

Misure del diametro solare allo Gnomone Clementino

LABORATORIO DI ASTROFISICA

PAOLO DE BERNARDIS

Pietro D'amico

con supervisione del professor Costantino Sigismondi

A.A. 2024/2025

Abstract

Studiare il funzionamento, le peculiarità storiche e le caratteristiche tecniche dello Gnomone Clementino, i transiti meridiani e le caratteristiche della meridiana. Correlazione tra condizioni meteorologiche e osservazioni astronomiche del Sole

1 Introduzione

1.1 Attività solare

Il diametro del Sole può essere misurato con tecniche astrometriche basate sui transiti meridiani o su fenomeni astronomici come le eclissi. Il presente lavoro si propone di ripercorrere le tappe di tali misure in luce bianca, nel contesto del massimo dell'attività solare del ciclo undecennale XXV.

Si misura il diametro apparente del Sole in luce bianca, verificando possibili variazioni del diametro in funzione dell'attività solare per poi valutare l'influenza delle condizioni atmosferiche e delle tecniche osservative ed infine confrontare i risultati con misure storiche e moderne.

L'attività solare viene misurata in base al numero di macchie solari che compaiono in maniera ciclica sulla superficie solare. Il numero medio di macchie solari presenti sul Sole non è costante, ma varia tra periodi di minimo e di massimo. Il ciclo solare è il periodo, lungo in media 11 anni, che intercorre tra un periodo di minimo (o massimo)

dell'attività solare e il successivo.

L'attività solare si manifesta in svariati modi e oltre alla variazione del numero di macchie solari, molti fenomeni osservabili del Sole manifestano variazioni cicliche undecennali, tra cui la frequenza di brillamenti solari, espulsioni di massa coronali, come pure la frequenza di aurore sulla Terra. L'astronomo solare Edward Walter Maunder (Londra, 12 aprile 1851 – Londra, 21 marzo 1928) si accorse che tra il 1645 e il 1715 il Sole interruppe il ciclo undecennale e ci fu un'epoca in cui quasi non ci furono macchie, denominato minimo di Maunder

1.2 Meridiana clementina

La meridiana della Basilica di Santa Maria degli Angeli e dei Martiri a Roma, detta anche **Gnomone Clementino**, fu realizzata nel 1702 da **Francesco Bianchini** (Verona, 13 dicembre 1662 – Roma, 2 marzo 1729) su incarico di Papa Clemente XI, per verificare la riforma del calendario Gregoriano e misurare con precisione l'obliquità dell'eclittica,

il tempo degli equinozi e la durata dell'anno tropico.



Figura 1: Epigrafe situata in Basilica

È una meridiana gnomonica a camera oscura: la luce del Sole entra da un foro stenopeico, originariamente di circa 2 cm di diametro, cioè pari alla millesima parte della sua altezza dal pavimento posto a 20.34 m di altezza, proietta l'immagine del disco solare sul pavimento della Basilica, dove è tracciata una linea meridiana, di ottone, lunga 44.89 m orientata in direzione nord-sud (Catamo, M., & Lucarini, S. Il cielo in Basilica. Roma: Edizioni Agami, 2002).

Se il foro fosse ideale, ovvero un punto adimensionale senza estensione, si avrebbe un'immagine solare senza la penombra e bordi ben definiti. Inoltre l'immagine solare sarebbe più piccola di quella che è e presumibilmente non ci sarebbe alcuno shift dal centro. Infine se fosse davvero puntiforme vedremmo delle figure di diffrazione (dischi di Airy) quindi avremmo comunque una sfocatura ma non data dalla geometria.

In seguito ad alcune operazioni di restauro della Basilica, il foro era stato modificato e non era più di forma circolare. Il professore Costantino Sigismondi, dopo aver apposto uno schermo circolare con un diametro di 15.9 mm per ovviare momentaneamente al problema, ha agito direttamente sul foro stenopeico, allargandolo e restituendogli la forma circolare. Attualmente il foro ha un diametro di 25 mm,

uno spessore di 6.22 mm e presenta uno sbeccamento verso l'interno di 2.5 mm sul bordo Nord.

Adiacente alla linea, sul marmo bianco, sono riportate due scale graduate: una in parti centesime (ovvero usando come unità di misura un centesimo dell'altezza del foro stenopeico) per misurare le distanze dal piede del foro, e l'altra in gradi per misurare l'angolo complementare all'altezza nel cielo dell'oggetto di cui si osserva il transito. Le due grandezze sono collegate dalla funzione tangente: un valore L sulla scala delle lunghezze può essere convertito in un valore z sulla scala degli angoli tramite la relazione:

$$z = \arctan \frac{L}{100} \quad (1)$$

A differenza di orologi solari orizzontali o verticali in cui è presente un asse gnomonico opportunamente orientato rispetto all'asse terrestre (parallelamente o perpendicolarmente a esso), i tipi a camera oscura proiettano non un'ombra ma un'immagine del Sole ellittica. Il contesto ideale è pertanto un ambiente chiuso e poco illuminato.

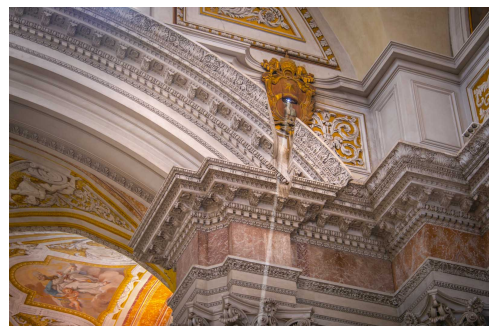


Figura 2: Foro gnomonico e luce proiettata

La linea meridiana è essa stessa la materializzazione della retta tangente di una grande circonferenza immaginaria centrata sul foro stenopeico. In tal modo è possibile prevedere le posizioni dell'ellissi luminosa durante i principali eventi astronomici: solstizio invernale ed estivo, in cui si raggiungono, rispettivamente la distanza massima

e minima dal foro gnomonico, e punto equinoziale in cui il Sole entra – nel suo moto apparente – nel segno dell’Ariete in Primavera e della Bilancia in Autunno, a causa del moto precessionale del pianeta, il Sole transita nelle costellazioni Pesci e Vergine



Figura 3: Linea Clementina vista dall’equinozio, con linea di ottone

Lungo tutta la linea meridiana possiamo osservare le diverse costellazioni zodiacali riprodotte attraverso bellissime tarsie marmoree realizzate con materiali di provenienza archeologica. A destra della meridiana vi sono le costellazioni estive e autunnali, alla sinistra invece quelle primaverili e invernali. Il Cancro e il Capricorno, coincidendo con i solstizi, sono invece collocati alle due estremità della meridiana.

2 Apparato Sperimentale

2.1 Principio di Funzionamento

Il principio base è geometrico: quando il Sole attraversa il meridiano locale (il piano verticale passante per il nord e lo zenit), il centro della sua immagine coincide con la

linea tracciata sul pavimento, si registra il momento preciso in cui il bordo solare anteriore tocca la linea (primo contatto) e il momento in cui il bordo posteriore la lascia (secondo contatto), si può calcolare il tempo medio del transito e quindi il diametro apparente del Sole.

Il foro stenopeico agisce come un obiettivo di camera oscura, proiettando un’immagine reale, rovesciata e in scala dell’oggetto celeste osservato in questo caso, il Sole. La nitidezza dell’immagine dipende direttamente dal diametro d del foro e dalla distanza H dal piano di proiezione (il pavimento).

La conversione in mm sul pavimento a secondi d’arco in cielo cambia a seconda dell’altezza $h[^\circ]$ del Sole sull’orizzonte, l’immagine infatti sul pavimento si allunga o accorcia a seconda di come incidono i raggi solari. Il fattore di scala S è dato da:

$$S = \frac{(\sin h)^2}{H} 206265'' ["/mm] \approx 10 \sin h^2 ["/mm] \quad (2)$$

Dove 206265 è il fattore di conversione per l’angolo da radianti a arcosecondi (")

S varia da $2''/mm$ al solstizio d’inverno ($h \approx 25^\circ$) fino a $9''/mm$ al solstizio d’estate ($h \approx 71.5^\circ$), rendendo le misure invernali geometricamente più risolte. Il bordo dell’immagine risulta sfocato per effetto della penombra, ma grazie alla definizione dei contorni e all’analisi video è possibile interpolare i bordi con precisione millimetrica.

Avendo i seguenti dati:

- Altezza foro gnomonico: $H = 20353.44 mm$;
- Scala angolare: da $2''$ in inverno a $9''$ in estate, per ogni mm sulla linea;
- La velocità apparente del bordo solare sulla linea meridiana è di:

$$v = 1.5 \cdot \frac{1}{\cos z} \cdot \cos \delta [mm/s] \quad (3)$$

Il fattore numerico è dato dalla velocità angolare di rotazione terrestre per l'altezza dello gnomone ($H \cdot \omega = 1,48 mm/s$) con una correzione empirica per tener conto della penombra e dunque di una specifica definizione di centro geometrico;

Dove $\frac{1}{\cos z} = \sqrt{1 + (\tan z)^2}$ è chiamato **fattore di proiezione**, cioè corregge la velocità in base a quanto l'immagine è schiacciata sul pavimento;

Invece $\cos \delta$ corregge la velocità in base alla posizione del Sole rispetto l'equatore celeste, infatti $\delta = h - (90^\circ - \phi)$, con $\phi = 41.9^\circ$, latitudine della Basilica;

Dato che z e δ cambiano durante i mesi dell'anno, anche la velocità cambia, riportiamo un grafico per mostrare il suo andamento mensile.

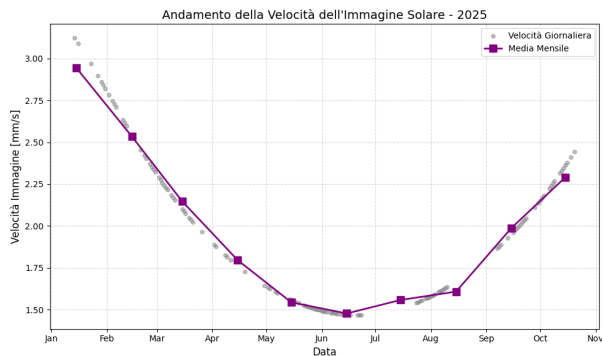


Figura 4: Andamento velocità lineare dell'immagine solare al variare dei mesi. Notiamo un massimo in inverno ($v \approx 3.1 mm/s$) quando il Sole è basso e un minimo in estate ($v \approx 1.5 mm/s$) quando il Sole è alto

Per una misura accurata, è fondamentale stimare con precisione la durata del transito: $t_2 - t_1$ e la precisione temporale: $\sigma_t = \pm 0.5s$;

Dove D è il diametro angolare del Sole e t è la durata del transito. Questo valore

sarà poi utilizzato per convertire differenze temporali in ampiezze angolari.

2.2 Procedura osservativa

Come prima cosa si deve tener conto, durante tutta l'esperienza, che l'orientamento della linea meridiana (scostamento azimutale rispetto al nord celeste) è di circa $+4'30''$ Est. Si prendono le misure dei due lembi del Sole tracciando dei segni con la matita direttamente sul marmo della meridiana. Sulle zone della meridiana più delicate onde evitare di danneggiarle, si posizionano fogli di carta lisci, su cui far cadere l'immagine solare.

L'osservazione del transito meridiano dipende fortemente da un agente esterno non controllabile, ovvero il meteo. Infatti la condizione necessaria per osservare il transito è, ovviamente, che il Sole non sia coperto dalle nuvole, almeno per il periodo di tempo che intercorre tra l'entrata e l'uscita dell'immagine del Sole nel marmo bianco. Oltre che dal meteo, l'osservazione dell'immagine del Sole è influenzata dalle fluttuazioni di temperatura e pressione dell'aria che si trova all'esterno della Basilica, e dai suoi moti turbolenti causati dal riscaldamento generato dal mattonato del vano del foro stenopeico colpito direttamente dalla radiazione solare. L'immagine solare proiettata sul pavimento della Basilica, quindi, risulta agitata.

2.3 Transiti meridiani del Sole

L'osservazione del transito meridiano consiste nel misurare il tempo di transito sulla linea meridiana e nel misurare le posizioni del bordo Nord e del bord Sud dell'immagine del Sole sulla meridiana. Una volta ottenute le posizioni dei bordi è possibile calcolare la lunghezza dell'immagine del Sole, ovvero il diametro maggiore dell'ellisse generata dalla proiezione a terra del disco solare, la posizione del centro del Sole sul-

la meridiana e, di conseguenza, la posizione del Sole nel cielo attraverso la conversione in altezza zenitale. Il tempo di transito corrisponde all'istante in cui il centro del Sole, che si muove sul pavimento della Basilica in direzione Ovest-Est, si sovrappone all'asse longitudinale della linea meridiana, larga 30 mm



Figura 5: Transit meridiano del giorno 15 Marzo 2024. Da notare la penombra sui bordi, la quale in seguito a turbolenze è instabile e rende difficilmente visibile i bordi dell'immagine solare. Questo è uno dei maggiori problemi legati alla presa dati, sta infatti all'occhio umano la stima di dove cade il bordo dell'immagine solare

In questo senso, per ottenere una misura del tempo di transito più precisa possibile, si cerca di misurare, sia i tempi di contatto tra l'immagine del Sole e l'asse longitudinale della linea di ottone, sia i tempi di contatto con i bordi del marmo bianco, per poi effettuare una media. Le misure di posizione, invece, vengono effettuate misurando la distanza tra i bordi Nord e Sud dell'immagine e una certa posizione di riferimento di cui si conosce la distanza dal piede del foro; in questo modo è possibile determinare la posizione assoluta dei bordi dell'immagine e di

conseguenza la posizione assoluta del centro dell'immagine sulla meridiana, mediando i due valori, e la lunghezza dell'immagine

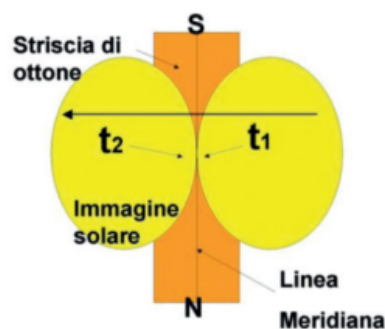


Figura 6: Schema della misura del tempo di transito come media dei due contatti con l'asse della linea (Sigismondi, C., *Lo Gnomone Clementino: Astronomia Meridiana in Chiesa dal '700 ad oggi*, pp. 9, 2010, Figura 9. a. Eclissi del 29.3.2006; b: Schema dei transiti)

Come accennato in precedenza, un'altra osservabile che si ricava dalla posizione dell'immagine è l'altezza nel cielo del Sole: visionando, sulla scala degli angoli il valore corrispondente alla posizione in cui avviene il transito, si ottiene l'altezza zenitale del Sole nel cielo. Il valore ottenuto, però, non corrisponde al vero valore dell'altezza nel cielo perché essa viene modificata dalla rifrazione dell'atmosfera, che ha l'effetto di alzare l'immagine apparente del Sole ma stimando il contributo della rifrazione dell'atmosfera, come verrà mostrato nella sezione Analisi Dati, è possibile arrivare alla posizione vera del Sole nel cielo.

Il metodo di misura adottato con il professore Sigismondi per effettuare le osservazioni è stato la seguente: le posizioni dei bordi dell'immagine del Sole vengono segnate con una matita sul marmo bianco i bordi agitati dalla turbolenza atmosferica¹, mentre il tempo di transito è preso tramite una video ripresa che inquadra, mentre avviene

¹I segni a matita vengono fatti interpolando visivamente il bordo agitato dalla turbolenza, è dunque un'azione implicita nel metodo

il transito, un orologio radiocontrollato (nel nostro caso un Casio modello G-SHOCK) in modo tale da poter ottenere con precisione sia i contatti con la linea che quelli con il marmo bianco visionando il video fotogramma per fotogramma, una volta ancorato il tempo del video con il tempo reale (UTC: tempo universale coordinato) dato dall'orologio.

Successivamente per una maggior precisione e per compilare i file excel con gli effettivi dati per un singolo transito, viene prima di tutto analizzato il video del transito da PC tramite il software VLC media player (frame by frame), annotando i tempi di entrata, di primo, secondo contatto e di uscita del disco solare rispettivamente alla linea di bronzo².

L'annotazione dei tempi è avvenuta dopo la sincronizzazione dell'orologio aggiungendo al valore temporale il tempo trascorso dall'inizio del video. Avendo il tempo di transito, lo si confronta con il tempo dato dal software *Stellarium 25.1* impostando il giorno e il tempo indicato. Ai 180° di azimuth, cerco il transito che inserisco nei valori delle effemeridi, com mostrato in Fig 10 così da avere un confronto teorico con i dati sperimentali. L'altezza riportata dallo stesso software è un dato che inserisco facilmente nella sezione "centro Sole". Aggiungo anche il diametro solare (apparente) nell'apposita casella, insieme alle misure Equatore-polo Sud ed Equatore-polo Nord entrambe sommate al diametro solare.

²In realtà alcune volte sono state necessarie più misure dell'immagine solare, a partire dal di fuori della meridiana stessa fino ad arrivare alla linea di bronzo. Il motivo è stato quello di aver più dati possibili del diametro solare per aumentare la precisione della misura, cambiando le superfici sulle quali essa veniva riflessa rispetto alla singola linea di bronzo e marmo bianco centrale dove essa è incastonata

³A causa di questi effetti e l'intensità dell'immagine estiva è 5 volte maggiore rispetto a quella invernale. Inoltre, può verificarsi una fluttuazione meteorologica della posizione dell'immagine di $\pm 1.5\text{ mm}$ dovuta alla variazione dell'indice di rifrazione dell'atmosfera, quando la T si allontana dalle condizioni STP (Standard Temperature and Pressure) (15°C , 1013 hPa): a circa $\pm 1\text{ mm}/10^\circ\text{C}$ e $\pm 1\text{ mm}/10\text{ hPa}$ (Sigismondi, C., *Solar Astrometry in Rome at the End of the Maunder Minimum*, 2025) in prossimità del solstizio invernale, l'effetto è meno evidente a lunghezze focali inferiori verso l'ora estiva (un grosso cambiamento di P e T ha effetti più piccoli in termini di spostamento lineare)

Dato che si è voluto tenere conto anche delle condizioni atmosferiche nelle apposite caeselle sono stati inseriti i valori di pressione, temperatura ed umidità percentuale. Presi dal sito "METAR aeroporto Roma-Urbe LIRU".

In [Appendice](#) riportiamo alcune analisi più dettagliate su come agiscono i fattori di disturbo come la penombra, la non idealità del foro e le condizioni atmosferiche³

3 Analisi dei Dati

Gli obiettivi principali sono: quantificare due parametri fondamentali: lo shift dal centro dell'immagine solare dalle effemeridi (Δt) e la discrepanza dal diametro angolare (ΔD).

Sono stati analizzati i video dei transiti del Sole sulla meridiana Clementina relativi ai mesi compresi tra marzo 2025 e maggio 2025, (i dati sono disponibili anche da mesi precedenti e successivi, ma i dati acquisiti durante l'esperienza sono prevalentemente da marzo a maggio 2025). Per ogni transito è stato registrato il momento del primo e dell'ultimo contatto del disco solare con la linea meridiana, determinando così:

- L'istante del passaggio del centro solare: $t_c = \frac{t_{\text{ingresso}} + t_{\text{uscita}}}{2}$
- La durata complessiva del transito: $\Delta t = t_{\text{uscita}} - t_{\text{ingresso}}$

3.1 Confronto con le Effemeridi

Il valore atteso del diametro solare è stato ottenuto dalle effemeridi proiettate sulla meridiana, con le sue dimensioni reali. Si è quindi calcolata la differenza $O - C$ (Osservato - Calcolato) sia per il tempo di passaggio del centro, sia per il diametro:

$$\Delta t_c = t_{c,oss} - t_{c,effemeridi} \quad (4)$$

$$\Delta D = D_{oss} - D_{effemeridi} \quad (5)$$

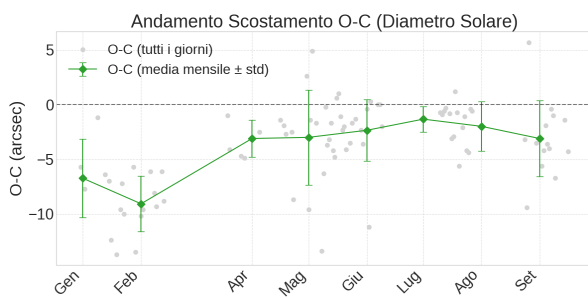


Figura 7: Confronto tra dati osservativi e effemeridi. Differenza tra il diametro osservato e quello calcolato (O-C).

La linea verde mostra la differenza tra il diametro solare osservato e quello calcolato dalle effemeridi. La media globale (linea tratteggiata) indica che il diametro misurato è sistematicamente inferiore a quello teorico. Il ridursi dell'immagine contribuisce a ridurre la penombra.

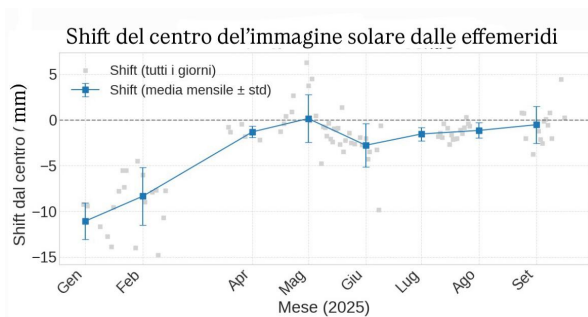


Figura 8: Confronto tra dati osservativi e effemeridi. Shift dal centro del Sole (Δt)

La linea blu rappresenta lo shift del centro dell'immagine solare dalle effemeridi tra

osservazione prevista e effemeridi. Si osserva una chiara modulazione stagionale: lo shift è negativo in inverno e positivo in estate, un comportamento dovuto all'eventuale presenza del "seno Boscoviciano". Seno dal quale la linea di ottone si discosta rispetto ad una retta ideale, nonostante questa evidenza non si sappia con esattezza dove esso sia

L'analisi del centro dell'immagine Est-Ovest rispetto alla effemeridi, calcolate per una retta tirata tra i due "punti solstiziali" della meridiana, ossia dove sia esattamente il centro dell'immagine solare nei transiti del 21 giugno e 21 dicembre, rivela una variazione sinusoidale: Questa periodicità conferma l'influenza della non rettilineità della geometria della linea meridiana (vedi sezione 4.2).

3.2 Diametro solare osservato e variazioni stagionali

Uno degli obiettivi principali della campagna osservativa del 2025 è stato la verifica della variazione del diametro angolare del Sole nel corso dell'anno. Come noto, l'orbita terrestre non è perfettamente circolare ma ellittica. Di conseguenza, la distanza Terra-Sole varia, causando una variazione apparente delle dimensioni del disco solare.

La Figura 9 mostra il confronto tra l'andamento teorico atteso (linea tratteggiata) e i valori medi mensili osservati (punti rossi) da Gennaio a Ottobre 2025.

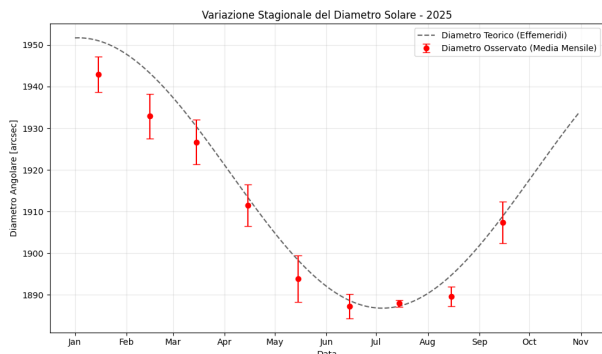


Figura 9: Diametro solare osservato nei diversi mesi del 2025. Il diametro si intende quello dell'immagine solare ridotta dalla penombra.

Le misure osservate seguono fedelmente l'andamento sinusoidale previsto dalla meccanica celeste. Si osserva chiaramente la diminuzione progressiva del diametro angolare dai valori massimi invernali ($\sim 1952''$ a Gennaio), al perielio, verso il minimo estivo ($\sim 1887''$ a Luglio), in corrispondenza dell'afelio.

Nonostante il buon accordo qualitativo, l'analisi dei residui ha evidenziato una leggera sottostima del diametro nei primi mesi dell'anno (punti sistematicamente sotto la curva teorica da Gennaio e Febbraio) e una sovrastima nei mesi successivi (punti sopra la curva da Aprile in poi).

Il valore medio osservato è stato di $D = 1915.0'' \pm 7.6''$. Il valore minimo di $1888.4''$, mentre il massimo $1947.0''$. L'analisi mese per mese mostra un aumento del diametro apparente da gennaio verso il perielio. Una successiva diminuzione verso i mesi primaverili ed estivi.

In Figura 8 è riportato l'andamento degli scarti temporali del transito del centro solare e delle discrepanze nel diametro. Gli shift del centro del Sole dalle effemeridi, oscillano tra $-3.14 \pm 9.65 \text{ mm}$ su base annua rispetto alle effemeridi, indicando un possibile errore sistematico legato alla definizione dei bordi (probabilmente dato dall'incertezza della

penombra). L'oscillazione media annua e l'incertezza associata si basano direttamente su tutte le singole osservazioni giornaliere di shift raccolte durante l'anno, non sulle medie mensili. Questo ci dà un'idea dell'oscillazione della differenza di tempo tra transito ed effemeridi.

Dati i valori del paragrafo precedente, non possiamo escludere che il vero valore sia zero. Il valore osservato potrebbe essere una fluttuazione casuale dovuta al metodo di acquisizione e non un'indicazione di un reale spostamento rispetto all'effemeride. La banda di incertezza è così ampia da rendere difficile affermare con certezza che esista un'oscillazione consistente e diversa da zero su base annua. I valori delle misure potrebbero oscillare attorno allo zero o avere oscillazioni molto variabili.

Il fatto che la deviazione standard è molto più grande del valore medio ci suggerisce che, per l'anno 2025 in questione e con le osservazioni disponibili, non c'è una chiara indicazione di uno shift annuale consistente del centro rispetto alle effemeridi.

3.3 Precisione raggiungibile ed incertezze statistiche

Le discrepanze rispetto ai valori delle effemeridi nascono principalmente da due fattori: la geometria non ideale del foro stenopeico e la rifrazione atmosferica.

Intorno all'immagine proiettata è presente una penombra pari, in prima approssimazione, alla metà del diametro lineare del foro. Per quanto riguarda lo strumento specifico, il foro effettivo risulta dalle dimensioni originali (25 mm) corrette per lo sbecamento interno (2.5 mm a Nord) e per la proiezione dello spessore (6.22 mm), la cui proiezione influenza l'ampiezza del diametro efficace e varia con l'altezza del Sole. Una corretta definizione dei bordi richiede quindi

di considerare il diametro efficace⁴. Per correggere l'effetto della rifrazione atmosferica, che innalza la posizione apparente del Sole riducendone la distanza zenitale, si può utilizzare la formula approssimata di Cassini (valida per $z < 75^\circ$):

$$z_{vero} \approx z_{oss} - 60'' \cdot \tan(z_{oss}) \quad (6)$$

Per quanto riguarda la precisione, per il diametro solare servirebbe una sensibilità dell'ordine di $\pm 0.1''$. Tuttavia, il seeing atmosferico (il quale va dai $2'' - 3''$ diurni ed una turbolenza locale di $10'' - 25''$) determina una sensibilità non raggiungibile. Ci troviamo davanti, un limite fisico dato dall'alta risoluzione.

4 Discussione e Conclusioni

L'attività sperimentale condotta presso la Basilica di Santa Maria degli Angeli ha permesso di verificare con successo la variazione stagionale del diametro solare utilizzando uno strumento storico del XVIII secolo: la Meridiana Clementina. L'integrazione tra la grandiosa struttura gnomonica e le moderne tecniche di acquisizione ha consentito di raggiungere una precisione tale da permettere la stima del diametro solare con un'incertezza di $\sigma \pm 7.6''$.

I dati raccolti nel 2025 mostrano un buon accordo con le effemeridi astronomiche:

- Il diametro medio osservato ($1915.98''$) si discosta dal valore teorico (diametro medio del Sole ad $1 UA$ è di $1920.00''$) di appena $+4.0''$;
- Media O-C per i mesi invernali: $-8.25''$ invece la media O-C per i mesi estivi disponibili $-1.88''$. L'escursione

totale annuale tra estate e inverno osservata è dunque di: $6.37''$.

Oggi l'applicazione di metodi digitali permette di spingere le potenzialità della Meridiana verso i limiti imposti dalla fisica dell'atmosfera, migliorando la prestazioni rispetto a quanto potevano ottenere Bianchini ed altri scienziati del passato. Tuttavia, il valore dell'opera di Bianchini trascende il dato tecnico: la precisione e l'ingegno profusi nella realizzazione della Linea rimangono una testimonianza stupefacente della capacità di coniugare arte e scienza.

4.1 Approccio metodologico e sviluppi futuri

Il protocollo osservativo adottato, (vedi sezione 2.2) ha integrato la correzione sistemica per la rifrazione atmosferica e l'uso di orologi sincronizzati UTC (NTP/GPS), elementi che hanno portato ad una miglioria rispetto alle osservazioni storiche originali. Per migliorare ulteriormente la qualità del dato, le future campagne osservative potrebbero beneficiare di: Acquisizione video ad alta frequenza per "congelare" la turbolenza atmosferica e selezionare i fotogrammi con maggior contrasto.

4.2 Il Seno Boscoviciano e la verifica della rettilietà

Un aspetto critico emerso dall'analisi degli shift dal centro del Sole rispetto le effemeridi (Δt) è la conferma di deviazioni locali nella geometria della linea, note storicamente come "Seno Boscoviciano". Come osservato già dal gesuita Ruggero Boscovich nel 1750, (Catamo, S., & Lucarini, S. *Il cielo in Basilica*. Roma: Edizioni Agami, 2002) la linea meridiana non è perfettamente rettilinea ma presenta lievi ondulazioni (rispetto

⁴Ovvero la larghezza angolare del disco solare ricavata dalla differenza tra gli istanti di secondo e primo contatto durante il transito meridiano. Il diametro dinamico, misurato cronometricamente. Se l'atmosfera è turbolenta, il diametro efficace misurato tende a variare scostandosi da quello canonico

ad una retta ideale). Si escludono a priori irregolarità dovute all'assestamento della pavimentazione.. Inoltre anche se ci fosse un'impresione di questo tipo avverrebbe verticalmente e non orizzontalmente, come osserviamo per il seno.

La Figura 11 evidenzia come i residui della posizione del centro solare rispetto alle effemeridi non siano casuali, ma mostrino un andamento in funzione della declinazione solare. Tali deviazioni, sono dell'ordine di alcuni millimetri. La linea rossa è il Seno Boscoviciano, notiamo che da circa 125 parti centesimali lo shift è negativo ed arriva a -5 mm a Ovest della retta, la quale è già deviata a Est

Il grafico mostra i residui temporali del transito (Shift, asse Y) in funzione della posizione dell'immagine solare lungo la linea meridiana (Parti Centesime⁵, asse X). I punti rappresentano le singole misurazioni giornaliere, con scala cromatica indicante il mese di osservazione. La linea nera ($y = 0$) rappresenta il tracciato semi-ideale della meridiana. Sappiamo che la linea meridiana non è perfettamente allineata secondo la direzione Nord-Sud, essa presenta una deviazione di $5''11'$ (Sigismondi, C. *Il seno Boscoviciano*: Balmer-3-2025-Sigismondi-SenoBosc, pp.31-34, 2025). La deviazione sistematica dei punti rispetto allo zero evidenzia la deformazione geometrica della linea nota come Seno Boscoviciano. Si rimanda alla Figura 12 per una migliore visualizzazione.

L'analisi dati del Seno Boscoviciano è stata eseguita usando gli istanti del transito (t_{trans}), di misurando gli istanti di primo e secondo contatto dell'immagine solare con il centro della linea meridiana e le posizioni sulla linea: annotando il punto esatto

in cui avviene il transito (questo è indicato come "parti centesime della meridiana"). Una volta ottenuti i dati grezzi, sono stati confrontati con il modello rettilineo della meridiana e le effemeridi (Δt_{eff}).

Usando i dati astronomici, che indicano a che ora dovrebbe avvenire il transito se la meridiana fosse perfettamente allineata (Nord-Sud). La Meridiana Clementina infatti, come già detto, non è perfettamente allineata a Nord (Azimut 0°), ma è inclinata verso Est di $5'11''$, ma questa misura è basata solo sui transiti nei due solstizi. Per il ritardo geometrico (Δt_{geom}), usando l'inclinazione verso Est e la velocità dell'immagine solare a terra, si calcola il ritardo teorico previsto per ogni punto della meridiana.

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} \quad (7)$$

Con v la velocità lineare descritta nella formula (3)

Lo studio che abbiamo svolto consiste nel trovare la differenza tra il comportamento osservato e quello geometrico previsto. Calcoliamo infatti, la differenza tra il ritardo geometrico calcolato (Δt_{geom}) e il ritardo di transito effettivamente osservato (Δt_{trans}). Se il risultato è positivo, indica uno spostamento verso Ovest, se negativo, verso Est. La curva che emerge da questi punti residui è il Seno Boscoviciano. Vediamo delle inclinazioni del primo ordine (dovute all'inclinazione della retta di ottone non perfettamente allineata) ed altre del secondo ordine, ovvero il Seno Boscoviciano.

Per i dati del mese di Novembre-Gennaio, i quali riportano un'incertezza maggiore nei dati grezzi, non si sono trovate, per ora, motivazioni esaustive per spie-

⁵Le parti centesime rappresentano una scala di coordinate lineari incisa sulla linea meridiana, in cui l'unità di misura è definita geometricamente come $\frac{1}{100}$ dell'altezza gnomonica (H). In tale sistema, la posizione dell'immagine solare corrisponde direttamente al valore della tangente della distanza zenitale z moltiplicata per 100. ($L = \tan z \cdot 100$)

gare il fenomeno. Potrebbe essere dato da un'ostruzione del foro (come già capitato in passato, non verificabile per via di lavori di ristrutturazione), in alternativa si pensa ad un disturbo di luce ambientale che altera la percezione dei lembi, proveniente finestrone della navata e di quello ellittico della Cappella Albergati (posta dietro il foro).

In conclusione, l'esperienza conferma che la Meridiana Clementina non è solo un

monumento del passato, ma un laboratorio scientifico ancora attivo. La possibilità di correlare le misure astrometriche con studi moderni sull'attività solare (come le variazioni storiche del ^{14}C e degli isotopi del Berillio) dimostra (Usoskin, Living Review of Solar Physics et al [2023](#)) come questo strumento possa ancora offrire spunti didattici e scientifici di grande attualità.

5 Appendice

Utilizzando la procedura di analisi, confrontiamo i dati osservati con quelli previsti dalle effemeridi. Il diametro solare, misurato storicamente da Cassini (maestro di Bianchini ed autore della già famosa meridiana nella chiesa di San Petronio a Bologna, che servì da modello per la nuova costruzione) e Bianchini, oggi è definito come la distanza angolare tra i due lembi meridiani Nord e Sud.

Diversi fattori fisici influenzano la misura del diametro apparente sulla linea meridiana:

- L'oscuramento al bordo, che rende i bordi meno brillanti rispetto al centro del disco;
- La penombra geometrica, dovuta alla non idealità delle dimensioni fisiche del foro stenopeico;
- La diffusione della luce all'interno del marmo, che tende a ingrandire l'immagine;
- L'estinzione atmosferica, che varia in funzione della massa d'aria, combinata con l'area efficace del foro stenopeico da come risultato un'immagine più fioca;
- Il disturbo della luce ambientale (come già accennato nella parte di analisi del Seno Boscoviciano), non può essere rimossa: la Basilica è la Chiesa nazionale della Repubblica Italiana e non potrebbe essere oscurata di giorno senza venire anche chiusa al pubblico. Contrariamente a come Bianchini era solito fare, oscurandola tramite tendaggi;

Il foro stenopeico dello Gnomone Clementino: L'attuale foro stenopeico è costituito da una rondella, posta sopra la lasta d'ottone fabbricata da Campani (Castel San Felice, 1635 – Roma, 28 luglio 1715), il miglior costruttore di lenti all'epoca, spessa 6.2 mm con un diametro di 25 mm (Schiavo, A., La Meridiana di S. Maria degli Angeli, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma [1993](#)). A causa dell'inclinazione dei raggi solari, il foro effettivo si riduce drasticamente in inverno, diventando un'ellisse di circa 11 mm meridiani per 23 mm laterali.

La linea meridiana e i marmi: La linea centrale in ottone e bronzo ha una larghezza di 30 mm . È incastonata tra due lastre di marmo bianco (larghezza totale 910 mm) bordate da due fasce esterne di marmo giallo da 224 mm ciascuna, come mostrato in fig. [6](#).

METEO/T/P/umidità	GIORNO	MESE	ANNO	TRANSITO	EFFEMERIDI	CENTRO SOLE["] +/- ATM	PARAMETRI IMMAGINE
METAR LIRU 081050Z 3000SKT 250V360	8	4	2025	12:12:00.2	12:11:46.6	55,4467	arcsec/mm img reale
METAR LIRU 081150Z 24007KT 170V280	sereno	15	1023	65	Offset lembi [- vs CNC]	55,4582	7,0659
BORDO NORD th- vs CANCRO	55,724	13842,0	equatore	-4414,0	-21,30	DIAM SOLE ' / "	diam. Teorico
BORDO SUD th-vs CAPRICORNO	55,192	14134,0	equatore	-4122,0	-28,68	31,9468	299,4
ΔT teorico	14,6	DEMPTA PEN+C	OMBRA SUD mm	4,27	lembi+centro dempta p+c	1916,81	diam. Misurato
velocità immagine mm/s	1,826	13850,2	shit del centro c	2,14	68,0486		292,0
lunghezza dempta	271,3	14121,5	FORO meridiano eff.	20,73	69,3814	fare meglio la proiezione	O-C (diametro)
ΔToss/seno: riprende	13,6	-0,964	Offset centro img	-24,99	68,7150	dal giallo	-7,4

Figura 10: Esempio tabella excel con i valori da inserire dalle osservazioni, e quelli calcolati automaticamente, del giorno 8 Aprile 2025. [Torna al testo](#)

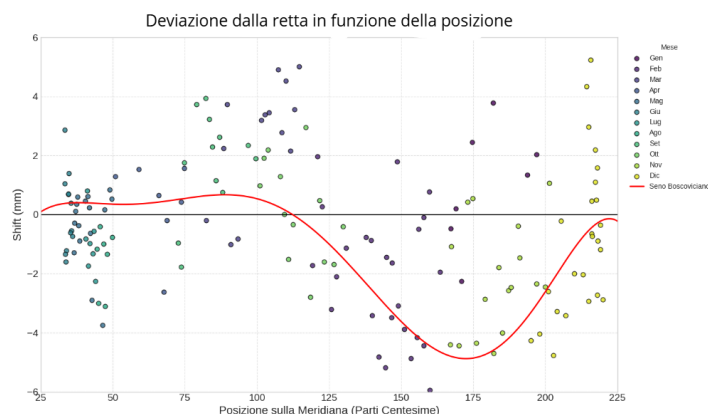


Figura 11: Riportando nel grafico lo shift del centro del Sole (ovvero l'anticipo o il ritardo del transito rispetto alle effemeridi) in funzione della posizione dell'immagine sulla linea, espressa in parti centesime della distanza zenitale. [Torna al testo](#)

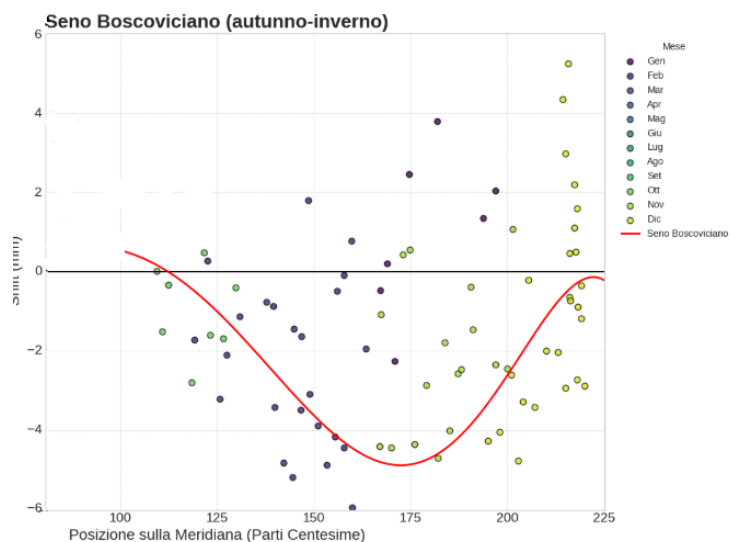


Figura 12: Riportiamo la medesima analisi della Fig.10 evidenziando i mesi che si discostano maggiormente dalla retta reale. Il grafico stesso evidenzia la sinuosità dei dati e come essi si discostino dalla linea meridiana. [Torna al testo](#)

6 Bibliografia

- Bianchini, F. *De Nummo et Gnomone Clementino*. Roma: Joannem Mariam Salvioni, 1703;
- Usoskin, Living Review of Solar Physics, A history of solar activity over millennia, 2023. Available online: [https : //cc.oulu.fi/ usoskin/personal/LRSP2023.pdf](https://cc.oulu.fi/usoskin/personal/LRSP2023.pdf), (accessed on 12 November 2025);
- Boscovich, R. J. *De litteraria expeditione per pontificiam Ditionem ad dimetendos meridiani gradus et corrigendam mappam geographicam*. Roma: Pallade & Palearini, 1775;
- Catamo, M., & Lucarini, S. *Il cielo in Basilica*. Roma: Edizioni Agami, 2002;
- Sigismondi, C., Brucato, A., Andreasi Bassi G., *Solar Astrometry in Rome at the End of the Maunder Minimu*, pp. 7–11, 2025.
Available online: <https://doi.org/10.3390/universe11060186>, (accessed on 5 November 2025);
- Sigismondi, C., *High precision ground-based measurements of solar diameter in support of PICARD mission*, pp. 19. 2012. Available online: <https://arxiv.org/pdf/1112.5878>, (accessed on 4 January 2026);
- Sigismondi, C. *Il seno Boscoviciano*: Balmer-3-2025-Sigismondi-SenoBosc, pp.31-34, 2025;
- Sigismondi, C., *Lo Gnomone Clementino: Astronomia Meridiana in Chiesa dal '700 ad oggi*, pp. 3–7, 2010. Available online: <https://arxiv.org/pdf/1106.2498>, (accessed on 11 September 2025);
- Schiavo, A., *La Meridiana di S. Maria degli Angeli*, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 1993;