13,33			
2007	Jun	18	15:47:51.0	9	1	10,829			+ 18	50	13,11			
2007	Jun	18	15:47:52.0	9	1	10,854			+ 18	50	12,9			
2007	Jun	18	15:47:53.0	9	1	10,88			+ 18	50	12,68			

Tabella2: effemeridi dello U.S. Naval Observatory per la Luna e Venere

Al valore da noi osservato è associato una precisione al decimo di secondo essendo stata condotta l'analisi del fenomeno tramite filmato con precisione di 25 fotogrammi al secondo. I dati da noi utilizzati non sono però quelli da noi stimati durante l'osservazione ma quelli forniti dal Kepler Observatory in Linz-Austria, che con precisione del centesimo di secondo fornisce il valore di $51,239 \pm 0,020$ s per quanto riguarda l'uscita di Venere. Il valore teorico interpolato risulta essere di $51,638$ s, evidenziando quindi una discrepanza di $0,400 \pm 0,020$ s.

Parte del ritardo osservato nella riapparizione può essere imputato al profilo lunare che è irregolare a causa di monti e crateri [1] (nella tabulazione delle effemeridi si tiene conto del raggio Lunare medio). Dobbiamo dunque considerare l'angolo di emersione, ricavato per mezzo del software WinOccult (v 3.6.0.0) e pari a circa 257° .

La presenza di una catena montuosa in corrispondenza dell'angolo di emersione di Venere può giustificare il ritardo osservato; infatti rispetto al disco lunare medio il profilo reale è più alto di circa $1.0'' \pm 0.2''$. Bisogna anche considerare che il calcolo delle effemeridi tiene conto del centro di massa della Luna e non del centro geometrico, un eventuale discostamento delle due posizioni influenzerebbe la misura.

Possiamo dunque dire che le effemeridi lunari utilizzate sono adatte per i calcoli che più avanti sosterremo.

1.2 - Verifica effemeridi solari - Transito solare ai solstizi sulla meridiana di Santa Maria degli Angeli in Roma.

In S. Maria degli angeli, basilica costruita nelle Terme di Diocleziano su progetto di Michelangelo e poi di Vanvitelli, è posta la Meridiana o Linea Clementina [6] commissionata da Papa Clemente XI verso il 1700 allo scopo di verificare ulteriormente la validità della Riforma Gregoriana del Calendario. La Meridiana fu costruita con la massima esattezza scientifica raggiungibile nel XVIII secolo. Consiste in una grande linea di bronzo inserita in una fascia di marmo che si estende per 45 metri, se si considera come punto virtuale di partenza quello su cui cade la perpendicolare proveniente dal centro del foro gnomonico. L'immagine del Sole percorre durante l'anno, a mezzogiorno solare vero, tutta la Linea, partendo dal Cancro al Solstizio d'Estate, raggiungendo il Capricorno al Solstizio d'Inverno e compiendo successivamente il percorso inverso. L'immagine del Sole, in forma di ellisse, si allunga, nel suo asse maggiore, da circa 21 centimetri al solstizio estivo a circa 111 centimetri al solstizio invernale, compiendo il percorso tra i due tropici.

Il vantaggio di utilizzare tale meridiana risiede nel fatto che, in quanto meridiana storica, vanta una raccolta dati di transiti fin dalla data della sua costruzione.

In generale i dati acquisiti tramite l'analisi del transito in tale meridiana devono essere corretti per le deviazioni locali dalla retta e per $\Delta UT1$ (si veda al riguardo il prossimo paragrafo). Così facendo i risultati odierni dei solstizi risultano in accordo tra loro e con le misure di Boscovich e Maire (sulla stessa meridiana) di metà Settecento. Nel Settecento infatti la Linea era molto più precisa di adesso in quanto solo i successivi restauri ne hanno gradualmente compromesso la rettilinearità fino all'attuale scarto quadratico medio di ± 5 mm.

L'istante del transito sulla meridiana era ed è ottenuto come media di 2 o più istanti in cui i due lembi del Sole toccano la linea meridiana, ed eventualmente altre linee vicine ad essa parallele [5].

Le osservazioni sono effettuate tramite analisi di registrazioni video con accuratezza di 0.3s ossia di 4'' d'arco. L'incertezza è principalmente dovuta al seeing, quantificabile in 10'' e non è eliminabile con filtri ma riducibile aumentando il numero di osservazioni in quanto il sigma va come l'inverso della radice di N osservazioni. Per 1000 osservazioni condotte fuori dall'atmosfera l'errore si riduce a 0,13'', tipica variazione del diametro solare ricavato con i dati dell'eclisse.

Studiando l'azimut della Linea Clementina si è potuto verificare la stabilità e l'entità delle correzioni per diversi tipi di effemeridi. Queste correzioni vengono usate come parametri di fit nei programmi di simulazione delle eclissi di Sole come SOLRAD e WinOccult v3.6, dove la precisione del centesimo di secondo di tempo corrisponde a 5 miliardosecondi nella misura del raggio solare. Dati recenti a nostra disposizione sono stati confrontati con tre diversi tipi di effemeridi (SPA, Ephemvga, IMCCE) e indicano che:

A fine 2005 SPA seguiva Ephemvga di 0.41 s e IMCCE seguiva SPA di altri 0.51 s.

A metà 2006 SPA seguiva Ephemvga di 0.64 s e IMCCE seguiva SPA di altri 0.48 s.

A fine 2006 SPA segue Ephemvga di 0.34 s e IMCCE segue SPA di altri 0.49 s.

Si vede che, in un anno, IMCCE ed SPA restano legate entro 0.03 s, mentre Ephemvga fluttua entro un intervallo, più ampio, di 0.30 s. [6]

Per una discussione più approfondita sullo studio delle effemeridi solari alla meridiana di Santa Maria degli Angeli in Roma e sulla sua taratura si rimanda agli studi specifici al riguardo compiuti dal Prof. Costantino Sigismondi [6] in attesa di ulteriori verifiche da compiersi sulla meridiana.

1-3 - DeltaUT1

Per poter simulare con sufficiente precisione eclissi storiche o future è necessario tenere conto del DeltaT, ovvero della discrepanza tra Tempo Universale (UT, misurato in base alla rotazione terrestre) e Tempo Dinamico Terrestre (TDT, una scala temporale strettamente uniforme). Questa differenza infatti non è costante in quanto la rotazione terrestre rallenta progressivamente (nel corso del 2006 ha perso 0.3 secondi).

Per ovviare ciò e far sì che il tempo indicato dagli orologi civili sia in accordo con il tempo delle effemeridi, si inseriscono secondi intercalari a cavallo del 1° gennaio o del 1° Luglio. Questi inserimenti di secondi interi tengono collegato lo scorrere del Tempo Universale (UT) sia con gli orologi atomici che con i fenomeni astronomici (UT1), e perciò si parla di Tempo Universale Coordinato UTC.

Da un punto di vista terminologico oggi il tempo delle effemeridi è chiamato anche tempo terrestre (TT), mentre il Tempo Universale UT è di fatto l'UT1.

Il Tempo Universale Coordinato UTC è legato agli impulsi degli orologi atomici al Cesio, e segue un ritmo uniforme, riferito alla durata dell'anno 1900, rispetto al quale la rotazione terrestre rallenta attualmente di 0.8 millisecondi al giorno. Il secondo intercalare viene inserito in modo da mantenere UTC vicino a UT1, il tempo dei fenomeni astronomici, entro al massimo 0.9 secondi.

Questa differenza di tempo viene denominata DeltaT e tiene conto dei secondi interi di ritardo che si accumulano nel corso del tempo rispetto agli orologi al Cesio.

Per conoscere il valore corrente di DUT1, l'Istituto International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Service de la Rotation Terrestre de l'Observatoire de Paris, aggiorna continuamente il valore di DUT1, ogni volta che varia di un decimo di secondo, mediante una circolare a cui si attengono i segnali orario degli istituti nazionali di cronometria.

È da sottolineare che il DUT1 non è uniforme ma dipende sia da variazioni climatiche che da variazioni dinamiche del nucleo terrestre. È dunque difficile da stimare in anticipo o da calcolare per remoti passati.

Per eventi astronomici precedenti al 1961 nelle effemeridi planetarie si usa una interpolazione tra valori annuali di DeltaT alla data dell'osservazione che si aggiunge poi al Tempo Universale.

Dopo il 1972 nelle effemeridi planetarie si aggiunge una correzione all'offset dell'UTC dall'ATI. Per la posizione rotazionale della Terra si usa un valore interpolato di dUT1 alla data dell'osservazione che aggiunta all'UTC fornisce il valore di UT. Tra il 1962 e il 1972 furono applicate piccole correzioni costanti in modo da rendere molto vicini UTC e UT dal 1972, e il segnale UTC è aggiustato di un secondo esatto. La differenza (in decimi di secondo) tra UTC e UT è codificata nel segnale orario UTC.

Attualmente il DeltaT è stimato nella data del 14 giugno 2007 ed è del valore di $DT = -0,2$ s.

1-4 Altre incertezze sulla stima del tempo

Anche tenendo conto del DeltaUT1 altri fattori influenzano la stima dell'intervallo temporale delle misurazioni. Si ha per esempio la diversa risposta di orologi con diversi meccanismi posti nelle stesse condizioni ambientali o la variazione di misurazione di uno stesso orologio posto in diversi bagni termici. L'errore di misurazione del tempo in questo ultimo caso è associato all'escursione termica, alla marca e all'anno di fabbricazione ed ovviamente dipende dalla tipologia di costruzione.

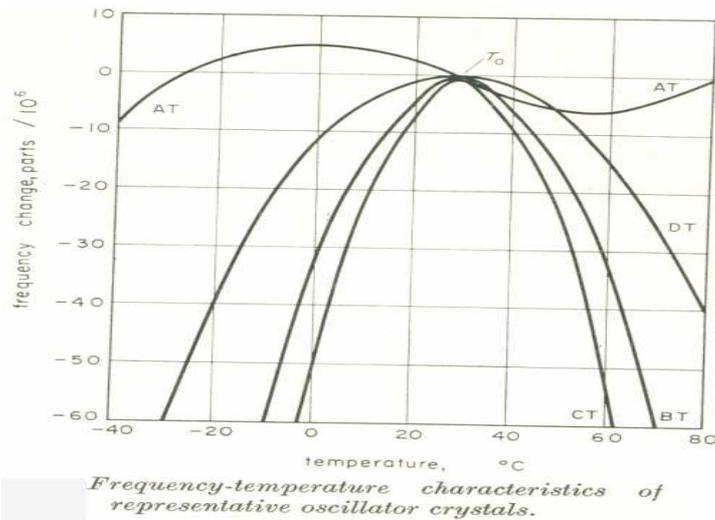


Figura 2: frequenza di oscillazione di alcuni cristalli in funzione della temperatura.[8]

Ciò induce, per quanto concerne lo studio trattato, un errore sistematico sulla sincronizzazione, che è un elemento indispensabile per legare più osservazioni dello stesso fenomeno. Inoltre si deve stimare il ritardo dell'orologio durante la misurazione, che può ricoprire intervalli temporali dell'ordine dell'ora. Un problema aggiuntivo è dato se il drift orario non segue andamento lineare.

Uno studio condotto da il prof. C. Sigismondi mostra la diversa risposta di due orologi di diverse marche sottoposti a stesso trattamento[1]. La risposta varia di un $\Delta\sigma$ di 0.04s, che si ripercuote sulla stima di un evento di eclissi nella misura di un singolo frame dato che i drift in gioco sono inferiori a 0.01 s/h e la centralità di un'eclissi dura al massimo 12 minuti.

In tale contesto si può pensare alla soluzione dell'orologio con controllo via radio, usato per molti lavori in astrometria di occultazioni asteroidali ed eclissi, ma questo comporta un errore significativo rispetto a quello dovuto al drift dell'orologio stesso nei periodi in cui non è sincronizzato automaticamente.

Sicuramente avendone la possibilità è da preferirsi il valore fornito dalla radio transoceanica anche se quel che si reputa più affidabile tra i mezzi più comuni, ed è il sistema scelto per le misurazioni in seguito, è il segnale orario radio.

Cap. 2: Misura del diametro solare durante le eclissi

2-1 Introduzione al metodo

Il metodo di misura del diametro solare per mezzo dei Baily's beads è basato sull'identificazione dei beads stessi e sul confronto fra i tempi di apparizione e sparizione previsti e quelli osservati per ogni fissato bead [2] [3].

I Baily's beads appaiono quando il bordo irregolare della Luna diventa tangente o quasi al lembo del Sole e le montagne lunari interrompono l'arco della fotosfera solare in diversi punti creando delle *perle di luce*. All'inizio della fase di anularità, quando il disco lunare entra nel disco solare che è più grande, queste perle si formano appena il Sole inizia a sorgere dalla valle lunare e spariscono fondendosi con le altre quando la fotosfera non è più interrotta dalle vette delle montagne lunari più alte. Al termine della fase di anularità sono le vette delle montagne più alte a toccare per prime la fotosfera solare e ad isolarne dei segmenti in cui il Sole tramonta alla base delle valli più profonde. In termini di velocità angolare la Luna avanza sul Sole a circa 0.5 arcsec/s e le montagne più alte arrivano ai 2 arcsec. Dunque sono circa 10 i secondi cruciali in cui tutti i grani di Baily si manifestano se osservati dal centro della fascia di anularità.

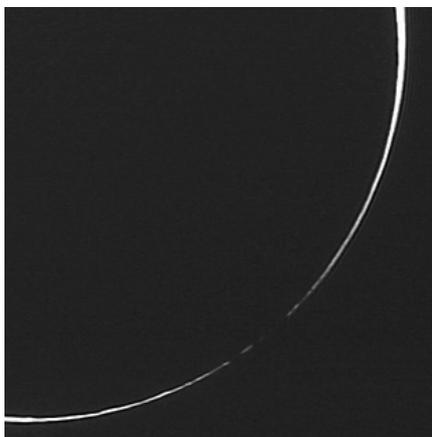
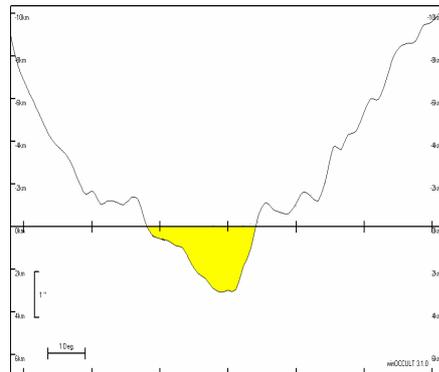
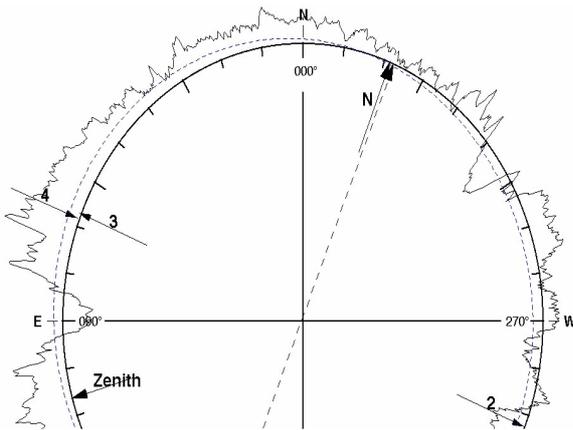


Figure 3,4,5,6, dall'alto a sinistra: 3- profilo lunare di Watts (i rilievi sono stati magnificati); 4- valle lunare dai profili di Watts, quando il disco solare sorge occupando l'area selezionata diviene visibile il bead; 5-6- fotogrammi di due differenti riprese della stessa eclissi anulare di Sole in cui sono visibili i beads causati dai rilievi lunari.

Gli eventi in studio sono quelli di apparizione (A) all'inizio dell'anularità e quelli di sparizione (S) alla fine. Degli istanti A ed S occorre conoscere l'istante del tempo universale coordinato UTC e l'angolo di posizione P.A. sul disco Lunare.

Gli istanti degli eventi di fusione (merging) tra grani possono essere influenzati dal fenomeno della goccia nera (*Black Drop*). Esso è dovuto alle distorsioni ottiche dello strumento combinate con il profilo radiale di luminosità del Sole rapidamente variabile, per cui con due strumenti diversi si registrano istanti diversi. Gli istanti di A ed S, invece, sono determinati da allineamenti geometrici al di fuori dell'atmosfera ed ogni possibile distorsione ottica in atmosfera o nel telescopio non modifica la natura del segnale che è di tipo luce SI / luce NO.

L'unica accortezza è quella di determinare la magnitudine limite dei grani di Baily osservabili, cioè il più piccolo numero di fotoni osservabile dal sistema telescopio-rivelatore, per il quale si può dire luce SI con un rapporto segnale/rumore pari almeno a 5.

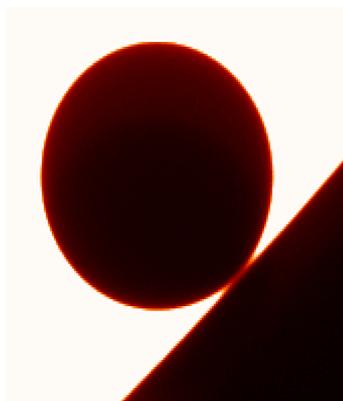


Figura 7: effetto black drop in un transito planetario

Considerando le velocità angolare del Sole e della Luna, note dalle effemeridi, è possibile misurare le corde di cui i beads sono gli estremi con precisione di $\Delta T/T = 0.04s/300s = 10^{-4}$.

WinOccult [trattato nel paragrafo 2.3] permette di gestire il raggio solare come parametro: ad ogni ΔR fissato si calcolano gli scarti tra i tempi osservati e simulati. In seguito si costruisce una variabile $\chi^2 = \sum_i (O_i - C_i)^2 / \sigma^2$ ottenuta dal confronto di tutti i dati osservati O_i e di quelli calcolati C_i per un dato ΔR , con σ dipendente dall'errore associato ai profili lunari di Watts pari a circa 0.2 arcsec.

Si può a questo punto sottolineare che osservare un'eclisse solare al bordo della striscia d'ombra permette di massimizzare la durata dei Baily's beads che si formano a causa dei monti e delle valli solari quando i bordi Lunare e solare sono quasi paralleli tra loro. Questo intervallo di tempo può essere anche superiore alla massima durata della totalità, e su un arco anche superiore ai 180 gradi. Inoltre l'osservazione ai bordi della zona d'ombra (e quindi di centralità) permette di andare a osservare i beads polari che non sono influenzati dal fenomeno di librazione a differenza di quelli equatoriali che ne risentono maggiormente [2].

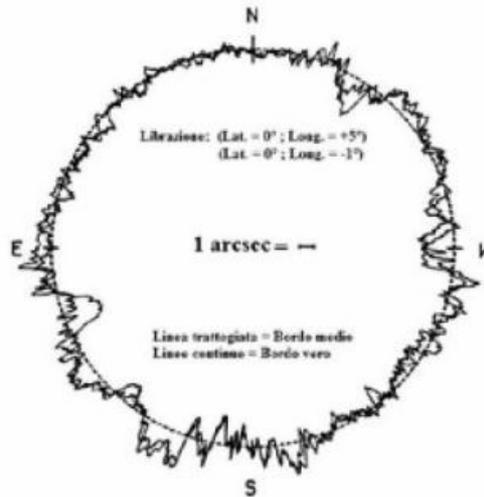


Figura 8: profili lunari di Watts tracciati al massimo (linea tratteggiata) e al minimo (linea continua) di librazione. Come si vede la librazione modifica molto i profili equatoriali ed è invece trascurabile ai poli dove i profili coincidono quasi esattamente.

La fascia dove l'eclissi è centrale, cioè o anulare o totale, è una ristretta zona del globo, larga attorno ai 2-300 km.

In prima approssimazione l'accuratezza relativa sulla misura del diametro solare dipende anche dalla precisione con cui è nota la posizione dell'osservatore rispetto alle dimensioni della fascia.

Con un dispositivo GPS si ha la precisione di ± 2 m, da confrontare con i 317 km di ampiezza della fascia (Espenak, 2005), quindi di una parte su 160.000

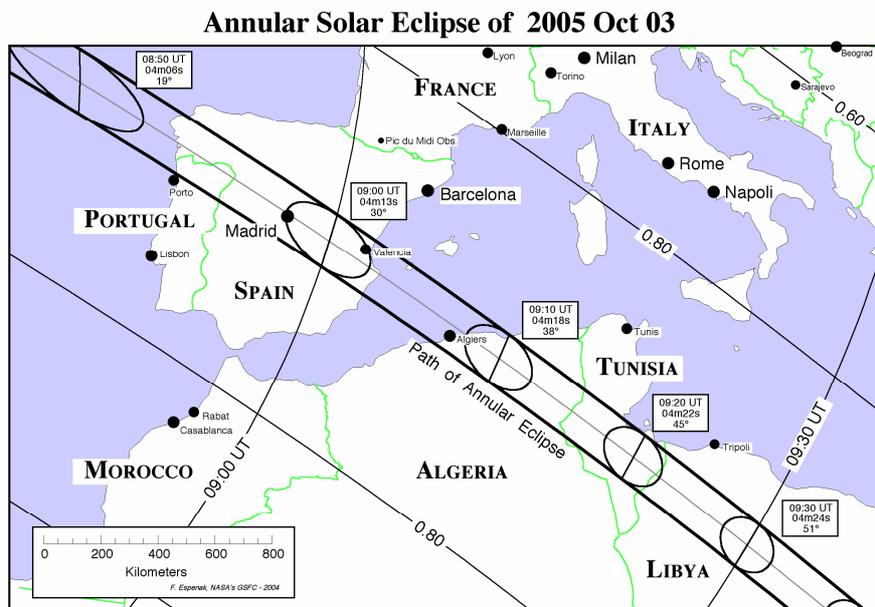


Figura 9: fascia d'ombra per l'eclisse anulare di Sole del 3/10/2005

2-2 Errori sulle misurazioni

Oltre all'effetto blackdrop e al seeing di cui si è già accennato, esistono altre fonti di errore che contaminano le osservazioni e quindi l'accuratezza della stima della variazione del diametro solare. Tra questi annoveriamo l'errore associato al timing dovuto alla sincronizzazione degli eventi osservati e simulati. Quest'errore diventa particolarmente rilevante se, come spesso avviene, si lavora su riprese amatoriali con incertezza intrinseca sul riferimento temporale riportato. Questa incertezza, che può raggiungere anche il decimo di secondo, può essere ridotta avendo a disposizione molte osservazioni e un gran numero di Baily's beads in quanto l'errore si riduce di un fattore proporzionale a \sqrt{N} . In questi casi è ovviamente altra fonte di errore l'incertezza sulla localizzazione del sito di osservazione che, usando un sistema GPS, comporta errori dell'ordine di secondi in latitudine e longitudine spostandosi di pochi metri sulla posizione. Questo errore non è eliminabile e si propaga come un errore sul tempo di apparizione/sparizione dell'evento nella simulazione.

Altra incertezza è apportata se si sceglie di utilizzare un filtro nel telescopio durante l'osservazione. Un filtro davanti all'obiettivo infatti aumenta la magnitudine apparente dei beads anticipando la loro comparsa sullo schermo di proiezione. Bisogna tenere conto di questo effetto che altrimenti causerebbe un errore sistematico sulle misure rivelando un Sole più piccolo di quanto misurato senza filtro, e quindi implicherebbe variazioni virtuali del diametro solare confrontato con i dati acquisiti senza filtro o a occhio nudo nelle eclissi più antiche documentate.

Vi è inoltre un effetto di oscuramento al bordo durante le osservazioni, che riduce la brillantezza degli eventi sul bordo (aumenta quindi la magnitudine) di un fattore del 16% rispetto alla brillantezza superficiale centrale del disco.

Per stimare quanto il Sole appaia più piccolo occorre conoscere la curva di oscuramento al bordo solare (solar limb darkening function, figura 10). Nota questa curva si può calcolare la luminosità di un Baily's bead in funzione della sua forma e profondità, cioè dell'area di fotosfera che la valle Lunare ci lascia trasparire e stimare il minimo di luminosità necessaria affinché il rapporto segnale/rumore permetta l'individuazione del Baily's bead.

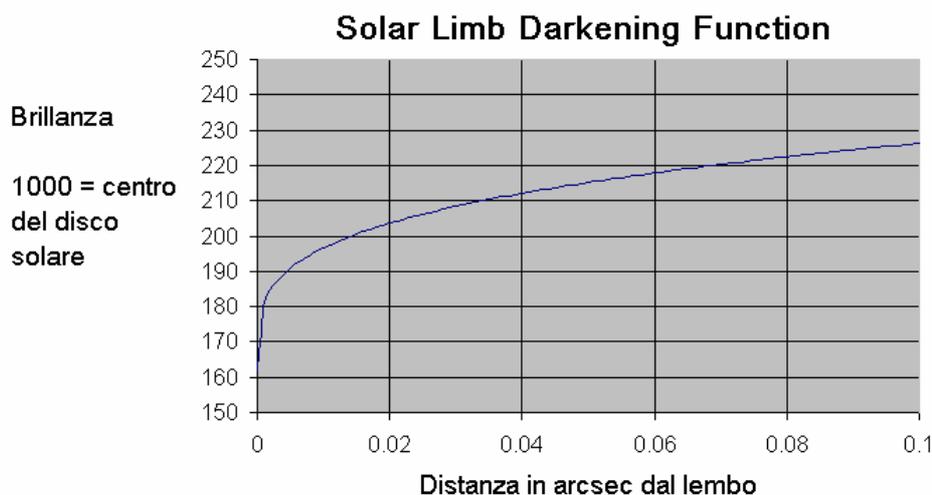


Figura 10: Andamento della brillantezza superficiale del Sole spostandosi lungo un diametro a partire dal lembo (0). La brillantezza è l'intensità luminosa per unità di area. Il valore massimo in questo grafico è normalizzato a 1000, ed è quello raggiunto al centro del disco solare.[8]

2-3 Software di analisi

L'analisi dati consiste nel confronto tra i tempi di osservazione dei Baily's beads e i tempi attesi per gli stessi fenomeni ottenuti tramite il programma di simulazione WinOccult [9], che consente di identificare i profili lunari che danno origine ai Baily's beads durante un'eclissi di Sole. Si tratta dell'unico programma disponibile in grado di simulare puntualmente un'eclisse utilizzando i profili di Watts, validi in tutto il range di librazioni lunari. L'accuratezza dei profili lunari di Watts è di circa 0.2 arcsec; per N beads ovviamente si ha una riduzione dell'errore proporzionale alla \sqrt{N} . Il software permette di utilizzare le correzioni di Appleby e Morrison che correggono gli errori di orientamento nella cartografia originale di Watts [1].

Per facilitare l'identificazione dei beads è possibile visualizzare nel programma una simulazione animata dell'eclisse, avendo inserito il giorno e l'ora dell'evento con le coordinate e l'altitudine del sito di osservazione. Il profilo lunare sovrapposto al disco solare può essere graficato a varie scale con le relative coordinate.

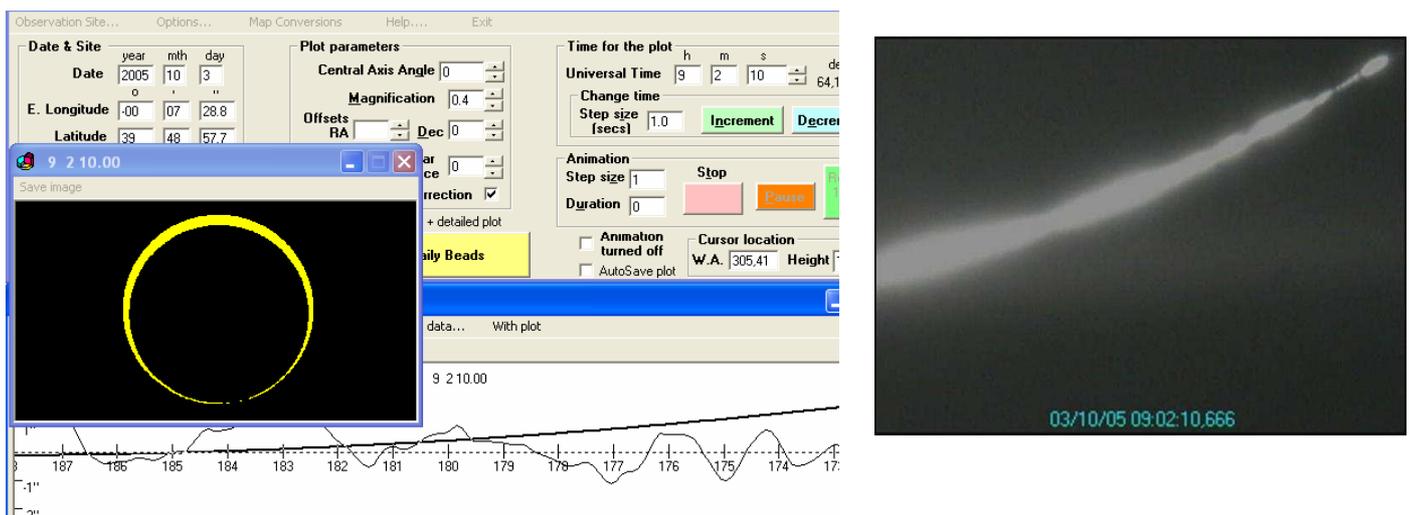


Figura 11: interfaccia grafica di WinOccult; in base ai parametri forniti in input il software realizza una simulazione dell'eclisse vista globalmente (riquadro in basso a sinistra) e del profilo lunare confrontato al disco solare per la posizione angolare voluta (visibile nella finestra in basso). Il software permette inoltre di simulare per un determinato intervallo di tempo l'evoluzione dell'eclissi permettendo l'identificazione dei beads confrontati con la registrazione dell'evento (immagine a destra).

Mediante il confronto tra la simulazione e un filmato completo di timing dell'eclisse è possibile identificare la posizione e la sequenza dei beads e trovare la migliore corrispondenza tra osservazione e simulazione utilizzando come parametro libero una δ variazione del raggio solare, tenendo in dovuto conto l'incidenza degli errori.

Il programma utilizza per la simulazione:

- le effemeridi solari calcolate per mezzo delle espressioni VSOP
- le effemeridi Lunari calcolate per mezzo delle espressioni di Chapront (ELP-82B), basate sulle DE200. Queste effemeridi includono un offset di 0.5" in longitudine, a causa della

- differenza tra centro di massa e centro della figura lunare. Non vi sono invece correzioni alla latitudine.
- il raggio Lunare è considerato pari a 0.2725026 per il 1° e 4° contatto e per i limiti di penombra dell'eclisse. Viene utilizzato invece il valore di 0.272281 per il 2° e 3° contatto, per il calcolo della durata dell'eclisse centrale e per i suoi limiti. Il secondo raggio lievemente più piccolo permette di tenere in debito conto l'effetto delle valli Lunari.
- il raggio terrestre durante l'eclisse Lunare è considerato pari a 0.998333
- il raggio del Sole (a distanza di un'unità astronomica) pari a 659.63" (a cui si sottraggono 1.55" nel calcolo del momento del contatto centrale per tenere conto dell'irraggiamento). Il software permette di variare il diametro solare rispetto al suo valore standard.

L'applicazione di DeltaT alle osservazioni è implementata nel software che utilizza un database contenente i valori di DeltaT in secondi (differenza tra UT e TDT) per ogni anno a partire dal 1620. Per ottenere il valore di dUT1 alla data dell'osservazione WinOccult usa una interpolazione lineare tra i valori con un errore inferiore a 0.1 s, che propagato sulle coordinate geografiche equivale ad un errore in longitudine di 1.5" e in latitudine di $46m \times \cos(lat)$, ai quali corrisponde uno shift in parallasse della Luna di 0.03" [9].

Cap.3: Analisi dati - Eclisse spagnola del 3 ottobre 2005

Come già detto lo scopo di questo lavoro è l'analisi dati di un'eclisse registrata amatorialmente in diversi siti di osservazione. I filmati, completi di riferimento UTC e di coordinate geografiche, presentano rapporti segnale/rumore non calcolabili in quanto non si conosce il tipo di strumentazione utilizzata. Per far sì che questo non contaminasse le misure si è scelto di considerare solo i Baily's beads "certi" preferendo perdere degli eventi ma esser certi che quelli considerati siano veri.

Analizzando i filmati si sono registrati i tempi e le posizioni angolari di comparsa e scomparsa dei beads confrontando le riprese con le simulazioni ottenute tramite il software WinOccult per due siti di osservazioni della stessa eclisse. Per ogni evento si è registrato il dh, ossia l'altezza del profilo solare rispetto a quello lunare al tempo di osservazione nei due filmati a nostra disposizione compilando le seguenti tabelle:

sito: Moncofa Long: W 00°07' 28".8 Lat:N 39°48'57".7 Alt: 5m						
n ^b baily	Angle (°)	T oss(h:m:s)	err(s)	Δh_{Watts} (arcsec)	$\Delta h_{\text{A\&M}}$ (arcosec)	err (arcsec)
S1	179,00	9:02:13.7	0,10	-0,16	-0,33	0,02
S2	181,40	9:02:20.6	0,10	-0,22	-0,40	0,02
S3	177,80	9:02:20.9	0,10	-0,09	-0,25	0,02
S4	172,40	9:02:22.6	0,10	-0,26	-0,40	0,02
S5	173,60	9:02:24.8	0,10	-0,27	-0,41	0,02
S6	177,00	9:02:27.6	0,10	-0,33	-0,49	0,02
S7	175,00	9:02:27.8	0,10	-0,30	-0,45	0,02
S8	170,60	9:02:34.6	0,10	0,13	-0,26	0,02
S9	162,70	9:02:38.2	0,10	-0,32	-0,43	0,02
S10	161,70	9:02:38.4	0,10	-0,17	-0,27	0,02
S11	156,00	9:02:36.8	0,10	-0,30	-0,39	0,02

Long:W 00°08' 30".94 Lat:N 39°48'02".96						
n ^b baily	Angle (°)	T oss(h:m:s)	err(s)	Δh_{Watts} (arcsec)	$\Delta h_{\text{A\&M}}$ (arcosec)	err (arcsec)
A1	205,5	09 00 46	0,10	-0,22	-0,04	0,02
A2	235,9	09 00 55	0,10	-0,42	-0,15	0,02
A3	210,7	09 01 9	0,10	-0,45	-0,17	0,02
A4	224,7	09 01 10	0,10	-0,55	-0,27	0,02
A5	218,6	09 01 10	0,10	-0,42	-0,21	0,02
A6	215,6	09 01 16	0,10	0,36	-0,06	0,02
S7	192,4	09 02 11	0,10	0,01	-0,23	0,02
S8	188,9	09 02 17	0,10	0	-0,3	0,02
S9	186,2	09 02 27	0,10	-0,17	-0,02	0,02
S10	181,4	09 02 27	0,10	-0,06	-0,12	0,02
S11	177	09 02 33	0,10	-0,13	-0,29	0,02
S12	170,6	09 02 38	0,10	-0,15	-0,01	0,02
S13	156	09 02 38	0,10	-0,05	-0,03	0,02
S14	161,7	09 02 41	0,10	0	-0,1	0,02
S15	196,1	09 03 13	0,10	-0,1	-0,13	0,02

Tabelle 3.1 e 3.2: dati registrati dal confronto osservazione filmato-simulazione WinOccult per l'eclissi del 3/10/2005 nei diversi siti indicati. Il segno negativo dei dh indica che il disco solare è sotto il profilo Lunare. A e S prima del numero identificativo del bead indicano se l'evento è di apparizione o sparizione. Gli errori sono associati all'accuratezza del programma di simulazione.

Dal primo set di dati risulta subito che mediamente il disco solare è sotto il profilo Lunare di $\Delta h_1=0.37\pm 0.03$ arcsec, mentre dal secondo set di misure si trova $\Delta h_2=0.14\pm 0.06$ arcsec, dove gli errori associati sono errori statistici.

Successivamente si è proceduto per la minimizzazione degli errori descritti nel capitolo precedente. Per calcolare il ritardo temporale dT dell'osservazione rispetto la simulazione si calcola la velocità solare locale v per ogni beads e si ricava $dT=dh/v$. A questo punto per minimizzare l'errore sistematico, associabile al timing, si sottrae ad ogni dT il valore minimo di dT_{\min} ottenendo i seguenti valori:

Sito: Moncofa Long:W 00°07' 28".8 Lat:N 39°48'57" .7 Alt: 5m				Long:W 00°08' 30".94 Lat:N 39°48'02".96			
n beads	V (arcsec/s)	$dT_{A\&M}$ (s)	dT_{corretto} (s)	n beads	v (arcsec/s)	$dT_{A\&M}$ (s)	dT_{corretto} (s)
S1	0,12	-2,75	-1,52	A1	0,08	-0,50	-0,49
S2	0,11	-3,64	-2,41	A2	0,68	-0,22	-0,21
S3	0,13	-1,92	-0,69	A3	0,18	-0,94	-0,93
S4	0,16	-2,5	-1,27	A4	0,12	-2,25	-2,24
S5	0,16	-2,56	-1,33	A5	0,12	-1,75	-1,74
S6	0,13	-3,77	-2,54	A6	0,07	-0,86	-0,85
S7	0,15	-3	-1,77	S7	0,1	-2,30	-2,29
S8	0,18	-1,44	-0,21	S8	0,15	-2,00	-1,99
S9	0,22	-1,95	-0,72	S9	0,14	-0,14	-0,13
S10	0,22	-1,23	0	S10	0,16	-0,75	-0,74
S11	0,25	-1,56	-0,33	S11	0,2	-1,45	-1,44
				S12	1,34	-0,01	0
				S13	0,24	-0,13	-0,12
				S14	0,28	-0,36	-0,35
				S15	0,04	-3,25	-3,24

Tabella 3.3 3.4: calcolo delle correzioni dei ritardi temporali nelle apparizioni (A) e sparizioni (S) dei beads ottenute sottraendo il minimo $dT_{A\&M}$, eliminando così l'errore sistematico dovuto al timing.

Per il primo set di dati si trova quindi un ritardo medio della simulazione rispetto all'osservazione di $\Delta T_1 = 1.16\pm 0.49$ s, mentre per il secondo $\Delta T_2 = 1.12\pm 0.55$ s. Le incertezze sono errori statistici. I due dati sono tra loro in accordo entro un σ e mediati ci forniscono un valore del ritardo pari a $\Delta T_c = 1.14\pm 1.04$ s.

Considerando che la Luna sopravanza il Sole di circa 0.5 arcsec/s, dal ritardo ricavato si può stimare una variazione del diametro solare dell'ordine di $\Delta d_{sol} = -0.5 \times \Delta T_c = -0.57\pm 0.52$ s rispetto al valore medio standard ad 1UA pari a 959.63 arcsec. Il segno negativo sta a indicare che il Sole risulta con diametro minore rispetto a quello standard.

Cap.4: Conclusioni

L'analisi condotta evidenzia una minima riduzione del diametro solare che tuttavia è compatibile con il valore del diametro solare medio standard entro due sigma, se si considera il valore standard privo di errore. Sebbene gli errori sono troppo alti per poter dedurre un'effettiva variazione del diametro solare, quel che emerge risulta comunque in accordo con lo studio condotto dal Prof. C. Sigismondi che riguardo all'eclissi in Guyana del 22 settembre 2006 stima una tendenza alla riduzione su base secolare del diametro solare.[8]

L'eventuale conferma di questa tendenza e la possibilità di riduzione dell'errore associato alla misura sarà possibile con l'elaborazione dati di altri filmati di stessa eclisse, attualmente in fase di analisi.

Oltre al metodo da noi adottato di studio della variazione del diametro solare medio per mezzo del metodo dei Baily's beads, misure più dettagliate, nello specifico di oscillazioni nello spessore della fotosfera, sono state effettuate dal satellite SOHO. Misure ancora più accurate verranno compiute dalla missione PICARD concepita appositamente per lo studio del diametro solare.

Ringraziamenti

Aver avuto la possibilità di lavorare su di un argomento in pieno sviluppo è stato senza dubbio di grande sprono per la nostra determinazione nel continuare questo tipo di studi. Ringraziamo il prof. C. Sigismondi per averci fatto partecipi della sua ricerca e per averci coinvolto attivamente nel cercare di immaginare, di visualizzare e di creare metodi alternativi per la risoluzione dei più svariati problemi. "Non ci sono domande stupide" e "le teorie cambiano ma una buona osservazione è per sempre" sono frasi che accompagneranno il ricordo di questa esperienza, in cui finalmente abbiamo provato l'ebbrezza di un'osservazione al telescopio condotta con rigore scientifico.

Bibliografia

- [1] **Watts, C.B.** The Marginal Zone of the Moon. Astronomical Papers prepared for the use of the American Ephemeris and Nautical Almanac (United States Government Printing Office, Washington), (XVII), (1963).
- [2] **Dunham, D.W.; Dunham, J.B.** . Moon, (8):546, (1973).
- [3] **Fiala, A.D.; Dunham, D.W.; Sofia, S.** . Solar Physics, (152):97, (1994).
- [4] **Fiala, A.D.; Dunham, D. W.; Sofia, S.** Variation of the solar diameter from solar eclipse observations, 1715-1991. Solar Physics, (70), (1994).
- [5] **C. Sigismondi and C. Contento**, Pinhole Solar Monitor to Detect 0.01” Radius Variations” IAU XXV General Assembly, Sydney 13-16 July (2003).
- [6] **Costantino Sigismondi**, Solstizi equinozi e bisestili in Basilica, *Astronomia nella Basilica di Santa Maria degli Angeli, Geografia*, 101-102, 2-8 (2003).
- [8] **Costantino Sigismondi**, Timing assoluto e relativo per le osservazioni con videocamere digitali (2006).
- [9] **Dave Herald**. WinOccult 3.6.0. <http://www.lunar-occultations.com/iota/occult3.htm>, (), (2003).