

F. ANDREOLI

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Laboratorio Tecnologie Nucleari
Centro Ricerche Frascati

**S. BOLLANTI, P. DI LAZZARO, F. FLORA,
L. MEZI, D. MURRA**

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Laboratorio Applicazioni dei plasmi
ed esperimenti interdisciplinari
Centro Ricerche Frascati

F. MAIERNA

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Sezione Superconduttività
Centro Ricerche Frascati

M. DE FRANCESCHINI, G. VENEZIANO

Osservatorio astronomico di Genova
Via Superiore al Gazzo, 16154 - Genova

A. FORLINI

Via Piave 61, 00187 Roma

ESPERIMENTO DI CONVERSIONE DEI SOLSTIZI

RT/2023/1/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

F. ANDREOLI

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Laboratorio Tecnologie Nucleari
Centro Ricerche Frascati

**S. BOLLANTI, P. DI LAZZARO, F. FLORA,
L. MEZI, D. MURRA**

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Laboratorio Applicazioni dei plasmi
ed esperimenti interdisciplinari
Centro Ricerche Frascati

F. MAIERNA

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Sezione Superconduttività
Centro Ricerche Frascati

M. DE FRANCESCHINI, G. VENEZIANO

Osservatorio astronomico di Genova
Via Superiore al Gazzo, 16154 - Genova

A. FORLINI

Via Piave 61, 00187 Roma

ESPERIMENTO DI CONVERSIONE DEI SOLSTIZI

RT/2023/1/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

ESPERIMENTO DI CONVERSIONE DEI SOLSTIZI

F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, F. Flora, A. Forlini, F. Maierna, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano

Riassunto

In questo Rapporto presentiamo il progetto e il primo test sperimentale del Convertitore dei Solstizi, un innovativo strumento ottico in grado di riflettere i raggi del sole nella stessa direzione di quelli emessi nel giorno in cui il sole ha declinazione opposta. Ad esempio, al solstizio estivo (21 giugno) i raggi solari riflessi dal Convertitore sono diretti nella stessa direzione dei raggi solari al solstizio invernale (21 dicembre) in qualunque istante della giornata. Al solstizio estivo il Convertitore simula i raggi del sole al solstizio invernale, quindi un oggetto illuminato dalla luce riflessa dal Convertitore proietta la propria ombra nella stessa direzione che si osserva al solstizio invernale alla stessa ora solare. Il Convertitore è stato sperimentato con successo nelle misure di allineamento archeo-astronomico presso la Grotta di Tiberio, a Sperlonga, descritte in questo Rapporto.

Parole chiave: Archeologia; Astronomia; Bussola solare; Grotta Tiberio; Ottica; Solstizio; Sperlonga.

Abstract

In this technical report we present the design and first experimental test of the Solstice Converter, a novel optical instrument capable of reflecting the sun's rays in the same direction as those emitted in the day when the sun has opposite declination. For example, at the summer solstice (June 21), the rays reflected by the Converter are directed in the same direction as the sun's rays at the winter solstice (Dec. 21), at any instant of the day. At the summer solstice, therefore, the Converter simulates the sun's rays at the winter solstice, thus an object illuminated by light reflected from the Converter would cast its shadow in the same direction observed at the winter solstice.

The Converter has been successfully tested in archaeo-astronomical measurements at the Cave of emperor Tiberius, in Sperlonga, described in this report.

Keywords: Archaeology; Astronomy; Optics; Solar compass; Solstice; Sperlonga; Tiberius Cave.

INDICE

INTRODUZIONE	7
IL TRAGUARDO DI TIBERIO	7
IL CONVERTITORE DEI SOLSTIZI: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	10
IL CONVERTITORE DEI SOLSTIZI A SPERLONGA	11
L'ALLINEAMENTO DEL CONVERTITORE	12
L'ORA DEL TRAMONTO	13
IL PERCORSO DELL'OMBRA E L'ALTEZZA DELLO GNOMONE	14
VERIFICHE DEL TRAGUARDO	17
ANNOTAZIONI CONCLUSIVE	20
RINGRAZIAMENTI	21
REFERENZE	22
APPENDICE: VERIFICA DELLA PLANARITÀ DEL PIANALE E DELLO SPECCHIO	24

Esperimento di Conversione dei Solstizi

Introduzione

Nei pressi dell'attuale cittadina di Sperlonga (LT), in uno dei punti più spettacolari della costa del Lazio, l'imperatore Tiberio Giulio Cesare Augusto (42 a.C. – 37 d.C.) aveva ampliato una villa di epoca repubblicana a pochi metri dal mare, da cui lo sguardo spaziava dalle Isole Pontine fino al Monte Circeo, che visto da lì sembra anch'esso un'isola. La grotta naturale al limitare della spiaggia divenne parte della residenza imperiale. Tiberio ne regolarizzò la forma, aggiungendo un doppio bacino d'acqua, circolare all'interno e rettangolare all'esterno. Nella grotta venne sistemato il gruppo statuario dell'accecamento di Polifemo, più altre sculture ispirate al mito di Odisseo. Al centro del bacino rettangolare si vede una sorta di isolotto interpretato come triclinio: in realtà era destinato all'allevamento del pesce, come dimostrato da recenti studi.

Sono trascorsi più di 60 anni dal rinvenimento dei resti della villa e di sculture e frammenti marmorei che adornavano la grotta, inclusi i frammenti di un'iscrizione che riporta i nomi degli scultori Agesandro, Atenodoro e Polidoro, i celebri autori del Laocoonte e probabili artefici dei principali gruppi marmorei della grotta di Tiberio: Scilla e l'accecamento di Polifemo [1, 2]. Diversi studiosi hanno pubblicato le loro ricerche sull'importanza storica e archeologica dei reperti riportati alla luce e del loro effetto scenografico [1, 2, 3]. Tuttavia, mettendo in sinergia saperi diversi, come l'ottica, l'archeologia, l'astronomia, la geodesia e l'architettura, è possibile investigare aspetti che la sola archeologia non avrebbe potuto rivelare. La scoperta del Traguardo di Tiberio a Sperlonga e l'esperimento di conversione dei solstizi di cui riportiamo i risultati in questo Rapporto, sono esempi di tale sinergia.

Il Traguardo di Tiberio

Grazie ai rilievi di orientamento eseguiti con la bussola solare brevettata dall'ENEA [4] nella grotta di Tiberio a Sperlonga [5, 6, 7, 8, 9], abbiamo scoperto che il segmento di congiunzione tra il centro del portale di accesso al cubicolo della nicchia diretta a N-E internamente alla grotta denominata "nicchia A" ed il centro della nicchia a semiluna sullo scoglio in direzione Sud-Ovest, mostrata in Fig. 1, è

orientato con estrema precisione -entro due decimi di grado- nella direzione in cui tramontava il sole al solstizio invernale dei tempi di Tiberio, come mostrato nella Fig. 2. L'allineamento è troppo preciso per essere casuale, ed è quindi probabile che tale nicchia contenesse uno gnomone finalizzato al riconoscimento/celebrazione del solstizio invernale. Abbiamo denominato "Traguardo di Tiberio" il segmento che congiunge il centro dell'ingresso del cubicolo con il centro della nicchia a semiluna, vedi la Fig. 2. Il valore di azimut del Traguardo è stato ottenuto dai rilievi eseguiti con la bussola solare ENEA, mentre la direzione del tramonto al tempo di Tiberio è stata calcolata tramite l'App *ENEA Mobile Sun Compass* [10], disponibile su Play Store.



Figura 1. Foto da drone della nicchia a semiluna ricavata all'esterno alla grotta.

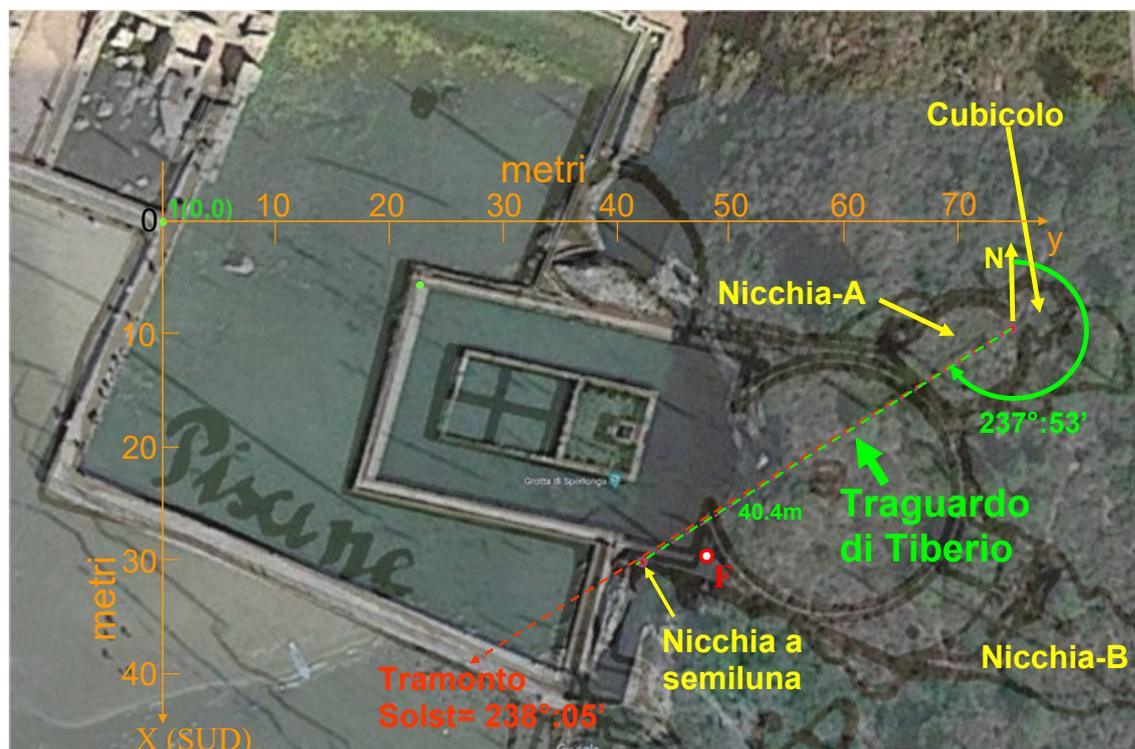


Figura 2. Pianta della grotta di Sperlonga (Latitudine = $41^{\circ}:15':09''$ Longitudine = $13:26':60''$) in cui il Traguardo di Tiberio (segmento tratteggiato in verde) è confrontato con la direzione in cui tramontava il sole al 21 dicembre al tempo di Tiberio (retta tratteggiata rossa). La pianta è sovrapposta ad una foto aerea del sito. Il cerchietto F indica il punto da cui sono state riprese le immagini di verifica del traguardo riportate in seguito.

La distanza tra i due estremi del Traguardo di Tiberio, pari a 40 metri, rende questo antico allineamento astronomico estremamente preciso. Basti pensare che il movimento apparente che il sole compie in un minuto corrisponde ad uno spostamento dell'ombra dello gnomone di ben 17,5 cm, facilmente apprezzabile sul fondo del cubicolo.

Il percorso che l'ombra dello gnomone compie prima del momento del tramonto di Tiberio è spettacolare: come previsto dall'App *ENEA Mobile Sun Compass* e come osservato sperimentalmente in occasione del solstizio invernale 2021 [7], l'ombra prima si riflette sulla superficie dell'acqua nella vasca circolare di 22 metri di diametro interna alla grotta e si proietta, capovolta per effetto della riflessione, sulla roccia oltre la vasca; man mano che il sole cala, l'ombra riflessa si muove verso il basso a destra fino a "tuffarsi" nella vasca. Successivamente esce dall'acqua (non più capovolta) e risale la scalinata, entra nel portale del cubicolo fino a raggiungere, al tramonto di Tiberio, definito come il momento in cui il disco solare tocca il mare, il centro del cubicolo, e infine scompare.

L'intero evento ha una durata di circa un'ora, l'ultima della giornata, ovvero la dodicesima ora babilonica. I babilonesi, infatti, contavano 12 ore diurne che iniziavano con l'alba e terminavano con il tramonto, indipendentemente dalla stagione dell'anno.

Ammettendo che l'ipotesi della presenza di uno gnomone sia corretta, non vi sono indicazioni archeologiche certe sulla sua forma e natura. Un potenziale candidato è la statua di "Andromeda incatenata", ritrovata nel mare prospiciente la grotta di Tiberio ed esposta nell'adiacente Museo Archeologico Nazionale di Sperlonga, perché da un punto di vista geometrico ha le dimensioni e la forma (a doppio mirino, cioè con le braccia che formano un semianello concentrico con la testa) ottimali per svolgere tale ruolo [5, 6, 7, 8, 9]. Questa ipotesi è compatibile con alcuni dati astronomici: la stella centrale della costellazione di Andromeda "Mirach" β -Andromedae, ai tempi di Tiberio aveva la stessa declinazione, $+24^\circ$, raggiunta dal sole al solstizio estivo [7], e quindi, vista dalla grotta, tramontava di fronte alla nicchia B, sopra il promontorio che oggi ospita la cittadina di Sperlonga. Inoltre, alcune civiltà consideravano Andromeda dea della rinascita del sole [11, 12] perché la sua costellazione era quasi sul piano equatoriale, e si allineava con il sole nel periodo del solstizio invernale [7].

Tuttavia, non mancano le contraddizioni: per motivi stilistici la statua di Andromeda è datata al II secolo d.C. quindi posteriore all'epoca di Tiberio.

Per questi motivi, nell'ultimo test del Traguardo di Tiberio eseguito il 4 Luglio 2022, abbiamo preferito usare uno gnomone anonimo mostrato nella Fig. 3, costituito da un disco di 0,42 m di diametro, un valore tale da poter coprire completamente il sole se osservato dal cubicolo, concentrico ad una semi corona circolare di diametro interno ed esterno rispettivamente pari a 0,8 m - 1 m che consente di riconoscere un eventuale capovolgimento dell'ombra prodotta dallo gnomone.



Figura 3. La sagoma usata come gnomone per la verifica sperimentale del Traguardo di Tiberio effettuata il 4/7/2022.

Il Convertitore dei Solstizi: principio di funzionamento

Lo strumento che abbiamo denominato “Convertitore dei Solstizi” [13] consiste in uno specchio piano, orientato parallelamente al piano dell’equatore terrestre, verso il polo Nord celeste. In qualunque giorno dell’anno in cui il sole ha una declinazione positiva, dall’equinozio di primavera a quello di autunno, il fascio di luce riflesso dallo specchio è diretto, in qualunque istante della giornata, esattamente come la luce solare nel giorno in cui il sole ha declinazione opposta. In particolare, come mostrato nella Fig. 4, al solstizio estivo (21 giugno) i raggi riflessi dal Convertitore vanno nella stessa direzione dei raggi solari al solstizio invernale (21 dicembre).



Figura 4. Principio di funzionamento del “Convertitore dei Solstizi”: lo specchio, orientato con la sua normale verso la stella polare e quindi parallelo all’equatore, riflette i raggi del sole di qualsiasi giorno a declinazione positiva (dal 21 marzo al 23 settembre) in modo tale che siano diretti come i raggi del giorno in cui il sole ha declinazione opposta; in particolare, i raggi del giorno del 21 giugno (declinazione $+23.5^\circ$) sono convertiti nei raggi del 21 dicembre (declinazione -23.5°).

Al solstizio estivo, dunque, un tale strumento simula i raggi del sole del solstizio invernale: un oggetto illuminato dalla luce riflessa dallo specchio proietta la stessa ombra che si osserva al solstizio invernale alla stessa ora. Se lo specchio è sufficientemente grande e vicino allo gnomone, il fenomeno di inversione dei solstizi e della conseguente proiezione dell'ombra può essere osservato per tutte le ore in cui la luce riflessa dallo specchio illumina lo gnomone.

Dalla figura 4 è evidente che orientando lo specchio verso il polo Sud celeste anziché verso il polo Nord celeste sarebbe possibile ottenere l'inversione opposta: simulare al solstizio invernale il sole del solstizio estivo. Tuttavia, la giornata invernale più corta non consente di simulare tutte le ore di una giornata estiva.

Il Convertitore dei Solstizi a Sperlonga

La grande distanza nel Traguado di Tiberio tra lo gnomone ed il “piano” di proiezione consente di raggiungere un'elevata precisione nel rivelare la data del solstizio invernale, ma tale precisione rende impegnativo realizzare un Convertitore dei Solstizi adeguato. Bisogna considerare che su una distanza di 40 m la penombra dovuta alla dimensione angolare di $0,5^\circ$ del disco solare raggiunge una estensione di 17,5 cm. Questo significa che la dimensione dello specchio deve essere di almeno 0,77 m, affinché il disco di 0,42 m dello gnomone sia circondato da un anello di luce ampio quanto la penombra.

Inoltre, la perpendicolare allo specchio deve essere orientata verso la stella polare e quindi lo specchio deve essere inclinato, rispetto alla verticale, quanto il complementare della latitudine del luogo (a Sperlonga $90^\circ - 41,25^\circ = 48,75^\circ$) attorno all'asse est-ovest, lungo una direzione che si discosta di 30° da quella del traguardo di Tiberio. Pertanto lo specchio, visto dal cubicolo e posizionato il più vicino possibile allo gnomone, appare inclinato e la superficie riflettente efficace è dimezzata nella sua dimensione orizzontale e ridotta del 25% nella sua dimensione verticale. Di conseguenza abbiamo scelto una dimensione dello specchio Convertitore di 1,6 m di larghezza e 1 m di altezza. Lo specchio ha un peso pari a 30 kg, e deve essere sorretto da una struttura stabile, resistente al vento ed alla corrosione marina e, per rispetto del sito archeologico, ancorata esclusivamente per forza di gravità.

Inoltre, la planarità dello specchio deve essere tale da garantire deviazioni da una superficie piana ideale minori di almeno un ordine di grandezza dei $0,25^\circ$ della penombra, ovvero minori di 0,5 mm/m. Se lo specchio dovesse, ad esempio, incurvarsi assumendo una forma cilindrica, per rispettare la suddetta condizione di planarità il raggio di curvatura della superficie dovrebbe essere maggiore di 1 km. La resistenza meccanica intrinseca dello specchio non è sufficiente a garantire una tale planarità, sicché abbiamo usato un pianale indeformabile di alluminio che agisce da supporto allo specchio e che rispetta i vincoli di planarità richiesti.

Per sostenere il pianale di alluminio secondo i requisiti di stabilità sopra descritti, abbiamo progettato e realizzato un treppiede a colonna adattabile alla struttura della nicchia esterna e tale da poter spostare lo specchio su 4 assi: orientamento di azimut, inclinazione, traslazione verticale e traslazione orizzontale. Il treppiede a colonna è progettato per essere collocato sulla sommità del muretto circolare della nicchia a semiluna, come mostrato nella Fig. 5. Un contrappeso ed un quarto piede che si appoggia sulla roccia in direzione Ovest (Fig. 5a) consentono di decentrare lo specchio. Il decentramento è indispensabile affinché il centro dello specchio si trovi lungo la retta del Traguado di Tiberio rispetto allo gnomone. In questo modo lo gnomone, visto dal cubicolo, appare centrato rispetto allo specchio.

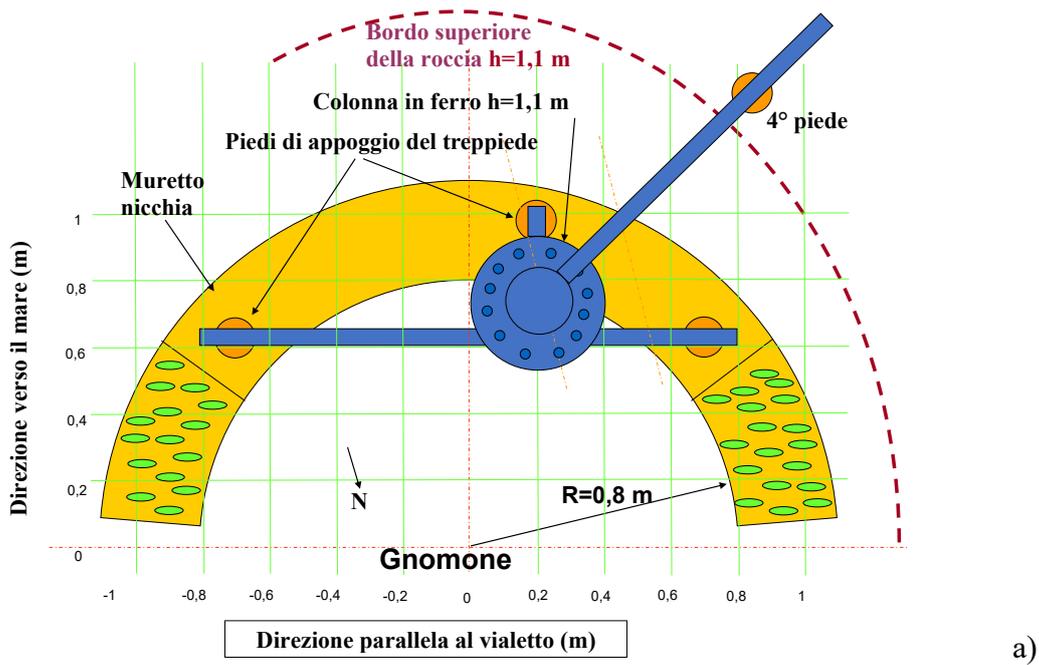


Figura 5. Il Convertitore dei Solstizi. a) Disegno quotato del treppiede visto dall'alto. b) Foto del Convertitore visto dal retro, e c) visto dalla grotta.

L'allineamento del Convertitore

Per ottenere l'inversione dei solstizi lo specchio deve essere parallelo al piano equatoriale e quindi la sua perpendicolare deve puntare il polo Nord celeste, come mostrato nella Fig. 4. Per allineare lo specchio con un'accuratezza migliore di $0,1^\circ$ è necessaria una bussola di precisione, molto più accurata delle bussole magnetiche. Allo scopo, abbiamo usato la bussola solare brevettata da ENEA montata su teodolite [4].

Abbiamo agganciato sul retro del pianale uno specchio ausiliario parallelo al pianale stesso e posizionato un secondo specchio orizzontale accanto alla base del treppiede, come mostrato nella Fig. 6. Questa soluzione obbliga a posizionare la bussola solare sulle rocce sovrastanti la nicchia a semiluna, e a spostare la bussola ogni volta che l'immagine riflessa del teodolite esce dal campo visivo consentito dai due specchietti di allineamento, ogni mezzo grado di rotazione. L'operazione di allineamento dello specchio, disagiata a causa della conformazione del terreno, è stata completata in due ore.

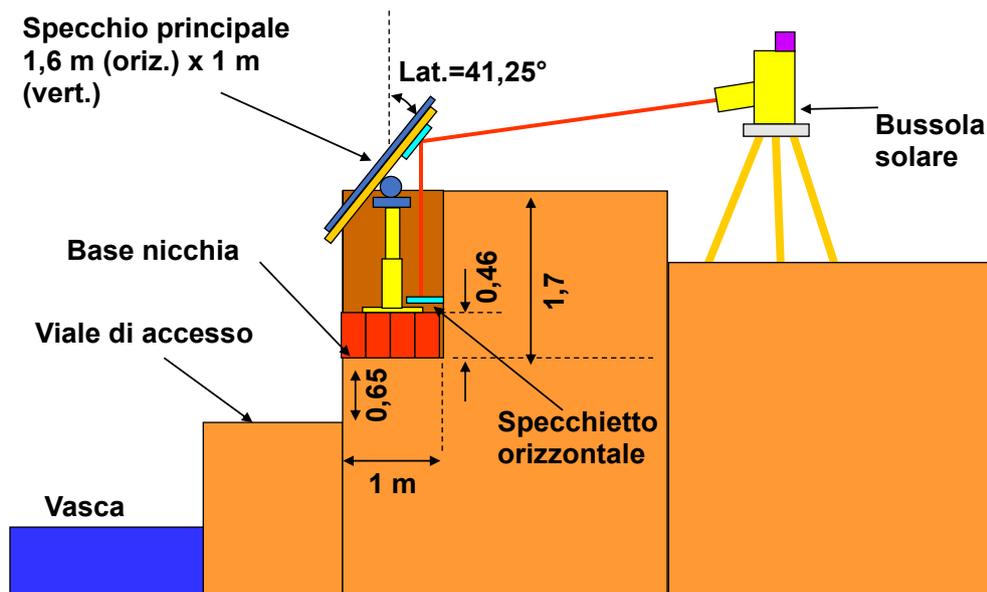


Figura 6. Posizionamento del Convertitore dei Solstizi nella nicchia esterna a semiluna e sistema di allineamento del pianale tramite bussola solare. L'inclinazione verso il basso del cannocchiale del teodolite della bussola solare è di $2 \cdot \text{Lat} - 90^\circ$ ovvero di $7,5^\circ$. Le distanze sono espresse in metri.

L'ora del tramonto

In estate vige l'ora legale e per ottenere l'orario estivo corrispondente all'ora invernale di interesse bisogna aggiungere un'ora. Inoltre gli orologi sono basati sul Tempo Medio (TM), cioè sull'assunzione che i giorni intesi come la distanza temporale tra un mezzogiorno ed il successivo abbiano sempre la medesima durata. In realtà la durata dei giorni solari cambia lievemente con le stagioni fino a circa $\pm 0,5$ minuti, sia perché la velocità con cui la Terra gira intorno al sole non è costante, sia perché l'asse di rotazione terrestre è inclinato [14]. Di conseguenza, si accumula una differenza denominata Equazione del Tempo (ET) tra il TM ed il Tempo Vero del Luogo (TVL), cioè il tempo indicato dalle meridiane secondo il quale è mezzogiorno nel momento in cui il sole è realmente all'apice del suo percorso e quindi è in direzione Sud in quel luogo. Dalla Fig. 4 è evidente che l'inversione dal solstizio estivo a quello invernale avviene a parità di angolo di rotazione della Terra rispetto al sole, ovvero quando al solstizio estivo i raggi del sole formano il medesimo angolo che essi formavano al solstizio invernale rispetto ad un qualsiasi meridiano (ad esempio quello del luogo). In pratica, l'inversione dei solstizi avviene a parità di TVL e non di TM.

Il tramonto del sole sul mare, inteso come l'istante in cui il disco solare appariva tangente all'orizzonte sul mare, al solstizio invernale dei tempi di Tiberio avveniva, d'accordo con le simulazioni dell'App *ENEA Mobile Sun Compass* [10] alle ore del $\text{TVL}_{\text{tram}} = 16:31':22''$.

Per conoscere l'ora TM corrispondente al TVL_{tram} al solstizio estivo 2022 bisogna aggiungere l'ora legale e tener conto dell'equazione del tempo al solstizio estivo e della variazione di orario fissa dovuta alla longitudine del luogo. Il risultato è riportato nella Fig. 7 per diverse date in prossimità del solstizio. Nella stessa figura riportiamo anche la declinazione del sole.

Dalla Fig. 7 si può notare che il giorno dell'esperimento di inversione dei solstizi, 4 luglio 2022, l'ora corrispondente al tramonto invernale è $\text{TM } 4\text{lug}_{\text{tram}} = 17:42':00''$ e la declinazione del sole era calata di $0,6^\circ$ rispetto al valore raggiunto al solstizio, una variazione compensabile tramite un innalzamento dello gnomone, come vedremo nel seguito.

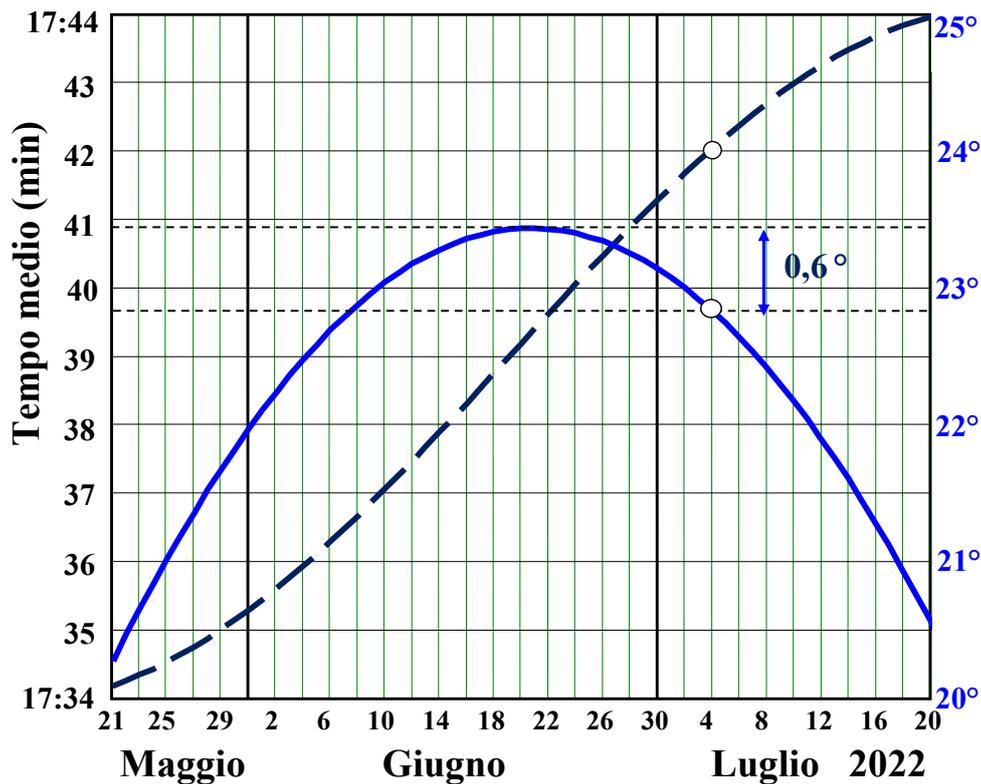


Figura 7. Curva tratteggiata: l'ora estiva TM corrispondente al momento del tramonto di Tiberio ($TVL_{tram} = 16:31:22''$), e declinazione del sole, curva continua, nei mesi che precedono e seguono il solstizio estivo 2022.

Il percorso dell'ombra e l'altezza dello gnomone

Al solstizio invernale l'ombra dello gnomone riflessa nella vasca circolare si osserva già un'ora prima del tramonto. Immaginando di avere una grande parete quale proseguimento di quella di fondo della nicchia A, vedi la Fig. 2, ortogonale al Traguardo di Tiberio, scopriremmo che l'ombra dello gnomone si muoverebbe lungo la curva ad iperbole corrispondente al 21 dicembre di un'enorme meridiana, come mostrato nella Fig. 8.

È il caso di sottolineare che il disegno di meridiana della Fig. 8 con doppia linea solstiziale corrispondente a presenza/assenza dell'aria, quindi all'inclusione o meno dell'effetto della rifrazione in prossimità del tramonto, è originale ed è reso possibile grazie agli algoritmi sviluppati per l'App *ENEA Mobile Sun Compass* [10]. In tutte le meridiane, infatti, è tracciata solo la linea "senza aria", quella tratteggiata nella Fig. 8, perché è molto più semplice da calcolare. Nella Fig. 8 le due linee tratteggiate del 21 dicembre e del 3 gennaio, che normalmente avrebbero un significato virtuale perché ignorano l'effetto della rifrazione dell'aria, sono state aggiunte perché quando si usa il Convertitore dei solstizi il percorso dell'ombra segue la linea tratteggiata anziché quella continua, per cui nel simulare il solstizio opposto, il Convertitore non simula la rifrazione che l'aria introduce in prossimità del vero tramonto invernale.

Il punto di coordinate (0,0) di Fig. 8 corrisponde al piede dello gnomone, ovvero alla proiezione geometrica del centro dello gnomone sulla parete mentre il cerchietto verde al termine della linea continua del 21 dicembre del primo secolo d.C. indica il momento del "tramonto di Tiberio".

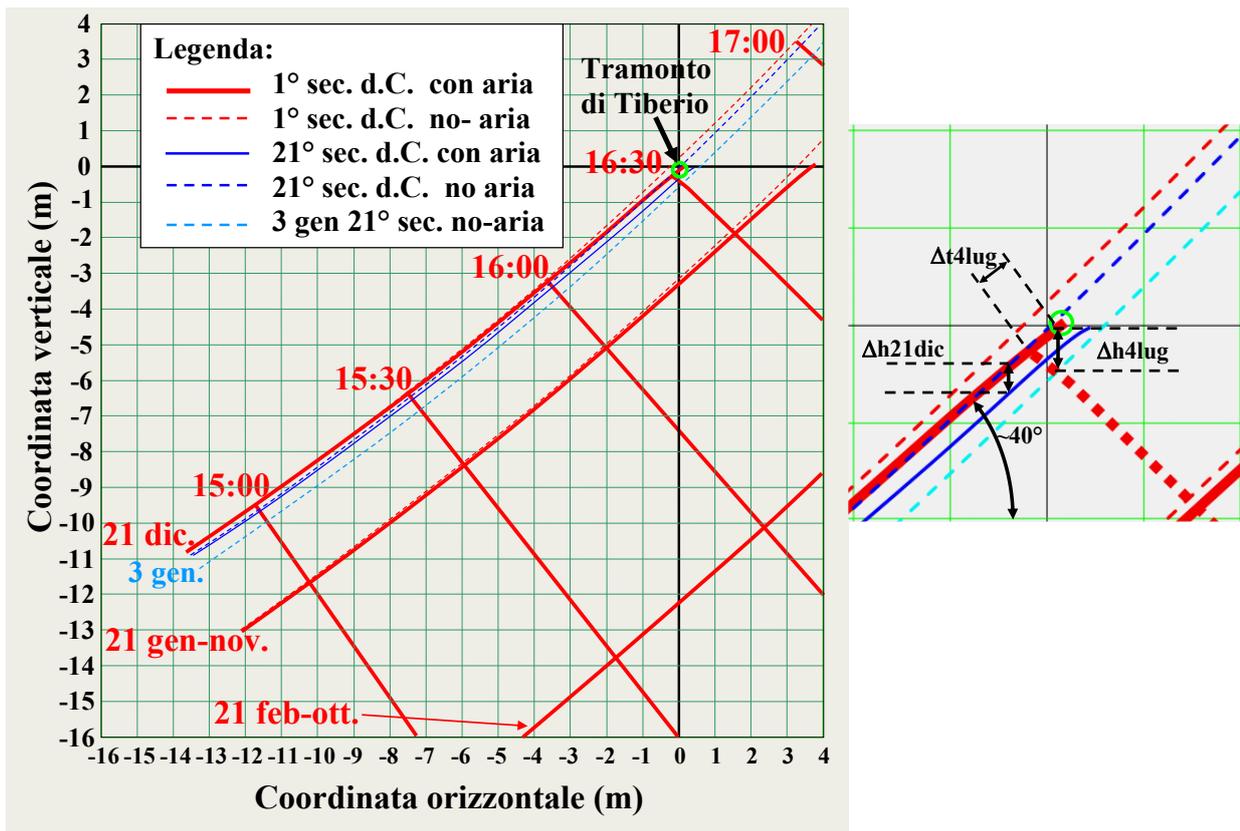


Figura 8. Porzione di meridiana al TVL per parete verticale con azimuth pari a 238° rispetto al Nord, calcolata tramite l'algoritmo di ENEA Mobile Sun Compass [10] per l'altezza gnomonica, cioè la distanza tra lo gnomone ed il piano della meridiana, pari a 40 m, alla latitudine della grotta di Tiberio ($41^\circ:15'$), ai tempi di Tiberio (I secolo d.C.) e oggi. La meridiana riporta i segmenti raggiunti dall'ombra dello gnomone nell'intervallo 15:00 – 17:00 TVL ed il percorso dell'ombra al giorno 21 dei mesi invernali ed autunnali sia in presenza della rifrazione dell'aria (curve continue) e sia in assenza (curve tratteggiate). Le grandezze riportate nello zoom sono descritte nel testo.

Rispetto ai tempi di Tiberio, l'inclinazione dell'asse terrestre, ovvero la declinazione massima del sole è diminuita di $0,25^\circ$ e conseguentemente l'iperbole del 21 dicembre nella meridiana di Tiberio mostrata in Fig. 8 si è abbassata di $\Delta h_{21dic} = 0,25$ m come mostrato nella curva blu nello zoom di Fig. 8. Oggigiorno dovremmo alzare lo gnomone di 0,25 m affinché l'ombra dello gnomone segua lo stesso percorso che seguiva ai tempi di Tiberio. Ma se usiamo il Convertitore dei Solstizi per simulare il tramonto di Tiberio invernale al solstizio estivo, non è necessario innalzare lo gnomone perché al momento del tramonto di Tiberio in estate il sole è ancora alto e l'assenza di rifrazione, vedi la curva blu tratteggiate nella Fig. 8, compensa il calo di inclinazione dell'asse: la curva tratteggiate blu va infatti a sovrapporsi alla curva continua rossa della Fig. 8.

Abbiamo usato il Convertitore il 4 luglio, ovvero 13 giorni dopo il solstizio, simulando così i raggi solari alla data del 3 gennaio anziché quella del 21 dicembre, per cui la declinazione del sole è calata di ulteriori $0,6^\circ$, quindi di $0,85^\circ$ rispetto a quella del 21 dicembre dei tempi di Tiberio. Di conseguenza, l'iperbole del 21 dicembre (dislivello tra curve continua e tratteggiate) si è abbassata di 0,8 m, ma, grazie al minor effetto dovuto alla rifrazione al 4 luglio alla stessa ora del tramonto di Tiberio, il calo si riduce a $\Delta h_{4lug} = 0,45$ m come mostrato nell'inserito della Fig. 8. Per portare il percorso a quello del solstizio di Tiberio ed esattamente allo stesso punto nel momento del tramonto di Tiberio è stato quindi necessario aumentare la quota dello gnomone di 0,45 m.

Il calo di declinazione di $0,6^\circ$ ha comportato uno spostamento inclinato lungo la direzione delle linee orarie, e quindi uno spostamento orizzontale verso destra che, una volta recuperato quello verticale tramite l'innalzamento dello gnomone, si traduce in un anticipo temporale. Questo anticipo, al momento del tramonto di Tiberio è pari a $\Delta t_{4lug} \sim 2':10''$.

La Figura 9 riporta la foto della nicchia A scattata dalla nicchia a semiluna, insieme alla curva corrispondente al percorso dell'ombra dello gnomone nell'ultima ora prima del tramonto di Tiberio, corrispondente all'ultima parte della curva del 21 dicembre nella Fig. 8. Considerando l'effetto di raddrizzamento del percorso rispetto all'iperbole che la rifrazione dell'aria provoca nell'ultima ora e data l'irregolarità della superficie rocciosa, la curva è stata qui approssimata con una retta inclinata di 40° , vedi l'insero nella Fig. 8, mentre il tratto di sinistra, a partire dal punto in cui la retta incrocia la superficie dell'acqua della vasca, è stato ribaltato specularmente rispetto ad un piano orizzontale per tener conto della riflessione dell'acqua.

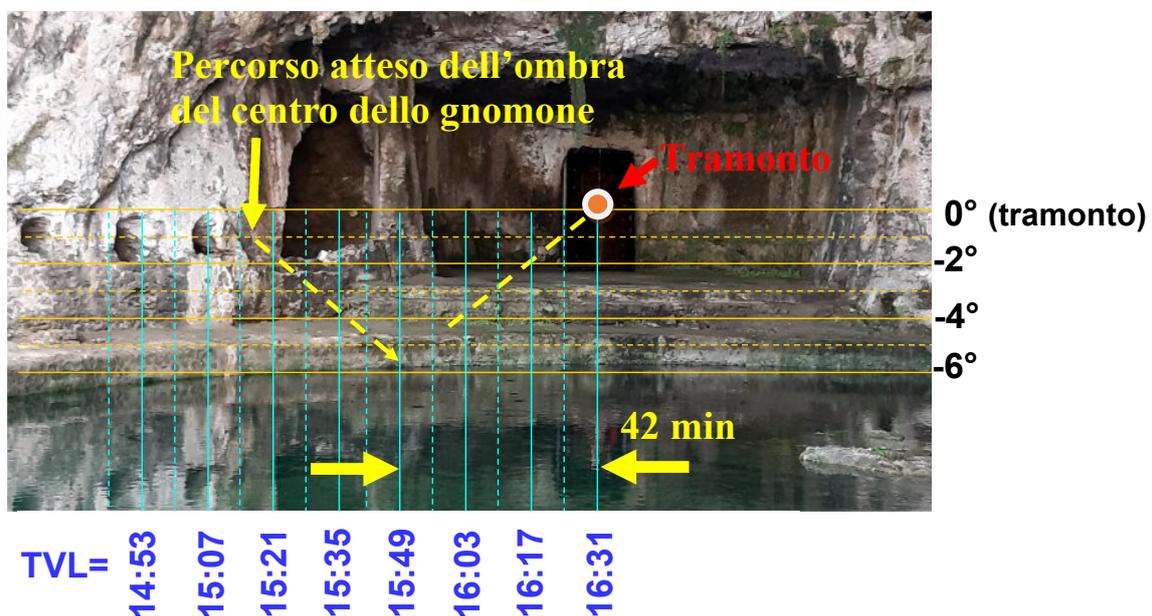


Figura 9. La nicchia A e la vasca circolare viste dalla nicchia a semiluna. Alla foto è stata sovrapposta l'ultima parte dell'iperbole del 21 dicembre approssimata con una retta inclinata di 40° , centrando il piede dello gnomone nel centro del portale di accesso al cubicolo della nicchia e ribaltando verso l'alto la parte di iperbole che sarebbe finita sotto il livello dell'acqua della vasca circolare.

La riflessione dell'ombra nella vasca segue un percorso suggestivo: dapprima è capovolta e scende verso l'acqua, quasi a tuffarsi, poi si raddrizza e sale la scalinata della vasca, fino a entrare nel cubicolo proiettata sulla parete di fondo ed infine, al momento del tramonto, si presenta centrata all'ingresso del cubicolo. Questo percorso rende il Trapianto di Tiberio originale ed unico rispetto ad altri strumenti astronomici ideati nell'antichità per la celebrazione del solstizio invernale, come nel celebre caso di Stonehenge.

Nella Fig. 9 abbiamo ipotizzato di porre il centro dello gnomone sulla verticale del centro di curvatura della nicchia a semiluna e ad un'altezza tale da risultare centrato con il sole al tramonto visto dal centro dell'ingresso al cubicolo, cioè $0,29$ m sopra la linea dell'orizzonte [7].

Durante i test di verifica del funzionamento del Trapianto di Tiberio eseguiti al solstizio invernale (20/12/2021) e vicini al solstizio estivo con l'ausilio del Convertitore dei Solstizi (4/7/2022), tale altezza è stata incrementata rispettivamente dei valori di Δh_{21dic} e Δh_{4lug} sopra menzionati, raggiungendo quindi,

nominalmente, la quota di 0,54 m e 0,74 m sopra la linea dell'orizzonte, corrispondenti a 1,65 m e 1,85 m sopra il limite superiore del muretto a semiluna. I valori sperimentali di queste due quote sono molto vicini a quelli calcolati, come mostrato nella Fig. 10, che riporta una foto dello gnomone in entrambi gli esperimenti visti dal centro del cubicolo.



Figura 10. Gli gnomoni collocati nella nicchia a semiluna per la verifica a) del 20/12/2021 e b) del 4/7/2022. L'altezza rispetto alla linea dell'orizzonte, stimata da queste foto tramite proporzioni, risulta rispettivamente di 0,54 m e di 0,7 m, molto vicina ai valori desiderati.

Verifiche del Traguardo

L'evoluzione temporale dell'ombra dello gnomone il 20/12/2021 per il solstizio invernale ed il 4/7/2022 per il Convertitore dei solstizi è stata ripresa scattando una foto ogni 10 minuti durante la penultima ora, e ogni minuto durante l'ultima mezz'ora prima del tramonto di Tiberio, che avveniva alle ore $TVL_{tram} = 16:31:22''$.

Per confrontare i due eventi, associamo ad ogni foto il corrispondente intervallo temporale, Δt_{tram} , di anticipo rispetto al momento TVL_{tram} , ovvero convertiamo l'orario TM di ogni foto, registrato automaticamente dalla fotocamera, in orario TVL, lo correggiamo del ritardo dovuto alla data dell'esperimento rispetto al solstizio e lo sottraiamo al TVL_{tram} , ovvero:

$$1) TVL_{foto} = TM_{foto} + \Delta t_{foto} + ET + \Delta t_{long} - LEG$$

$$2) \Delta t_{tram} = TVL_{foto} + \Delta t_{data} - TVL_{tram}$$

dove

TM_{foto} = tempo medio della foto, registrato dalla macchina fotografica;

Δt_{foto} = ritardo dell'orologio interno alla macchina fotografica = +1':03'' e +2':13'' rispettivamente al 20/12/2021 e al 4/7/2022.

ET = equazione del tempo nel giorno dell'esperimento = +2':14'' e -4':28'' rispettivamente al 20/12/2021 e al 4/7/2022.

Δt_{long} = correzione per la longitudine del luogo = $Long./(15^\circ/ora) - 1\text{ ora} = -6':12''$

LEG = correzione per l'ora legale = 0 ore e 1 ora rispettivamente al 20/12/2021 e al 4/7/2022.

Δt_{data} = correzione dovuta alla data dell'esperimento = 0' e 2':14'' rispettivamente al 20/12/2021 e al 4/7/2022, vedi l'insero di Fig. 8.

Il valore di Δt_{foto} è stato misurato scattando una foto, nello stesso giorno dell'esperimento, alla schermata "Effemeridi" dell'App *ENEA Mobile Sun Compass*, che mostra l'ora esatta rilevata dal GPS:

la differenza tra il TM vero visibile nella foto ed il TM registrato dalla macchina fotografica su quella stessa foto fornisce il valore di Δt_{foto} che assumiamo costante per tutte le foto della giornata.

La posizione della fotocamera nel punto F di Fig. 2, prossimo allo gnomone, è la medesima sia per il solstizio invernale e sia per il Convertitore al solstizio estivo.

Nelle figure dalla 11 alla 16 riportiamo alcune foto significative eseguendo, dove possibile, il confronto tra i due solstizi a parità di Δt_{tram} . Negli ultimi 14 minuti di Δt_{tram} il confronto non è possibile perché nel test del 20/12/2021 il sole è stato oscurato da una nuvola poco prima il momento del tramonto di Tiberio.

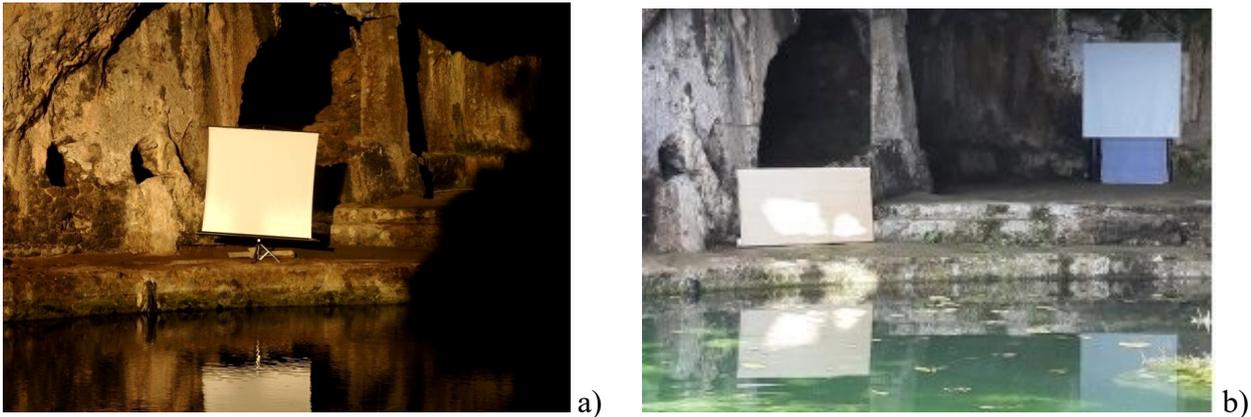


Figura 11. L'ombra dello gnomone appare su uno schermo dopo essere stata riflessa dall'acqua della vasca. Foto scattata a) il 20/12/2021 ($\Delta t_{\text{tram}} = -51':49''$) e b) il 4/7/2022 ($\Delta t_{\text{tram}} = -43':16''$). L'ombra in a) è capovolta dalla riflessione: la parte superiore dell'ombra corrisponde alla roccia mentre quella inferiore corrisponde allo gnomone. L'ombra dello gnomone in b) ha raggiunto la condizione ibrida: la parte superiore è proiettata sul bordo della vasca ed è quindi diritta, mentre la parte inferiore è proiettata sullo schermo dopo essersi riflessa nell'acqua ed è capovolta.

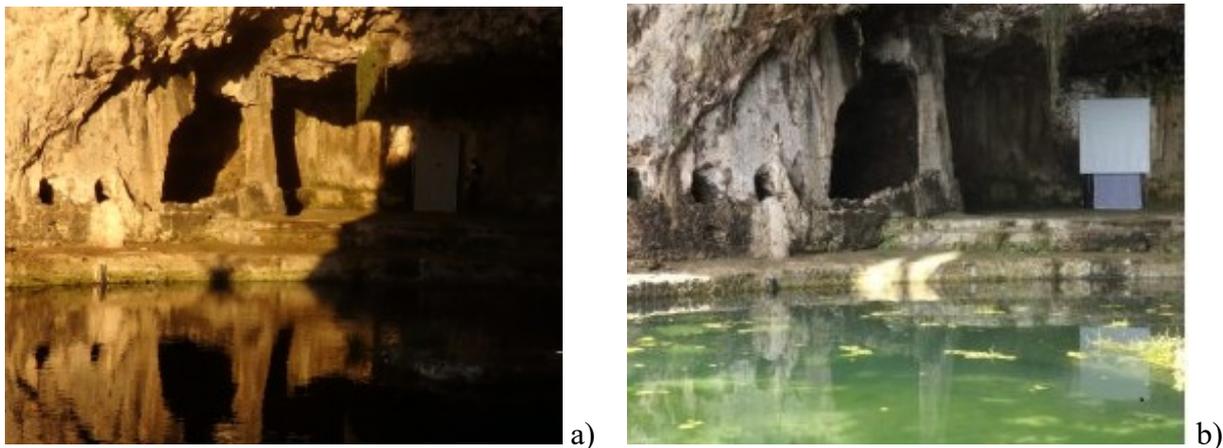


Figura 12. l'ombra dello gnomone è emersa dall'acqua ed ha raggiunto il primo gradino della vasca. Foto scattata a) il 20/12/2021 ($\Delta t_{\text{tram}} = -34':15''$) e b) il 4/7/2022 ($\Delta t_{\text{tram}} = -35':15''$).



a)



b)

Figura 13. L'ombra dello gnomone ha raggiunto il secondo gradino della vasca. Foto scattata a) il 20/12/2021 ($\Delta t_{\text{tram}} = -29':23''$) e b) il 4/7/2022 ($\Delta t_{\text{tram}} = -28':43''$).



a)



b)

Figura 14. L'ombra dello gnomone ha raggiunto la parete di fondo della nicchia A. Foto scattata a) il 20/12/2021 ($\Delta t_{\text{tram}} = -14':25''$) e b) il 4/7/2022 ($\Delta t_{\text{tram}} = -14':43''$).



Figura 15. L'ombra dello gnomone entra nel portale di accesso al cubicolo, situato nel fondo della nicchia A, coperto da uno schermo bianco per meglio osservare la stessa ombra. Foto scattata il 4/7/2022, $\Delta t_{\text{tram}} = -7':43''$.

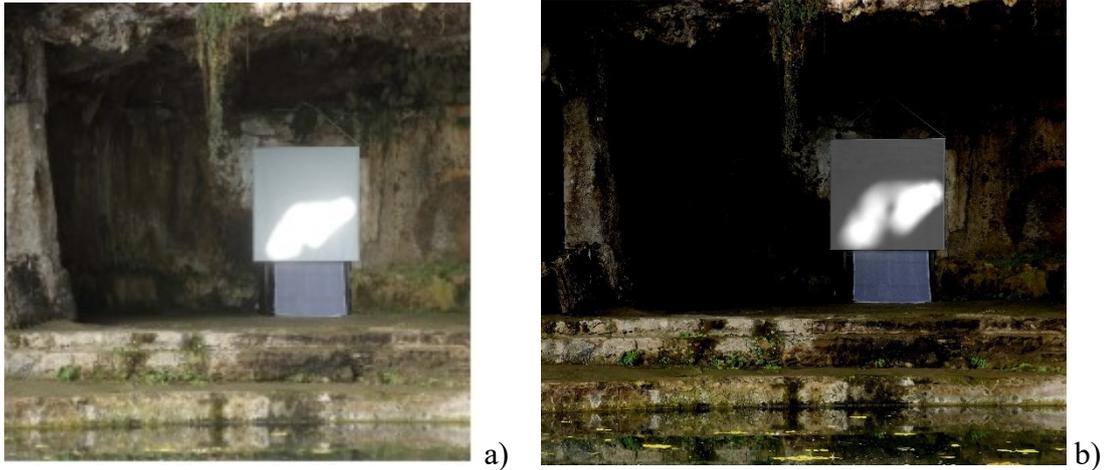


Figura 16. L'ombra dello gnomone raggiunge il centro del portale di accesso al cubicolo. Foto scattata il 4/7/2022 $\Delta t_{\text{tram}} = -0':43''$: a) al naturale e b) dopo regolazione di luminosità e contrasto.

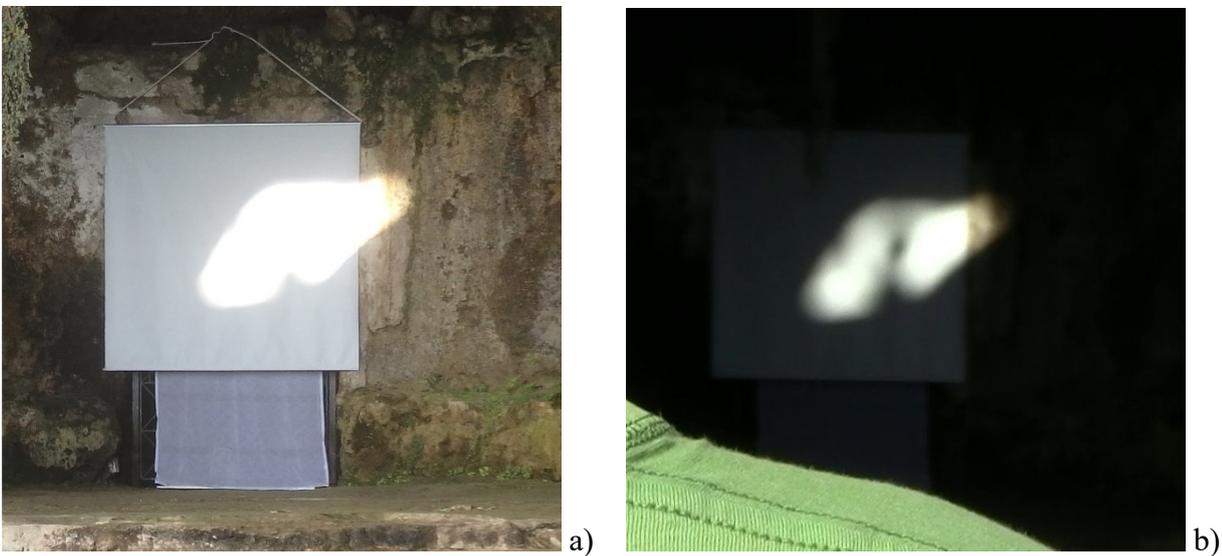


Figura 16bis. L'ombra dello gnomone ha appena superato il centro del portale di accesso al cubicolo. Foto scattata il 4/7/2022 $\Delta t_{\text{tram}} = +3':23''$: a) al naturale e b) da videocamera prossima allo gnomone, sempre al naturale ma influenzata dalla presenza di una maglia verde in primo piano, grazie alla quale la videocamera ha automaticamente ridotto la luminosità evitando la saturazione nella zona del fascio riflesso dal Convertitore. La saturazione è evidente nella foto a).

Annotazioni conclusive

Dalle immagini delle Figure 11-16 emergono le seguenti considerazioni.

- ✓ Osserviamo un'ottima corrispondenza della posizione dell'ombra tra il 20/12/2021 e il 4/7/2022 e questo dimostra che il Convertitore dei Solstizi ha funzionato correttamente. Il percorso dell'ombra è in accordo con le previsioni teoriche, vedi la Fig. 9.
- ✓ L'esperimento del 4 luglio ha consentito di completare il percorso dell'ombra negli ultimi 14 minuti che erano mancati al solstizio invernale a causa dell'oscuramento del sole dovuto alle nuvole, ed ha dimostrato che al momento del tramonto di Tiberio l'ombra raggiunge il centro del portale del cubicolo.
- ✓ Il rapporto larghezza/altezza del fascio di luce riflesso dallo specchio è passato dal valore originale di 1,44, vedi la Fig. 10b, a 1,33 (vedi le Figg. 15 e 16), evidenziando che lo specchio non è perfettamente piano, ma convergente sul piano orizzontale, con un fuoco a 400-500 m e quindi con

un raggio di curvatura inferiore ad 1 km, violando così il limite per ottenere immagini prive di deformazioni. Questo spiega la scarsa definizione dell'ombra proiettata. È auspicabile un'analisi ottica dello specchio ed un'eventuale riparazione del pianale.

- ✓ Prima delle misure a Sperlonga, abbiamo eseguito una verifica della planarità dello specchio e del pianale. I risultati riportati in Appendice mostrano che una parte del degrado della planarità del sistema era intrinseco, e un ulteriore degrado è avvenuto durante il trasporto del pianale da Frascati a Sperlonga. La non perfetta planarità ha reso meno nitida la proiezione dell'ombra dello gnomone. Tuttavia, il centro dello specchio è stato ben posizionato lungo il traguardo di Tiberio, perché il centro-specchio, visto dal centro del portale del cubicolo, passava sopra il centro di curvatura della nicchia esterna, vedi la foto di Fig. 17 scattata dal centro del portale. Di conseguenza il centro del parallelogramma di luce che lo specchio ha proiettato nelle immagini delle Figure 11-16 ha indicato, al momento del tramonto di Tiberio, la reale posizione in cui sarebbe apparso il centro dell'ombra dello gnomone. Questo rende scientificamente significativo il buon esito dell'esperimento di funzionamento del Convertitore.
- ✓ Malgrado la complessità dell'installazione del Convertitore in un sito impervio come la grotta di Tiberio, esso ha consentito di verificare la funzionalità del Traguardo di Tiberio in una stagione meteorologicamente più favorevole di quella invernale.



Figura 17. Il Convertitore dei Solstizi nella nicchia esterna, fotografato a) dal centro del portale della nicchia-A, b) lungo il vialetto di accesso alla grotta. Malgrado il centro del disco gnomonico e dello specchio non coincidano verticalmente, essi coincidono orizzontalmente e si trovano allineati con il centro di curvatura della nicchia se osservati dal centro del portale.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano la Direttrice del Museo di Sperlonga, Dr.ssa Cristiana Ruggini, per aver concesso ed agevolato l'esecuzione delle misure, l'Ing. Sven Liebschwager per la foto aerea della Fig. 1, ed infine l'Arch. Paola Giaquinto e la Dr.ssa Laura Moretti di ENEA-REL per il patrocinio di REL nell'esecuzione dell'esperimento con il Convertitore dei Solstizi. Gli autori ringraziano anche Fabrizio Marini (ENEA Frascati) per l'aiuto nella realizzazione del supporto del Convertitore e la ditta Edilvetro S.r.l. di Roma per aver donato lo specchio del Convertitore.

Referenze

- [1] A.F. Stewart: “To entertain an emperor: Sperlonga, Laocoon and Tiberius at the dinner table” *Journal of Roman Studies*, **67**, 76-90 (1977). <https://doi.org/10.2307/299920>
- [2] B. Andreae: “Praetorium Speluncae. L'antro di Tiberio a Sperlonga ed Ovidio” (Rubbettino editore, 1995)
- [3] S. Gilles: “Un conflit qui s’eternise: la «guerre de Sperlonga»” *Revue Archéologique*, **2**, 261-96 (1997). <http://www.jstor.org/stable/41738419>
- [4] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: “Electro-optical sun compass with a very high degree of accuracy” *Optics Letters* **40**, 3619-3622 (2015). <https://doi.org/10.1364/OL.40.003619>
- [5] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: “Misure di orientamento ad alta precisione con bussola solare ENEA nell’Area archeologica della Grotta di Tiberio a Sperlonga”, *Atti del 22° Seminario di Archeoastronomia*, Edizioni ALSSA (Associazione Ligure per lo Sviluppo degli Studi Archeoastronomici), pp. 31-52 (2020). <https://www.alssa.it/wp-content/uploads/2020/12/Atti-del-22%C2%B0-Seminario.pdf>
- [6] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, D. De Meis, G.P. Gallerano, P. Di Lazzaro, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: “Era Andromeda a celebrare il solstizio invernale nella Grotta di Tiberio a Sperlonga?”, *Atti del 23° Seminario di Archeoastronomia*, Edizioni ALSSA (Associazione Ligure per lo Sviluppo degli Studi Archeoastronomici), pp. 58-69 (2021). <https://www.alssa.it/2021/11/05/atti-seminario-23/>
- [7] F. Flora et al.: “Il Traguardo di Tiberio a Sperlonga: prime verifiche solari del suo funzionamento” *Atti del 24° Seminario di Archeoastronomia*, Edizioni ALSSA (Associazione Ligure per lo Sviluppo degli Studi Archeoastronomici). In stampa.
- [8] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: “La bussola solare Enea in archeoastronomia - Rilievi di orientamento nella Grotta di Tiberio a Sperlonga”, *Rapporto Tecnico ENEA*, RT/2021/1/ENEA (2021). Disponibile al sito: <https://iris.enea.it/retrieve/handle/20.500.12079/56121/9041/RT-2021-01-ENEA.pdf>
- [9] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: “High-accuracy orientation survey in the Tiberius’ Cave near Sperlonga”, *Journal of Cultural Heritage* **55**, pp. 138–142 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.03.008> Vedi anche il file “Supplementary Materials” allegato allo stesso articolo.
- [10] S. Bollanti F. Andreoli, L. Cafarella, D. De Meis, P. Di Lazzaro, D. Di Mauro, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, L. Murra, A. Zirizzotti: “Accurate and low-cost ENEA solar compass for precision metrology of true azimuth: instrumental and smart versions” *SPIE* vol. **11352** (2020). <https://doi.org/10.1117/12.2555747>

[11] G.M. Sesti: “Le Dimore del Cielo. Archeologia e Mito delle Costellazioni”, Novecento Editrice, (1987). Vedi anche: Mircea Eliade, “Trattato di Storia delle Religioni”, a cura di P. Angelini, Ed. Universale Bollati Boringhieri, 1949. <https://www.famigliafideus.com/wp-content/uploads/2016/10/TRATTATO-DI-STORIA-DELLE-RELIGIONI-Mircea-Eliade.pdf>

[12] F. Bonoli: “Sulle Origini delle Costellazioni”, Tesi di laurea, A.A. 2015-2016, Università di Bologna. <https://amslaurea.unibo.it/12819/1/Sulle%20Origini%20delle%20Costellazioni.pdf>

[13] A. Forlini: “Figlia del Sole: il convertitore dei solstizi” Atti del 23° Seminario di Archeoastronomia, Edizioni ALSSA (Associazione Ligure per lo Sviluppo degli Studi Archeoastronomici), pp. 70-82 (2021). <https://www.alsa.it/2021/11/05/atti-seminario-23/>

[14] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, A. Fastelli, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: “Calcolo analitico della posizione del sole per l’allineamento di impianti solari ed altre applicazioni” RT/2012/24/ENEA (2012) ISSN/0393-3016. <https://www.researchgate.net/publication/262200491>

Appendice. Verifica della planarità del pianale e dello specchio

Sei giorni prima dell'esperimento del 4 luglio, presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati abbiamo misurato la planarità del pianale prodotto dalla Ercole Marelli Doluflex di Bergamo e dello specchio donato dalla ditta N. Edilvetro s.r.l. di Roma.

Per verificare che le diverse porzioni dello specchio riflettano i raggi solari nella medesima direzione, abbiamo coperto lo specchio con fogli di carta A4 disposti a scacchiera come mostrato nella Fig. 18a, e verificato il mantenimento della proporzione delle distanze tra le caselle della scacchiera a diverse distanze dallo specchio. I risultati dell'esperimento sono mostrati nelle Figg. 18b, c, d.

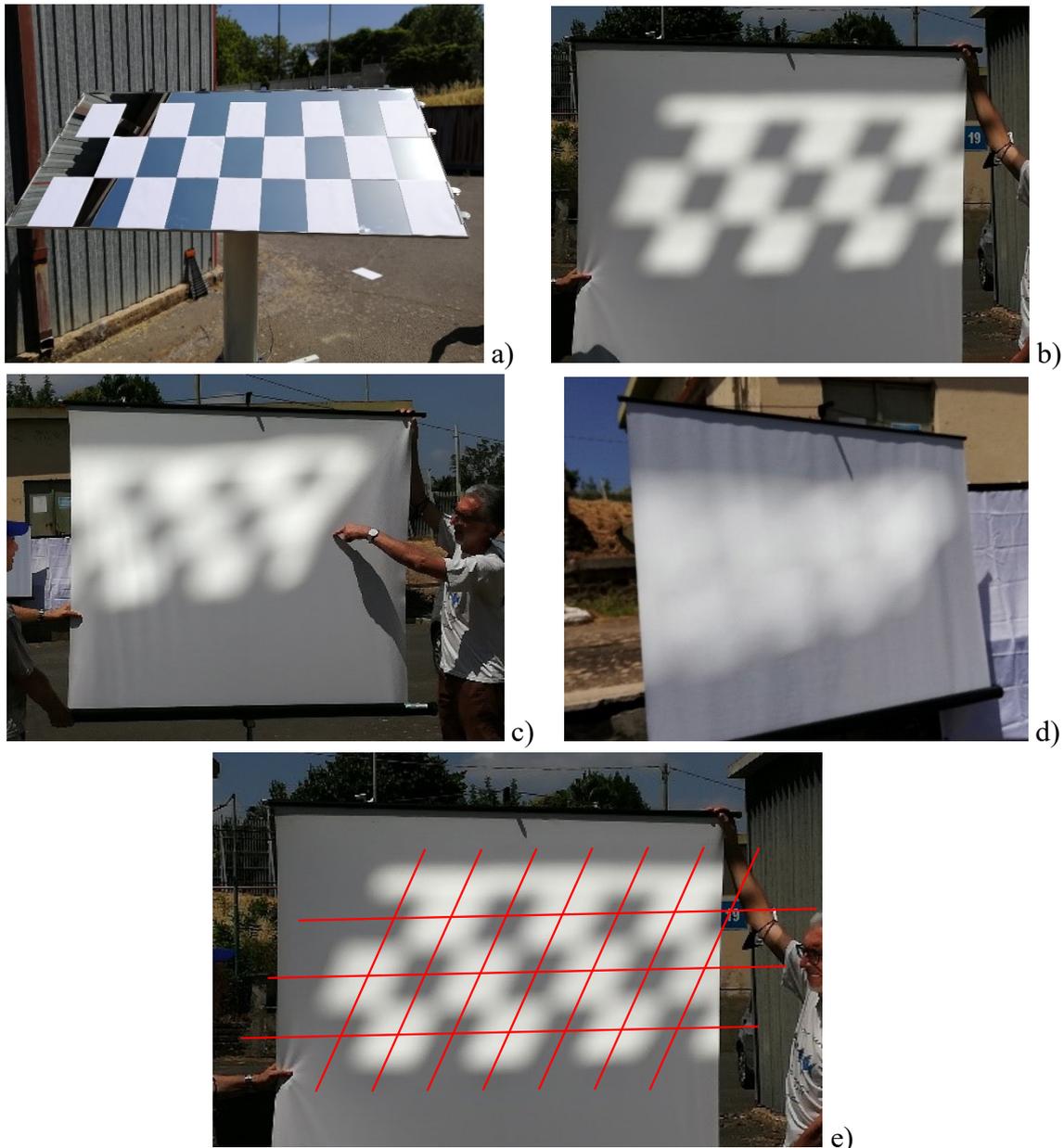


Figura 18: Test di planarità del pianale e dello specchio eseguito il 29/6/2022 presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati: a) lo specchio è stato coperto di fogli di carta A4 in modo da formare una riflessione a scacchiera con passo orizzontale/verticale pari a 21,0 / 29,7 cm. L'immagine riflessa vista alle distanze b) 12 m, c) 19 m e d) 40 m ha mantenuto abbastanza bene le proporzioni della scacchiera solo nella zona centrale dell'immagine. Infine (e) abbiamo sovrapposto un reticolato alla (b) per verificare la linearità delle posizioni dei centri delle ombre dei fogli.

In particolare, confrontando l'immagine ottenuta a 12 m (Fig. 18b) con un reticolato di passo pari a quello dei fogli A4 (Fig. 18e), si nota che nella zona centrale dell'immagine i centroidi delle ombre generate dai fogli di carta si discostano dai centri del reticolato meno di 2 cm, corrispondenti ad una deviazione angolare inferiore a $0,1^\circ$, ma verso i bordi la situazione peggiora.

Si è poi passati alla proiezione dello gnomone. Abbiamo posto davanti allo specchio la stessa sagoma di Andromeda in scala 1:1 utilizzata a Sperlonga per l'esperimento del 20/12/2021, mostrata in Fig. 19a, e abbiamo osservato la proiezione dell'ombra a diverse distanze, vedi le Figg. 19b, c.

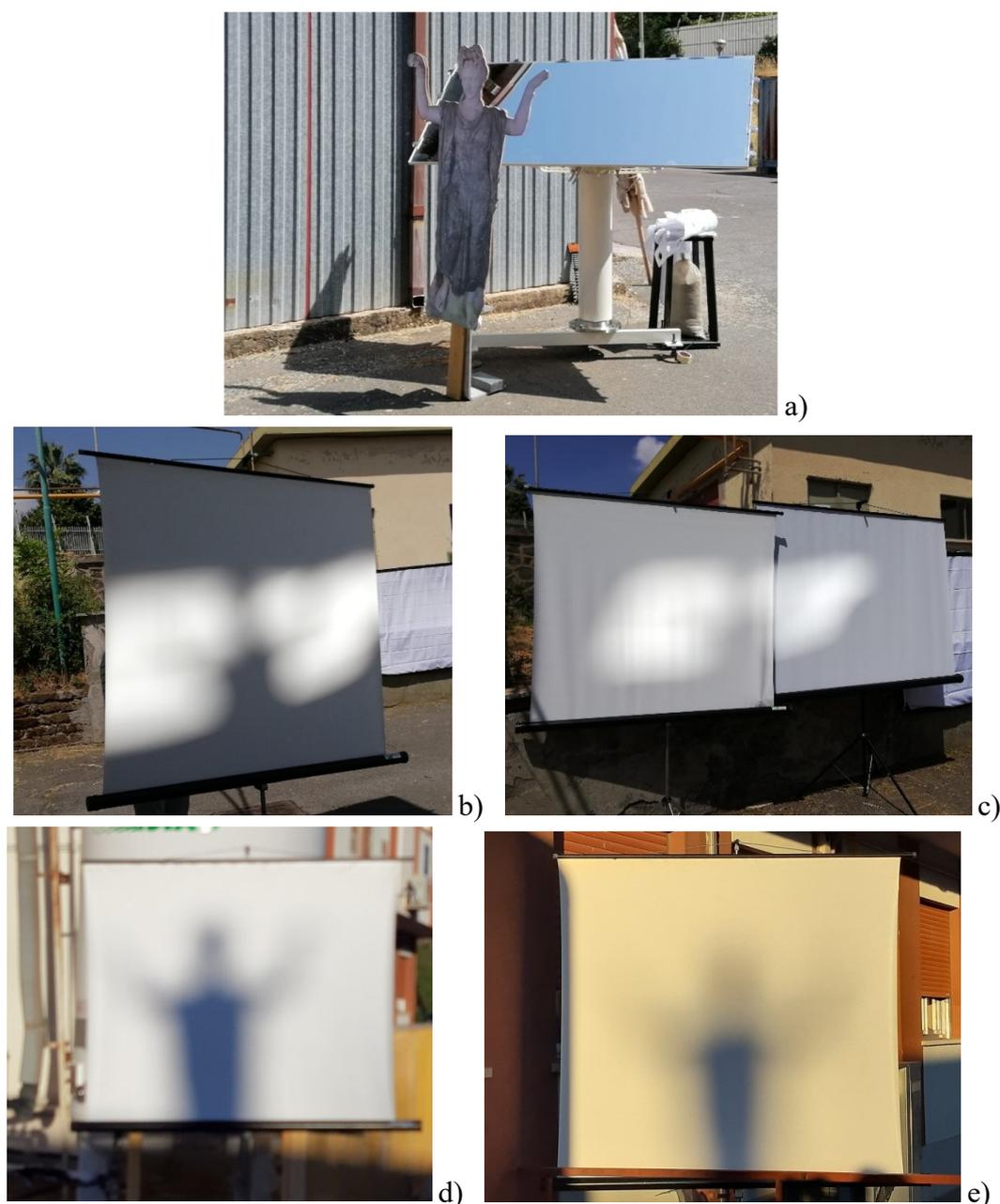


Figura 19: Verifica della proiezione dello gnomone: a) posizionamento dello gnomone (sagoma in scala 1:1 della statua di Andromeda conservata nel Museo di Sperlonga) davanti allo specchio; proiezione dell'ombra b) a 30 m e c) a 40 m di distanza dallo specchio. Immagine della medesima sagoma di Andromeda proiettata direttamente (senza specchio) alle medesime distanze, d) a 30 m ed e) a 40 m, scattate in prossimità del tramonto del 2 febbraio 2022 presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati.

Confrontando le immagini delle Figg. 19b e 19c con le corrispondenti delle Figg. 19d e 19e ottenute senza specchio, possiamo notare che lo sfocamento dell'immagine è dominato dall'effetto della penombra solare ($0,26^\circ$ di ampiezza) e che il degrado della proiezione dell'ombra causato invece dallo specchio (dovuto sia ai difetti di planarità del supporto sia alle micro-ondulazioni dello specchio) è modesto rispetto alla penombra ma comunque non trascurabile.

In conclusione, considerando che il primo gradino della vasca si trova a 30 m dallo gnomone, se il pianale non avesse subito alcun danno durante il trasporto da Frascati a Sperlonga e se fosse stata usata come gnomone la statua di Andromeda, le immagini ottenute a Sperlonga il 4 luglio 2022 mostrate nelle Figg. 12b e 16b sarebbero state simili alle Figg. 19b e 19c rispettivamente.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
gennaio 2023