

# Osservazioni Astronomiche allo Gnomone Clementino

## Laboratorio di Astrofisica Paolo de Bernardis

Flavio Cencioni

con supervisione del professore Costantino Sigismondi

Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma, Piazzale Aldo Moro, 5, 00185, Roma, Italia.  
e-mail: cencioni.1716362@studenti.uniroma1.it

September 21, 2024

### ABSTRACT

*Aims.* Studiare il funzionamento, le peculiarità storiche e le caratteristiche tecniche dello Gnomone Clementino

*Methods.* Studio dei transiti meridiani e delle caratteristiche della meridiana

*Results.* I. Stima della deviazione della Linea Clementina all'Equinozio; II. Studio della riflessione nel marmo adiacente alla meridiana; III. Correlazione tra condizioni meteorologiche e osservazioni astronomiche del Sole.

## 1. Introduzione

Lo scopo di questa esperienza del corso di Laboratorio di Astrofisica è stato quello di conoscere e studiare lo Gnomone Clementino, una meridiana a foro stenopeico ubicata nella Basilica di Santa Maria degli Angeli a Roma (figura 1). Lo Gnomone Clementino, con più di 300 anni di storia alle spalle, è uno straordinario strumento che consente di effettuare osservazioni astronomiche di ogni tipo nei pressi del centro di Roma.



**Fig. 1.** Vista frontale dell'ingresso della Basilica di Santa Maria degli Angeli.

## 2. Teoria

### 2.1. Cenni Storici

Lo Gnomone Clementino è stato costruito tra il 1701 e il 1702 dall'astronomo e archeologo veronese Francesco Bianchini su commissione di papa Clemente XI, che poi la inaugurò. Oltre che per l'ampio spazio in cui poter inserire la linea meridiana, Bianchini scelse di posizionare il suo strumento nella Basilica



**Fig. 2.** Linea Clementina vista dall'Equinozio. Sono visibili la linea meridiana fatta di ottone, il marmo bianco di Carrara, il marmo giallo di Verona, le due scale graduate e la linea dell'Equinozio.

di Santa Maria degli Angeli, in particolare nel braccio destro del transetto, perché le mura della Basilica, originariamente appartenenti alle Terme di Diocleziano, risultavano stabili e sicure da più di mille anni, a differenza dei luoghi che, all'epoca, accoglievano strumenti simili: Cassini a Bologna e il gesuita Ximenes a Firenze osservarono che il foro stenopeico delle meridiane che utilizzavano risultavano entrambi leggermente spostati rispetto la loro posizione originaria per via di movimenti strutturali o di assestamento. Per poter tracciare la linea meridiana, Bianchini aveva bisogno di conoscere la latitudine del posto, la direzione Nord-Sud e la verticale del foro stenopeico. Per ottenere la verticale, l'astronomo veronese usò un filo a piombo immerso nell'acqua per attenuarne le oscillazioni, per la direzione Nord-Sud invece si avvalse di una meridiana ausiliara a



Fig. 3. Vano del foro stenopeico visto dall'esterno.

Palazzo Venezia, mentre per conoscere la latitudine della Basilica costruì la meridiana boreale per l'osservazione della stella Polare, che proprio il primo gennaio 1701, data dell'inizio dei lavori dello Gnomone Clementino, effettuava entrambi i transiti meridiani di notte.

## 2.2. Caratteristiche Tecniche

Il foro stenopeico dello Gnomone Clementino (figura 3) è posizionato a 20.353 metri di altezza dal pavimento della Basilica, in un vano incastonato nel muro del transetto che si affaccia a Sud, ed aveva originariamente un diametro pari alla millesima parte dell'altezza, ovvero 20 mm. 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 sbecamento verso l'interno di 2.5 mm sul bordo Nord.

La linea meridiana è lunga 44.917 metri ed ha una deviazione verso Est rispetto alla direzione Nord-Sud di  $4'28.8'' \pm 0.6''$ , probabilmente ereditata da quella ausiliaria utilizzata in fase di costruzione. La linea (figura 2) è composta da segmenti di ottone adagiati su una base di marmo bianco di Carrara ed è contornata dalle raffigurazioni opportunamente posizionate dei 12 segni zodiacali - in analogia allo strumento dell'astronomo danese Tycho Brahe - e da uno strato decorativo di marmo giallo di Verona. Adiacentemente alla linea, sul marmo bianco di Carrara, 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 transit. Le due grandezze sono collegate dalla funzione tangente: un valore  $d$  sulla scala delle lunghezze può essere convertito in un valore  $z$  sulla scala degli angoli tramite la relazione  $z = 90^\circ - \text{atan}(d)$ .

Lo gnomone risulta avere una posizione, misurata mediante GPS, di coordinate  $41^\circ 54' 11.2''$  N in latitudine e  $12^\circ 29' 50.9''$  E in longitudine ed ha un'altezza di 70 m rispetto il livello del mare.

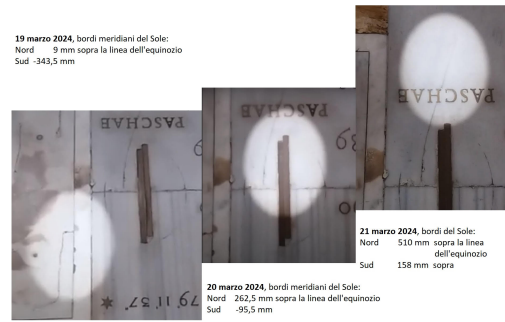


Fig. 4. Composizione creata dal professore Sigismondi del transit del 19, 20 e 21 marzo



Fig. 5. Immagine del sole durante un'eclissi vanvitelliana: il bordo Est risulta oscurato da una parte della trabeazione costruita da Luigi Vanvitelli quando il sole transita vicino al foro stenopeico.

## 3. Osservazioni

Le attività inerenti all'esperienza di laboratorio sono iniziate a inizio marzo 2024, e consistevano nell'osservare i transiti meridiani del Sole insieme al professore Sigismondi, che esegue questo tipo di osservazione allo Gnomone Clementino da circa 4 anni. L'osservazione del transit meridianio dipende fortemente da un agente esterno non controllabile, ovvero il meteo. Infatti la condizione necessaria per osservare il transit 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 adiacentemente al foro 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 perché la turbolenza altera di continuo l'indice di rifrazione dell'aria che circonda il foro.

Il 20 marzo 2024 è stato osservato il transit del Sole durante l'Equinozio di Primavera (figura 4) mentre da maggio è stato possibile osservare il cosiddetto fenomeno dell'eclissi "vanvitelliana" (figura 5): appena sotto il foro stenopeico è presente una trabeazione costruita dall'architetto Luigi Vanvitelli che, nonostante sia stata asportata la porzione immediatamente di fronte al foro, ostruisce leggermente il cammino ottico della luce del Sole tra il foro e il pavimento, risultando in una leggera oscurazione del bordo Est dell'immagine proiettata durante i transiti che avvengono vicino alla verticale dal foro, cioè quelli del periodo maggio-luglio.



Fig. 6. Transito meridiano del 15 marzo 2024.

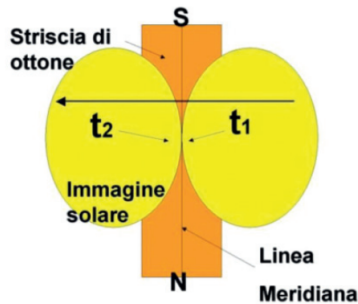


Fig. 7. Schema del professore Sigismondi della misura del tempo di transito come media dei due contatti con l'asse della Linea Clementina.

### 3.1. Transiti Meridiani del Sole

L'osservazione del transito meridiano (figura 6) consiste nel misurare il tempo di transito sulla linea meridiana e nel misurare le posizioni del bordo Nord e del bordo 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 sulla 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, spesso qualche centimetro. In questo senso, per ottenere una misura del tempo di transito meno instabile possibile, si cerca di misurare - se il meteo lo permette - sia i tempi di contatto tra l'immagine del sole ed l'asse longitudinale della linea di ottone (figura 8), 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 asso-



Fig. 8. Punto di emissione del LASER.

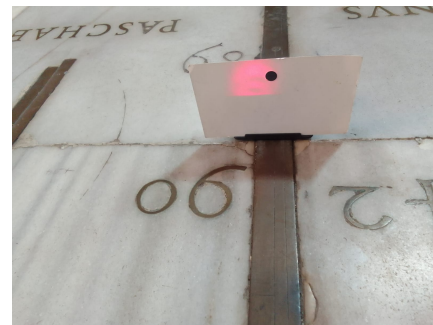
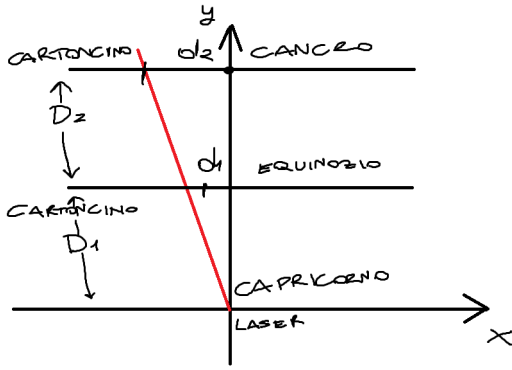


Fig. 9. Immagine del LASER stampata sul cartoncino posto all'Equinozio.

luta 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, facendone la differenza. Come accennato in precedenza, un altro osservabile che si ricava dalla posizione dell'immagine è l'altezza nel cielo del Sole: visionando, per esempio, sulla scala degli angoli il valore corrispondente alla posizione in cui avviene il transito, si ottiene il complementare dell'altezza 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 stata la seguente: le posizioni dei bordi dell'immagine del Sole vengono segnate con una matita sul marmo bianco interpolando visivamente l'immagine agitata dalla turbolenza adiacente al foro quando la stella è prossima al transito, mentre il tempo di transito è preso tramite una video ripresa che inquadra, mentre avviene il transito, un orologio digitale della Casio modello G-SHOCK in modo tale da poter ottenere con precisione di 1 secondo (la sensibilità dell'orologio) sia i contatti con la linea che quelli con il marmo bianco visionando il video fotogramma per fotogramma, una volta aver "ancorato" il tempo del video con il tempo reale dato dall'orologio.



**Fig. 10.** Schema dell'osservazione della linearità della meridiana tramite retta LASER. In rosso la retta LASER,  $d_1$  e  $d_2$  sono le distanze misurate sui cartoncini,  $D_1$  e  $D_2$  sono le distanze tra Capricorno ed Equinozio e tra Equinozio e Cancro.

### 3.2. Linearità della Meridiana

L'astronomo gesuita Ruggero Boscovich, studiando attentamente la meridiana, notò intorno al 1750 attraverso l'analisi dei tempi di transito che la linea presentasse un "seno", ovvero un incurvatura nel piano del pavimento. Abbiamo quindi proceduto a misurare tramite un LASER, di marca STANLEY modello TLM30, la rettilineità della linea meridiana: il LASER crea una linea dritta e, se fatta coincidere con l'inizio e la fine della linea, è possibile misurare la deviazione della meridiana dalla retta ideale nelle sue posizioni intermedie (figura 10). Il LASER è stato posto alla fine della meridiana con il punto di emissione centrato con l'asse longitudinale della meridiana (figura 9) ed è stato puntato verso l'inizio della linea dove c'era un cartoncino, centrato anch'esso con l'asse della meridiana, ad intercettare la luce LASER. Un altro cartoncino è stato posto in corrispondenza dell'Equinozio (che si trova tra la posizione 89 e 90), indicato sul marmo bianco con una linea trasversale alla meridiana e l'incisione in latino "terminvs paschae". I due cartoncini sono stati posizionati in modo tale da essere ortogonali al pavimento, e quindi alla linea meridiana. La misura consiste nel ricavare la distanza del centro del pattern luminoso generato dal LASER intercettato dai cartoncini e l'asse ortogonale al pavimento di quest'ultimi fotografandoli frontalmente e ricavando la misura tramite l'analisi delle foto. Siccome la pedana di vetro posta a circa metà linea ostruiva il cammino ottico del LASER durante le misure preliminari mentre era poggiato sul pavimento, lo strumento è stato posizionato su di un supporto alto quanto bastava a generare la retta LASER ad un'altezza maggiore di quella della pedana. Per ovviare alla brevità della durata di emissione del LASER (qualche secondo) e per minimizzare gli errori generati dal movimento dello strumento stesso (per azionarlo bisogna premere un tasto posto su di esso e quindi, di fatto, perturbarlo) la misura è stata effettuata durante una sola emissione della luce facendola intercettare dapprima dal cartoncino posto all'Equinozio che, una volta fotografato, è stato spostato dal cammino ottico del LASER per fare arrivare la luce all'altro cartoncino per poi fotografare anch'esso. Si sono poi ottenute le grandezze volute misurando digitalmente le distanze cercate in pixel e poi convertendole in millimetri sfruttando la conoscenza della misura reale dei piccoli fori di 8.72 mm di diametro che i due cartoncini hanno sul loro asse trasversale. Considerando l'errore di 1 px nelle misure digitali, i risultati delle due misure per le distanze tra il centro dell'immagine stampata dal LASER

sui cartoncini e l'asse del cartoncino sono  $d_1=5.22\pm 0.18$  mm all'Equinozio e  $d_2=10.45\pm 0.09$  mm al Cancro. In un sistema di coordinate cartesiane con centro il punto di emissione del LASER e asse y sovrapposto alla direzione inizio fine linea-inizio linea (quindi che punta verso il foro stenopeico), la retta LASER ha equazione

$$y = (D_1 + D_2) \frac{x}{d_2}, \quad (1)$$

dove  $D_1 = 10721.5 \pm 0.1$  mm è la distanza tra punto di emissione del LASER e l'Equinozio,  $D_2 = 26660.9 \pm 0.1$  mm è la distanza tra l'Equinozio e la posizione del cartoncino posto a inizio linea e  $d_2$ , in questo sistema di coordinate, è negativo. La deviazione all'equinozio  $\delta_{eq}$  della retta LASER dalla direzione rappresentata dal nostro asse y è quindi data dalla differenza tra  $d_1$  e il modulo del valore della x,  $x_{eq}$ , per cui  $y(x_{eq}) = D_1$

$$\delta_{eq} = d_1 - \left\| \frac{d_2 D_1}{D_1 + D_2} \right\|, \quad (2)$$

mentre l'incertezza su  $\delta_{eq}$ , considerando solo i contributi principali, risulta essere

$$\Delta \delta_{eq} = \sqrt{\Delta d_1^2 + \frac{D_1}{D_1 + D_2} \Delta d_2^2}. \quad (3)$$

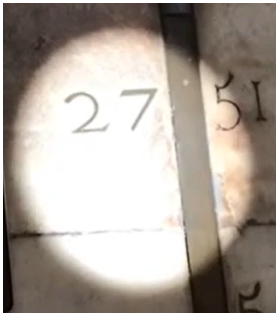
Il risultato di queste misure è quindi  $\delta_{eq} = 2.22 \pm 0.10$  mm e ci dice che, rispetto alla retta immaginaria che collega l'inizio e la fine della meridiana, il punto intercettato sulla linea Clementina dalla linea dell'Equinozio risulta essere spostato verso Ovest di 2.22 mm.

### 3.3. Errori Sistemati nelle Osservazioni

Come accennato in precedenza, la posizione del Sole nel cielo e il suo diametro misurati sulla Linea Clementina non corrispondono a quelli reali. Ciò succede sostanzialmente per due motivazioni: da un lato ci sono degli effetti di penombra dovuti alla non idealità del foro stenopeico, dall'altro la rifrazione della luce nell'atmosfera ne modifica la direzione di incidenza facendolo apparire più in alto di quanto realmente stia. Intorno all'immagine del Sole proiettata sul pavimento della Basilica si può osservare uno strato di penombra (figura 11) che ha uno spessore pari alla metà del diametro del foro stenopeico effettivo, minore dei 25 mm del foro originale. Il diametro del foro effettivo si ottiene sottraendo ai 25 mm di partenza i 2.5 mm dello sbecamento interno che si trova nella parte Nord del foro e sottraendo la proiezione dei 6.22 mm dello spessore del foro che, data l'angolazione, agisce a Sud. Sottraendo e aggiungendo propriamente la metà del diametro del foro effettivo ai bordi longitudinali dell'immagine è possibile ottenere il valore vero del diametro dell'immagine del Sole. Per correggere invece l'effetto della rifrazione dell'atmosfera sulla posizione apparente del Sole nel cielo è possibile utilizzare, per esempio, la formula empirica di Cassini  $\alpha_{vero} = \alpha_{oss} - (1/60)^\circ \tan(z_{oss})$  che vale fino a valori dell'altezza zenitale  $z$  pari a  $75^\circ$ , dove  $\alpha$  è l'angolo misurato rispetto a una retta ortogonale al pavimento della Basilica.

## 4. Analisi dati

L'analisi presente in questa relazione riguarda le osservazioni dei transiti meridiani compiute dal professore Costantino Sigismondi tra il 2019 e il 2024, in particolare noi abbiamo partecipato a quelle del periodo marzo-maggio di quest'anno. Una volta

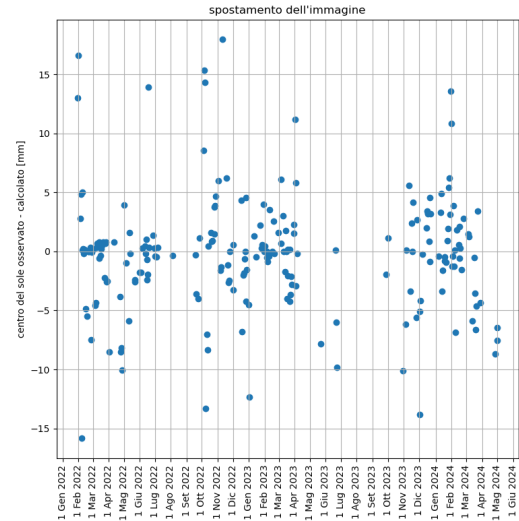


**Fig. 11.** Dettaglio della penombra che circonda l'immagine solare.

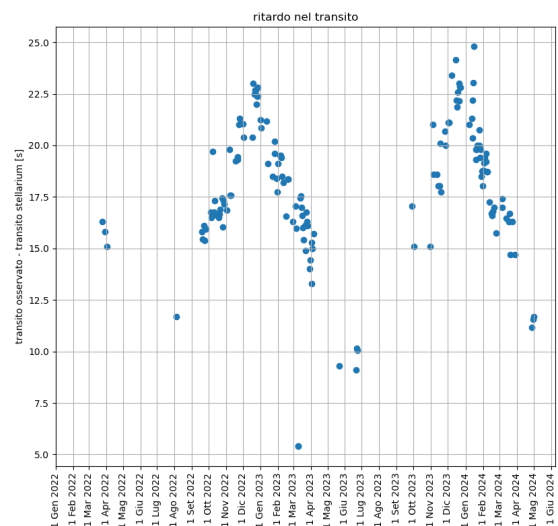
osservati tempo di transito, posizione del centro dell'immagine sulla linea e diametro maggiore, viene compilato il database lavorando sulle osservazioni per ottenere le grandezze che ci interessa studiare e confrontarle con quelle calcolate da Stellarium (versione 24.1 del software). Le posizioni dei bordi del Sole sulla meridiana e la lunghezza della sua immagine vengono tradotti in parti centesime e in gradi e poi vengono corrette considerando l'effetto della penombra e della rifrazione dell'atmosfera attraverso la formula di Cassini e la formula di Laplace (che generalizza quella di Cassini). Per confrontare le osservazioni con i calcoli di Stellarium si può analizzare, per esempio, la differenza tra la posizione del Sole nel cielo osservata durante il transito e quella calcolata da Stellarium. Con i dati raccolti, questa differenza di posizione può essere ottenuta mediando tre diverse stime dello spostamento dell'immagine solare: la differenza tra la posizione del Sole osservata senza correzione atmosferica e la posizione del Sole calcolata da Stellarium visto con l'atmosfera, la differenza tra la posizione corretta con la formula di Cassini e la posizione calcolata da Stellarium togliendo l'atmosfera e la differenza tra la posizione corretta dalla formula di Laplace e quella calcolata da Stellarium senza atmosfera. Il risultato del calcolo di questi spostamenti rappresenta quanto lo Gnomone Clementino riesce tutt'ora ad effettuare misure affidabili, infatti lo spostamento dell'immagine risulta nella maggioranza dei casi considerati sotto il centimetro (figura 12). Il ritardo nel tempo di transito è un'altra grandezza utile a verificare l'affidabilità dello strumento e risulta sempre sotto il mezzo minuto per i transiti analizzati (figura 13). A differenza della distribuzione omogenea dei dati della figura 12, quella dei dati dei transiti presenta un pattern a "zig-zag" in cui i valori massimi vengono raggiunti tra dicembre e gennaio: ciò sarebbe dovuto alla non linearità della meridiana che produce ritardi maggiori dove la deviazione rispetto alla direzione vera Nord-Sud è più accentuata, ovvero verso il Capricorno. Oltre a quello osservato, viene anche calcolato un ritardo "teorico", ovvero il ritardo che si avrebbe tra un tempo di transito misurato su una meridiana ideale (diretta nella vera direzione Nord-Sud) ed il valore fornito da Stellarium, il quale permette di evidenziare, per esempio, gli effetti della deviazione dalla linearità della meridiana.

#### 4.1. Deviazione della Linea Clementina

Abbiamo analizzato la differenza tra il ritardo osservato e quello teorico per 158 transiti. In figura 14 è rappresentato come si distribuisce questo "ritardo tra i ritardi" lungo la linea meridiana e si può notare come intorno ad una determinata posizione i dati subiscano un offset medio di circa 1 secondo rispetto agli altri punti della meridiana: si passa da un scarto medio di 0.736 s per i transiti lontani da quella posizione ad uno scarto medio



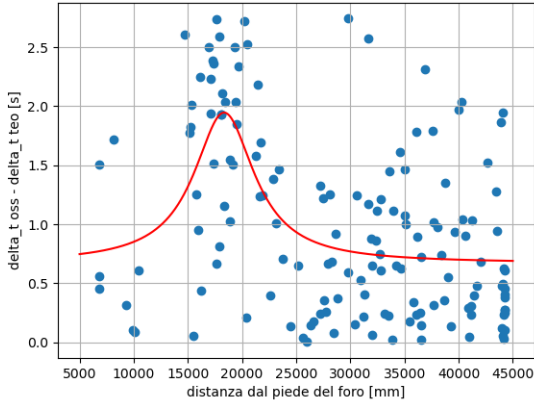
**Fig. 12.** Diferenza tra posizione del Sole osservata e calcolata da Stellarium per i transiti che vanno dal 1 gennaio 2022 fino a fine maggio 2024.



**Fig. 13.** Diferenza tra tempo di transito meridiano osservato e calcolato da Stellarium per i transiti che vanno dal 1 gennaio 2022 fino a fine maggio 2024.

di 1.751 s per i transiti che ne avvengono intorno. Dal grafico notiamo che, in prima approssimazione, l'aumento del ritardo si registra nei transiti che avvengono tra i 15 e i 22 m di distanza dal piede del foro, ovvero intorno all'Equinozio. Per ottenere una stima della deviazione e della posizione sulla linea meridiana di questo "seno" si è pensato di fittare i dati con una curva che simulasse il rigonfiamento osservato e i cui parametri (valore massimo, valore di fondo, posizione del massimo e larghezza della curva) verranno poi associati alle stime richieste. La curva scelta per il fit è del tipo:

$$y = \frac{y_{max}}{1 + \frac{(x - x_{centro})^2}{\sigma_x^2}} + y_{fondo} \quad (4)$$



**Fig. 14.** Differenza tra ritardo osservato e ritardo teorico in funzione della posizione sulla linea meridiana. La posizione 0 mm corrisponde al piede del foro. Il ritardo osservato corrisponde alla differenza tra tempo di transito osservato e quello fornito da Stellarium, mentre il ritardo teorico corrisponde al ritardo - sempre rispetto al tempo di transito calcolato da Stellarium - del tempo di transito misurato su una meridiana ideale diretta con precisione in direzione Nord-Sud.

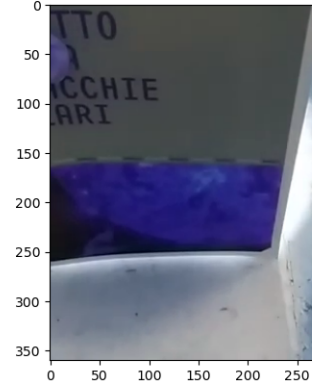
e fa corrispondere la posizione del seno sulla linea meridiana al valore di  $x_{centro}$ , mentre la sua deviazione può essere stimata come lo scarto tra i ritardi medi calcolati sulla parte dritta della linea e intorno al rigonfiamento (ovvero  $y_{max} - y_{fondo}$ ), moltiplicato per la velocità con cui si sposta l'immagine del Sole quando transita per  $x_{centro}$ , che risulta essere 2.74 mm/s. Il risultato del fit fornisce come posizione del centro della deviazione il valore di  $18345.078 \pm 547.332$  mm (circa 10 cm dopo l'equinozio, tra la posizione 90 e 91) ed uno scarto dei ritardi medi pari a  $1.344 \pm 0.248$  s, al quale corrisponde una deviazione di  $3.711 \pm 0.686$  mm.

#### 4.2. Trasparenza dello strato superficiale del marmo bianco

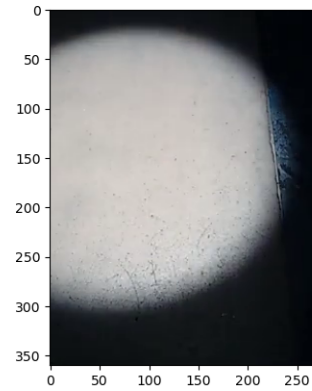
Un fenomeno che è possibile osservare sul pavimento della Basilica di Santa Maria degli Angeli è quello della luce che riesce a passare al di sotto degli ostacoli poggiati direttamente a terra, come dimostrato dall'esempio in figura 15. L'origine di questo fenomeno risiederebbe nel fatto che il marmo bianco di Carrara che contorna la meridiana possiede apparentemente un sottile strato superficiale semitrasparente. Questo strato abbassa, sostanzialmente, il pavimento su cui si osserva l'immagine del Sole e, di fatto aumentando l'altezza effettiva del foro stenopeico, comporta uno spostamento dell'immagine verso il Capricorno. Per indagare questo fenomeno abbiamo pensato a un modello semplice che possa simulare la situazione reale. Secondo questo modellino ci sarebbe uno strato di marmo bianco omogeneo e completamente trasparente, quindi con indice di rifrazione uniforme  $n_{strato} = 1$ , e il cui spessore  $s$  è legato allo spostamento  $\delta$  dell'immagine lungo la meridiana tramite la relazione

$$\frac{s}{\delta} = \frac{h}{d} = \frac{1}{\tan(\theta)}, \quad (5)$$

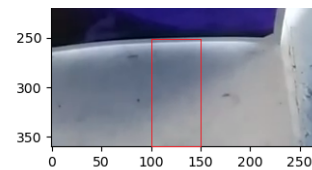
dove  $\theta$  è l'angolo segnato sulla meridiana,  $h$  è l'altezza del foro stenopeico e  $d$  è la distanza dal piede del foro in cui si trova il centro del Sole al momento del transito. Conoscendo a priori  $h$  e potendo misurare sia  $\delta$  che  $d$  è possibile determinare lo



**Fig. 15.** Dimostrazione del fenomeno della trasparenza superficiale del marmo utilizzando un fotogramma di un video effettuato durante il transito del 9 maggio: la luce riesce a passare sotto l'ostacolo nonostante esso sia completamente poggiato a terra



**Fig. 16.** Fotogramma dell'immagine del sole sul pavimento della Basilica.



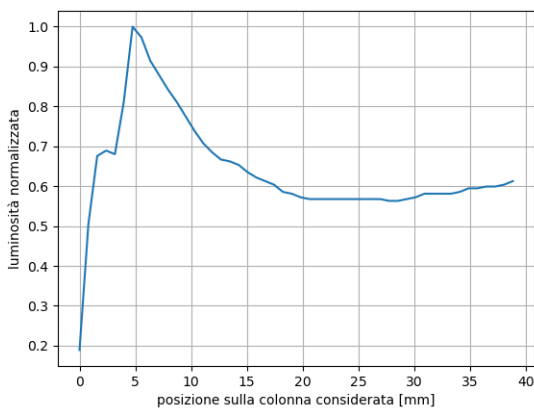
**Fig. 17.** Zona di interesse per l'analisi dello strato di luce che passa sotto l'ostacolo.

spessore  $s$ . In questo senso abbiamo analizzato due fotogrammi (figura 15 e figura 16) un video effettuato dal professore Sigismondi durante il transito del 9 maggio in cui era possibile vedere, con la stessa inquadratura e in istanti diversi, sia l'immagine solare sul pavimento della Basilica sia l'effetto della trasparenza del marmo tramite l'utilizzo di un ostacolo. Abbiamo prima misurato digitalmente, considerando un'incertezza di 1 px, lo spessore dello strato illuminato e poi la lunghezza dell'immagine solare, che ovviamente è stata misurata anche fisicamente. Per effettuare le misure digitali è stata utilizzata la libreria di python "cv2" grazie alla quale è possibile ottenere, tra le varie cose, la

luminosità di ogni pixel dell'immagine caricata in input. Per ottenere la dimensione dell'immagine solare nella foto sono stati cercati i pixel corrispondenti al bordo Nord e al bordo Sud utilizzando la condizione che l'immagine solare sia il luogo dei punti con luminosità maggiore di un decimo del valore massimo della scala utilizzata dalla libreria. Per ottenere invece la dimensione dello strato di luce che passa sotto l'ostacolo abbiamo analizzato le curve corrispondenti alle luminosità relative a 50 colonne di pixel lunghe 110 pixel l'una (in figura 18 vi è un esempio) centrate intorno alla parte di interesse dell'immagine (figura 17), definendo la lunghezza dello strato di luce come la differenza tra la posizione del massimo e la posizione successiva in cui la luminosità vale quanto il minimo appena precedente al picco di luminosità, che corrisponde qualitativamente alla posizione del flesso; infatti il massimo corrisponde al punto iniziale da cui la luce inizia ad uscire sotto l'ostacolo e stimare in questo modo lo spessore dello strato di luce significa andare a vedere dove l'intensità luminosa ritorna ad un valore paragonabile a quella presente nei punti appena sopra lo strato di luce. Si è preferito questo criterio più diretto rispetto alla ricerca del flesso in quanto le curve studiate apparivano troppo poco "lisce" per studiarne le derivate. Facendo poi la conversione da pixel a millimetri tramite la doppia misura del diametro è stata ottenuta infine una stima dello spessore dello strato trasparente del marmo bianco di Carrara pari a  $s = 8.67 \pm 1.75$  mm. Una volta determinato a quanto ammonta lo spessore dello strato di marmo  $s$ , questo modello permette di prevedere, alla posizione  $d$ , uno spostamento dell'immagine pari a

$$\delta = \frac{sd}{h} = 4.3 \times 10^{-4} d \quad (6)$$

verso il Capricorno e che varia in ordine di grandezza da 1 a 10 mm.



**Fig. 18.** Esempio della luminosità di una colonna di pixel relativa alla porzione di immagine in cui è presente la striscia di luce in funzione della posizione in mm sulla colonna stessa. 0 millimetri corrispondono all'inizio del riquadro rosso in figura 17 (250 px sull'asse verticale).

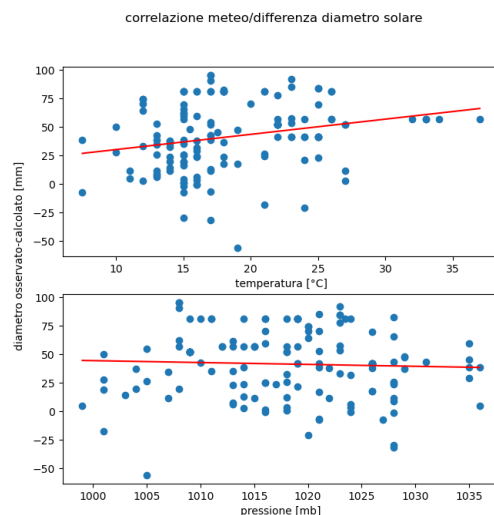
#### 4.3. Correlazione tra condizioni meteorologiche e osservazioni astronomiche

Come analisi ulteriore, è stato pensato di studiare la correlazione tra le condizioni meteorologiche e le osservazioni effettuate allo Gnomone Clementino. La proiezione del disco solare è influenzata dalle condizioni fisiche in cui si trova in generale

l'atmosfera ma soprattutto l'aria che si trova fuori dalla basilica nelle vicinanze della parte esterna del foro stenopeico. In questo senso sono state confrontate la differenza tra la lunghezza dell'immagine osservata e quella calcolata da Stellarium ( $\Delta l$ ) e lo spostamento del centro del sole osservato rispetto alla posizione calcolata da Stellarium ( $\Delta x$ ) con pressione atmosferica e temperatura dell'aria di Roma centro. Nella tabella 1 sono mostrati i coefficienti di correlazione  $r$  tra le coppie di grandezze considerate ed i parametri  $m$  (coefficiente angolare) e  $q$  (intercetta) della retta che prova ad approssimare l'andamento dei dati.

Grandezze	$r$	$m$	$q$
$\Delta l$ vs $T$	0.281	$1.335 \frac{mm}{^\circ C}$	1.697 mm
$\Delta x$ vs $T$	-0.047	$-0.045 \frac{mm}{^\circ C}$	0.925 mm
$\Delta l$ vs $P$	-0.132	-0.165	209.941 mm
$\Delta x$ vs $P$	0.259	$0.160 \frac{mm}{mbar}$	-162.547 mm

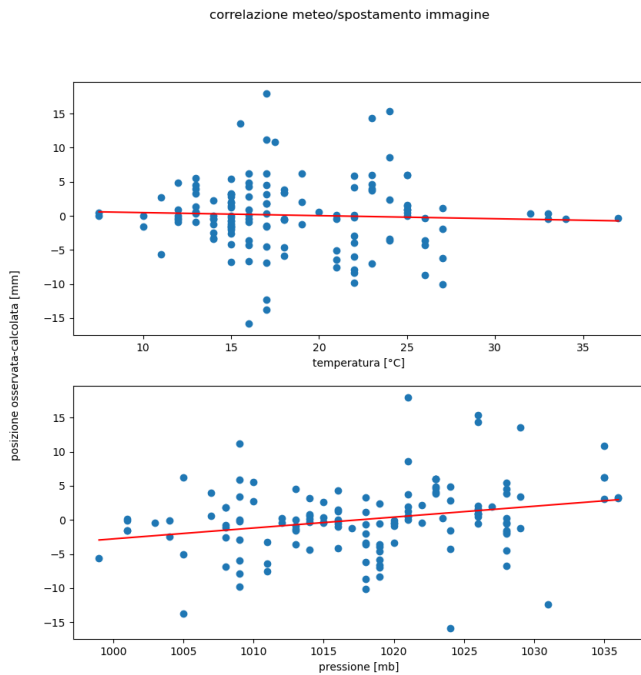
**Table 1.** Correlazione tra osservazioni astronomiche allo Gnomone Clementino e parametri meteorologici



**Fig. 19.** Correlazione della differenza tra diametro solare osservato e calcolato da Stellarium con temperatura e pressione: in blu il grafico a dispersione dello scarto tra diametro osservato e calcolato in funzione sia della temperatura dell'aria di Roma centro, sia della pressione atmosferica; in rosso la retta che approssima l'andamento lineare delle osservazioni.

## 5. Conclusioni

Le attività del corso di Laboratorio di Astrofisica alla Basilica di Santa Maria degli Angeli sono iniziate con un'introduzione al metodo di misura dei transiti meridiani del Sole per poi svilupparsi nello studio di alcune problematiche che affliggono le misurazioni. Sono stati affrontati il problema della deviazione della Linea Clementina, della riflessione nel marmo bianco di Carrara adiacente alla linea stessa e della correlazione tra meteo e scarti con i dati delle effemeridi. Abbiamo provato a stimare la deviazione della meridiana in prossimità della linea dell'Equinozio sia direttamente attraverso l'uso di un LASER sia estrapolandola con un fit curvilineo dal confronto con i dati di Stellarium e della meridiana ideale, ottenendo come risultato  $2.22 \pm 0.10$  mm con il LASER e  $3.71 \pm 0.69$  mm con il fit; per quanto



**Fig. 20.** Correlazione della differenza tra posizione del centro del sole osservato e calcolato da Stellarium con temperatura e pressione: in blu il grafico a dispersione dello spostamento dell'immagine solare lungo la meridiana rispetto alla posizione calcolata da Stellarium in funzione sia della temperatura dell'aria di Roma centro, sia della pressione atmosferica; in rosso la retta che approssima l'andamento lineare delle osservazioni.

riguarda il fenomeno della riflessione nello strato superficiale del marmo, si è cercato di dare una stima dello spessore di questo strato attraverso l'applicazione di un modello semplice che vede questo strato omogeneo e completamente trasparente, ottenendo uno spessore di  $8.67 \pm 1.75$  mm, per poi ricavare una formula pratica (equazione 6) per prevedere il conseguente spostamento dell'immagine solare sul pavimento della Basilica; per studiare la correlazione tra osservazioni astronomiche del Sole e condizioni meteorologiche abbiamo scelto di confrontare le differenze riscontrate rispetto le effemeridi della lunghezza dell'immagine del Sole e della sua posizione sulla meridiana con temperatura e pressione atmosferica, i cui risultati sono riassunti nella tabella 1 e in cui la correlazione più forte risulta essere quella, positiva, tra variazione del diametro solare e temperatura, coerentemente con il fatto che più fa caldo più l'aria adiacente al foro stenopeico tende ad agitarsi. In definitiva è stata un'esperienza divertente e formativa, unica nel suo genere in quanto, per esempio, è uno dei pochi "laboratori" in cui si può contemporaneamente effettuare le osservazioni e spiegarle ai turisti e i curiosi che giornalmente visitano, in prossimità del transito, la Basilica di Santa Maria degli Angeli.

## References

- "Lo Gnomone Clementino, *Astronomia Meridiana in Basilica*", Costantino Sigismondi  
 "Lo Gnomone Clementino: *Astronomia Meridiana in Chiesa dal '700 ad oggi*", Costantino Sigismondi