

TEST DELL'ACCURATEZZA DELLA BUSSOLA SOLARE ENEA IN OCCASIONE DELL' ECLISSI SOLARE DEL 20 MARZO 2015

S. BOLLANTI, D. DE MEIS, P. DI LAZZARO, F. FLORA, G.P. GALLERANO, L. MEZI, D. MURRA, A. TORRE, D. VICCA

ENEA – Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Centro Ricerche Frascati, Roma



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

TEST DELL'ACCURATEZZA DELLA BUSSOLA SOLARE ENEA IN OCCASIONE DELL' ECLISSI SOLARE DEL 20 MARZO 2015

S. BOLLANTI, D. DE MEIS, P. DI LAZZARO, F. FLORA, G.P. GALLERANO, L. MEZI, D. MURRA, A. TORRE, D. VICCA
ENEA – Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Centro Ricerche Frascati, Roma

I Rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina
<http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

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.

TEST DELL'ACCURATEZZA DELLA BUSSOLA SOLARE ENEA IN OCCASIONE DELL' ECLISSI SOLARE DEL 20 MARZO 2015

S. BOLLANTI, D. DE MEIS, P. DI LAZZARO, F. FLORA, G.P. GALLERANO, L. MEZI, D. MURRA, A. TORRE, D. VICCA

Riassunto

La bussola solare brevettata da ENEA si caratterizza per la capacità di misurare la direzione del Nord geografico con un livello di accuratezza di 0.01 gradi, nettamente migliore rispetto a quello delle migliori bussole magnetiche ed elettroniche sinora realizzate.

Ovviamente, la bussola ENEA è stata progettata per poter funzionare in condizioni di Sole pieno, ma cosa accade quando il disco solare è parzialmente oscurato, ad esempio da una nuvola? Per rispondere accuratamente a questa domanda abbiamo misurato le prestazioni della bussola solare ENEA prima, durante e dopo l'eclisse parziale di Sole del 20 Marzo 2015.

I risultati delle misure, riassunti in questo rapporto tecnico, dimostrano che quando il disco solare è coperto per una frazione pari al 35%, in modo asimmetrico, la bussola presenta uno scostamento di circa 0.08 gradi (pari a circa 5') rispetto alla misura con disco solare pieno. Questo valore resta ancora migliore rispetto agli errori introdotti dalle bussole magnetiche (circa 1 grado) e da quelle elettroniche (circa 0.1 grado).

Parole chiave: bussola solare, azimut, orientamento, topografia, cartografia, eclissi solare

TESTING THE ACCURACY OF THE ENEA SOLAR COMPASS DURING THE SOLAR ECLIPSE ON MARCH 20 2015

Abstract

The Sun compass patented by ENEA is noted for its ability to measure the direction of true North with accuracy better than 0.01 degree, much better than the precision level of the best magnetic compasses and electronic hitherto realized.

Obviously, the ENEA compass is designed to operate in sunny days, but what happens when the solar disk is partially obscured, for example by a cloud? To answer this question we have accurately measured the performance of the ENEA solar compass before, during and after the partial eclipse of the Sun occurred on March 20, 2015.

The results of measurements, summarized in this technical report, show that when 35% of the solar disk is asymmetrically covered, the ENEA compass suffers of a deviation of about 0.08 degrees (approximately 5') with respect to the true North measurements carried out with full solar disk. This deviation is still less than the errors introduced by magnetic compasses (about 1 degree) and electronic compasses (about 1/10 of a degree).

Keywords: solar compass, azimuth, bearing, topography, cartography, solar eclipse

INDICE

1. Introduzione	7
2. Principio di funzionamento della bussola.....	7
3. L'eclissi del 20 Marzo 2015 e misura sperimentale dell'effetto dell'oscuramento del sole sulla precisione della bussola.....	11
4. Conclusioni.....	13
Ringraziamenti.....	13
Appendice: analisi dei dati sperimentali e simulazione numerica.....	15
Bibliografia.....	18

TEST DELL'ACCURATEZZA DELLA BUSSOLA SOLARE ENEA IN OCCASIONE DELL'ECLISSI SOLARE DEL 20 MARZO 2015

1. INTRODUZIONE

La bussola solare ENEA, interamente progettata e realizzata presso il Centro ENEA di Frascati, è un dispositivo in grado di misurare il Nord geografico con un'elevata accuratezza [1]. Ciò è possibile grazie al sistema elettro-ottico di rilevamento della posizione angolare del Sole e ad un semplice algoritmo in grado di calcolare esattamente le coordinate celesti del Sole in funzione del punto di osservazione sulla Terra e del "Tempo Vero" del Luogo [2].

La bussola è stata brevettata in Italia ed il brevetto è stato esteso a livello internazionale tramite il Patent Cooperation Treaty [3].

L'efficacia e l'affidabilità della bussola sono state misurate sperimentalmente in diverse occasioni, e la sua accuratezza è dell'ordine di 1/100 di grado [1], superiore a qualsiasi altra bussola magnetica o elettronica che non sia basata su costosi e complessi sistemi multi-GPS. Le prestazioni della bussola ENEA hanno attirato l'attenzione internazionale degli specialisti, inclusa una recensione pubblicata dalla rivista New Scientist [4].

In occasione dell'eclissi del 20 Marzo 2015, visibile con una percentuale di oscuramento del Sole di circa il 50% alla latitudine di Frascati, abbiamo voluto analizzare la risposta della bussola ENEA in funzione di tale oscuramento. La bussola solare, infatti, è stata progettata per poter funzionare correttamente in condizioni di Sole pieno. L'eclissi rappresenta una situazione in cui l'oscuramento del Sole è facilmente controllabile e misurabile, pertanto è possibile ricavare la sua influenza sul grado di accuratezza della bussola e questo può risultare utile per conoscere l'errore massimo in caso di Sole parzialmente coperto.

2. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELLA BUSSOLA

Il principio di funzionamento della bussola solare ENEA è descritto in modo dettagliato nella domanda di brevetto depositata in Italia il 27 Dicembre 2012 [3] e qui ne riassumiamo le caratteristiche più importanti.

Per poter stabilire con esattezza la direzione del Nord geografico, è indispensabile conoscere due angoli, in particolare l'angolo di azimut sotto il quale il Sole viene osservato in un dato istante da una determinata località terrestre (calcolabile) e l'azimut di un piano verticale di riferimento rispetto al piano verticale passante per il Sole (misurabile). La differenza tra questi due angoli fornisce l'azimut del piano verticale di riferimento rispetto al Polo Nord Geografico, che non coincide con il Polo Nord Magnetico il quale si trova a diversi chilometri dal primo ed è in continuo spostamento.

Per conoscere la posizione del Sole è possibile consultare le tavole delle Effemeridi [5] oppure ricorrere ad un complesso calcolo matematico basato sulle equazioni di Keplero, che fornisce l'angolo di azimut del Sole (oltre ad altri parametri come l'angolo di declinazione e di elevazione) per qualsiasi data ed ora. Noi abbiamo sviluppato un semplice algoritmo in cui le equazioni di

Keplero sono state invertite in modo semi-analitico, in modo tale che, impostando data, ora e coordinate geografiche di un luogo della Terra, si ottiene immediatamente l'angolo desiderato. La figura 1 mostra gli elementi astronomici che entrano in gioco nel calcolo della posizione del Sole. Risolto il problema di determinare matematicamente l'azimut del Sole, per poter conoscere la

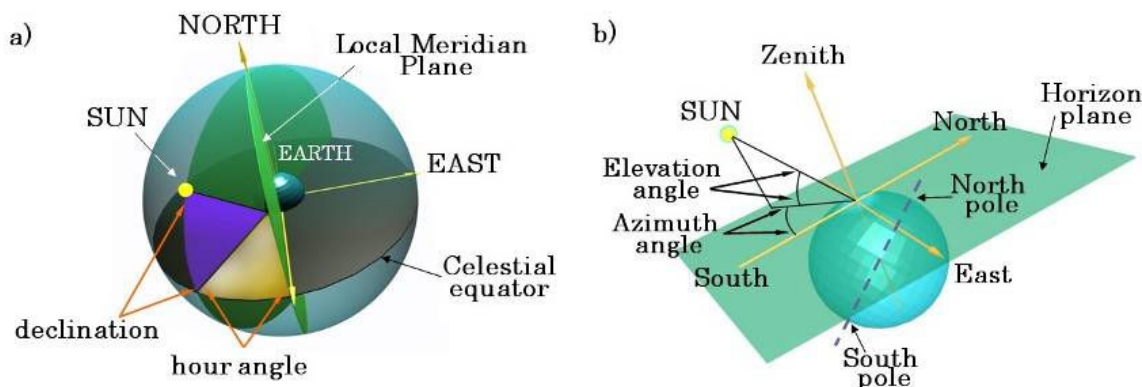


Figura 1. (a) Rappresentazione del Sistema Terra-Sole con le variabili astronomiche usate per determinare la direzione del Sole rispetto al Nord geografico. (b) La stessa rappresentazione vista da un osservatore sulla Terra.

direzione del vero Nord occorre misurare esattamente la posizione angolare del Sole rispetto ad un piano di riferimento verticale, in modo che si possa dedurre l'azimut di quest'ultimo a partire da quello del Sole (ovvero, l'azimut del piano di riferimento si ottiene aggiungendo all'azimut del Sole l'angolo tra tale piano e quello contenente il Sole).

Questo problema è inverso a quello di conoscere l'ora di un luogo utilizzando una meridiana, in cui la posizione del Sole viene individuata grazie all'ombra proiettata da uno gnomone e l'ora è determinata in base all'angolo tra questa ombra e la direzione Nord. Nel caso della bussola ENEA, poiché l'ora è nota a priori (tramite un ricevitore GPS che fornisce l'ora di Greenwich), la posizione del Sole può servire a determinare la direzione Nord, e tanto è più preciso il sistema di rilevamento tanto più è accurata la misura di tale direzione.

Diversi sistemi sono stati progettati e brevettati al fine di misurare la posizione angolare del Sole, sia per realizzare una bussola solare elettronica [6], sia per avere dei riferimenti spaziali precisi in caso di comunicazioni intersatellitari o sonde spaziali [7].

Le bussole solari elettroniche sinora realizzate e brevettate, ad ogni modo, hanno un'accuratezza peggiore di 1/20 di grado [6], quindi migliore rispetto a quella di una bussola magnetica (tipicamente intorno ad 1 grado) ma molto inferiore a quella dimostrata dalla bussola ENEA. Uno dei motivi dell'elevata accuratezza della bussola ENEA è il dispositivo elettro-ottico che misura la posizione del Sole, basato su una fenditura, che lascia passare una sottilissima riga di luce, ed un sensore che rivela la posizione di tale riga. L'uso di una fenditura migliora la stima dell'angolo di vista del Sole in quanto il calcolo del baricentro della linea, ottenuto mediando su tutte le righe, è meno soggetto ad errori di quello di un'immagine circolare, come avverrebbe se si usasse una lente o un foro.

La parte sensibile della bussola è costituita da un contenitore con un lato inclinato a 45° rispetto all'orizzontale, sul quale si trova la fenditura, ricavata tramite disegno litografico su un vetrino da microscopio. Sotto la fenditura, larga 70 μm e lunga 36 mm, si trova il fotosensore, di tipo CMOS,

a circa 18 mm di distanza.

Quando la fenditura è rivolta verso il Sole (entro un angolo utile di circa $\pm 5^\circ$), la parte di luce che attraversa sulla fenditura giunge sul fotosensore, illuminando una stretta striscia verticale di cui si può calcolare la posizione del baricentro e la sua distanza rispetto alla colonna che rappresenta la proiezione geometrica della fenditura sul sensore stesso. Tale distanza, divisa per la distanza tra fenditura e fotosensore, fornisce l'angolo di vista del Sole rispetto al piano verticale passante per la fenditura, come mostrato nella figura 2.

Il calcolo della posizione del Sole e la misura dell'angolo di vista vengono forniti da un programma inserito in un microprocessore che riceve i dati dal fotosensore e da un ricevitore GPS, mostrando il risultato dell'elaborazione su un display alfanumerico. La figura 3 mostra la parte sensibile della bussola (con la fenditura coperta da un filtro ad attenuazione variabile per limitare l'intensità della luce solare) e il contenitore con l'elettronica.

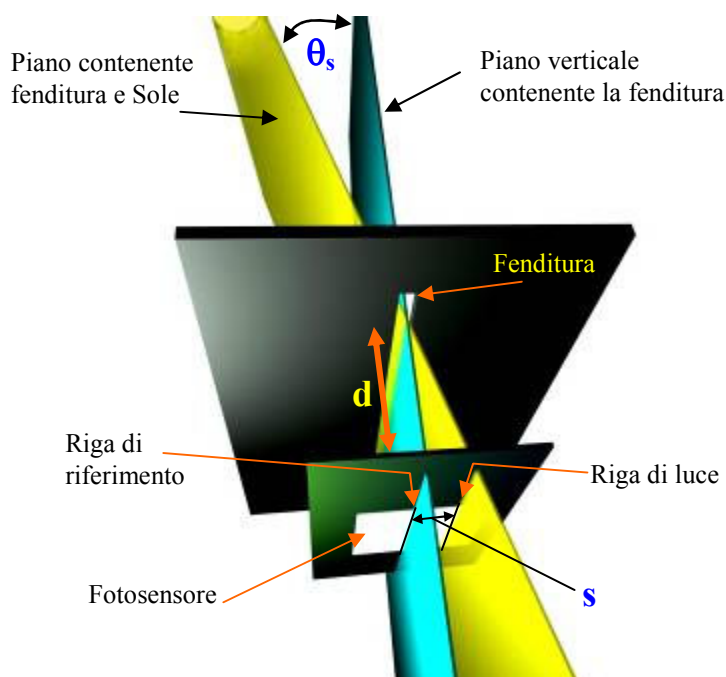


Figura 2. Schema del dispositivo elettro-ottico per la misura della posizione angolare del sole. Il sistema misura la distanza s tra la riga di luce e la colonna che rappresenta la proiezione della fenditura sul sensore, e il processore calcola l'angolo θ_s come arcotangente del rapporto tra s e la distanza d tra fenditura e sensore.



Figura 3. A sinistra la parte sensibile della bussola, dove si trova il piano con la fenditura (qui coperta da un filtro circolare) e il fotosensore. A destra la scatola che contiene il microprocessore, il GPS e la console per il controllo della bussola.

La calibrazione della bussola è stata effettuata tramite un banco ottico appositamente realizzato. Il

banco comprende una sorgente laser, opportunamente attenuata, costituita da un Nd-YAG in seconda armonica ($\lambda = 0.53 \mu\text{m}$), il cui fascio è inviato lungo una direzione verticale su cui sono posizionati 3 specchi parzialmente riflettenti. Questi deviano la luce verso un punto in cui viene collocata la parte sensibile della bussola solare, simulando i raggi che provengono da 3 altezze diverse del Sole. Durante la calibrazione viene inviato sulla bussola un fascio di luce per volta e per ognuno di essi viene misurato il baricentro della linea di luce che si forma sul fotosensore a diverse posizioni angolari della bussola stessa (ruotandola intorno ad un asse verticale). Al termine delle misure, i risultati vengono utilizzati per determinare i parametri costruttivi della bussola stessa, quali il rapporto tra dimensione del singolo pixel e la distanza tra sensore e fenditura, l'inclinazione e la rotazione relativa tra il piano del sensore e quello della fenditura ecc.

La figura 4 mostra lo schema del banco ottico di calibrazione e una foto dello stesso.

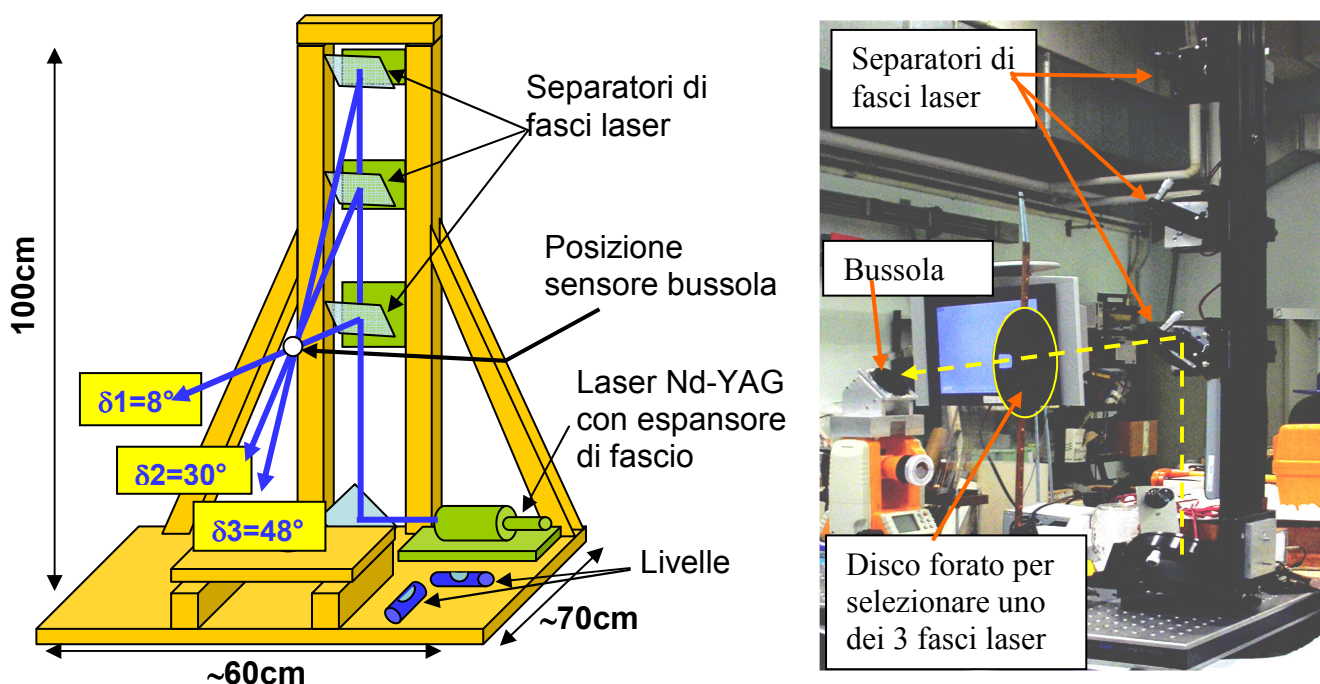


Figura 4. A sinistra, schema del banco ottico usato per tarare la bussola solare. Un fascio laser viene inviato in alto da uno specchio a 45° e poi 3 separatori di fascio posti su una linea verticale deviano una parte del fascio verso un unico punto, dove viene collocata la bussola. I 3 fasci simulano i raggi del sole aventi lo stesso azimut ma provenienti da diverse altezze. A destra, foto del banco ottico realizzato in laboratorio.

La bussola, una volta calibrata, è stata provata sul campo, tramite misure sperimentali di azimut di punti facilmente identificabili su una carta geografica. La parte sensibile della bussola è stata posizionata sulla testa di un teodolite dotato di goniometro ad altissima precisione (la cui sensibilità è di 1 secondo d'arco ovvero $1/3600$ di grado) e di una livella a bolla d'aria con un'incertezza massima di lettura di circa 0.5 primi di grado (ovvero $1/120$ di grado). Bussola e teodolite sono stati collocati in un'area del centro ENEA di Frascati da cui è stato possibile trapiantare il pinnacolo della cupola della Cattedrale di S. Pietro, un'antenna per le telecomunicazioni situata nella zona di Monte Mario, a Roma, e la cima di Monte Rocca Romana a Trevignano. Le distanze di questi punti sono rispettivamente di 20.2 km, 21.9 km e 54 km. La scelta di oggetti posti a notevole distanza si è resa necessaria per poter abbattere l'errore nella valutazione dell'azimut ottenuto dalle mappe geografiche, le quali, trasformando la superficie quasi-sferica della Terra in un piano

bidimensionale, apportano necessariamente delle approssimazioni alle reali coordinate geografiche di un punto. Tali correzioni influiscono nel calcolo dell'azimut in maniera tanto minore quanto più è elevata la distanza tra il punto di osservazione e il punto di cui viene misurato l'azimut.

Sottolineiamo che il calcolo dei 3 azimut, una volta recuperata l'informazione sulle coordinate geografiche mediando i valori ottenuti dai siti di Google Maps, Bing Maps e Faureragani [8], è stato ottenuto grazie ad un algoritmo che tiene conto della forma ellissoidica della Terra [2, 9].

In questi 3 casi lo scarto massimo tra la misura sperimentale eseguita con la nostra bussola e il valore ottenuto dal calcolo è stato inferiore a 0.65° , ovvero circa $1/92$ di grado.

Un successivo test è stato realizzato usando due colonne geo-referenziate dall'Istituto Geografico Militare, cioè due punti le cui coordinate sono note con la massima precisione. In questo caso, il valore di azimut di una colonna rispetto all'altra è risultato uguale a quello teorico con uno scarto di appena $12''$, ovvero circa $1/300$ di grado.

3. L'ECLISSI DEL 20 MARZO 2015 E MISURA SPERIMENTALE DELL'EFFETTO DELL'OSCURAMENTO DEL SOLE SULLA PRECISIONE DELLA BUSSOLA

Il 20 Marzo 2015, curiosamente proprio il giorno dell'equinozio di Primavera, si è verificata un'eclissi solare di un certo rilievo per l'Italia. La massima percentuale di oscuramento andava da circa il 40% delle regioni meridionali a circa il 67% di quelle settentrionali, per una durata totale dell'eclissi di circa 2 ore [10]. Una ristretta fascia del globo terrestre ha potuto godere di un'eclissi totale: ad esempio, a Reykjavík in Islanda la percentuale di oscuramento è arrivata al 97%.

A Frascati, l'eclissi ha avuto inizio poco prima delle ore 9.30. Alle 8.30 abbiamo avviato le operazioni di misura collocando la bussola sul tetto dell'edificio 2 del Centro Ricerche ENEA di Frascati.

Dopo avere verificato la messa in bolla del teodolite, è stata tralasciata la croce posta sul monte Tuscolo utilizzando il cannocchiale del teodolite stesso. Ai fini della valutazione dell'effetto dell'eclissi sulle misure eseguite con la bussola non era indispensabile puntare un oggetto particolare, né verificare un azimut assoluto, poiché la misura è di tipo relativo, ovvero, a bussola ferma (e quindi ad azimut fisso), occorreva misurare quanto variava il valore di tale azimut in funzione dell'oscuramento del Sole.

Una volta iniziata la fase di oscuramento del Sole, sono state eseguite 20 misure intervallate tra di loro da un minimo di 5 ad un massimo di 10 minuti di tempo. Per ogni misura è stata scattata una foto del sole, parzialmente occultato dalla Luna, tramite l'immagine creata da una lente di lunghezza focale pari a 2 metri e proiettata su uno schermo. La figura 5a mostra la foto del dispositivo cavalletto-lente-schermo usato per fotografare il disco solare, mentre nella figura 5b si vede il teodolite con la bussola, durante l'esecuzione di una misura.

L'azimut della croce del Tuscolo, misurato al momento in cui c'era Sole pieno, ad eclissi ancora non iniziata, ha fornito il valore di -55.27° , ovvero poco più di 55 gradi dalla direzione Sud muovendosi verso Est. Rispetto al Nord geografico, tale azimut corrisponde a 124.73° in senso orario. Nella figura 6 è riportato il grafico con tutte le misure effettuate, iniziate prima dell'eclissi e terminate poco dopo il ritorno al Sole pieno. Sull'asse delle ordinate non è riportato l'azimut assoluto, bensì la sola variazione rispetto a quella con Sole pieno, ed insieme al grafico sono mostrate le immagini del Sole parzialmente oscurato in corrispondenza a ciascuna misura. La figura 6 mostra uno scostamento di tipo sinusoidale rispetto al valore vero.



Figura 5. a) Foto dell'apparato utilizzato per riprendere l'immagine del disco solare durante l'eclissi. In alto si vede la lente fissata su un cavalletto e in basso lo schermo dove veniva proiettata l'immagine del sole (ingrandita nell'inserto), a circa 2 metri di distanza dalla lente. Da notare che, rispetto alla visione diretta del Sole, l'immagine dell'eclissi risulta invertita dalla lente. b) Foto del teodolite con la bussola collocata sopra, durante l'esecuzione di una misura.

La mancanza di punti sperimentali nella zona centrale del grafico, ovvero quando la curva sta tornando ad incrociare l'asse delle ascisse, è dovuta alla presenza di nuvole che hanno momentaneamente coperto il sole impedendo una misura accurata.

La figura 6 mostra che il massimo scostamento del valore di azimuth non si ha per il massimo oscuramento del disco solare, ma per la massima asimmetria della parte non oscurata rispetto all'asse principale della fenditura: infatti, la misura dell'azimut ottenuta con la bussola solare ENEA dipende strettamente dalla posizione del baricentro della linea di luce formata dai raggi solari che passano attraverso la fenditura (vedi la figura 2). Nel momento in cui la linea di luce non rappresenta più l'immagine (lineare) di un cerchio uniformemente illuminato, il calcolo del baricentro è naturalmente spostato nella direzione in cui il sole è meno oscurato.

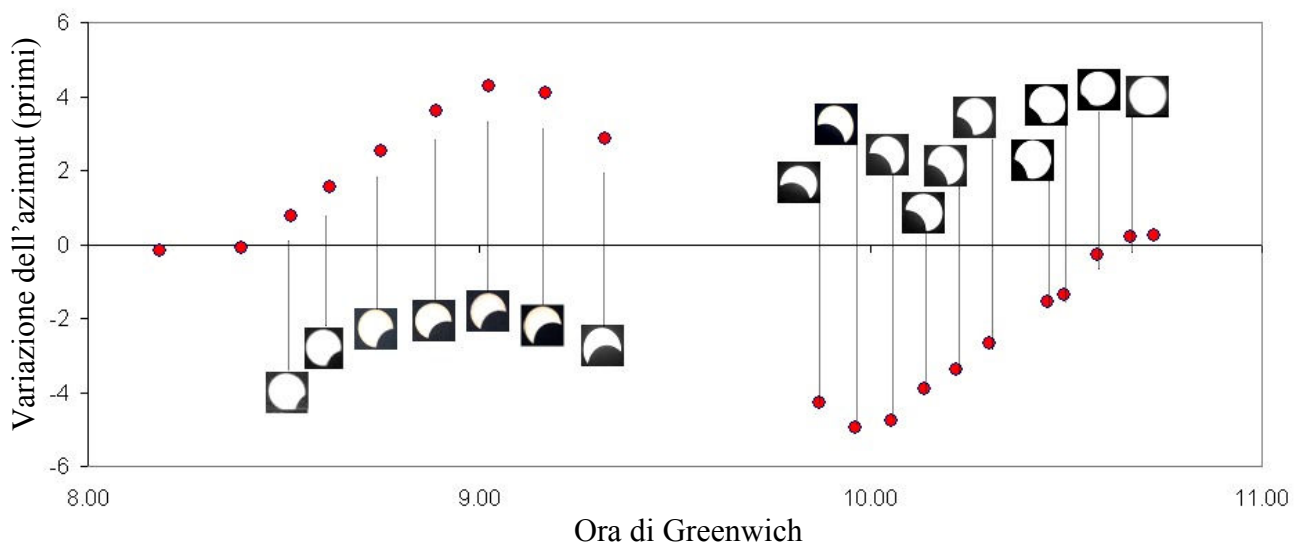


Figura 6. Andamento della variazione dell'azimut misurato dalla bussola durante le varie fasi dell'eclissi

Dal grafico è possibile osservare che il massimo scostamento del valore di azimut misurato rispetto a quello teorico è pari a poco meno di 5', ovvero circa 0.08°. Tale scostamento, verificatosi nella condizione di un oscuramento pari a circa il 35%, benché molto elevato rispetto all'accuratezza della bussola, dimostra che anche in condizioni di sole parzialmente coperto la precisione della bussola solare rimane notevolmente migliore sia di qualsiasi bussola magnetica, sia delle bussole elettroniche.

L'errore introdotto dal fatto che il disco solare sia oscurato da nuvole, o come in questo caso, dall'interposizione della Luna, era prevedibile. Tale errore, però, si è rivelato non così grave da compromettere l'accuratezza della bussola, nonostante il fatto che, data la dimensione angolare del Sole, pari a circa 32', si poteva temere, in linea di principio, un effetto molto più marcato. Il motivo per cui la bussola ha risentito solo parzialmente della copertura del Sole è spiegato in Appendice, in cui mostriamo un confronto tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti tramite una simulazione realizzata con un modello numerico.

4. CONCLUSIONI

L'eclissi del 20 Marzo 2015, oltre ad essere stata un emozionante fenomeno astronomico che ha interessato buona parte dell'emisfero boreale [10], si è anche rivelata un eccellente banco di prova per misurare gli effetti dell'oscuramento del sole sulle misure eseguite con la bussola solare ENEA. Questa bussola sfrutta un ingegnoso rivelatore elettro-ottico per determinare la direzione di vista del sole e, tramite un algoritmo fondato sulle equazioni di Keplero, fornisce l'azimut di una qualsiasi direzione di osservazione con un'accuratezza molto più elevata sia delle bussole magnetiche, sia delle più moderne bussole elettroniche [1-4].

Perché la bussola dia risultati attendibili è chiaramente necessaria la presenza del Sole, preferibilmente sgombro da nuvole.

L'influenza di un parziale oscuramento del Sole sulla determinazione della sua linea di vista è infatti potenzialmente deleteria per il corretto calcolo dell'azimut. L'eclissi di Sole è stata sfruttata proprio per valutare l'incidenza di un suo parziale oscuramento nel calcolo dell'azimut. I risultati ottenuti sono in linea con le simulazioni e dimostrano che la mancanza di un disco solare pieno introduce un errore dipendente più dall'asimmetria (rispetto alla fenditura) della parte del disco solare non coperta che dalla percentuale di disco coperto. L'errore, comunque, non è così incisivo da abbattere consistentemente la precisione dello strumento.

A fronte di un errore di circa 1/100 di grado in condizioni ottimali, infatti, la bussola ha manifestato uno scostamento di circa 8/100 di grado (pari a circa 5') che è un valore comunque migliore degli errori introdotti da bussole magnetiche (circa 1 grado) e dalle bussole elettroniche (circa 1/10 di grado).

Questo test, pertanto, ha consentito di verificare che la bussola solare ENEA può anche essere utilizzata in condizioni non ottimali di illuminamento solare, mantenendo un'accuratezza migliore di quello di altri sistemi di orientamento non basati su costosi sistemi multi-GPS.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Annamaria Gerardino dell'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del CNR di Roma per la realizzazione della fenditura tramite processo litografico, e il collega Flavio Miglietta

per le fotografie che hanno documentato l'evento, sintetizzato artisticamente nel *time lapse* qui di seguito riportato.



APPENDICE

ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI E SIMULAZIONE NUMERICA

Come già accennato, un errore nel calcolo del baricentro della linea di luce che si forma sul sensore, si riflette, tramite equazioni trigonometriche [1, 3], sul valore di azimut del piano principale verticale della bussola. L'immagine del Sole sul sensore non è circolare, bensì lineare, poiché il sistema ottico utilizza una fenditura piuttosto che una lente, pertanto il valore del baricentro è calcolato su una striscia luminosa invece che su un cerchio. Questa soluzione è vantaggiosa nel momento in cui il Sole è completamente scoperto, poiché è possibile integrare il segnale lungo le colonne, abbattendo errori dovuti a disuniformità di risposta ottica e/o elettronica del sensore stesso, oltre che ad una scarsa qualità dell'ottica (in questo caso i bordi della fenditura).

Quando, però, il Sole è parzialmente oscurato, l'integrazione dei pixel illuminati si rivela sfavorevole, poiché la discrepanza tra il valore del baricentro di un cerchio parzialmente oscurato rispetto ad un cerchio pieno è minore di quella tra una striscia uniforme ed una disomogenea.

Per valutare quanto incide la scelta di utilizzare una fenditura piuttosto che un foro circolare nel caso dell'eclissi solare, abbiamo approntato un programma di simulazione che ha riprodotto 3 situazioni: la prima, supponendo che la luce solare attraversi un foro circolare, calcola il baricentro X_b lungo le ascisse in modo canonico, secondo la formula:

$$X_b = \frac{\sum_n I_n \cdot X_n}{\sum_n I_n} \quad (1)$$

dove l'indice n si muove lungo tutti i punti del sensore ed I_n è l'intensità luminosa relativa al pixel n -esimo.

La seconda, in cui invece di un foro circolare abbiamo considerato una fenditura lineare, come nella nostra bussola, il baricentro viene calcolato facendo dapprima un'integrazione lungo le colonne e poi usando la formula (1) sul vettore integrato. Infine, la terza, procedendo inizialmente come nella seconda simulazione ma calcolando non già il baricentro bensì il picco della parabola che meglio approssima la distribuzione dell'intensità luminosa, dopo aver adeguatamente smussato la curva. Quest'ultimo metodo è quello che viene effettivamente utilizzato nell'algoritmo della bussola ENEA.

Considerando un sensore in cui almeno 200 pixel vengono investiti dalla luce del sole, il risultato è schematizzato nella figura 7, dove è riportato l'andamento della variazione sperimentale di azimut insieme agli andamenti dovuti alle 3 simulazioni.

La situazione migliore si ottiene con un'ottica che riproduce l'immagine del cerchio solare, ma anche il calcolo del baricentro eseguito sull'immagine di una fenditura tramite la formula (1) si comporta leggermente meglio dei dati sperimentali. La simulazione di quello che dovrebbe essere l'algoritmo basato sul picco di un andamento parabolico, al contrario, è palesemente in contrasto con i dati ottenuti con la bussola. In questo caso, infatti, l'errore dovuto ad un'eclissi simile a quella di Marzo 2015 arriva a superare i 16' e, soprattutto, tende a salire fino al momento in cui si inverte il segno dell'errore. L'andamento di quest'ultima simulazione, per quanto dissimile dai dati sperimentali, è ragionevole, poiché un algoritmo basato sulla posizione del picco di una distribuzione risente molto di asimmetrie indotte dall'oscuramento parziale del disco solare.

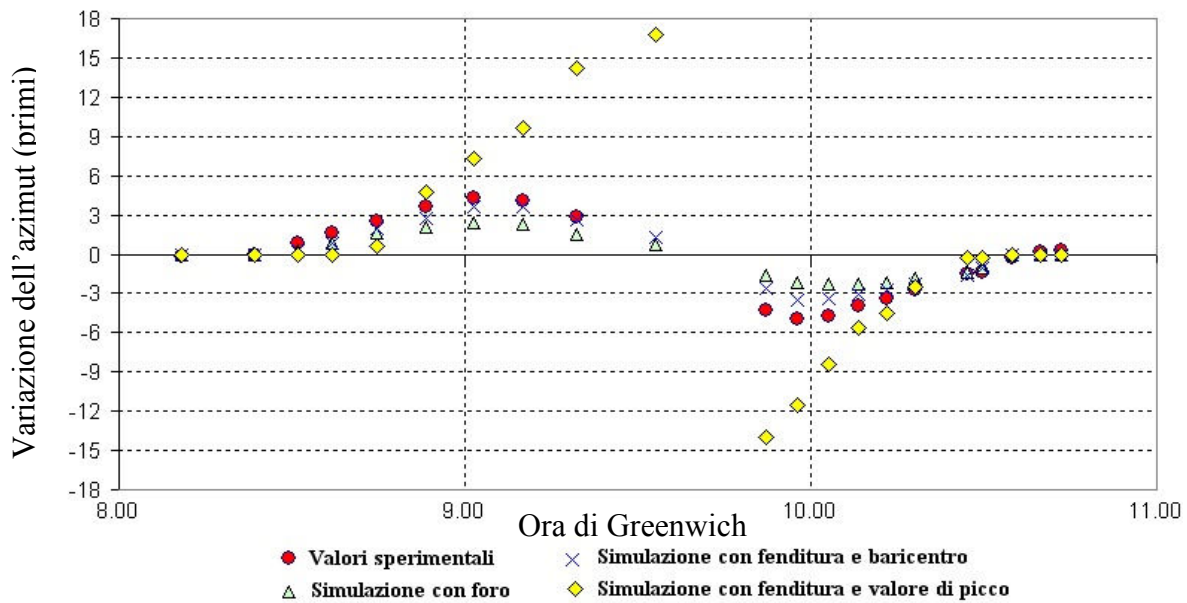


Figura 7. Variazione dell'azimut misurato sperimentalmente sulla bussola ENEA e confronto con le simulazioni di 3 diverse configurazioni di misura e calcolo.

Nella figura 8 sono mostrati alcuni grafici che rappresentano la forma della distribuzione di intensità simulata sul sensore una volta eseguita l'integrazione lungo le colonne, nei diversi momenti dell'eclissi. Come si può notare, lo spostamento del picco rispetto al centro della distribuzione è estremamente marcato (il valore di azimut è corretto quando il picco è al centro della curva), e salta improvvisamente da un valore al suo opposto quando l'ombra della Luna passa da sinistra a destra.

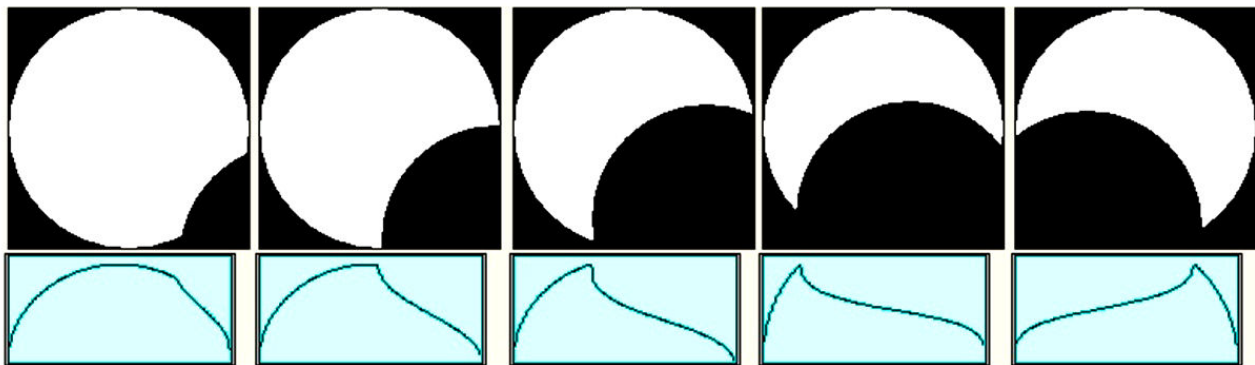


Figura 8. In alto: disegni che simulano l'oscuramento del sole. In basso: corrispondenti profili lineari dell'intensità lungo l'asse delle ascisse ottenuti con il programma di simulazione nell'ipotesi che la luce investa 200 pixel.

Nel caso dei valori sperimentali questo andamento non si osserva, gli errori sono decisamente più contenuti ed il salto in corrispondenza del passaggio della Luna da una parte all'altra del sole è molto meno evidente. In parte, ciò dipende dal fatto che il numero di pixel investiti realmente dalla luce del sole è molto minore dei 200 utilizzati nella simulazione precedente.

Per una fenditura larga $70 \mu\text{m}$, posta ad una distanza di 18 mm dal sensore, la larghezza della striscia luminosa dipende da due fattori: l'allargamento s_p dovuto all'effetto penombra (originato dal fatto che il Sole non è una sorgente puntiforme) e quello dato dalla diffrazione, s_d , causato dalle ridotte dimensioni della fenditura. Quest'ultimo è approssimativamente dato dalla formula:

$$s_d \cong \frac{\lambda \cdot d}{L}$$

dove λ è la lunghezza d'onda della luce che arriva sul sensore (pari a circa $0.35 \mu\text{m}$, per via di un filtro spettrale, posto davanti alla fenditura, che blocca la radiazione a basse lunghezze d'onda), L è la larghezza della fenditura e d la distanza tra fenditura e sensore. A causa della diffrazione, l'allargamento della striscia è di circa $90 \mu\text{m}$, che corrisponde a 16 pixel, in quanto la dimensione di un singolo pixel del sensore utilizzato è pari a $5.6 \mu\text{m}$.

L'effetto penombra dovuto alle dimensioni del Sole (che appare sotto un angolo di circa 0.5°) provoca un allargamento della striscia pari a:

$$s_p \cong 2d \cdot \tan(0.5/2)$$

Da cui $s_p = 157 \mu\text{m} \cong 28 \text{ pixel}$.

L'effetto della penombra è, dunque, dominante rispetto a quello dovuto alla diffrazione.

Le dimensioni totali della linea di luce, considerando la dimensione della fenditura stessa e i due effetti citati, è di circa $250 \mu\text{m}$, ovvero 45 pixel. La zona centrale, su cui l'intensità è costante, è pari a circa 14 pixel, dopodiché scende gradatamente fino a zero sui restanti pixel.

Per avere una simulazione abbastanza vicina alla situazione reale, dunque, abbiamo considerato una dimensione della linea di luce, pari a 25 pixel, su cui incide un'intensità costante.

Con questi parametri, il calcolo del centro della linea di luce non varia molto, rispetto alla simulazione precedente, quando si considerano i primi due algoritmi citati, ovvero quello basato sulla distribuzione circolare della luce solare e quello basato sull'equazione (1), mentre il valore dell'azimut cambia fortemente per il terzo algoritmo, che è quello utilizzato nella bussola ENEA.

In figura 9 riportiamo di nuovo lo scostamento delle misure sperimentali di azimut, accanto ai valori ottenuti con quest'ultima simulazione. Le differenze tra esperimento e simulazione, in questo caso, sono molto meno marcate, e si sentono esclusivamente nel momento di transizione dagli scostamenti positivi a quelli negativi.

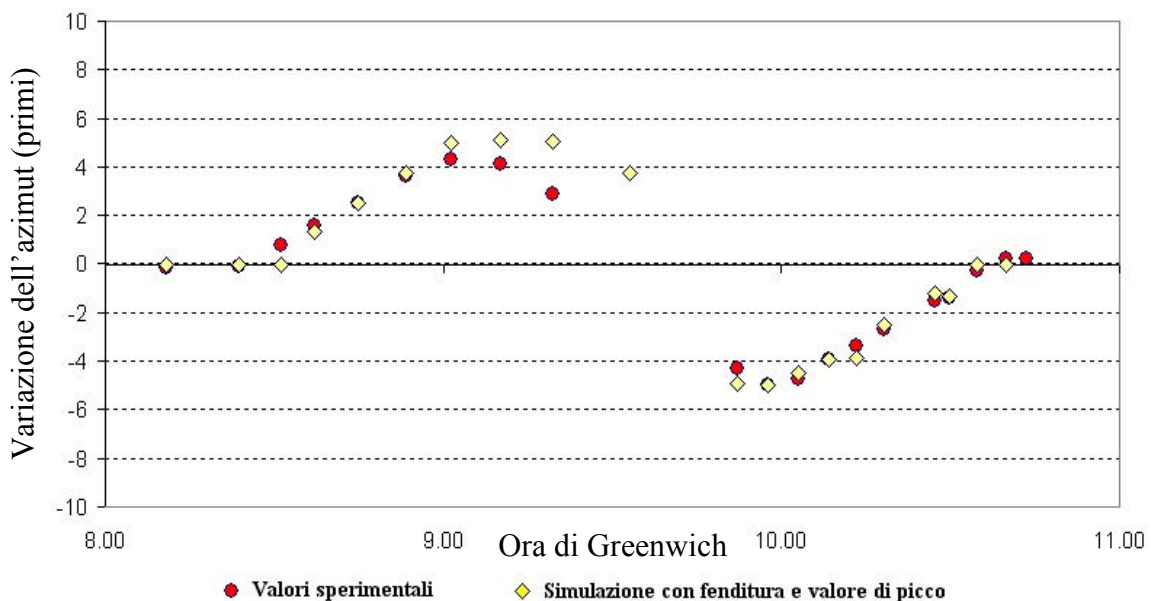


Figura 9. Variazione dell'azimut sperimentalmente misurato e confronto con la simulazione ottenuta con l'algoritmo parabolico su un sensore in cui la linea di luce si forma per una larghezza di 25 pixel.

Bibliografia

- [1] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca, “Electro-optical sun compass with a very high degree of accuracy”, *Optics Letters*, vol. 40. n. 15, pagg. 3619-3622 (2015). <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-40-15-3619>
- [2] 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”, *Rapporto Tecnico ENEA RT/2012/24/ENEA* (2012).
- [3] F. Flora, S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, A. Fastelli, G. P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, and D. Vicca, “High precision electronic solar compass,” PCT patent WO 2014102841 A1 (2014).
- [4] J. Aron, “Backwards sundial makes useful compass” *New Scientist*, vol. 227, Issue 3033, pag. 13 (8 Agosto 2015). doi:10.1016/S0262-4079(15)30912-X Vedi <https://www.newscientist.com/article/mg22730335-300-backwards-sundial-finds-true-north-better-than-magnets-or-gps/>
- [5] Vedi, ad esempio, D. Calonico, R. Oldani, “Il tempo è atomico: breve storia della misura del tempo” (Hoepli editore, Milano 2103).
- [6] C. J. Morcom, “Digital solar compass” U.S. patent 20120227273 A1 (Sept. 13, 2012). D. Bruns, D. Sandler, and M. Belenkii, “Celestial compass” U.S. patent 20070117078 A1 (May 24, 2007). C. J. Chen, “Automatic solar compass” U.S. patent 20090044418 A1 (Feb. 19, 2009). C. Christian, “Compact optoelectronic compass” NASA’s Jet Propulsion Laboratory, NASA Tech Briefs NPO-30872 (2004).
- [7] C.H. Hersom, P. Duggan, W.A. Gault, “Sun sensors using multi-pinhole overlay”, U.S. Patent 6,490,801 B1 (Dec 10, 2022), H. Ju, F. Pei, X. Li, L. Wang, “Lunar vehicle pose self-confirming method based on full-function sun-compass”, China Patent CN101344391B (Nov 5, 2011).
- [8] Le coordinate sono ricavabili sui seguenti siti:
Google Maps: <https://www.google.it/maps>
Bingo Maps: <https://www.bing.com/maps/>
Faureragani: <http://www.faureragani.it/mygps/getlatlonita.html>
- [9] W. Torge, J. Müller, “Geodesy” (Walter de Gruyter, 2012).
- [10] Vedi ad esempio https://it.wikipedia.org/wiki/Eclissi_solare_del_20_marzo_2015 Vedi anche: <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEplot/SEplot2001/SE2015Mar20T.GIF>

Edito dall'ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

www.enea.it

Pervenuto il 30.11.2015

Stampato presso il Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
Finito di stampare nel mese di novembre 2015