

Astronomia solare e ottica con il foro stenopeico

Pinhole solar imaging and principles of optical astronomy

Costantino Sigismondi
(Observatorio Nacional, Rio de Janeiro,
ICRANet / Sapienza e UPRA, Roma)

Abstract

The observation of the Sun with pinholes was started in Florence's Cathedral in 1475, and in Ulugh Beg observatory in Samarcand in 1424-29, well before the invention of the telescope, for measuring the solar position and the variation of the obliquity of the Earth's axis. Later, with Kepler, pinholes' telescopes were used to follow the solar spots when the telescopes made by Galileo were not available. The use of pinholes in positional solar astrometry continued successfully up to 1800 in some great Italian and French Churches. Nowadays by using pinholes it is possible to show the principles of positional astronomy and imaging to students with instruments very easy to be built at almost no cost. The concepts of focal length, best focus, angular resolution, atmospheric seeing and atmospheric transmittance can be verified with such simple devices. Such pinhole telescopes have been built by primary-school students at the Astronomical Observatory dedicated to the Pope astronomer Sylvester II, located in Bukowiec, Poland, which is at its third year of activity. The largest solar spots have been observed clearly with these instruments, demonstrating the principles discussed in this presentation. The light cast by one of this devices with 70 m of focal length and 1 cm of diameter has permitted to repeat the experiences on the diffraction of the light, made in 1648 by the Jesuits Riccioli and Grimaldi.

Resumo

A observação do Sol com furos estenopeicos foi iniciada na Catedral de Florença, em 1475, e no Observatório de Ulugh Begh em Samarcanda em 1424-29, bem antes da invenção do telescópio, para medir a posição solar e a variação da obliquidade do eixo da Terra. Mais tarde, com Kepler, telescópios com furos estenopeicos foram usadas para acompanhar as manchas solares, quando os telescópios feitos por Galileu não estavam disponíveis. O uso de furos estenopeicos em astrometria solar de posição continuou com sucesso até 1800 em alguns grandes Igrejas italianas e francesas. Hoje em dia, usando furos estenopeicos é possível mostrar os princípios da astronomia posicional e da formação das imagens com instrumentos fácil a ser realizados pelos jovens alunos e sem custo. Os conceitos de distância focal, melhor foco, resolução angular, turbulência atmosférica e transmitância atmosférica podem ser verificados com tais dispositivos simples. Esses telescópios com furos estenopeicos foram construídos por estudantes do ensino primário no Observatório Astronómico dedicado ao Papa astrônomo Silvestre II, localizado em Bukowiec, na Polônia, que está em seu terceiro ano de atividade. As maiores manchas solares foram observados claramente com estes instrumentos, demonstrando os princípios descritos nesta apresentação. Um destes dispositivos com 70 m de comprimento focal e 1 cm de diâmetro permitiu repetir as experiências sobre a difração da luz, feitas em 1648 pelos Jesuítas Riccioli e Grimaldi.

Introduzione

Le immagini stenopeiche delle macchie solari sono menzionate sia da Keplero,[1] che da Galileo,[2] ed è sorprendente che non siano state studiate in questo modo molto tempo prima dell'invenzione del telescopio. Un luogo candidato a questa scoperta poteva essere l'osservatorio di Ulugh Beg a Samarcanda costruito tra il 1424 e il 1429.[3]

Nella Cattedrale di Firenze nel 1475 Toscanelli[4] aveva installato nella lanterna della cupola del Brunelleschi un gnomone a foro stenopeico che avrebbe consentito di vedere le maggiori macchie.[5]

L'immagine del Sole prodotta da un foro stenopeico può raggiungere una ottima risoluzione angolare, come già presentato dall'Autore nel 2002.[6] All'Osservatorio di Bukowiec in occasione delle giornate dedicate all'astronomia solare e a Silvestro II dal 13 al 16 maggio 2013,[7] sono state ottenute le immagini solari più grandi e a maggior risoluzione del Sole mai realizzate, dall'enorme valenza didattica.

La particolare coerenza della direzione dei raggi luminosi consente esperienze di diffrazione della luce da ostacoli posti ad una certa distanza dallo schermo, come descrisse il Gesuita p. Grimaldi nel 1665.[8]

L'immagine stenopeica del Sole della scuola di Bukowiec

La migliore immagine è stata realizzata da un dispositivo a specchio piano alluminato solo esternamente dal diametro di 1 cm, alla distanza di 68 m. La foto di seguito a 8 bit, 256 livelli è stata trattata con IRIS per risaltare le macchie e comparata con l'immagine di SDO. Ha un livello di background di 90 conteggi ed un massimo attorno ai 160.

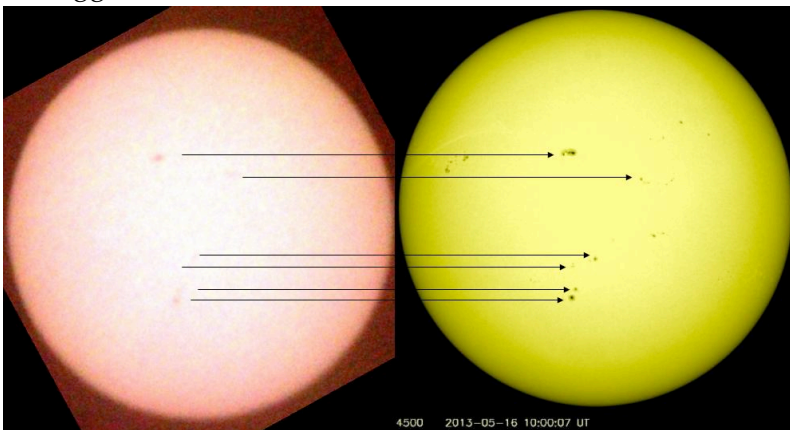


Fig. 1 Le macchie solari osservate col pinhole a Bukowiec il 16 maggio 2013 (a sinistra) e dal satellite SDO a destra.

La camera oscura consisteva in un corridoio di 55 m aperto da un lato, da questa apertura veniva la luce di background e quella del pinhole. Riducendo l'apertura del pinhole si sarebbe potuto ridurre anche il background, per campionare al meglio la funzione di oscuramento al bordo (LDF) del Sole che tra 32.5 e 51.5 secondi d'arco dal bordo, vale tra il 52 e il 57% dell'intensità registrata al centro.[9] Comunque in queste immagini l'intensità al bordo vale il 58% di quella al centro, che è esattamente quello che ci si attende integrando la LDF su un pinhole di 1 cm ed un diametro di 62 cm, corrispondenti a 1897 secondi d'arco in cielo. Quindi l'integrazione e la conseguente media avviene su $1897''/62=30''$, 30 secondi d'arco.

Anche le macchie subiscono la stessa convoluzione: il loro contrasto viene mediato entro un raggio di 15''. Le più piccole, perciò, non risultano visibili, ed anche quelle vicine al bordo. Ad occhio nudo, grazie al fatto che l'immagine era in movimento su una parete bianca, si potevano notare almeno otto macchie, rispetto alle sei evidenziate confrontando la foto in camera oscura con l'immagine dallo spazio.

Si fa notare anche che all'osservatore non allenato, cioè che non conosce la granulazione solare e la struttura delle macchie con la penombra, la visione stenopeica di queste macchie non appare peggiore di quella all'oculare di un telescopio, ma molto più confortevole da studiare e discutere con venti o trenta persone in una sola volta. La penombra delle macchie può essere osservata per le macchie più grandi.

La risoluzione angolare dell'immagine

Secondo il criterio di Rayleigh il foro stenopeico di 1 cm ha un limite di separazione (risoluzione angolare) tra due sorgenti uguali dato dalla diffrazione che per la luce visibile vale 10''. Il medesimo foro copre un angolo di 30'' se visto da una distanza di 68 m. In un cerchio di questo angolo tutti i dettagli dell'immagine sono mediati tra loro, sia la granulazione (che scompare) che le macchie, che la LDF.

La risoluzione angolare di questa immagine non è, pertanto, limitata dalla diffrazione, ma solo dal diametro del foro in rapporto alla distanza. Dalle immagini verifichiamo che risultano visibili macchie di 15" di diametro, come le più piccole osservate il 16 maggio 2013 attorno alle 10 UT, ma verifichiamo altresì che la struttura multipla della macchia maggiore che si sviluppa per oltre 30" non viene risolta.

La turbolenza atmosferica

L'immagine proiettata sul muro soffre del movimento dell'aria lungo tutto il cammino ottico dal foro allo schermo, ed anche di quello che precede il foro: tra il foro e il Sole.

A seconda della distanza dal foro si presentano fenomeni a frequenza e scala differente, prevalendo i più rapidi che avvengono presso il foro stenopeico lungo la linea di vista (moti convettivi dell'aria). Lo studio di questo fenomeno si può fare con un video ad alta risoluzione temporale.

L'esperienza della diffrazione "alla Grimaldi"

Sull'immagine stenopeica a 68 metri prodotta con un foro di 1 cm di diametro sappiamo che sullo schermo i raggi luminosi in ogni punto dell'immagine non divergono tra loro più di 30 secondi d'arco. Lungo tutto il cono di luce proiettato dal foro stenopeico questa proprietà cambia proporzionalmente con la distanza: a metà percorso un cerchio di 1 cm comprende raggi luminosi con 60 secondi d'arco di divergenza e così via, fino al foro stesso da cui si dipartono raggi divergenti tra loro 1897 secondi d'arco, ovvero il diametro angolare del Sole.

In altre parole in ogni punto dell'immagine del Sole ottenuta a grande distanza dal foro i raggi sono quasi paralleli, come quelli da una sorgente puntiforme: la condizione per non avere effetti di penombra, ma solo ombre nette.

Ponendo una tazza di tè fumante ad una decina di metri dallo schermo, su una sedia, oltre ai pennacchi convettivi dell'aria, si sono osservate benissimo le frange di diffrazione che furono studiate di nuovo da Fresnel nel 1818,[10] quando

la teoria ondulatoria della luce riprese piede, dopo il lungo stop dovuto alla prevalenza della teoria corpuscolare di Newton.[11]

Molto evidente è il contorno brillante dell'ombra, che può essere visto con facilità da tutti. Più attenzione bisogna porre alle frange luminose e oscure che completano il contorno.



Confronto con un LASER

Ho effettuato esperimenti per misurare la diffrazione di Fresnel da bordo opaco al finito sia con la luce stenopeica, sia con la luce LASER.

Il vantaggio del LASER sta nella monocromaticità della luce. Con il foro stenopeico, senza perdere troppo in luminosità, abbiamo usato il filtro Kodak Wratten 23 A che seleziona la lunghezza d'onda della luce $\lambda > 560$ nm.[12]

Il nostro occhio non vede luce con $\lambda > 700$ nm, il che completa l'ampiezza della banda osservata, di circa 140 nm.

Usando, viceversa, una sorgente LASER che sia quasi puntiforme, la diffrazione a grandi distanze gioca un ruolo molto grande nella forma del pennello luminoso. Un forellino

di 2 mm di diametro per un LASER, ad esempio, produce una divergenza di 50 secondi d'arco che è maggiore di quella ottenuta con il nostro foro stenopeico.

Conclusioni

L'esame dell'immagine stenopeica del Sole ottenuta in una camera oscura piuttosto lunga, con 68 m di lunghezza focale complessiva, ha permesso di evidenziare molti fenomeni che abbracciano molti concetti di ottica astronomica, oltre che di fisica solare. Dalla visione di gran parte delle macchie solari con una risoluzione angolare di 30 secondi d'arco, all'integrale di convoluzione, alla ripetizione delle esperienze di Grimaldi sui bordi dell'ombra di un oggetto investito dalla luce stenopeica, a causa della diffrazione della luce.

Il foro stenopeico, ed il suo equivalente a riflessione, potevano essere usati molto prima dell'invenzione del telescopio, ma, come sappiamo, soltanto dopo il 1609 i pinholes sono stati usati nell'osservazione delle macchie solari. Keplero e prima di lui Tycho usavano uno strumento a foro stenopeico solo per la misura del diametro solare, quindi di una proprietà globale dell'immagine, senza indagare i dettagli della superficie poiché la focale ridotta a soli 4 metri di questi strumenti ne impediva l'uso per imaging.

Il limite per l'uso di sistemi a riflessione viene invece dall'argentatura, una procedura messa a punto solo verso la fine del XVII secolo e perfezionata con l'alluminatura nel 1935-40 da I. Strong.[13]

L'immagine stenopeica del Sole mostra la funzione di oscuramento al bordo del Sole, la rotazione del Sole se osservata in giorni successivi, e la misura del diametro solare su cerchio orario, effettuabile individuando la direzione del moto orario del Sole quando lo specchio con il foro stenopeico è montato in una posizione fissa.

- [1] C. Sigismondi, F. Frascchetti, *The Observatory* **121**, 380 (2001).
- [2] G. Galilei, *Istoria e dimostrazioni sopra le macchie solari* [...], Roma (1613); cfr.
<http://193.206.220.110/Teca/Viewer?an=367710>
- [3] H.-J. Bode, *J. of Occultation Astronomy* **2**, 16 (2013).
- [4] P. Ranfagni, A. Righini,
<http://www.arcetri.astro.it/~ranfagni/gnomone/gnomo.html>
- [5] Durante il grande minimo solare noto come minimo di Spörer (1420-1570) è probabile che non si sarebbero viste macchie, specie con un foro stenopeico di 5 cm quale quello di Firenze, che da 90 metri da' un angolo di 114 arcsec, o con il foro di Ulugh Beg, di cui non si conosce la dimensione.
- [6] C. Sigismondi, *Am. J. of Physics* **70**, 1157 (2002).
- [7] Cfr. la *fotorelacji* in Ingelse
<http://www.millsky.home.pl/obserwatorium/?p=1235>
- [8] F. M. Grimaldi, *De Lumine coloribus et iride*, Bologna (1665). Cfr.
<http://www.scienzagiovane.unibo.it/scienziati/grimaldi-2.html>
- [9] J. B. Rogerson, *Astrophys. J.* **130**, 985 (1959).
- [10] Cfr. J. L. Basdevant
<http://www.bibnum.education.fr/files/fresnel-analyse-36.pdf> *Il observe d'abord l'ombre portée à longue distance d'un fil de fer éclairé par une source ponctuelle. Que la source soit ponctuelle est essentiel car cela protège des effets de pénombre des sources étendues.*
- [11] I. Newton, *Opticks*, London (1704).
- [12] Cfr. <http://www.newportglass.com/kodak/kod23A.htm>
- [13] http://www.treccani.it/enciclopedia/alluminatura_%28Dizionario-delle-Scienze-Fisiche%29/