

VEDERE L'INVISIBILE

Lo sguardo dello scienziato dentro le cose.

Firenze, 18-19 aprile 2024

Menzione d'onore
SEZIONE TESINE TRIENNIO

Stima del periodo di rotazione del Sole mediante lo studio del moto delle macchie solari

Studenti

Tambussi Rebecca - Arrigoni Davide - Marnini Samuele - Kumar Shivam

Classi 5T – 5U – 5V

Istituto di Istruzione Superiore

Liceo scientifico A. Cesaris - Casalpusterlengo (LO)

Docente Coordinatore

Monteverdi Filippo

La ricerca è attinente al titolo del concorso. L'ipotesi teorica alla base del lavoro è che le posizioni delle macchie solari compiano un moto armonico, proiezione sul piano di osservazione del moto del Sole. Le rilevazioni sono state effettuate con un telescopio opportunamente schermato. A causa del maltempo le misure effettuate sono state integrate con misure prese dalla banca dati della NASA. Il periodo di rotazione misurato è confrontabile con i dati ufficiali.

Stima del periodo di rotazione del sole mediante lo studio del moto delle macchie solari

Sezione triennio

I quattro ragazzi coinvolti in questo progetto frequentano il quinto anno del Liceo Scientifico OSA. Uno degli argomenti di fisica meno trattati all'interno dei programmi ministeriali riguarda l'astronomia e l'astrofisica, che a mio avviso invece sarebbe certamente in grado di affascinare le menti dei giovani studenti.

Spesso tuttavia la completa comprensione di questa branca della materia implica una padronanza di alcuni concetti matematici non affrontati dagli studenti all'interno del loro percorso di studi. Inoltre, la natura spesso notturna dei fenomeni astronomici ne rende proibitive la maggior parte delle misure effettuabili.

Il progetto elaborato in questo lavoro di ricerca è stato costruito proprio per dimostrare che, anche se in maniera limitata, le competenze acquisite durante l'intero ciclo di studi dei ragazzi rende accessibili alcune possibilità di studi astronomici anche durante l'orario scolastico: a patto di scegliere il fenomeno opportuno, le leggi fisiche apprese dai ragazzi sono universali e dunque ritrovabili anche all'interno di un oggetto siderale.

L'esperienza ha l'obiettivo di studiare il moto che le macchie solari seguono sulla superficie del Sole in funzione del tempo, ricavarne le rispettive leggi orarie ed ottenere in questo modo una stima del periodo di rotazione del Sole. Per far ciò è necessario collezionare una successione di fotografie del disco solare ad intervalli di tempo di 24 ore mediante un opportuno telescopio, ridurre le immagini acquisite, analizzarle ed infine dedurre dai dati le leggi orarie dei moti armonici delle macchie solari osservate.

Il lavoro si è svolto tra inizio novembre e fine febbraio. Complessivamente abbiamo effettuato dieci incontri di circa 4 ore ciascuno al sabato mattina, per un totale di oltre 30 ore in presenza.

Inizialmente sono stati introdotti alcuni concetti di astronomia e di ottica non affrontati nel normale corso di studi ed è stato dato ai ragazzi del materiale teorico di approfondimento riguardo le macchie solari e la cinematica delle stesse. La raccolta e l'analisi dati ha previsto l'utilizzo dei software di acquisizione AsiStudio e dei software di manipolazione di immagini

PlanetarySystemStacker e Gimp. La raccolta dei dati dalle immagini è stata possibile mediante un software Python appositamente codificato dal docente per permettere il prelievo delle coordinate in pixel delle macchie all'interno dei diversi fotogrammi. Infine è stato creato dai ragazzi un foglio elettronico Excell per l'analisi dei dati ottenuti.

Il lavoro, avviato con dei test di corrosione finalizzati alla realizzazione di uno strumento di osservazione ideale, si è evoluto durante il suo decorso, portando il gruppo alla scelta obbligata di rinunciare alla costruzione di uno strumento ad hoc e deviare su un telescopio newtoniano classico, dotato di un filtro ad alta profondità ottica. Le immagini sono state raccolte nell'arco di 2 settimane in modo da poter seguire una o più macchie solari durante l'intera traiettoria.

Purtroppo il periodo di lavoro è stato proibitivo per una sufficientemente ampia raccolta delle immagini giornaliere. La maggior parte delle giornate di gennaio sono state caratterizzate da cielo coperto e fitte coltri di nebbia, condizioni ovviamente proibitive per l'osservazione solare. In tutto sono state raccolte 6 immagini del disco solare, integrate per le giornate nuvolose con i fotogrammi pubblici presenti all'interno dell'archivio NASA del SolarDynamicsObservatory (SDO) per ampliare i dati da analizzare e ridurre così l'incertezza dei risultati.

I risultati ottenuti, oltre a mostrare un dato del periodo di rotazione del Sole perfettamente coerente con quanto descritto in letteratura, hanno portato gli studenti, guidati dal sottoscritto, a concordare sul fatto che laboratori sperimentali in campo astronomico sono possibili anche all'interno dell'ambiente scolastico.

I ragazzi hanno partecipato con impegno e responsabilità, hanno apprezzato il tipo di lavoro proposto e le modalità utilizzate.

Il referente del progetto

Stima del periodo di rotazione del sole mediante lo studio del moto delle macchie solari

ABSTRACT: Illustriamo un esperimento attraverso il quale abbiamo stimato il periodo di rotazione solare ricavando la legge oraria del moto delle macchie solari. Le macchie solari sono un fenomeno che si verifica a causa di un picco locale di attività magnetica che comporta una diminuzione di temperatura (3000 K) rispetto alle aree circostanti (5000 K), rendendole più scure rispetto al resto della superficie. Come è ormai noto il Sole compie un moto di rotazione intorno al proprio asse e le macchie ruotano insieme ad essa. Abbiamo analizzato il moto di 6 macchie per un periodo complessivo di 11 giorni. Il programma di acquisizione immagine è ASI Studio, le immagini sono state ridotte con l'ausilio di PLANETARY SYSTEM STACKER ed analizzate mediante software Python. Il risultato ottenuto è un periodo di rotazione medio di 27,6 giorni.

Key words. Sole – macchie solari – moto armonico – rotazione – Imaging

1. INTRODUZIONE

Spesso nel linguaggio comune si fa riferimento al termine "invisibile" per caratterizzare quei fenomeni non percepibili dai sensi umani. Tuttavia uno sguardo più attento è in grado di rilevarne la presenza, rendendo accessibili studi che un occhio non curioso trascurerebbe. L'essenziale è invisibile agli occhi. Il convegno di ScienzeAfirenze quest'anno ha deciso di focalizzarsi proprio sul concetto dell' "invisibile" e di come la figura dello scienziato sia in grado di "dare uno sguardo dentro le cose".

Il Sole è la stella madre del nostro Sistema Solare. La sua temperatura superficiale e l'irradianza media che il sole genera sulla superficie della Terra rende la sua osservazione ad occhio nudo proibitiva: per quanto visibile, il Sole risulta dunque "invisibile agli occhi". Abbiamo quindi deciso di concentrare il nostro lavoro sull'osservazione della superficie del Sole, così da poterne studiare nel dettaglio il suo moto di rotazione.

La natura circolare del sole visibile da terra rende impossibile apprezzare il suo moto di rotazione, tuttavia un'analisi della sua superficie mostra la presenza delle macchie solari. È noto che queste macchie sono dovute ad un'abbassamento locale della temperatura superficiale del Sole causata da interazioni della materia solare con il campo magnetico della stella. L'osservazione di una di queste macchie condotta su più giorni consecutivi ne mostra un moto di traslazione compatibile con un moto armonico di

periodo uguale a quello di rotazione del Sole.

Noto che la legge oraria di un moto armonico è:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi)$$

dove A rappresenta l'ampiezza del moto, ω la pulsazione e ϕ la fase iniziale, una stima di omega permetterebbe una misura indiretta del periodo di rotazione del Sole.

Il nostro lavoro si è dunque concentrato sulla realizzazione di un'apparato strumentale in grado di catturare da Terra immagini del disco del Sole ad intervalli di tempo definiti, così da poter studiare l'evoluzione della posizione delle macchie solari e ricavarne le rispettive leggi orarie.

2. INDIVIDUAZIONE DELL'APPARATO STRUMENTALE

La realizzazione delle riprese del Sole da Terra nascondono alcune difficoltà sistematiche da superare: eccessiva lunimosità del soggetto, seeing atmosferico e necessità di una perfetta collimazione delle ottiche.

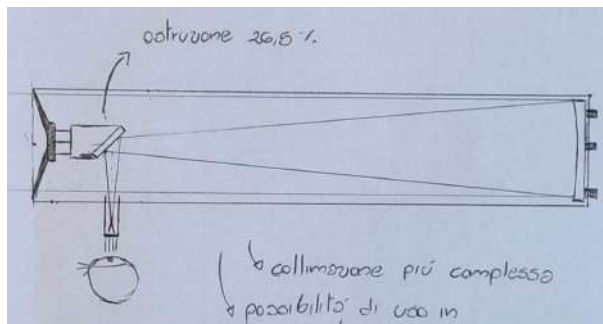
Il problema della luminosità interessa principalmente la sensibilità della telecamera di acquisizione: la potenza depositata sul sensore, qualora non opportunamente ridotta, porterebbe alla rottura della telecamera stessa.

Il seeing atmosferico è l'effetto che l'atmosfera genera a causa delle turbolenze dell'aria sulle osservazioni astronomiche. La luce del Sole, prima

di giungere sul sensore della camera di acquisizione, deve attraversare l'atmosfera terrestre che, essendo in costante mutamento, non possiede un costante indice di rifrazione. A causa di ciò il segnale luminoso viene parzialmente degradato, portando così alla modifica delle immagini acquisite.

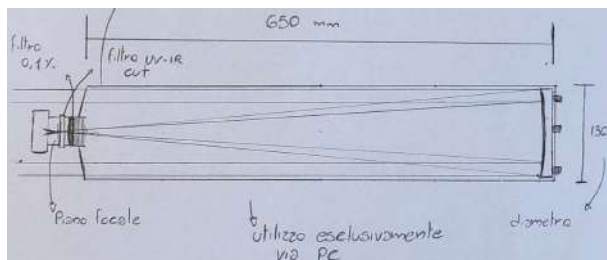
La collimazione delle ottiche invece determina una corretta formazione dell'immagine sul sensore: per avere l'immagine più nitida i raggi solari devono incontrarsi in un unico punto.

Per cercare di risolvere queste problematiche abbiamo inizialmente deciso di modificare un telescopio a riflessione Bresser Spica F5. Una prima configurazione prevedeva una semplice riduzione della luminosità in uscita dallo strumento mediante l'apposizione di un filtro ND 5 davanti all'apertura del telescopio, in modo da ridurre l'intensità incidente di un fattore 10^5 . In questo modo si risolve il problema dell'eccessiva luminosità, non risolvendo tuttavia la necessità di agevolare il processo di collimazione.



Configurazione 1

La seconda configurazione prevedeva di rimuovere lo strato riflettente dello specchio primario del telescopio, sostituendo inoltre lo specchio secondario con la telecamera di acquisizione, accessoriata con un filtro ND 3. Questa configurazione comporta una riduzione della luce trasmessa al sensore di un fattore 10^4 .



Configurazione 2

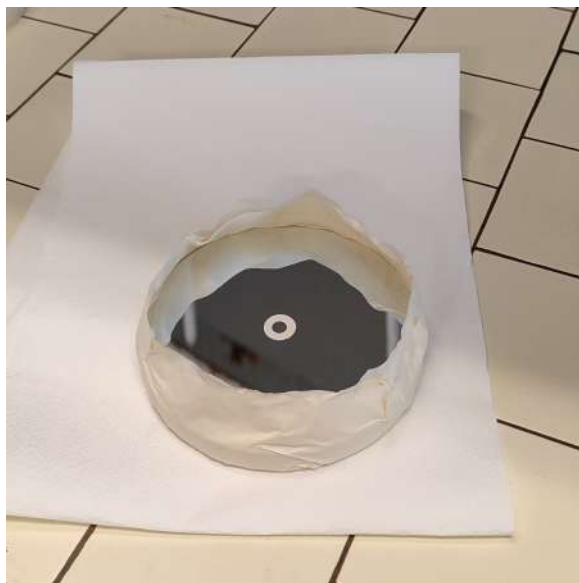
Abbiamo optato per la seconda configurazione poiché non presentando uno specchio secondario risultava più semplice la collimazione. La luminosità trasmessa inoltre risulta maggiore di un fattore 10, permettendo così di acquisire immagini in tempi di esposizione minori, riducendo quindi l'effetto del seeing sulle immagini finali.

2.1. Realizzazione dell'apparato

Per realizzare uno strumento adatto all'osservazione solare senza l'uso di filtri lungo il percorso ottico, è essenziale ridurre la riflettività del dispositivo di un fattore 10^5 . Pertanto, la prima fase consiste nella rimozione dello strato di alluminio presente sullo specchio primario, al fine di ottenere una lastra di vetro con una riflettività ridotta al 4 % rispetto alla configurazione iniziale. Dopo un'attenta ricerca online, abbiamo identificato la dissoluzione chimica tramite FeCl_3 come la soluzione ottimale per questo processo. Questo viene normalmente utilizzato per rimuovere il rame dalle PCB ("Printed Circuit Boards" schede circuito stampate) e lo fa piuttosto rapidamente. La sua compatibilità con l'alluminio ci ha convinti ad effettuare alcuni test con questa miscela. Per preservare l'integrità dello specchio primario, abbiamo condotto i nostri esperimenti sullo specchio secondario.

Test FeCl_3

Tuttavia, una volta trascorso un tempo sufficiente affinché la reazione potesse agire, abbiamo notato la presenza di macchie residue di natura indefinita sulla superficie del vetro. Nonostante abbiamo effettuato trattamenti chimici ulteriori nel tentativo di eliminarle, queste macchie sembrano persistere. È plausibile che tali difetti siano intrinseci allo specchio secondario, considerando che si tratta di un prodotto commerciale e non artigianale di alta qualità. È importante sottolineare che tali imperfezioni non sarebbero state rilevate se non avessimo proceduto con la rimozione dello strato primario, poiché queste non erano presenti su quest'ultimo. Detto ciò abbiamo proceduto alla rimozione dello strato di alluminio dallo specchio primario, sperando che il vetro sottostante non presentasse le stesse imperfezioni riscontrate sul secondario.



Rimozione dello specchio primario



Imperfezioni superficiali residue

Pertanto, abbiamo ritenuto necessario adottare un approccio alternativo a questo punto.

3. IMAGING

Date le difficoltà riscontrate nella realizzazione della prima configurazione dello strumento, per la cattura delle macchie solari abbiamo optato per le seguenti apparecchiature: un telescopio Skywatcher Heritage 130p F5, filtrato da un filtro solare Baader AstroSolar ND 5, in grado di ridurre la luminosità della radiazione solare di un fattore 10^5 . Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata una camera per imaging astronomico ZWO asi 224mc, dotata di filtro UV/IR cut per una migliore risoluzione. Per agevolare l'utilizzo del telescopio abbiamo utilizzato una montatura ad inseguimento automatico, comandabile tramite pulsantiera, in modo da poter evitare di toccare l'apparato e ridurre così al minimo le vibrazioni che potessero disturbare la cattura delle immagini. La tipica sessione di imaging inizia con la preparazione del telescopio all'esterno per circa un'ora prima di iniziare le riprese. In questo modo lo strumento ha modo di acclimatarsi con l'ambiente esterno, riducendo eventuali deformazioni termiche che danneggerebbero l'acquisizione. Per scattare le foto ci siamo posizionati sul secondo piano delle scale antincendio della nostra scuola, postazione ideale per un'osservazione verso SUD-EST. Tuttavia le scale antincendio in metallo si sono rivelate un punto poco stabile e soggetto a vibrazioni, fattore che è stato limitante per quanto riguarda la qualità delle immagini ottenute. Per ridurre al minimo tutte le vibrazioni causate dalla scala abbiamo impiegando l'utilizzo di un banco scolastico sulla quale abbiamo fissato con del nastro adesivo il telecomando per controllare la montatura, in modo da evitare di muovere la postazione durante la ripresa.



Rimozione dello specchio primario

Purtroppo anche in questo caso la rimozione dello strato riflettente non ha portato ad ottenere una superficie liscia.



Sessione di imaging

3.1. Acquisizione delle immagini

Per l'acquisizione delle immagini è stato utilizzato il software "ASI Studio", collegato alla fotocamera. Ciascuna immagine è stata acquisita con un'esposizione di 30 secondi. La montatura ad inseguimento automatico, da noi controllata per un inseguimento fine, ci ha così permesso di acquisire le foto del Sole.

Purtroppo, essendo l'astronomia un'attività strettamente correlata alla qualità del meteo, non ci è stato possibile effettuare una raccolta dati che coprisse una ragionevolmente ampia finestra temporale. Per aggirare questa difficoltà là dove ci è stato impossibile effettuare la fotografia del giorno, l'immagine solare per quella giornata è stata scaricata dalla banca dati "NASA.gov" del satellite SDO. Nella tabella seguente riassumiamo le date nelle quali siamo riusciti ad acquisire le immagini.

Table 1: Periodi di rotazione ricavati dal fit sinusoidale dei dati.

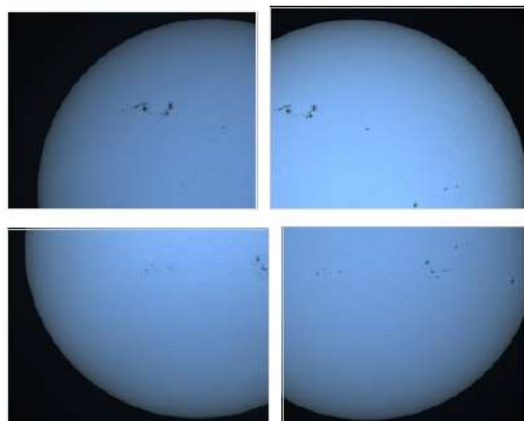
| Giornata | Fonte |
|-----------|-----------------|
| 18/01/24 | SDO |
| 19/01/24 | SDO |
| 20/01/24 | imaging diretto |
| 21/01/24 | SDO |
| 22/01/24 | imaging diretto |
| 23/01/24 | imaging diretto |
| 24/01/24 | imaging diretto |
| 25/01/24 | imaging diretto |
| 26/01/24 | SDO |
| 27/01/24 | SDO |
| 28/01/24 | SDO |
| 29/01/24 | imaging diretto |
| 30/01/24 | imaging diretto |
| 31/01/24 | imaging diretto |
| 01/002/24 | imaging diretto |

Si precisa che le foto realizzate nelle date che

vanno dal 29/01 al 01/02 non sono state utilizzate in quanto le macchie che stavamo cercando di analizzare non erano più visibili sul disco solare.

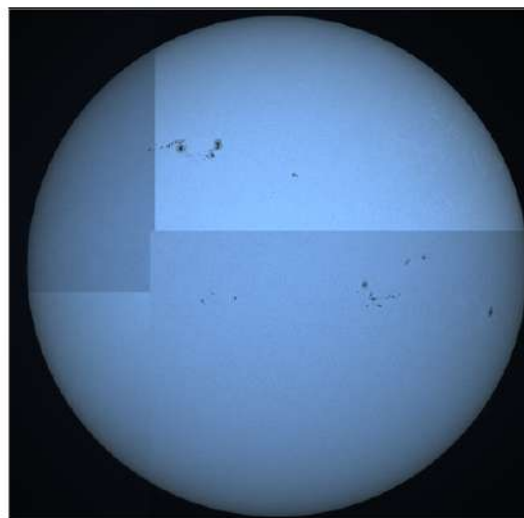
3.2. Post Processing

A causa della risoluzione del sensore della videocamera, abbiamo preso le foto del sole sempre a settori, con l'accortezza di avere sempre un'area in comune in modo da agevolare la loro sovrapposizione.



quadranti del disco solare

Le quattro immagini ottenute sono state successivamente unite mediante il software di manipolazione d'immagini "Gimp"

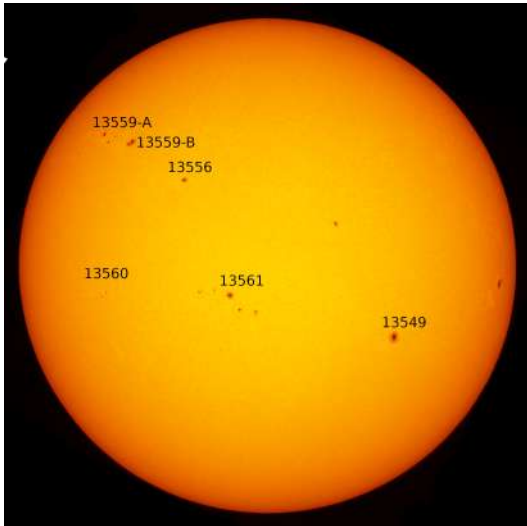


Disco solare completo

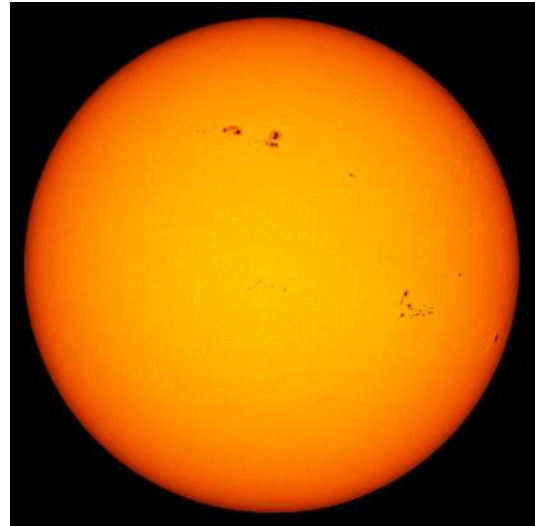
Una volta ottenute le immagini del disco solare, queste sono state allineate tra loro, in modo da mettere in evidenza la traiettoria rettilinea delle macchie nel tempo.

In ultimo, sempre utilizzando Gimp, abbiamo ridato al sole il suo "falso colore" agendo sulle curve di colore delle immagini. Questo processo di post produzione è stato necessario poichè il filtro UV/IR cut da noi utilizzato con lo scopo di eliminare disturbi

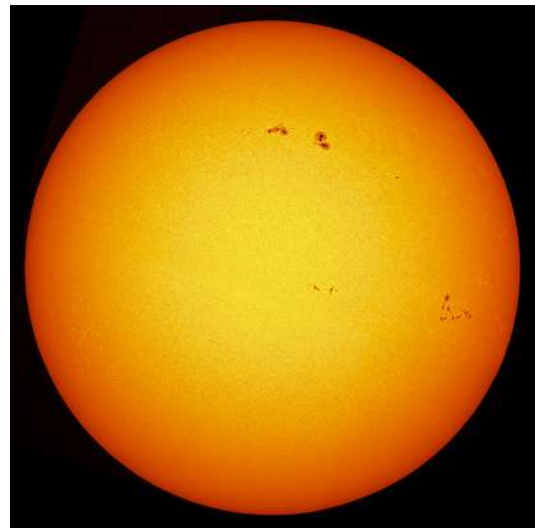
derivanti da eventuale luce riflessa dall'ambiente circostante, causa la decolorazione del sole e lo rende all'apparenza bluastrò. Riportiamo qui sotto le 5 immagini del disco solare da noi ricavate, la prima delle quali indica i nomi delle 6 macchie analizzate.



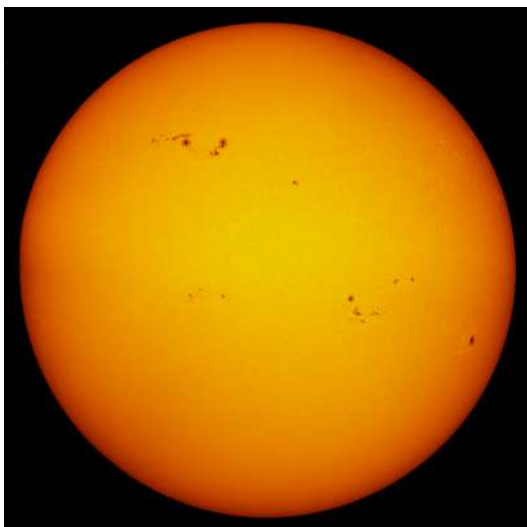
20/01/24



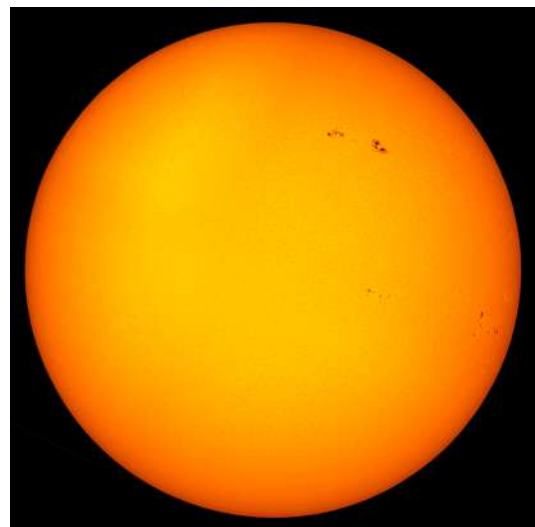
23/01/24



24/01/24



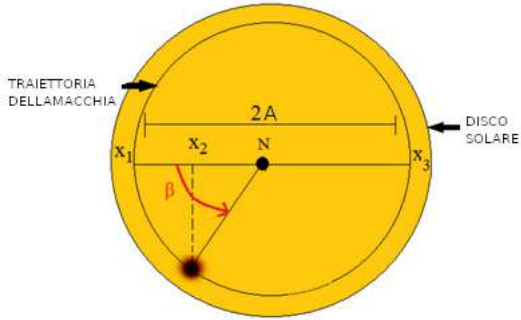
22/01/24



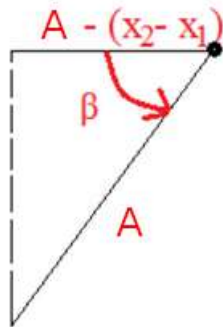
25/01/24

4. RACCOLTA ED ANALISI DATI

Sono state ricavate le leggi orarie dei moti armonici di 6 macchie solari, dalle quali si sono calcolati i periodi grazie all'utilizzo di un file Excell da noi realizzato. Le coordinate necessarie ai calcoli sono state ricavate grazie all'ausilio di un programma Python in grado di salvare le coordinate x, y in pixel di un punto selezionato all'interno dell'immagine studiata su un file esterno.



Siamo quindi riusciti ad ottenere le posizioni consecutive della macchia (x_2) e la lunghezza della traiettoria seguita dalla stessa ($2A=x_3-x_1$), dalla quale si è ricavata l'ampiezza del moto armonico della macchia.



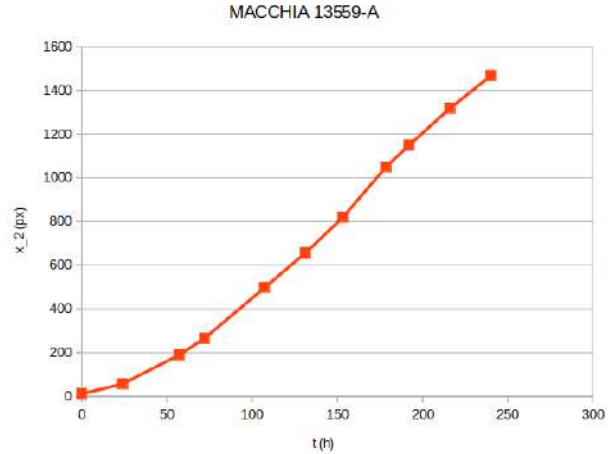
Si è quindi passati al calcolo della pulsazione del moto

$$\omega = \frac{\Delta\beta}{\Delta t}$$

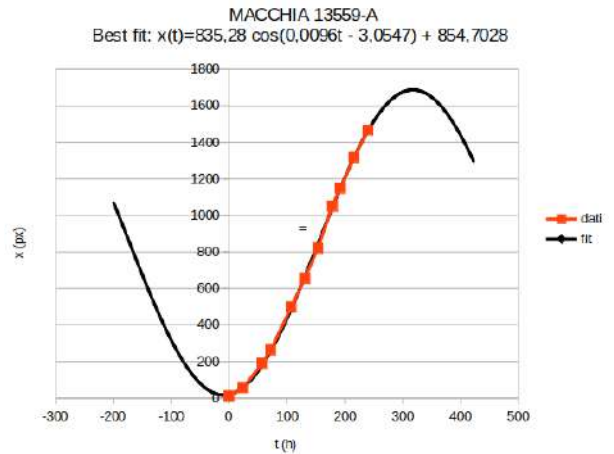
dove β rappresenta l'angolo a cui si trova la macchia in moto lungo una circonferenza di raggio A , coincidente con l'effettiva traiettoria circolare seguita dalla macchia sulla sfera solare.

$$\beta = \arccos\left(\frac{A - (x_2 - x_1)}{A}\right)$$

Dopo aver calcolato gli intervalli di tempo Δt trascorsi tra un'acquisizione del disco solare e la successiva, abbiamo ricavato il grafico della legge oraria del moto della macchia solare.



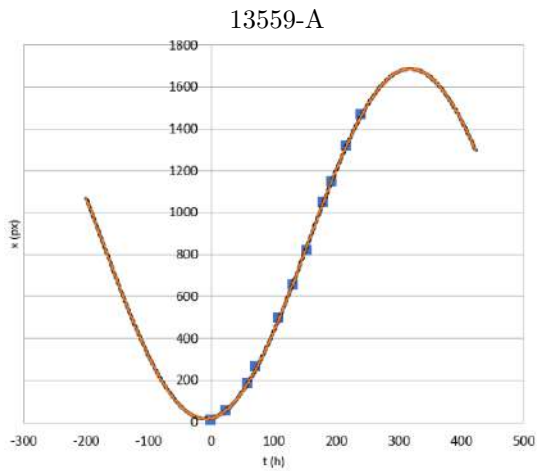
Infine, allo scopo di ridurre al massimo l'incertezza si è proceduto ad un fit sinusoidale dei dati ottenuti, in modo da poter ricavare l'equazione del moto che meglio approssimasse i nostri dati. Per far ciò ci siamo avvalsi del software di interpolazione SinusoidalRegressionCalculator presente sul sito web Stats.blue, ottenendo così la funzione finale.



Il periodo di rotazione è quindi stato ricavato dalla pulsazione ottenuta dal fit dei dati come

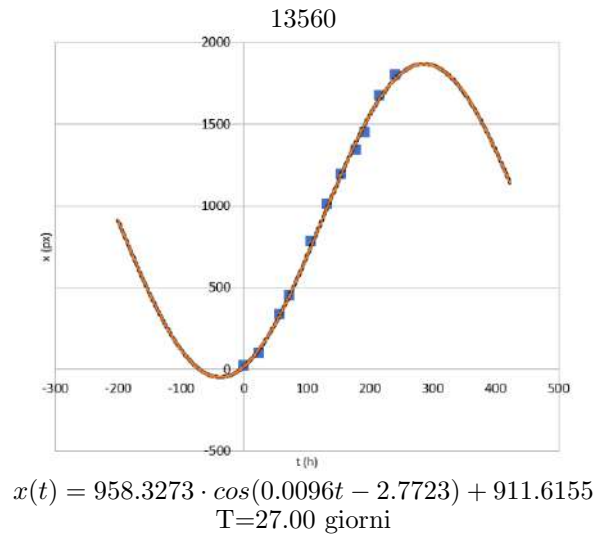
$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

I grafici e le leggi orarie ricavate per le 6 macchie vengono riportate qui sotto:



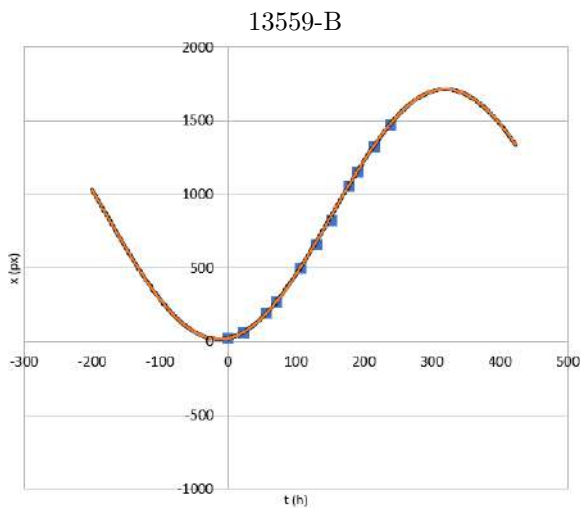
$$x(t) = 835.2820 \cdot \cos(0.0096t - 3.0547) + 851.7027$$

T=27.25 giorni



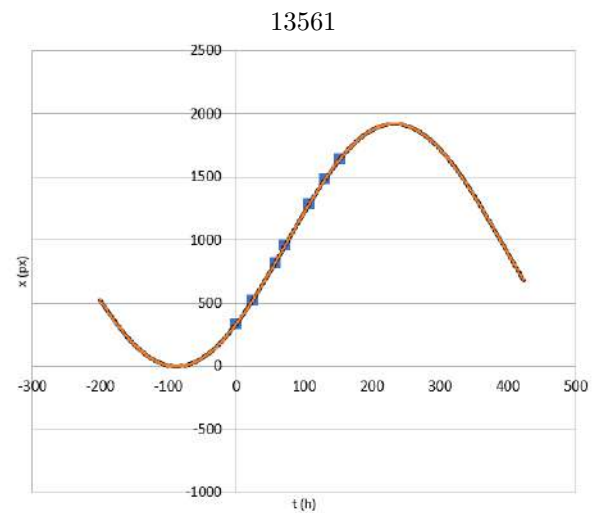
$$x(t) = 958.3273 \cdot \cos(0.0096t - 2.7723) + 911.6155$$

T=27.00 giorni



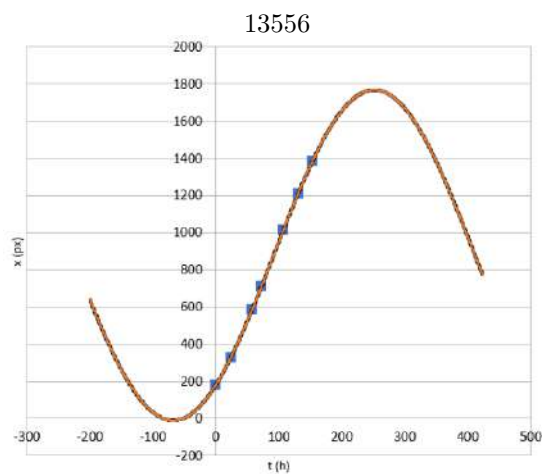
$$x(t) = 848.4964 \cdot \cos(0.0094t - 3.0478) + 865.8754$$

T=27.71 giorni



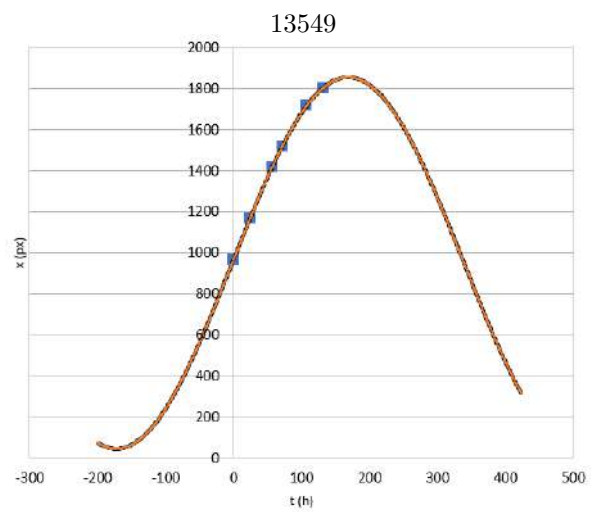
$$x(t) = 960.5972 \cdot \cos(0.0098t - 2.2810) + 958.8737$$

T=26.71 giorni



$$x(t) = 889.3039 \cdot \cos(0.0098t - 2.4735) + 878.6362$$

T=26.62 giorni



$$x(t) = 905.1759 \cdot \cos(0.0092t - 1.5507) + 950.1598$$

T=28.42 giorni

Riassumiamo in tabella i periodi ottenuti in ordine di latitudine crescente:

Table 2: Periodi di rotazione ricavati dal fit sinusoidale dei dati.

| Macchia | Periodo (giorni) |
|---------|------------------|
| 13561 | 26.71 |
| 13560 | 27.00 |
| 13549 | 28.42 |
| 13556 | 26.62 |
| 13559-B | 27.71 |
| 13559-A | 27.25 |

5. CONCLUSIONE

L'esperimento da noi effettuato aveva come obiettivo la misura del periodo di rotazione del Sole tramite lo studio del moto delle macchie solari. Il risultato che abbiamo ottenuto è un periodo di rotazione medio di 27,6 giorni, compatibile con il moto di rotazione siderale del sole di 27 giorni universalmente accettato dalla comunità scientifica. Le differenze possono essere dovute sia alle non ottimali condizioni in cui le riprese sono state effettuate, sia al fatto che le macchie solari in realtà possiedono una dinamica complessa, che ne causa l'ampliamento o la riduzione della superficie, rendendo più complesso individuarne la precisa posizione. In ultimo la risoluzione dei fotogrammi da noi acquisiti, seppur discreta, potrebbe aver influito su una non precisa individuazione del centro della macchia. Ciò considerato, ci riteniamo soddisfatti dei risultati ottenuti.

A causa del mal tempo non abbiamo potuto utilizzare solamente le nostre immagini ma abbiamo dovuto integrarle con quelle dell'archivio della NASA SDO. Riteniamo che il nostro esperimento potrebbe essere migliorato effettuando la raccolta dati in una località senza la presenza della nebbia, in presenza di un terreno stabile ed in condizioni meteorologiche migliori, così da ampliare sia il numero di acquisizioni e che la qualità delle stesse. Un altro limite si è rivelato la risoluzione della fotocamera utilizzata, la quale è risultata insufficiente per rilevare tutto il disco solare in una sola immagine, fattore che ci ha costretti a dover manipolare le quattro immagini acquisite aumentando l'incertezza globale.

Uno sviluppo dell'esperienza da noi effettuata potrebbe essere quello di studiare un maggior numero di macchie solari, in modo da indagare la variabilità del moto del loro periodo di rotazione in funzione della loro latitudine, così da poter elaborare un modello che descriva il moto di rotazione differenziale del Sole.

Grazie a questa esperienza siamo riusciti a dimostrare che è possibile effettuare la misura di una grandezza cinematica di un oggetto stellare a scuola.

Bibliografia

- CESAR Science Case – Rotation period of the Sun and the sunspot activity - Esa
 - STIMA DEL PERIODO DI ROTAZIONE DEL SOLE TRAMITE L'OSSERVAZIONE DELLE
- MACCHIE SOLARI- M. Altavilla; L. Aurino; G. Gravagno; U. A. Pellecchia; B. Serpe.
- <https://stats.blue.html>
 - <https://solarchatforum.com/viewtopic.php?t=11814>