

Misurare il Sole: storia recente dell'eliometria

Costantino Sigismondi

prof.sigismondi@icra.it

(ICRA/Sapienza Università di Roma e ITIS G. Ferraris, Roma)

Submitted April 14th 2023, revised and accepted April 20th

Abstract The diameter of the Sun has been measured accurately since the end of XIX century, when the hypothesis for energy production was by gravitational contraction. The possibility of a larger Sun in 1567, after the annular eclipse seen by Clavius in Rome, was investigated with celestial mechanics, eclipse data mining and eclipse observational campaigns. In the Solar Disk Sextant balloon-borne experiment a telescope with a wedge before the objective repeated the geometry used in XIX century to reach the 0.01'' accuracy without atmospheric turbulence. The Baily's beads apparition/disparition timing during central eclipses are much less affected by turbulence, and in the last 4 decades special missions were dedicated to record this phenomenon. A number N of Baily beads improve the definition of the solar diameter by $\sim 1/\sqrt{N}$ with respect to the sole totality duration. The hybrid eclipses, annular total or broken annular, offer a larger number of Baily's beads, achievable with a smartphone VGA 4x ISO 100 steady and continuous video, through the inspection of the Sun's ghost image. As participant to this historical phase of the solar astrometry I review the Sextant, the Astrolabes and the Eclipses methods. According either to gravitational contraction and to nuclear fusion theories the consequent variation of the solar diameter would not be observable even in a century, but for an accurate definition of the solar diameter the measures have been done; the "constant" diameter was 1919.26'' in 1891 and 1919.98'' in 2015.

Sommario Eclissi con perle di Baily, astrolabi solari ed eliometri con prismi sono fenomeni e strumenti incontrati assieme ai protagonisti di questa fase della storia della misurazione del Sole. Tanto a fine ottocento quanto oggi il diametro solare –se legato all'evoluzione stellare sia da contrazione gravitazionale globale, sia da fusione nucleare- non dovrebbe essere osservabile nelle sue variazioni. La possibile maggior dimensione del Sole ipotizzabile durante l'eclissi anulare del 1567, che ebbe come unico testimone autorevole il padre Clavio a Roma, ha aggiunto agli studi sulla variazione secolare dell'attività solare anche quella del suo diametro. Errori di misura, difficoltà intrinseche degli esperimenti e analisi dati complicate, sono raccontate da chi ha partecipato a questo studio durante l'ultimo quarto di secolo. Il diametro solare nel 1891 era di 191.26'' e 1919.98'' nel 2015. Poiché il numero N di perle di Baily durante le eclissi centrali aumenta la precisione della misura del diametro solare di $\sim 1/\sqrt{N}$ un video VGA ISO 100 stabile e continuo, tramite la ghost image del Sole ne può cogliere molti durante un'eclissi ibrida anulare-totale.

Keywords: Sun: radius, Baily beads, astrolabe, heliometer, hybrid eclipses.

Misurare il Sole con la Luna

Alla fine del millennio scorso, era il 1999, andai a Monaco di Baviera a vedere l'eclissi totale di Sole. Subito dopo ottenni una borsa di studio dall'Osservatorio di Roma a Monte Mario per studiare a Yale negli Stati Uniti il diametro del Sole mediante le eclissi. Così nel 2000 partii per l'America, per andarci a lavorare.

Il fascino delle eclissi aveva ridato vita alla passione per l'Astronomia per la quale avevo fatto le mie scelte scolastiche, prima, e universitarie, poi.

Andai, dunque, in America con il seguente bagaglio: trent'anni, vestiti pesanti per l'inverno continentale, tanta astronomia sui libri (laurea e dottorato in Fisica teorica) e osservata al mio telescopio, un'eclissi totale osservata dal vivo. I primi approcci con il Nuovo Mondo, da emigrato, o cervello in fuga, come si usava dire, furono buoni. In realtà non avevo per niente intenzione di fuggire dall'Italia, era solo l'occasione che mi si era presentata di andare fuori per lavoro.

Il tema della borsa di studio era proprio quello "della misura del diametro solare con le eclissi di Sole" e si intendeva le eclissi storiche.

L'idea che c'era dietro questa borsa era quella di riprendere le analisi fatte nei decenni precedenti per vedere se si poteva mostrare che il Sole, nel passato, aveva cambiato diametro.

Adesso, dopo 24 anni, vedo le cose da una prospettiva più ampia, e ve la racconto in questo articolo.

- 1) il diametro solare è una delle "costanti" astronomiche di riferimento, sia nei libri che nei programmi spaziali.
- 2) questo valore -costante- è di $1919.26''$ ad una Unità Astronomica. (si tratta di un diametro angolare, ma può essere tradotto in chilometri, circa 1 milione e 392 mila).
- 3) e qui viene il bello: questo valore è stato misurato da A. Auwers nel 1891!

Tra il punto 2 e il punto 3 possiamo mettere tutta l'essenza del programma dei corsi di Fisica, ossia cos'è l'incertezza di una misura e come si indica.

2a) quindi diciamo che se la misura del diametro solare è 1919.26" significa -se non è stato aggiunto altro- che è compresa tra 1919.25" e 1919.27".

Ossia su sei cifre significative l'ultima è incerta di una unità. Una precisione di una parte su duecentomila, quindi:

2b) essendo pari a 1.4 milioni di km quella parte è 7 km.

Conclusioni: la comunità astronomica internazionale considera il diametro del Sole costante entro +/- 7 km, tanto nel 2000 quanto oggi, basandosi su una misura del 1891.

La sua misura usando la Luna (quindi le sue eclissi) sarebbe servita a porre un punto fermo su questo parametro.

Il diametro del Sole alla fine del secolo della termodinamica

In questo secondo paragrafo della saga del diametro solare facciamo un passo indietro e ci mettiamo nel 1891.

In quell'epoca l'ottica astronomica aveva raggiunto la perfezione tecnica su tutti gli strumenti professionali.

Erano tutti pezzi di artigianato pregevolissimi.

Ogni telescopio, lungo fino a 20 metri, era meccanicamente equilibrato in modo da poter essere spostato con un mignolo, e le sue lenti lavorate fino alla precisione massima di " $\lambda/10$ ", cioè 1/10 della lunghezza d'onda della luce, cioè 50 nanometri. Gli strumenti ottici di adesso, a controllo numerico, non sono migliori, ma sono cambiate le tecniche osservative, con l'avvento della fotografia elettronica.

Quando una Università crea un Osservatorio Astronomico, e fa costruire un telescopio, si ha in mente un programma osservativo, degli obbiettivi scientifici, a seconda dei quali si progettano le caratteristiche dello strumento.

Ebbene a Goettingen, dove lavorava Auwers, Schur e Ambronn avevano progettato un eliometro (=misuratore del Sole) munito di un prisma davanti alla lente obbiettiva grande quanto la lente. Teniamo presente che il progetto, lo strumento e i risultati erano talmente buoni che furono replicati a partire dal 1984 alla NASA nel progetto SDS a cui ho partecipato anche io dal 2000.

Questo strumento del 1891 doveva misurare il diametro solare con la precisione di qualche chilometro. Ma perché?

La Germania dell'Ottocento è stata la patria di molti fisici che hanno fatto la storia della Termodinamica, come Walter Nernst, Rudolf Clausius, Ludwig Boltzmann, August Otto ...

Lo studio del calore come energia sfruttabile nasceva dalla rivoluzione industriale e tutti i teoremi che riguardano energia interna, energia libera, entalpia... servivano -nella pratica- a sapere come meglio sfruttare l'energia dei motori termici.

Poi i fisici teorici ne hanno fatto un mondo a sé, e la scuola e l'università non lo hanno presentato sempre nel modo più accattivante, che è sempre il processo storico.

La termodinamica nasceva da esigenze pratiche dell'industria, invece, e dall'idea che con una caldaia si voleva ottenere il massimo rendimento possibile. Per fare ciò bisogna conoscere bene come si comporta il vapore, e quindi tutto sui gas.

Già alla fine del seicento Robert Boyle aveva scoperto che comprimendo un gas questo diventava più caldo, la legge $V \cdot T = \text{costante}$ è la sua, e fu trovata e provata con tantissimi esperimenti.

A metà dell'Ottocento si era giunti alla conclusione che il Sole doveva emettere energia per questo tipo di processo.

Solo che a comprimere il suo gas, incandescente, era la sua stessa forza di gravità. Si chiama "contrazione gravitazionale" il processo a cui si attribuiva la produzione dell'energia solare.

La stima che avevano fatto i fisici teorici sul "carburante" a disposizione del Sole era che la sua contrazione sarebbe stata sufficiente per altri 100 milioni di anni a darci luce e calore.

Quindi $1.4/100=0.014$ km/anno= 14 metri all'anno, era il ritmo di contrazione del diametro del Sole, che qualunque studente di fisica avrebbe potuto stimare sulla base dei dati termodinamici, forniti, questi ultimi, dal professore!

Ora, generalmente, dei professori ci si fida. Specialmente se hanno i baffi all'insù, la barba bianca e gli occhialetti, come quelli delle Università di oltre 150 anni fa.

Si fidavano tutti, infatti, ma allo stesso tempo si facevano esperimenti per vedere se era vero quello che dicevano...

Se, infatti, il ritmo di contrazione del Sole era di 14 metri all'anno, non era possibile misurarlo con gli strumenti ottici di allora, e anche oggi vale la stessa cosa. Sui 14 chilometri il discorso diventa più probabile, ma ci sarebbero voluti mille anni prima che il Sole si fosse contratto di tanto.

Quindi come inquadriamo il programma scientifico di Auwers, Schur e Ambronn all'Osservatorio di Goettingen? Il diametro del Sole non è qualcosa che è bello di per sé... ma è un valore che se cambia fa cambiare la Fisica... e se non cambia, al più, la conferma.

Termodinamica classica e nucleare

Se alla fine dell'Ottocento dalla misura del diametro solare non ci si poteva aspettare che una variazione di 14 metri all'anno, ciò nonostante si fece di tutto per misurarlo con la massima precisione possibile, che si riteneva essere di ± 7 chilometri.

Tra il 1891 e la prima metà degli anni trenta ancora un tedesco, Albert Einstein, compie una rivoluzione vera e propria con la Teoria della Relatività (1905-1915) che trova la sua applicazione nella Termodinamica proprio con la sua formula più famosa $E=mc^2$. Negli anni trenta del Novecento la fonte di energia del Sole viene compresa meglio ed è la fusione

nucleare che, a differenza della contrazione gravitazionale, implica una variazione del diametro solare annuale ancora più piccola. A mano a mano che la nuova fisica, quella nucleare, si faceva spazio, prima negli articoli scientifici, poi nelle aule universitarie e poi nelle scuole... la questione sulle variazioni del diametro solare perse di interesse. Le misure di Auwers, se vogliamo, ci davano il suo valore, e la teoria dell'evoluzione stellare ci diceva che non cambiava, se non in miliardi di anni. Nel 1978 un fisico americano, John A. Eddy (1931-2009) riprese in mano la questione del Sole variabile anche dal punto di vista delle sue dimensioni. E lo fece proprio a partire dall'osservazione di un'eclissi, quella del 1567, osservata da Cristoforo Clavio a Roma.¹

Clavio non riporta il luogo di osservazione, probabilmente perché si trattava proprio dove insegnava,² e anche se quel giorno era mercoledì dell'ottava di Pasqua, vacanza per gli studenti di allora, era ragionevole che gli studenti e il professore fossero insieme per l'occasione -unica nella vita, e unica anche per circa sei secoli a venire- di un'eclissi centrale proprio a Roma. Gli studenti, infatti, abitavano nell'Università, visto che erano quasi tutti allievi Gesuiti, e una volta si viaggiava con molta più difficoltà di oggi, quindi avevano trascorso la Pasqua lì.

Clavio ci dice che al momento della totalità -che lui conosceva perché la aveva già vista a Coimbra il 21 agosto 1560- rimase una luce che abbracciava -verbo *amplector* in Latino- tutto il Sole. Eddy interpretò questa frase come se Clavio avesse osservato un'eclissi anulare.

Altri scienziati sostennero che Clavio avesse osservato la corona solare interna, e non la fotosfera, quindi l'eclissi era totale.

¹ J. Eddy, Boornazian e Clavio, *Sky and Telescope* 1980.

² Adiacente a piazza del Collegio Romano, nella sede precedente al 1584.

I meccanici celesti subito si misero ad esaminare le condizioni geometriche di quella eclissi e trovarono -al meglio delle loro possibilità computazionali- che la Luna era ad una distanza tale che l'eclissi poteva essere sia anulare che totale. Era totale dove la Luna era più vicina alla Terra (al meridiano, cioè non lontano da Roma, visto che l'eclissi fu alle 11) e anulare prima e dopo, quando la rotazione terrestre allontanava la superficie della Terra dalla Luna: **si trattava di un'eclissi ibrida.**

Il punto restava questo: Clavio, vedendo un cerchio attorno al Sole, descriveva la fotosfera o la corona solare interna?

Se stava descrivendo la fotosfera il Sole, nel 1567, doveva essere più grande di oggi di 4", cioè -rispetto a 1919.26", $400 \times 7 = 2800$ km più grande.

Questa è la provocazione che Eddy dava al mondo scientifico nel 1978, ed è il motivo per cui io fui chiamato in America nel 2000, per capire se -tramite le eclissi- si poteva raggiungere una misura certa del diametro solare, e quale.

Per il Sole c'è una fisica diversa?

C'è sempre la tendenza a far proprie le certezze di una generazione di scienziati.

Specialmente se (quasi) tutto collima con la teoria vigente.

Eppure i fisici si sono ormai abituati a studiare a fondo un problema non solo teoricamente (a tavolino) ma anche sperimentalmente. Le osservazioni hanno la precedenza e poi sono **i fenomeni che devono essere spiegati dalla teoria.**

I fenomeni sono ciò che noi vediamo e misuriamo, e la teoria e come noi li comprendiamo e capiamo. La teoria è potente perché può prevedere dei fenomeni che non conosciamo ancora, ma può capitare spesso che osserviamo dei fenomeni per cui non esiste ancora una teoria.

Dunque la fisica "utile" non è solo quella sperimentale né solo quella teorica...

C'è da dire che oggi, nel 2023, siamo ad un punto tale della Storia della Fisica che, da una parte siamo consapevoli del progresso esponenziale sperimentato in molti campi, e dall'altra sappiamo che il 95% dell'Universo gravitante ci è sconosciuto. Si tratta sia della Materia Oscura -preconizzata nel 1933- che dell'Energia Oscura, responsabile dell'espansione accelerata dell'Universo, riconosciuta dal 1998. Non sappiamo che fisica hanno né l'una né l'altra, ma sappiamo che ci sono. I fisici sperimentali sono all'opera, quanto i teorici, per "conquistare" questo vastissimo campo della conoscenza.

A scuola e all'università possiamo insegnare come funziona solo il 5% dell'Universo.

Roy Kerr nel 2016 ha detto *"questo è il momento buono per i giovani per lavorare nella Fisica: è ancora tutto da scoprire!"*

E' vero, ed è vero che oggi ci sono molte più risorse rispetto a ieri, anche economiche, investite nel campo della scienza.

Tornando al diametro del Sole, nel 1980 si era ormai aperto un dibattito, prevalentemente in America, che avveniva a colpi di articoli su Nature, Science, Sky and Telescope... sul diametro del Sole variabile.

Eddy, studioso del clima, aveva portato il discorso sulla piccola era glaciale (1645-1715) in Europa come indizi che qualcosa cambiava nella nostra stella su scale temporali più brevi dei miliardi di anni.

Che ci fossero le macchie solari si sapeva bene, e che queste presentassero delle ciclicità pure, ma -allora come oggi- che il Sole potesse influenzare direttamente le variazioni del clima terrestre non era chiaro. L'indicazione che veniva dall'eclissi del 1567 era che -forse- la variazione di diametro solare poteva essere correlata con la **variazione della "costante solare"** ossia l'output energetico del Sole, 1361.1 W/m^2 ,³ fuori dall'atmosfera

³ Gueymard, C.A., *Revised composite extraterrestrial spectrum based on recent solar irradiance observations*. Sol. Energy **169**, 434-440 (2018).

e su una superficie perpendicolare ai raggi del Sole.

Sarebbe bastata una variazione di una parte su diecimila per qualche decennio, nella costante solare, per indurre modifiche osservabili nel clima terrestre.

Ma il diametro non può variare se non per un processo che ha luogo nella parte più esterna del Sole, perché la fusione nucleare non dà queste variazioni.

La Fisica galileiana è la stessa ovunque.

La Politica e il Sole

Lo studio dei ghiacciai che avanzavano e regredivano durante i secoli riprese slancio proprio negli anni Ottanta del Novecento. Si era visto, per esempio, che a fine Ottocento alcuni ghiacciai alpini avevano fatto una puntatina verso valle di diversi chilometri, per poi ritornare indietro velocemente. Per altri ghiacciai in altri continenti non era la stessa cosa.

Si pensava anche che il clima si stesse raffreddando, sulla base dell'analisi dei dati planetari allora disponibili.

Poi nel 2000, quando arrivai in America, era in corso la campagna elettorale e i Repubblicani presentavano George W. Bush, mentre i Democratici proponevano Al Gore, al posto di Bill Clinton che aveva completato già due mandati. Al Gore basò la sua campagna elettorale sull'ambientalismo e sulla tesi del riscaldamento globale dovuto all'uomo.

Gore perse le elezioni, ma aveva mosso una macchina troppo grande in cui a temi ecologici giusti, si erano associati interessi economici di parte.

Già in quegli anni, nel gruppo di ricerca di cui facevo parte, si diceva chiaramente che lo studio del diametro solare non avrebbe avuto fondi se l'opinione pubblica avesse ritenuto l'uomo responsabile unico delle variazioni climatiche globali.

Allo stesso tempo si diceva che l'energia⁴ che l'uomo stava

⁴ Tecnicamente la potenza in Watt, cioè energia per unità di tempo.

liberando mediante i carburanti fossili era già pari ad una parte su diecimila di quella che la Terra riceveva dal Sole.

Se il Sole lo si conoscesse perfettamente entro una parte su diecimila, visto che il clima è un equilibrio delicatissimo tra molti fattori, si potrebbe dire che la responsabilità del cambiamento climatico è tutta umana perché gli altri termini restano invariati, ma poiché questa conoscenza non la abbiamo... tutta la colpa all'uomo non la possiamo dare.

Questo dice la ragione, ma nel frattempo l'economia ha preso delle direzioni che hanno inquinato di più il pianeta, con una produzione di rifiuti che è molto maggiore di venti anni fa sia in senso assoluto, che relativo (siamo di più e produciamo ognuno più rifiuti).

La NASA e il diametro solare

Nell'ultimo quarto di secolo la NASA ha investito nella fisica solare, sì, ma nel diametro solare molto poco...

Il progetto SDS dal 1984 prevedeva un prisma davanti all'obiettivo che era costato 100 mila dollari. SDS veniva lanciato periodicamente un pallone stratosferico dal New Mexico, a bordo del quale c'era un telescopio solare che puntava ed osservava in automatico, con cui si misurava il diametro solare usando 5 punti del suo bordo. Il lancio dei palloni aveva anche dei costi, così come le trasferte degli scienziati. L'analisi dei dati era parte del lavoro di routine degli scienziati, ma ha un costo pure quella.

Del cerchio si conoscono solo 5 punti, non la figura completa di cui si deve misurare il diametro.

SDS significa Solar Disk Sextant, dove per Sextant si intendeva uno strumento capace di misurare angoli, l'angolo formato dal disco solare visto da terra, appunto. Davanti ad un telescopio Schmidt-Cassegrain di 20 cm era posto un prisma, proprio come avevano fatto Schur e Ambronn a Goettingen nel 1891.

SDS poi volava su un pallone stratosferico a 37 km di quota, in modo da eliminare il grosso delle turbolenze atmosferiche che limitano la precisione delle misure da terra.

SDS ha fatto cinque voli tra il 1992 e il 1998 ed uno nel 2011, dopo un intero ciclo solare.

L'analisi dei dati è durata anni, ed è stata molto dibattuta; anche a me è stato chiesto un contributo, e secondo me restavano ancora dei problemi non risolti, ma è naturale che quando si arriva ad un certo punto conviene ripetere l'esperimento o farne uno nuovo perché non si viene più a capo di tutti i problemi individuati. Il P.I. = Principal Investigator dell'esperimento ha l'ultima voce in capitolo.

Comunque sia sui risultati non ho da eccepire, perché è uno degli esperimenti più accurati che io conosca, sia in termini di operazioni che di analisi dati.

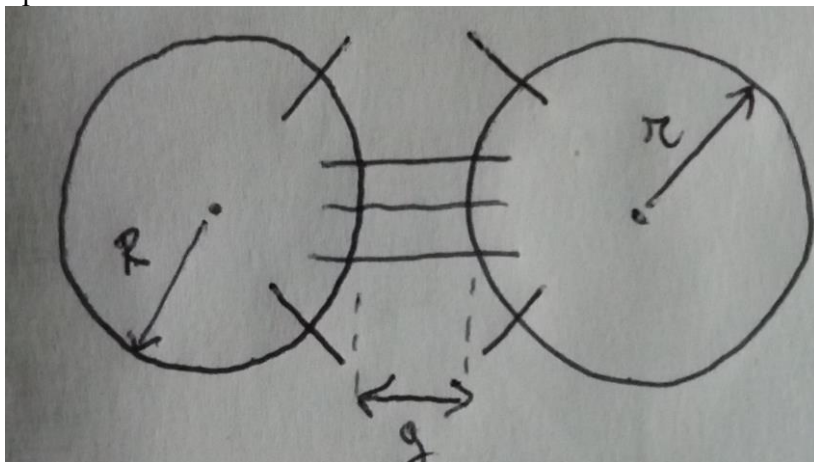


Fig. 1 Schema del rivelatore di SDS, con 7 CCD lineari, per misurare il gap tra le due immagini solari, diretta e prismatica.

Torniamo ai 5 punti con cui si misurava il diametro solare.

Erano presi mediante CCD lineari, cioè dei rivelatori da 1280×1 pixel, con un filtro monocromatico a 520 nm (giallo). Tecnologia all'avanguardia per il 1984...l'anno del progetto.

Ciò che bisognava localizzare era il bordo del Sole su ognuno di questi rivelatori, e avere così 5 coppie di punti con cui determinare 2 cerchi e -la cosa più importante- la loro distanza, g , che era legata al diametro del Sole. Infatti il prisma posto davanti all'obbiettivo del telescopio creava due immagini del Sole separate da un piccolo spazietto.

L'angolo primatico $\alpha = \arctan[(2r+g)/f]$ è fisso, g ed r cambiano con la distanza orbitale e con l'eventuale variazione intrinseca del diametro; f è la lunghezza focale del telescopio, fissa.

I centri delle immagini erano, dunque, a distanza fissa, dipendente dall'angolo formato dal prisma da 100 mila dollari, e dalla lunghezza focale e i loro bordi si avvicinavano e si allontanavano tra loro come il diametro angolare cambiava.

SDS era talmente preciso che riusciva a misurare la variazione angolare del Sole dovuta ad una sola ora di orbita ellittica della Terra attorno al Sole.

Proprio nei mesi di aprile e ottobre questa variazione è massima, quasi 6" in 10 giorni, cioè $0.6''/\text{giorno} = 0.025''/\text{ora}$.

SDS volava proprio in questi mesi.

Riuscii a vedere fisicamente SDS alla NASA nel febbraio del 2001 nel suo hangar.

Il telescopio issato sulla "gondola" che a sua volta, in campo aperto, veniva appesa al pallone stratosferico al momento del lancio. Lo guardavo dal basso verso l'alto.



Fig. 2 SDS in hangar e pronto per il volo il 13 ottobre 2011.

Il pallone pieno è circa 10 volte il volume della gondola cubica, e nella stratosfera, dove la pressione ambientale è 3 mb, diventa sferico e teso.

La mia idea era alla NASA quella di osservare il Sole da terra con SDS per capire i problemi dei dati di quel telescopio.

Fu difficile convincere il mio capo, il grande Sabatino Sofia. Egli insisteva che quel telescopio aveva senso perché lavorasse da sopra la stratosfera e osservare da basso avrebbe solo offerto dati inguardabili per la turbolenza atmosferica, io insistevo che essendo inguardabili quelli di uno dei voli, non si sarebbe perso nulla a tentare a terra: bastava tirare fuori dal garage il telescopio e puntarlo al Sole. Niente da fare, ma il vero impedimento a questo esperimento fu imponderabile...

La gondola, dove il telescopio aveva la possibilità –in cielo- di muoversi e puntare e seguire il Sole, doveva essere abbastanza resistente da sopravvivere all'urto con il suolo, che era sempre molto violento perché il pallone scendeva a terra senza tanti complimenti dopo il compimento della sua missione nella stratosfera. E poi lo si doveva andare a raccogliere nel punto dove era atterrato dopo 8-12 ore di volo. Ciò avveniva nel deserto di White Sands, proprio lo stesso dove il 13 aprile del 1981 lo Shuttle era atterrato dopo la sua prima missione e tutti lo aspettavamo in diretta TV con trepidazione, momenti indimenticabili per me in prima media... si doveva andare a ripescare questo pallone, la gondola che aveva protetto il telescopio con il prisma da 100 mila dollari e i dati registrati dalle CCD lineari.

Era la air base Edwards della US airforce.

Prendeva certe botte questo SDS... che il lavoro di sistemazione dello strumento prima di ogni volo doveva essere bello lungo...tuttavia il famoso prisma da 100 mila dollari era la chiave di tutto l'esperimento: l'angolo formato da quel prisma doveva restare immutabile fino alla fine dei

tempi, sia con il caldo che con il freddo, sia con le botte che con le carezze.

Nella stratosfera la temperatura della poca aria residua può arrivare anche a 100°C sottozero, ma le parti al Sole, viceversa, si possono scaldare al massimo.

Dunque il tutto doveva essere a prova di espansione termica.

Lo stesso concetto doveva valere per il prisma usato da Auwers e messo a punto a Goettingen prima del 1891.

Anche alla meridiana di s. Maria degli Angeli c'è una componente invariante: la posizione e la forma del foro stenopeico. L'espansione termica agisce anche sulle mura spesse due metri e alte oltre venti metri, ma l'assestamento dell'edificio dopo 15 secoli dalla sua costruzione da parte di Diocleziano, era ormai terminato quando Bianchini nel 1701 ha costruito la meridiana.

Da cinque punti a n punti

Trovare il disco del Sole da 5 punti è uno sviluppo del problema che si studia al liceo di trovare il cerchio da 3 punti.

E' laborioso, ma si fa. Siccome tre dei cinque punti di intersezione tra il bordo del Sole e la CCD (fig. 1) sono quasi allineati, si possono calcolare bene centri e raggi solo di tre diversi cerchi; poi si fa la media e la semidisposizione ed abbiamo il risultato. Proprio nello stesso modo in cui operiamo in laboratorio.

Di queste misure SDS ne ha fatte una al secondo in ogni volo.

Passando alle eclissi di Sole i punti da cui partire sono ottenuti dall'accensione o dallo spegnimento dei Baily's beads sul fondo delle valli del lembo lunare al momento dell'eclissi.

Nel 1962 Chester B. Watts pubblicò l'atlante dei margini della Luna, realizzato in oltre 18 anni di osservazioni all'Osservatorio Navale degli Stati Uniti d'America.⁵

⁵ [Link](#) all'atlante digitalizzato.

Perché così tanto tempo? Poiché a causa della librazione lunare il lembo, che sta di profilo, sul bordo lunare cambia leggermente, ma continuamente, da un momento all'altro. Sappiamo infatti che la Luna ci mostra la stessa faccia, ma a causa dell'orbita ellittica che ha attorno a noi, vediamo anche un 9% della faccia nascosta nel corso dell'orbita ed il periodo completo di profili e fasi lunari è di 18 anni 10 giorni e 8 ore, ossia il ciclo di Saros. Dunque solo dopo aver fatto foto alla Luna per 18 oltre anni Watts poteva essere sicuro di aver fotografato tutti i possibili orli della Luna.

Tranne due zone vicine ai poli, chiamate zone di Cassini, che non sono mai illuminate dal Sole per noi, ma che si possono scoprire quando, ogni tanto, ci tramonta una stella sopra.

Il fatto che siano state chiamate zone di Cassini significa che Giandomenico Cassini (1625-1712) le aveva già scoperte quando realizzò all'Osservatorio di Parigi, che aveva fondato e dirigeva, la sua mappa lunare.

Ci sono volute le sonde sovietiche Luna e le americane Ranger e Surveyor e per vedere per la prima volta sia la faccia nascosta che le zone di Cassini, ma solo dal 2009 abbiamo proprio tutti i lembi lunari con un metro di precisione grazie al radar laser-altimetro della sonda giapponese Kaguya-Selene. Questi dati hanno aggiornato lo splendido lavoro di Watts dopo oltre cinquant'anni.

La Cina con Chang'e 4 è andata sulla faccia nascosta, mentre un orbiter manteneva il contatto con la Terra. Segno che la Luna è ormai tornata nel mirino di parecchie nazioni.

Il profilo della Luna lo conosciamo ormai bene, almeno altrettanto bene quanto il suo moto.

Siamo arrivati pure a fare Laser-ranging da Terra usando potentissimi Laser riflessi dagli specchi collocati dagli astronauti dal 1969 al 1972, ed ho potuto vedere un paio di queste stazioni a Terra da cui fanno lunar Laser ranging, oltre

che occuparmi degli articoli degli scienziati che li hanno analizzati. Una sera ero all'Osservatorio di Nizza a Calern, 1210 metri sul livello del mare, proprio mentre facevano "Laser-Lune". Prima ancora lo avevo visto in America alla NASA. Infine con i miei studenti ho visto un elemento dello specchio usato dagli astronauti sulla Luna, capace di riflettere indietro un raggio proveniente da qualunque angolazione. Era al dipartimento di Ingegneria Aerospaziale della Sapienza nell'area dell'aeroporto dell'Urbe.⁶

Orbene la Luna durante un'eclissi, specialmente se l'eclissi è ibrida, offre n punti per determinare il disco solare, tanti quanti sono i Baily's beads osservabili.

Le perle di Baily

Dopo il prisma da 100 mila dollari abbiamo ancora a che fare con un tesoro: stavolta sono le perle di Baily.

Francis Baily le scoprì a Pavia nel 1831, assistendo all'eclissi totale di Sole. Durante la fase di totalità descrisse, per primo, l'apparizione di grani o perle di luce che circondavano il disco nero della Luna. Dopo la terminologia semi-tecnica delle eclissi si arricchì con l'*anello di diamante*, che altro non è che l'ultima perla di Baily prima della totalità e la corona interna del Sole dall'altro lato. Durante l'eclissi ibrida ci si può aspettare che non ci sia un anello di diamante, ma una sorta di "*broken annular eclipse*" un'eclissi anulare interrotta in più punti. La parte luminosa della *broken annular* è quelle composta da Baily's beads.

Avevo studiato l'eclissi totale-anulare del 1966 sull'Isola di Lesbo il 20 maggio, perché simile –forse- a quella di Clavio.

⁶ Valse la pena di tutto il lungo viaggio in bus e l'attesa su in uno sperduto cavalcavia che mi ricordava una situazione analoga in Virginia, uscito dalla Johns Hopkins University dopo aver ricevuto un passaggio in auto fino ad una fermata dimenticata da Dio e dagli uomini. *Bonanza...* per chi capisce la citazione cinematografica *vintage*.

Era una foto in bianco e nero con pochi dettagli.⁷

C'erano tutti i mostri sacri dell'epoca, in particolare: Donald H. Menzel (1901-1976) e Max Waldmeier (1912-2000) rispettivamente di Harvard e di Zurigo (erede di Goettingen). Che fossero già al corrente dell'opportunità di misurare il diametro solare? La questione non era stata ancora aperta.

Nel 1984 ho potuto osservare l'inizio dell'eclissi che si ripeteva dopo un intero ciclo di Saros. Era il 30 maggio al tramonto.⁸ In America l'eclissi fu centrale e si vide il Sole circondato da perle luminose nella sua fase massima.

Nel 2002 ho cercato di ottenere i dati dall'eclissi che seguiva quel Saros, ma nessuno viaggiava in mezzo al Pacifico per pochi Beads e pochi secondi di totalità. Nel 2020, **54 anni e 33 giorni** dopo l'eclissi di Lesvos, un intero ciclo *Exeligmos* era il 21 giugno, e quell'eclissi la ho osservata integralmente dal terrazzo di studio.⁹ Solo che da Roma era parziale, radente.

Nessun grano di Baily poteva essere visto, e la misura del diametro solare presentava altri problemi.

Problemi ritenuti sempre eccessivi da Sabatino Sofia, che mi impedì di osservare l'eclissi di Sole del 25 dicembre 2000, visibile solo dall'America. Per gli Americani, anche se di origine italiana, *Time is Money!*

Avevo lasciato in sospeso il mio tentativo di usare SDS a terra per capirne i problemi sui dati... era Febbraio 2001. Dopo un po' di burocrazia per darmi un ufficio e relative furnitures pure alla NASA sede di Greenbelt Maryland, dove stava SDS e vari personaggi illustri tra cui Fred Espenak, chiamato Mister

⁷ Xavier Jubier ha raccolto tutte le informazioni su questa eclissi alla pagina [qui](https://www.youtube.com/watch?v=6HdCU0jGiXQ) linkata, che contiene anche la simulazione con il suo software [Maestro](https://www.youtube.com/watch?v=6HdCU0jGiXQ)

⁸ finale di Coppa Campioni all'Olimpico persa ai calci di rigore dalla Roma.

⁹ <https://youtu.be/oCzOVTxT1tk>

Eclipse, una autorità indiscussa in termini di eclissi ed effemeridi, ed alcuni astronauti che avevano calcato il suolo lunare... avevamo fissato l'appuntamento per Settembre.

Martedì 11 al mattino.

Non fu possibile.

Nazione sotto attacco.

Porte chiuse.

Ordini superiori.

Era l'imponderabile.

Sull'altopiano sopra Nizza

A Nizza dal 2007 avevo ripreso in mano il progetto del diametro solare con strumenti basati a terra, per accompagnare una missione da satellite francese: PICARD. Di fatto dal 1975 l'Osservatorio di Nizza nella persona di Francis Laclare (1935-2014) aveva messo a punto l'astrolabio di Danjon per osservazioni solari, addirittura nella versione modificata chiamata DORAYSOL a partire dal 1990. Questa ricerca era svolta in rete con altri Osservatori: quello Reale della Marina Spagnola a san Fernando, uno a Tubitak in Turchia, un altro a Tamanrasset in Algeria –ex colonia francese-, e due in Brasile a Rio e a Sao Paulo, e dopo il periodo di Nizza (2007-2011) fui chiamato a Rio (2012-2014) a portare avanti il lavoro.

Volevo far funzionare DORAYSOL per qualche volta al fine di capire i problemi di dati che avevano fatto arenare la ricerca.

Usare lo strumento. Fare misure. Prendere dati. Toccarlo. Smanettarlo. Infatti Francis Laclare non faceva più osservazioni all'*astrolabe*, da qualche anno.

Tutto era ormai solo analisi dati, per giunta in formati sempre meno intellegibili e reperibili. Il programma era in Pascal, che avevo studiato vent'anni prima... ma non c'era più un computer dove questo programma girasse.

Maledetti sistemi operativi che cambiano in continuazione.

In particolare il computer che stava in Osservatorio a 1200 metri di quota senza un uso continuo... vi potete immaginare che fine ha fatto. Finalmente il 14 ottobre 2008 alle 3 del pomeriggio, dopo una ennesima riunione convinco l'astronomo che mi accompagnava ad aprire la cupola di DORAYSOL e osservare il Sole. L'ultimo transito in almucantarato possibile... poi il Sole andava troppo in basso per essere colto dall'ultimo prisma dell'astrolabio.

Lo vidi, vidi il computer funzionare... come un fantasma...vidi aprire e chiudere il tetto scorrevole dell'*astrolabe*. Fu l'unica volta, neanche mezz'ora. Il 15 ottobre il Sole già non avrebbe raggiunto più l'altezza sufficiente per essere avvistato.

La riunione precedente, era stata fatta per stabilire che tutti gli sforzi dovevano rivolgersi al progetto PICARD-sol, che in francese significa suolo e non Sole, ossia lo strumento nominato PICARD in onore dell'abate astronomo Jean Picard che nel 1680 aveva misurato il meridiano di Francia per conto di Luigi XIV, che si divideva in due parti: un satellite e uno strumento gemello al suolo, quello per cui ero lì. Non si poteva perdere tempo a capire perché un esperimento durato 25 anni dava problemi, bisognava concentrare tutti gli sforzi su quello che stava per andare nello spazio di lì a 2 anni.

Le temps est argent. Time is money in francese.

Così 25 anni di dati stavano per restare senza continuità con quelli dallo spazio. Per fortuna ci fu Rio de Janeiro a riaprire la questione.

Ci tornai il meno possibile sopra l'Osservatorio dove era Picard-sol. I motivi erano due e -di ferro-¹⁰ Il più ferreo dei due motivi era che tutti i tornanti necessari per arrivare lassù, al Plateau di Calern, a 1200 metri di altezza mi davano il mal di stomaco, sull'altro sorvolo, ma dava pure il mal di stomaco.

¹⁰ come disse il Maggiore nella saga "Lo chiamavano Trinità" di Sergio Leone, con Bud Spencer e Terence Hill.

I fotometri nel prato

Restando a Nizza si potevano incontrare persone importanti. E in quell'occasione il mio capo e direttore del dipartimento Hyppolite Fizeau, Jean Arnaud (+2010), mi presentò Jean-Yves Prado, un pezzo grosso dell'agenzia spaziale francese. Questo scienziato voleva misurare il diametro del Sole con le eclissi usando 10 fotometri da sparpagliare sul territorio dove avveniva la totalità.

Un fotometro vede solo luce, non vede immagini. Vede la somma di tutti i Baily beads, e permette di capire veramente solo quando inizia e finisce la totalità. Due punti. Avendo altri dieci fotometri i punti diventano 20. Così Prado sistemava la questione del bordo solare usando solo 2 beads per volta.¹¹

Non ero molto d'accordo, venivo dalla scuola Americana dove si faceva l'immagine dell'eclissi, sia pure con risoluzione fotometrica molto minore. Alla fine, nel 2015, hanno fatto 4 eclissi tra 0.02 e 0.09 arcsec di precisione. Non male.

10 rivelatori sparsi qua e là senza operatore, e poi analisi dettagliata della curva di luce dell'eclissi. Hanno tenuto conto anche dei miei contributi allo studio delle eclissi, che nel frattempo avevamo pubblicato, ossia l'eclissi del 2006, l'atlante dei Baily beads del 2009 e il nuovo metodo di analisi dei Baily beads del 2012.

L'esperienza di dei fotometri di Prado¹² concludeva che Auwers (1891) doveva essere aggiornato da 959.63'' a 959.99'' il raggio solare di 0.36" più largo, quindi il diametro di 0.72".

Si deve aggiornare perché quello di prima era sbagliato o perché è cambiato?

Gli autori sono tutti francesi...anche i personaggi ringraziati.

¹¹ Goldstein, autore del libro di meccanica razionale che avevamo all'Università, avrebbe commentato "hanno spaccato una nocciolina con un maglio". Dieci fotometri sparpagliati per la fascia di totalità per prendere solo due punti ciascuno.

¹² Lamy, P., et al. Solar Physics **290**, 2617 (2015)

Agli altri, al più, l'onore delle citazioni. Ed è l'articolo dove sono citato più volte, bene! Li ringrazio anche io.

Le immagini ghost verdi

In un video di un'eclissi ibrida con delle immagini ghost, anche piccole, si possono cogliere molti beads. Basta un solo video, anche VGA cioè a bassa risoluzione.

Mentre i fotometri ne colgono solo due, con una ripresa video rivolta verso il Sole e zoom 4x ISO 100 EV=-2 fatto con uno smartphone, che pure in Timor Est ormai hanno tutti, basta geolocalizzarlo e il gioco è fatto.

Ho le prove. Il 14 aprile ho realizzato la simulazione di un'eclissi ibrida realizzando un video nei tempi e nei modi di come si verificherà laggiù a Timor Est il 20 aprile.

A Piazza san Pietro ho aspettato il transito meridiano del Sole all'Obelisco Vaticano individuando il posto dove il Sole passava esattamente al centro della stella tridimensionale sopra l'obelisco. Nel video, dalla ghost image, si notano 8 beads, quattro prima e quattro dopo, due dei quali restano accesi durante la fase di totalità. Si tratta di una simulazione molto realistica dell'eclissi anulare interrotta, *broken annular*.



Fig. 3 Il Sole dietro l'obelisco Vaticano il 14 aprile, immagine diretta (dx) sovraesposta e ghost image (sx) dove si vedono 4 beads. ISO 100, EV=-2. Fotogramma VGA 640x480. FPS 1/30 s.¹³

¹³ Video del fenomeno: <https://youtu.be/0DOfl3QAe2I> (14 apr 2023) con spiegazioni tecniche nelle specifiche del video.

Mentre la totalità vera e propria, dove normalmente la gente si reca per sperimentare l'eclissi, è buio anche nell'immagine diretta, anche un singolo Baily bead riluce tanto da abbagliare la telecamera (e anche l'occhio) per cui la ghost image aiuta a vedere cosa sta succedendo mentre l'immagine diretta risulta ancora troppo sovraesposta. I singoli frame del video, formato **VGA**, 640x480 pixel, mostrano una **ghost image del Sole di 22 pixel di diametro**. La circonferenza $\pi D=69 \text{ pixel}=360^\circ$, ha un pixel ogni 5° , meglio del fotometro senza risoluzione spaziale. La risoluzione fotometrica in VGA mostra intensità della ghost image tra 2 e 90 ADU (unità tra 0 e 255, bianco saturo).

A causa del trattamento antiriflesso delle lenti della fotocamera la ghost image è verde, quindi vicina allo standard monocromatico di 540 nm considerato per il continuum solare, e utilizzato da Prado e compagni per le 4 eclissi della prima metà dello scorso decennio, e al filtro SDS di 520 nm.

Con dei video dell'eclissi fatti da posti abbastanza diversi tra loro possiamo aspettarci lo stesso numero di beads analizzati da Prado e compagni su 4 eclissi... ecco perché incoraggio le osservazioni con la *ghost image* della prossima eclissi ibrida.

La risoluzione temporale è 0.03 secondi sull'On/Off e c'è una discreta modulazione di intensità 0-90 ADU. ¹⁴Per l'eclissi solare con una tipica velocità relativa di 0.335"/s corrisponde ad un'accuratezza di 0.01". N punti con 10 milliarcsecondi di precisione ognuno, separati, e distinti, grazie alla ghost image. La ricerca della ghost image è un gioco da ragazzi, è presente in tutte le fotocamere, perché dovuta a riflessioni interne quando gli elementi ottici sono almeno due.

Il vetro protettivo delle fotocamere è un elemento ottico, anche se è piano e sottile, perché riflette l'immagine che a sua volta il rivestimento rivestito con un film ottico antiriflesso rimanda

¹⁴ anche se il rischio di aggiustamenti automatici non è mai del tutto eliminato dalla modalità "pro" del video, che dovrebbe essere "manuale".

verso l'esterno. Proprio questa immagine verdolina è la ghost image del Sole, che è la sorgente luminosa più forte che possiamo riprendere.

La *ghost image del Sole* ha cinque proprietà:

- 1- è molto più debole dell'immagine diretta
- 2- è quasi a fuoco¹⁵ e mostra il diametro angolare reale del Sole
- 3- si trova dalla parte opposta al Sole rispetto al centro ottico
- 4- è speculare al vero (sotto - sopra e Ovest - Est invertiti)
- 5- l'immagine è verde,¹⁶ come il picco dell'emissione del continuo solare a 540 nm.

Si vede meglio quando è proiettata su uno sfondo scuro, altrimenti sfugge all'attenzione. Per riprendere un'eclissi occorre fare un po' di pratica con la ghost image del proprio smartphone. Durante il video il telefonino è fermo, e la cover bianca serve per non scaldarlo troppo al Sole.



Fig. 4 Eclissi parziale del 25 ottobre '22 a Roma h 11:46 (ghost).

Dinamica fotometrica della ghost image

L'intensità della ghost image¹⁷ arriva attorno a 100 adu, il bead

¹⁵ In pieno Sole appare un'altra ghost image blu, sfuocata e più debole.

¹⁶ Donald C. Dilworth, *Introduction to Optics and Lens Design- part 11: Ghost images* <https://www.youtube.com/watch?v=zUPe6LJObCg> 2017

¹⁷ Si chiama anche *immagine catadiottrica* o, in breve, la *catadiottrica* <http://www.funsci.it/files/catadiottriche.pdf> di Giovanni Pietro Sini autore del testo Problemi di [Microscopia Ottica](#) Bologna (2007).

più debole vale circa 2 adu (fig.3). Se il bead è ancora abbagliante (255 adu) nell'immagine diretta significa che a 2 adu di ghost corrispondono **almeno** 255 adu di immagine diretta: un rapporto 1:100. Ciò significa che le 100 adu a 100 ISO fissi nella ghost image del Sole corrisponderebbero (se il rivelatore fosse lineare) a $100 \times 100 = 10000$ adu dell'immagine diretta. Così la dinamica fino a 255 adu (8 bit, $2^8 = 256$ livelli), grazie alla ghost image supera i 12 bit (4096 livelli).

Per questa ragione l'eclissi può essere seguita agevolmente nelle fasi di parzialità tramite la ghost image, e quando si avvicina la totalità, la ghost image si affievolisce e sparisce e l'immagine diretta permette di seguire lo spegnimento degli ultimi beads. Il moltiplicatore $\sim 10^2$ tra la ghost e l'immagine diretta dipende dalla riflettanza dei vetri delle ottiche (almeno due, quello di protezione e quello della lente dell'obbiettivo fotografico, che danno una sola ghost image).

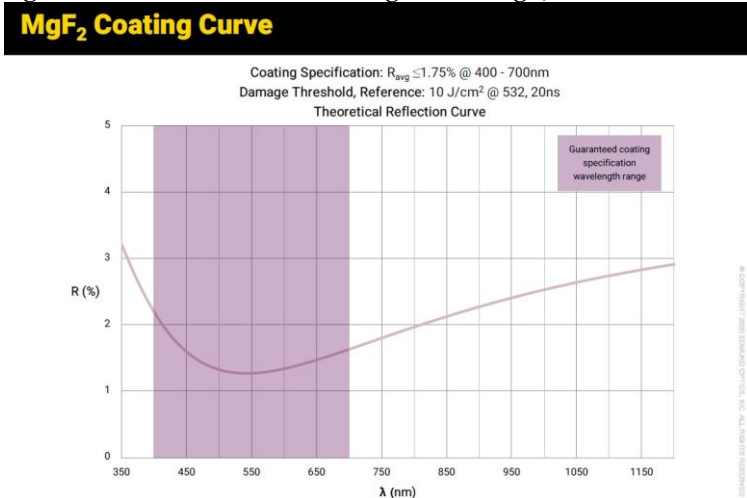


Fig. 5 Il trattamento antiriflesso¹⁸ $\lambda/4$ MgF₂@550 nm è il più

¹⁸ Kristina Kaszei, *What are ghost images*, Edmund Optics Inc.
<https://www.youtube.com/watch?v=nu1kgeYHfZ4> (2022)

usato¹⁹ per la luce visibile, trasmette meglio il verde a 550 nm. Alla lunghezza d'onda 550 nm si ha la minima riflettanza pari a 1.35%. Il vetro protettivo ha trasmittanza attorno all'80%, la lente trattata con Fluoruro di Magnesio riflette 1.35% della luce che rientra come ghost dopo la seconda riflessione sul vetro nella parte interna. Il rapporto tra le luminosità Ghost=G e Diretta=D è $IG/ID=1/370$.²⁰ La trasmittanza massima è nel verde, dove è anche massima l'emissione del Sole, quindi abbiamo la *ghost image* verde, quasi come le specifiche dei filtri di SDS e dei fotometri.

Conclusioni Il diametro solare ufficialmente non cambia, ma le misure non concordano, a meno che non debbano farlo per forza. Jean Pierre Rozelot, altro astronomo di Nizza-Grasse, ha studiato le misure dello schiacciamento polare del Sole (oblateness) da Dicke (1967) in poi usando anche il telescopio di Pic du Midi (2877 m) e ha raggiunto i millisecondi d'arco. Marcelo Emilio ha munto i dati di SOHO, satellite ESA-NASA mostrandoci che il diametro non è variato entro 15 km. SOHO ha immagini con 4096 pixel, cioè 0.5" sul Sole. Il lavoro per scendere a 0.01" è puro equilibrismo, ma Emilio ha usato il timing del transito di Mercurio del 2003, un virtuosismo. La questione sulle variazioni del diametro non è affatto chiusa, almeno entro 0.1", ma pure tre volte tanto. L'eclissi ibrida del 20 aprile 2023 può offrirci molti altri dati utili per ottenere questa misurazione del valore attuale del diametro solare.²¹ La possibilità di fare video con lo smartphone e di studiare la

¹⁹ <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/lasers/anti-reflection-coatings/>

²⁰ La luce riflessa che arriva all'obbiettivo dipende dalla sua riflettanza $R_o=0.0135$ e dalla riflettanza del vetro $R_v=0.1\div0.2$. La luminosità dell'immagine ghost di primo ordine è $1/R_vR_o=370\div740$. La ghost image è più debole dell'immagine diretta $IG/ID=370\div740$ volte.

²¹ Sigismondi e Raponi, <https://www.astronomerstelegram.org/?read=15991>

curva di luce dei Baily's beads grazie al moltiplicatore che c'è tra l'immagine diretta e la ghost image, dell'ordine di 300, fa sì che i 255 livelli di intensità di un pixel di una normale immagine jpg, passino ad un valore ben superiore a 10000 con la visibilità della ghost image. Il detector della fotocamera, non è lineare e per l'astronomia richiede opportune calibrazioni. La fase centrale della totalità è visibile con l'immagine diretta, mentre quelle parziali precedenti, abbaglianti per l'immagine diretta, sono accessibili con la ghost image verde.

È necessario prendere confidenza con la ripresa della ghost image, ossia trovare dove si trova rispetto al Sole in modo da averla nel video dell'eclissi sempre nel campo. È importante cercare subito la ghost image: a 4x si trova vicino al centro dell'immagine; senza zoom è più facile perdere la ghost image; il Sole quindi deve stare poco ($<5^\circ$) fuori asse. Lo zoom 4x dà un buon video, con ISO 100 EV=-2 e 30 fps, VGA, 640x480.

Con le nubi e cambi continui di luminosità i beads si vedono comunque,²² ma prima e dopo la totalità risaltano meglio.²³

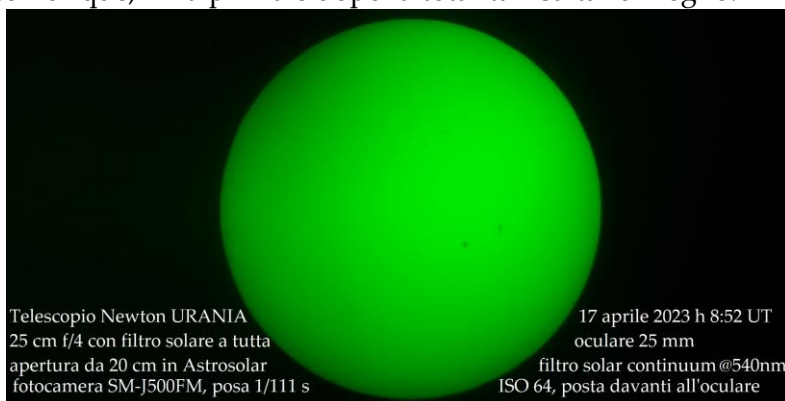


Fig. 6 La presenza di facole al lembo, come presso la macchia AR3280 a W, può alterare la curva di luce dei Baily's beads.

²² C. Sigismondi (2023) https://youtu.be/3V0dHq2B_oE, 16 aprile '23 all'Obelisco Vaticano. Con spiegazioni in Inglese delle varie tecniche.

²³ Prosaica, ma efficace la totalità simulata https://youtu.be/wcMh3_n-pmM