"Percorsi per le Competenze Trasversali e l'Orientamento" (PCTO)

STIMA DEL PERIODO DI ROTAZIONE DEL SOLE TRAMITE L'OSSERVAZIONE DELLE MACCHIE SOLARI

M. Altavilla; L. Aurino; G. Gravagno; U. A. Pellecchia; B. Serpe.

LICEO SCIENTIFICO A. NOBEL TORRE DEL GRECO, NAPOLI, ITALIA
PROF VOCCIA, ALUNNI 5°A (A.S. 2020/2021)

ABSTRACT

Si illustra un esperimento attraverso il quale abbiamo stimato il periodo di rotazione del Sole, sfruttando il moto delle macchie solari. Queste ultime sono delle regioni visibili nella parte più bassa dell'atmosfera del Sole, la "fotosfera", caratterizzate da una temperatura minore (~3700 K) rispetto alle aree circostanti (~5700 K), dovuta all'inibizione del trasporto dell'energia verso la fotosfera per la presenza di un'intensa attività magnetica, che le rende più scure rispetto al resto del manto, per contrasto. Questa evidenza è un ottimo strumento per portare a termine indagini circa i diversi comportamenti del Sole. *Il nostro obiettivo è quello di sfruttare il loro moto per poter stimare il periodo di rotazione solare.* Come è ormai noto il corpo celeste compie un moto di rotazione intorno al proprio asse e, poiché le macchie si trovano sulla fotosfera, ruoteranno con essa. Abbiamo analizzato il moto delle macchie solari in un intervallo di tempo di 13 giorni - utilizzando il programma di analisi di immagini *JHelioviewer*[1]- e, con i dati ottenuti, abbiamo costruito una rappresentazione euclidea bidimensionale da cui stimare la velocità angolare ω e, quindi, il periodo di rotazione.

Parole chiave: Sole: Macchie solari - Sole: Periodo di rotazione

INTRODUZIONE

È ben risaputo che il Sole è un corpo tutt'altro che statico, coinvolto in una pluralità di processi fisici, tra cui un moto di rotazione intorno al proprio asse.

Diversi sono gli studi effettuati sul tema, i quali hanno permesso di conoscerne il periodo di rotazione con un'elevata precisione, ma a netto di complesse attrezzature non alla portata di tutti. Quello che infatti vorremmo l'utilizzo di software di analisi delle immagini e di calcolo e discrete competenze matematiche per essere eseguito, quindi sicuramente adatto alla divulgazione e alla riproduzione in scuole o, in generale, all'esterno di sedi prettamente scientifiche che, ciononostante, ci assicurano stime più che accettabili.

Gli strumenti richiesti sono:
-Software:*Jhelioviewer;*
-*Software:Excel;*
-Immagini della stessa macchia solare ottenute nel continuo dallo strumento HMI[2] (Helioseismic and Magnetic Imager) a bordo del satellite SDO[3] (Solar Dynamic Observatory) e prese a distanza di un giorno e per almeno 10 giorni consecutivi.

Il nostro punto di partenza sono le macchie solari. Il fenomeno fu osservato per la prima volta nel 1610 da Galileo Galilei[4], successivamente descritto nel trattato "*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari"*. Secondo la sua idea iniziale, le macchie venivano identificate come delle nubi piatte situate al di sopra della superficie solare e, studiando il loro moto uniforme, dedusse che il Sole dovesse ruotare sul proprio asse con velocità uniforme. Inoltre, il continuo apparire e scomparire delle macchie, dimostrava che il Sole subiva cambiamenti. Queste scoperte misero in crisi sia la concezione del Sole come astro perfetto, sia l'immutabilità dei cieli, teorie fortemente sostenute dagli aristotelici. A oggi sappiamo che le macchie solari, spesso riunite in coppie o in gruppi, presentano una forma circolare e spesso irregolare. Appaiono scure a causa della differente temperatura, trattandosi di zone in cui essa risulta inferiore rispetto al resto della superficie solare, emettendo, dunque, meno energia delle regioni circostanti; inoltre ricordiamo essere causate dall'azione del campo magnetico solare che inibisce il processo di convenzione del plasma, causando quindi un raffreddamento di tali regioni. Il primo che utilizzò le macchie solari per calcolare il periodo di rotazione fu l'astronomo Johannes Fabricius[5] nel 1611(in parallelo ed indipendentemente dagli studi di Galileo). Successivamente il fisico Christoph Scheiner[6] misurò il periodo di rotazione e notò come questo diminuiva all'aumentare della latitudine, scoprendo che il moto di rotazione solare è differenziale. Questo è causato dal fatto che la fotosfera solare è costituita da uno strato di plasma che si muove più velocemente nelle zone equatoriali e più lentamente in quelle tendenti verso l'area polare.

Le nostre misurazioni sono state effettuate mediante l'utilizzo del software di visualizzazione per immagini solari free source *JHelioviewer*, un avanzato programma prodotto dall'*ESA JHELIOVIEWER TEAM,* basato sullo standard di compressione JPEG 2000 e utilizzato a livello globale. Esso consente l'accesso ai dati di alcuni telescopi spaziali, tra cui *SDO* di proprietà della NASA, selezionato per condurre il nostro esperimento.

DATI E ANALISI

Utilizzando *JHelioviewer* (in particolare le informazioni del database dello strumento HMI) andiamo a misurare un certo numero di macchie solari, che per l'esperimento abbiamo deciso essere 3, e il loro moto circolare uniforme. Per ciascuna di esse andiamo a misurare la longitudine φ, la latitudine θ e il loro spostamento in un lasso di tempo *t* di massimo 13 giorni. La misura viene fornita da *JHelioviewer* semplicemente puntando il mouse sulla macchia: il programma darà automaticamente la posizione. Per

garantire una maggiore precisione scegliamo una tripletta di macchie né troppo tendenti ad una latitudine equatoriale, né tantomeno una polare (tra i 15° ed i 30°). Le latitudini delle 3 macchie sono le seguenti:

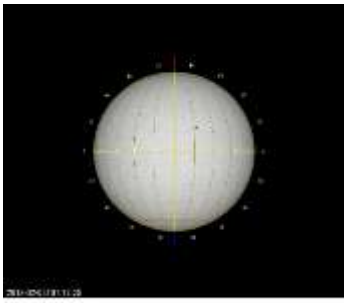


FIG. 1: Latitudine 15°osservata tra il 28/01/2013 ed il 9/02/2013
Data Giuliana: 2456320.81255-2456322.81255

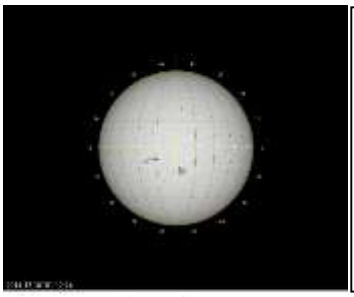
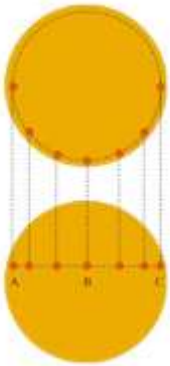


FIG.2: Latitudine 23.5°osservata tra il 17/03/2015 ed il 28/03/2015
Data Giuliana: 2457098.81255
2457109.81255

FIG. 3: Latitudine 30°osservata tra 11/12/14 ed il 23/12/2014
Data Giuliana: 2457002.81255-2457014.81255

Una volta misurate le macchie sorge un problema circa l'utilizzo dei dati, in quanto il Sole può essere approssimato ad una sfera che, però, noi osserviamo come un disco (FIG. 4). Questa proiezione fa sì che le macchie più vicine al bordo del disco sembreranno compiere un percorso molto più breve rispetto alle stesse macchie in prossimità del centro del disco.



Ricordiamo che il procedimento che da qui in seguito descriveremo andrà replicato per ogni macchia.

Tracciamo sull'immagine del Sole visualizzata su *JHelioviewer* una corda (parallela al diametro del Sole) che passi il più possibile per le diverse posizioni che la macchia assume nel tempo, andando così a costruire un semicerchio avente come diametro proprio la corda trovata. Abbiamo dunque rappresentato la sua traiettoria in figura 5.

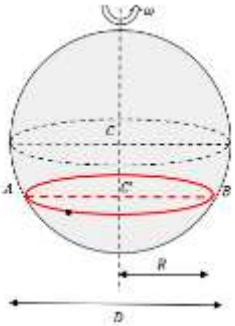


FIG.5

Quando eseguiamo le misure con *JHelioviewer* stiamo osservando la proiezione del moto circolare lungo il diametro solare, ottenendo i valori della nostra ascissa (cioè la longitudine φ). Il modello che possiamo utilizzare è del tutto analogo a quello di un moto armonico semplice, il quale può essere descritto proprio in questo modo. Definiamo AB il diametro, β l'angolo al centro e R il raggio (FIG. 6)

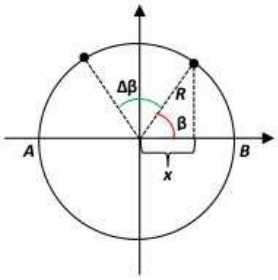


FIG. 6

Dalla trigonometria sappiamo che:

$$x = R cos\beta$$

Nel moto circolare uniforme $\omega = \beta t$ e quindi lo spostamento della macchia seguirà la legge oraria quindi

$$x(t) = R\cos(\omega t + \alpha)$$

dove ω è la velocità angolare e α la fase iniziale del moto circolare

$$x / R = cos(\omega t + \alpha)$$
$$arccos(x / R) = \omega t + \alpha$$

Detto:

$$y = arccos(x\ /\ R)$$

Otteniamo che:

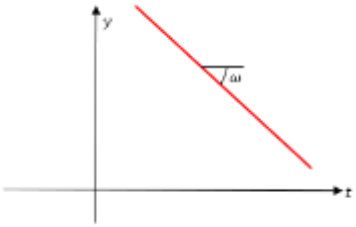


FIG. 7

$$y = \omega t + \alpha$$

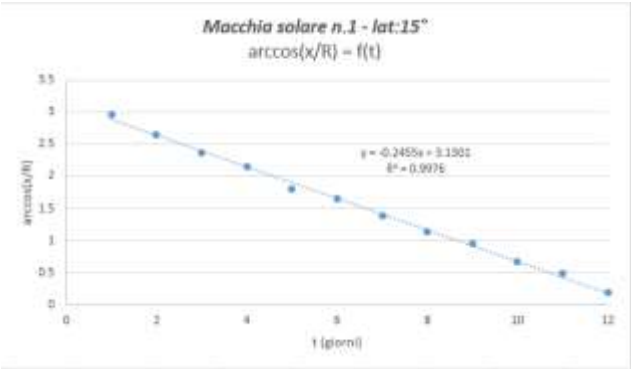
Si tratta di una funzione il cui grafico è una retta di pendenza ω (FIG. 7):

Si ricordi che nel moto circolare il periodo T vale: $T = 2\pi\ /\ \omega$

Da questa semplice formula ricaviamo il periodo di rotazione del Sole.

Passiamo ai dati.

Macchia1:



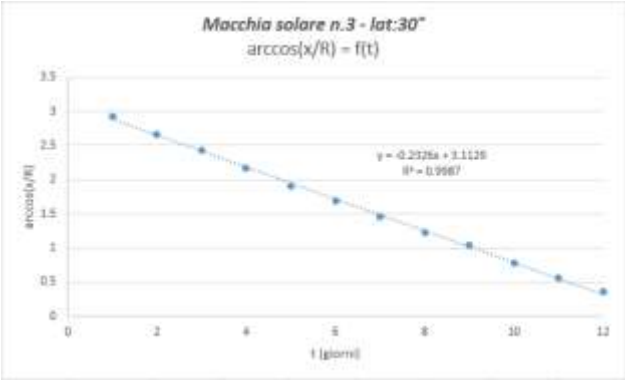
t (giorni)	x (cm)	arccos(x/R)
1	-5.9	2.958763937
2	-5.3	2.653722747
3	-4.3	2.369807283
4	-3.3	2.153160565
5	-1.4	1.806300564
6	-0.5	1.654226413
7	1.1	1.386420136
8	2.5	1.141020895
9	3.5	0.947969741
10	4.7	0.670785993
11	5.3	0.487869906
12	5.9	0.182828717

ω (rad/giorno)	T = 2π/ω (giorni)
0.2455	25.59342

Raggio traiettoria macchia	
R (cm)	
6	

Possiamo anche costruire un grafico della legge oraria. Il periodo analizzato non è sufficientemente ampio per far emergere nel grafico della legge oraria un chiaro andamento sinusoidale. Pertanto una volta raggiunto il 13esimo giorno (corrispondente al picco) è necessario specchiare i dati per i successivi 13 giorni per avere la parte discendente della sinusoide. Così ottenuta la curva intera, essa può essere ripetuta, tenendo conto della periodicità della funzione coseno.

Macchia 2:

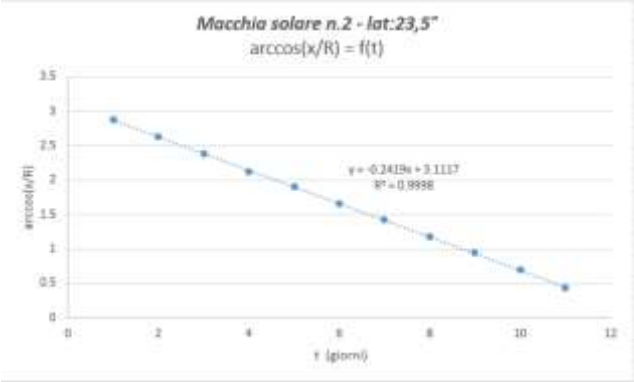


t (giorni)	x (cm)	arccos(x/R)
1	-5.3	2.871088737
2	-4.8	2.63155735
3	-4	2.385136269
4	-2.9	2.12618398
5	-1.8	1.904212237
6	-0.5	1.661831105
7	0.8	1.424823938
8	2.1	1.179033604
9	3.2	0.94983391
10	4.2	0.70186969
11	5	0.429699666

ω (rad/giorno)	T = 2π/ω (giorni)
0.2419	25.97431

Raggio traiettoria macchia
R (cm)
5.5

Macchia 3:

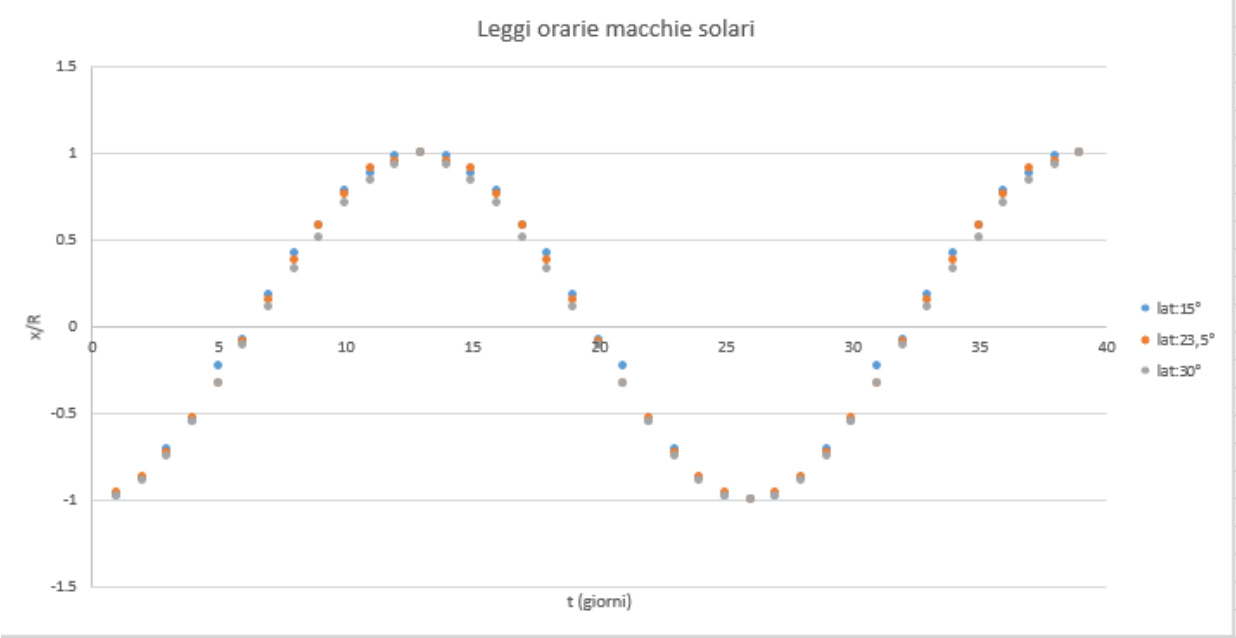


t (giorni)	x (cm)	arccos(x/R)
1	-4.4	2.930381773
2	-4	2.665710404
3	-3.4	2.427298099
4	-2.5	2.159827297
5	-1.5	1.910633236
6	-0.5	1.682137341
7	0.5	1.459455312
8	1.5	1.230959417
9	2.3	1.034319313
10	3.2	0.779719029
11	3.8	0.565269184
12	4.2	0.367208021

ω (rad/giorno)	T = 2π/ω (giorni)
0.2326	27.01283

Raggio traiettoria macchia
R (cm)
4.5

È inoltre possibile costruire un diagramma di legge oraria unico per le tre macchie:



t (giorni)	*lat:15°*	*lat:23,5°*	*lat:30°*
1	-0.98333	-0.96364	-0.97778
2	-0.88333	-0.87273	-0.88889
3	-0.71667	-0.72727	-0.75556
4	-0.55	-0.52727	-0.55556
5	-0.23333	-0.32727	-0.33333
6	-0.08333	-0.09091	-0.11111
7	0.18333	0.14545	0.11111
8	0.41667	0.38182	0.33333
9	0.58333	0.58182	0.51111
10	0.78333	0.76364	0.71111
11	0.88333	0.90909	0.84444
12	0.98333	0.94545	0.93333
13	1	1	1
14	0.98333	0.94545	0.93333
15	0.88333	0.90909	0.84444
16	0.78333	0.76364	0.71111
17	0.58333	0.58182	0.51111
18	0.41667	0.38182	0.33333
19	0.18333	0.14545	0.11111
20	-0.08333	-0.09091	-0.11111
21	-0.23333	-0.32727	-0.33333
22	-0.55	-0.52727	-0.55556
23	-0.71667	-0.72727	-0.75556
24	-0.88333	-0.87273	-0.88889
25	-0.98333	-0.96364	-0.97778
26	-1	-1	-1
27	-0.98333	-0.96364	-0.97778
28	-0.88333	-0.87273	-0.88889
29	-0.71667	-0.72727	-0.75556
30	-0.55	-0.52727	-0.55556
31	-0.23333	-0.32727	-0.33333
32	-0.08333	-0.09091	-0.11111
33	0.18333	0.14545	0.11111
34	0.41667	0.38182	0.33333
35	0.58333	0.58182	0.51111
36	0.78333	0.76364	0.71111
37	0.88333	0.90909	0.84444
38	0.98333	0.94545	0.93333
39	1	1	1

RISULTATI E DISCUSSIONE

Gli esperimenti hanno condotto alle seguenti stime del periodo di rotazione del Sole:

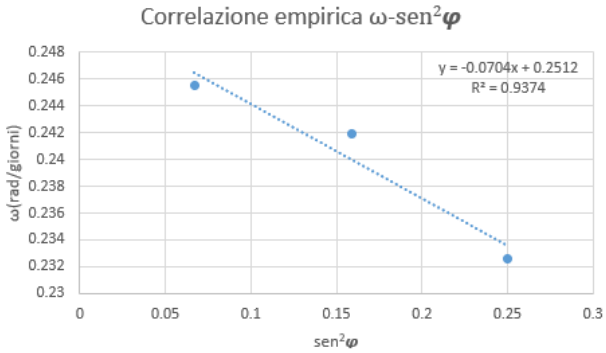
Macchia φ=15°:	T=25.5934 giorni
Macchia φ=23.5°:	T=25.97343 giorni
Macchia φ=30°	T=27.0128 giorni

Quello che risulta dal nostro esperimento è che il periodo di rotazione del Sole non è costante, ma differenziale, poiché varia con la latitudine (e più nello specifico aumenta, all'aumentare della latitudine). Le misure della velocità angolare possono essere utilizzate per ricavare la variazione della stessa alle differenti latitudini solari, nota come *legge di rotazione differenziale*. L'espressione comunemente utilizzata per esprimere questa legge è (Poljančić[7]):

$$\omega(\varphi) = A + Bsin^2\varphi$$

dove φ è la latitudine eliografica, e *A*, *B* sono parametri della rotazione differenziale solare. In particolare per $\varphi = 0°$, *A* è la velocità angolare equatoriale solare.

Sempre tramite il programma di elaborazione dati possiamo ricavare un'equazione interpolante, mediante il metodo dei minimi quadrati, che descriva la variazione della velocità angolare sinodica (e quindi del periodo sinodico) alle varie latitudini. Usando i dati in tabella ed eseguendo il fit lineare otteniamo i seguenti valori per le costanti:



$\varphi(°)$	$sen^2\varphi$	$\omega\left(\frac{rad}{giorni}\right)$
15	0.066987	0.2455
23.5	0.159001	0.2419
30	0.25	0.2326

$$A = 0.2512\frac{rad}{giorno}$$

$$B = -0.0704\frac{rad}{giorno}$$

Come ogni misura in fisica anche le nostre presentano un errore che sarà dovuto alla precisione degli strumenti, quindi alla risoluzione delle immagini di *Jhelioviewer*. Inoltre lo stesso valore determinato dalle immagini del Sole è quello che viene chiamato *periodo sinodico di rotazione*. Questo è il periodo di rotazione apparente del Sole visto da Terra, non il "vero" periodo di rotazione del Sole perché la Terra è in movimento, orbita attorno al Sole da ovest a est mentre il Sole ruota. Il periodo di rotazione "vero" del Sole, è noto come *periodo di rotazione siderale.* Per questa ragione il *periodo sinodico* è un po' 'più lungo *del periodo siderale*. A ciò si aggiunge ovviamente che il nostro esperimento può essere migliorato: un modo sarebbe considerare un maggior numero di macchie e prendendo ciascuna di esse a delle latitudini più diverse possibili. È utile nella scelta delle macchie prestare particolare attenzione al periodo in cui si selezionano, poiché il Sole attualmente si trova in un periodo di attività minima che causa una scarsa quantità di produzione di macchie, al contrario della situazione degli anni precedenti (come ad esempio il 2015). In più, un limite di questo metodo è la facilità con la quale si può cadere in errore, in quanto anche una minima imprecisione dovuta alla determinazione delle coordinate delle macchie, con conseguente variazione decimale dei valori ottenuti, potrebbero portare nel risultato finale a importanti errori nella stima dell'effettivo periodo di rotazione solare.

CONCLUSIONE

Il nostro obiettivo era quello di trovare un metodo accessibile ma efficace per il calcolo del periodo di rotazione solare, partendo dai dati del satellite SDO analizzati mediante il programma *Jhelioviewer,* per poi andare a utilizzare delle nozioni di dinamica per giungere al risultato. Vista la semplicità dell'esperimento e i risultati soddisfacenti a cui siamo pervenuti, possiamo affermare con assoluta certezza che l'esperimento, tenendo conto dei suoi limiti, ha avuto successo.

RIFERIMENTI

[1]JHelioviewer, JHelioviewer team: D. Berghmans, *Royal Observatory of Belgium*; B. Bourgoignie, *Royal Observatory of Belgium*; A. Csillaghy, *University of Applied Sciences; FHNW, Switzerland*, G Dimitoglou *Hood College Frederick, MD, USA*; S Felix, *University of Applied Sciences, FHNW, Switzerland*; B Fleck, *ESA*; P Jiggens, *ESA*; D. Müller, *ESA*; B Nicula, *Royal Observatory of Belgium*; F. Verstringe, *Royal Observatory of Belgium*.

[2]HMI: chou, J., Scherrer, P. H., Bush, R. I., et al. 2012, Sol. Phys., 275, 229

[3]*SDO: Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. C. 2012, Sol. Phys., 275,* 3

[4]Galileo Galilei, 1613; *storia e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti: comprese in tre lettere scritte all'illustrissimo signor Marco Velseri Galileo Galilei*; Link per il download del pdf: *..\..\..\..\..\Download\galilei_istoria_e_dimostrazioni_etc.pdf*

[5]Johannes Fabricius, 1611, *De Maculis in Sole Observatis et apparente earum cum Sole conversione, Narratio.* Link per il download: *https://play.google.com/books/reader?id=M5hbAAAAcAAJ&hl=it&pg=GBS.PP1*

[6]Christoph Scheiner , 1630, *Rosa Ursine sive solis.* Link per il download del pdf*: Christoph_Scheiner_Rosa_ursina_sive_sol.pdf*

[7]Poljančić*Beljan*, I. et al., *Astronomy* & Astrophisycs 606, A72 ,2017

Inoltre:
The spinning sun (sito dal quale abbiamo tratto
spunto per il lavoro di ricerca): *http://www.mso.anu.edu.au/~jerjen/researchprojects/spinningsun/spinningsun.html*

C. Isabel Ribeiro; Sunspots on a rotating Sun (articolo da cui abbiamo preso spunto per l'esperienza): https://www.scienceinschool.org/content/sunspots-rotating-sun

Convertitore in data Giuliana: http://www.onlineconversion.com/julian_date.htm

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia sinceramente per il supporto e la consulenza il professor R. Voccia ed i due ricercatori dell'INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte-Napoli, C. Sasso e L. Terranegra.