

Prefazione

Nell'ambito del Progetto Alternanza Scuola Lavoro, nel mese di Aprile 2016, due Studenti della classe 4F del Liceo Scientifico dell'Istituto hanno svolto uno stage di 40 ore presso l'Osservatorio Solare dell'IISS "Valceresio" svolgendo un lavoro all'apparenza noioso e ripetitivo, ma in realtà di una portata notevole nel contesto dello studio del Sole ed in particolare dei suoi cicli di attività.

Si tratta di un'indagine compiuta in modo amatoriale e con mezzi alla portata di tutti (disegni della fotosfera, matita, riga e goniometro), per di più ristretta in un lasso di tempo ridotto, causa la breve durata del loro stage.

Di Bella e Seveso hanno svolto un lavoro che rappresenta comunque un modesto, ma significativo contributo alla comprensione del comportamento della nostra stella.

La loro attività è concernente un argomento molto specialistico e tecnico, che gli autori spiegano solo brevemente nel testo lasciando giustamente più spazio alla descrizione del loro metodo di lavoro e dei loro risultati. Allo stesso tipo di indagine, se pur con metodi ovviamente più sofisticati e per lunghi periodi di tempo, si sono dedicati e si dedicano molti fisici solari professionisti, vista la sua importanza.

Pertanto il presente lavoro, pur nei limiti di una tecnica semplice ma efficace e basandosi su materiale prodotto nel nostro Osservatorio, che pur essendo amatoriale è comunque da oltre 5 anni inserito nel network internazionale del SIDC/SILSO* di Bruxelles (e visti i suoi coefficienti di riduzione costanti nel tempo e i valori di dispersione degli stessi tra i più bassi al mondo, è da considerarsi comunque un eccellente Osservatorio), non vuole certo essere né esaustivo né avere la pretesa di essere considerato una pubblicazione scientifica. E' solo il resoconto, scritto però con il rigore e le caratteristiche di un vero articolo di Fisica Solare, di un'esperienza che spero abbia, al di là dei risultati prodotti, arricchito il patrimonio culturale degli studenti e soprattutto abbia dato loro modo di apprendere come si lavora in ambito scientifico sperimentale.

Prof. Mario Gatti

Direttore Responsabile dell'Osservatorio Solare dell'IISS "Valceresio".

* Il SIDC (Solar Influences Data Analysis Center) ha sede a Bruxelles presso l'Osservatorio Reale del Belgio e dal 1982 coordina una rete di Osservatori Solari sparsi in tutto il mondo per il calcolo dei cosiddetti International Sunspots Numbers, oltre che occuparsi del Sole in altri settori di ricerca, come l'emissione radio e lo Space Weather ad esempio. Da pochi anni è nato il SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations), un centro di calcolo costituito all'interno del SIDC e dedicato espressamente all'attività fotosferica del Sole, punto di riferimento mondiale per tutto ciò che ha a che fare con le macchie solari. Una curiosità: oltre il 65% degli osservatori del network è costituito da quelli che in Belgio chiamano *amateurs*, cioè astronomi non per professione, ma per passione, preparati e motivati nel loro lavoro.

Nota: gli autori da due anni fanno parte di un gruppo di tre osservatori della loro classe che compiono osservazioni sistematiche del Sole in fotosfera, con il conteggio delle macchie ed in cromosfera con il conteggio dei filamenti e delle protuberanze al lembo. Questo nell'ambito di un altro progetto formativo, detto Astro.Net, giunto al suo ottavo anno di vita, che coinvolge annualmente una trentina di studenti nelle attività dell'Osservatorio. Sono inoltre impegnati in una attività di riconteggio dei dati della Specola di Locarno utilizzando un metodo diverso da quello impiegato in quell'Osservatorio, detto metodo non ponderato. Questo per aiutare i nostri colleghi locarnesi ai quali il SILSO ha chiesto di riconteggiare tutte le osservazioni dal 1981 ad oggi.

Angoli di tilt e Legge di Joy nel ciclo solare 24: un'analisi preliminare.

Sergio Di Bella e Lorenzo Seveso

Osservatorio Solare
Istituto di Istruzione Superiore Statale "Valceresio"
21050 Bisuschio (Varese)

Abstract

I gruppi di macchie solari, controparte fotosferiche delle Regioni Attive Bipolari (ARs), presentano una sistematica inclinazione del loro asse rispetto all'equatore solare. Questa caratteristica, scoperta e descritta nei primi anni del secolo scorso, prende il nome di "Legge di Joy". E' di fondamentale importanza nel modello della dinamo solare globale in quanto ne rappresenta uno degli aspetti principali. Questo lavoro si basa sulla misura dell'angolo di inclinazione di gruppi di macchie in un periodo compreso tra Novembre 2011 e Maggio 2014, allo scopo di determinarne il valore medio e la sua eventuale correlazione con la latitudine dei gruppi all'interno del ciclo solare 24, tuttora in corso, se pur ormai nella sua fase calante verso il prossimo minimo di attività. Una breve introduzione illustra l'importanza di questi angoli in fisica solare (punto 1). Seguono la descrizione del metodo operativo impiegato (punto 2), i risultati e relativa discussione degli stessi (punto 3) e le conclusioni (punto 4). In appendice seguono alcune considerazioni personali degli autori relative alla loro esperienza.

1) Introduzione

Un piccolo angolo sistematico, detto angolo di tilt, tra l'asse di una Regione Attiva Bipolare (ARs, Active Regions) fu scoperto da George Ellery Hale e collaboratori nel 1919 (1). Il risultato si era basato su uno studio statistico di A.H. Joy, il quarto coautore del lavoro, il che condusse Zirin nel 1988 (2) a chiamare questa importante caratteristica delle ARs "Legge di Joy". A pagina 167 del loro articolo si trova scritto:

"A study by Joy of the sunspots-drawings of Carrington (1856-1861) and Spörer (1861-1893) shows that there is little change in this angle during the life of the group, but that in the mean the angle bears a definite relation to the latitude of the group. Twenty-six hundred and thirty-three bipolar and multiple groups, covering three and one-half sun-spots cycles, were examined. The following spot of the pair tends to appear farther from the equator than the preceding spot, and the higher the latitude, the greater is the inclination of the axis to the equator. This relation holds for both hemispheres."

In poche parole, la parte di un gruppo di macchie (polo) che precede nel senso della rotazione del Sole dovrebbe trovarsi a latitudine eliografica più bassa rispetto alla parte seguente. Quindi nei due opposti emisferi i gruppi di macchie tendono a disporsi con orientazioni contrarie. Questo è evidente nella figura 1 alla pagina seguente, che riporta un disegno della fotosfera effettuato nel nostro Osservatorio.

Inoltre l'angolo di tilt tende ad aumentare con la latitudine del gruppo. Queste sono le caratteristiche che emergono dalle parole di Hale e collaboratori. Un'altra caratteristica dei gruppi di macchie, messa in evidenza da Spörer, è quella di disporsi verso latitudini sempre più prossime all'equatore con il procedere di un ciclo di attività. All'inizio del ciclo le macchie compaiono solitamente a latitudini tra $\pm 30^\circ$ - 40° per poi "scendere" verso l'equatore a ridosso del quale si trovano al minimo successivo. Se si riportano su grafico le posizioni delle macchie in funzione della latitudine si ottengono i cosiddetti diagrammi a farfalla, detti anche diagrammi di Maunder, come si vede in figura 2:

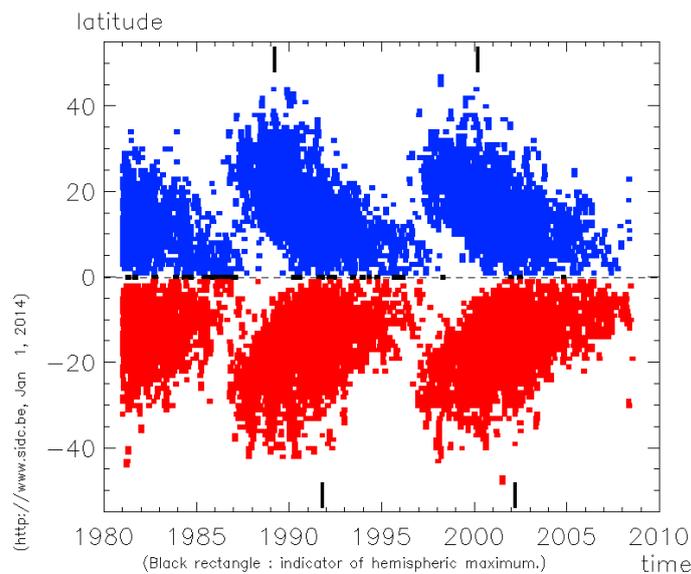


Figura 2: diagramma di Maunder (butterfly - diagram) che evidenzia la migrazione delle macchie solari in latitudine verso l'equatore con il procedere di un ciclo di attività. Emisfero N in blu ed emisfero S in rosso. Le tacche nere verticali rappresentano i massimi dei cicli. Notare come i massimi sono due separati (gap) e quello nell'emisfero N precede quello nell'emisfero S. Questa è stata confermata essere una caratteristica di tutti i cicli. Anche il ciclo 24 ha presentato un massimo a N nel Novembre 2011 ed uno a S tra Febbraio e Aprile del 2014 (Cortesia: SIDC/SILSO <http://sidc.be/silso>)

Questa tendenza dei gruppi di macchie a disporsi nei pressi dell'equatore al termine di un ciclo, unita all'orientazione della loro inclinazione di tilt è alla base del più conosciuto modello che spiega l'attività ciclica del Sole, elaborato da Babcock nel 1961 (3) e formalizzato matematicamente da Leighton nel 1964 e 1969 (4,5), detto per questo *modello di Babcock – Leighton*. Si tratta di un modello di dinamo solare globale, detta anche a trasporto di flusso, che cerca di spiegare l'attività solare basandosi sulla sua rotazione differenziale. E' noto infatti che, dai 7/10 del raggio solare sino alla fotosfera la stella ruota con velocità angolare maggiore all'equatore rispetto ai poli.

La rotazione differenziale scompare al di sotto dei 7/10 del raggio e al di sopra della fotosfera, cioè in cromosfera e in corona, anche se la si ritrova in alcune zone a temperature diverse in corona. La rotazione differenziale del Sole è tuttora inspiegabile ed è uno dei grandi problemi aperti nella Fisica Solare. La linea ideale (in realtà è un sottile anello di qualche centinaio di Km di spessore) intorno ai 7/10 del raggio solare che separa i due modi di rotazione nonché la zona radiativa da quella convettiva ha il nome intraducibile anglosassone di *Tachocline*.

Nella didascalia della figura 3 alla pagina seguente, che schematizza il modello della dinamo solare, è spiegato come la presenza dell'angolo di tilt sia fondamentale per la consistenza del modello. Il modello di Babcock – Leighton è molto complesso e richiede comprensione approfondita della

MHD o Magnetoidrodinamica, che tratta del moto di un plasma immerso in un campo magnetico. Forzatamente ci si limita qui ad una illustrazione schematica ed estremamente semplificata.

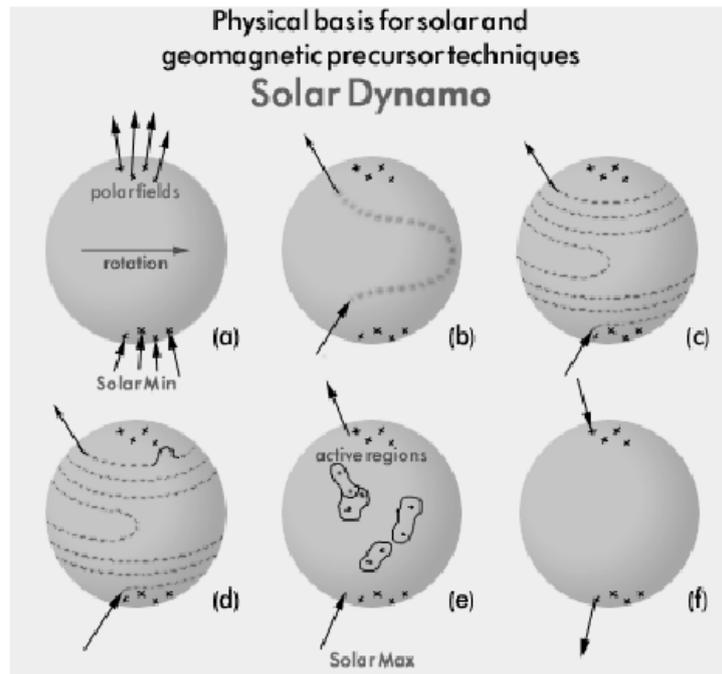


Figura 3: Nel modello della dinamo globale al minimo di un ciclo le linee del campo magnetico del Sole sono disposte in modo poloidale, cioè con simmetria assiale rispetto all'asse eliografico (a). Con il procedere del ciclo la rotazione differenziale distorce le linee (b,c,d) fino a portarle in una configurazione detta di campo toroidale, estremamente irregolare e con simmetria diversa. L'inclinazione opposta (tilt) nei due emisferi delle ARs porta poli opposti molto vicini, che tendono a neutralizzarsi (e) lasciando un eccesso di polarità opposte, che vengono poi ritrascinate verso i poli con un meccanismo detto "meridional circulation" o "conveyor belt" che avviene a livello della Tachocline. Questo riporta le linee in configurazione di campo poloidale (f), ma con i poli magnetici invertiti. Ha inizio così un nuovo ciclo. Pertanto il vero ciclo solare, inteso come il ripristinarsi di una certa polarità iniziale, dura due cicli di macchie solari, quindi circa 22,4 anni. Notare il ruolo essenziale del tilt delle ARs, senza il quale l'intero modello non sarebbe sostenibile. (Cortesia: <https://www.researchgate.net>)

Vista l'importanza dell'angolo di tilt, numerosi studiosi hanno dedicato lavori in proposito. Recentemente, V. Senthamizh Pavai *et al.* (6) in un articolo intitolato "Sunspot group tilt angle measurements from historical Observations" hanno preso in esame migliaia di gruppi di macchie solari presi da serie storiche di disegni della fotosfera effettuati tra il 1618 e il 1894 da diversi osservatori, tra i quali Staudacher, Hevelius, Schwabe e Spörer, giungendo a interessanti conclusioni: gli angoli di tilt medi sono piccoli, non più grandi di $5.35^\circ \pm 1.43^\circ$ (disegni di Hevelius), sono in correlazione con la forza del ciclo ed in anticorrelazione con quella del ciclo successivo. Alle medesime conclusioni sono giunti M. Dasi-Espuig *et al.* Nell'articolo "Sunspot group tilt angles and the strenght of the solar cycle" (7). Per forza di un ciclo si intende la superficie massima fotosferica coperta dalle macchie durante il ciclo. Gli autori hanno trovato un r_c pari a -0.93 per l'anticorrelazione angolo di tilt – forza del ciclo in corso ed un r_c pari a $+0.70$ per la correlazione angolo di tilt – forza del ciclo successivo (r_c indica il coefficiente di correlazione di Bravais-Pearson per la definizione del quale si rimanda alla letteratura specifica o alla rete. I valori riportati sono stati ottenuti dagli autori esaminando i dati dell'Osservatorio di Kodaikanal coprendo i cicli solari dal 15 al 21). Altri dati, relativi all'Osservatorio di Mount Wilson, hanno dato gli stessi risultati se pur con coefficienti di correlazione minori. In conclusione, non solo gli angoli di tilt sono fondamentali per la consistenza del modello della dinamo globale, ma rappresentano un indice che permette di valutare la forza di un ciclo e fare previsioni su quella del ciclo successivo.

2) Metodo operativo

Allo scopo di misurare gli angoli di tilt dei gruppi di macchie per il ciclo in corso sono stati utilizzati i disegni della fotosfera relativi alle macchie solari per un periodo temporale da Gennaio 2011 a Maggio 2014. Per minimizzare l'errore dovuto alla simmetria sferica della fotosfera e quindi al fatto che l'angolo di tilt si calcola non fra due rette ma tra una retta (asse del gruppo) e una curva (equatore solare) sono stati presi in considerazione solo quei disegni con latitudine eliocentrica (B_0) compresa tra $\pm 4^\circ$. In questo intervallo i paralleli e l'equatore sono praticamente rettilinei se osservati da Terra. Questo significa avere a disposizione circa 6 mesi per anno.

Ovviamente, non essendo bipolari, non sono stati considerati i gruppi di classe A, H e J secondo la classificazione di Zurigo. Sempre per evitare errori dovuti alla curvatura vicino ai lembi, sono state limitate le misure a gruppi compresi tra $40^\circ E$ e $40^\circ W$ in longitudine eliografica. Successivamente su ogni disegno, debitamente fotocopiato per non danneggiare l'originale, sono stati tracciati gli assi dei gruppi, l'equatore e misurati gli angoli di tilt con un semplice goniometro nonagesimale con sensibilità di 0.5° . Però, considerato che sono state necessarie altre misure di angoli, come spiegato in seguito, eseguite con Dischi di Stonyhurst, i quali hanno sensibilità di 1° , per uniformità tutte le misure di angolo sono state arrotondate alla cifra intera, cercando il più possibile di bilanciare gli arrotondamenti per difetto con quelli per eccesso.

Al semplice scopo di avere una verifica del buon procedere del lavoro è stata utilizzata una formula semiempirica proposta da Wang e Sheeley nel 1989 (8) che permette di calcolare gli angoli di tilt ed è una delle più usate in letteratura, anche se non è l'unica. Secondo questa formula l'angolo di tilt è in relazione con le coordinate eliografiche nel seguente modo:

$$\tan\alpha = \Delta B / \Delta L \cos B$$

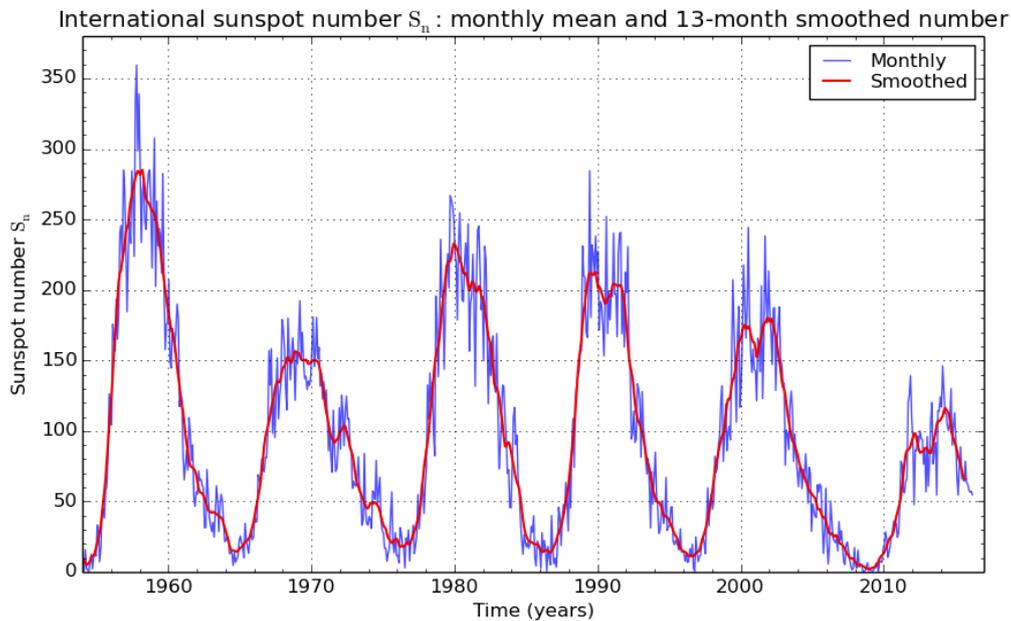
dove α è l'angolo di tilt, B è la latitudine eliografica del centro geometrico del gruppo e ΔB e ΔL sono le differenze angolari in latitudine e longitudine eliografica tra i centri dei due poli di ogni gruppo. Questi angoli sono stati misurati in gradi con i Dischi di Stonyhurst. Le latitudini sono state tutte considerate in valore assoluto (quelle a S sono sempre espresse come negative).

Sono stati esaminati complessivamente 336 disegni, con un totale di 850 gruppi sui quali sono state effettuate le misure descritte. Tutti i valori ottenuti sono stati inseriti in un foglio di calcolo predisposto, unitamente alla data dell'osservazione e al numero NOAA dei gruppi considerati.

3) Risultati

Il risultato più significativo ottenuto è una media degli angoli misurati decisamente più alta di quelle ottenute in passato. Questo potrebbe essere sicuramente dovuto ad errori casuali, ma resta il fatto che anche la media degli angoli calcolati con la formula di Wang-Sheeley risulta addirittura più alta di quella misurata. Visto che lo scarto tra gli angoli misurati e quelli calcolati è piccolo e simile ai valori medi ottenuti in passato, probabilmente il valore medio elevato trovato è dovuto alla anticorrelazione tra l'angolo di tilt e la forza del ciclo in corso. E' noto infatti che, anche se il ciclo 24 non si è ancora ufficialmente concluso, è stato sicuramente il più debole dei suoi ultimi predecessori. D'altra parte è anche noto che il ciclo di Wolf-Schwabe non è l'unico mostrato dal Sole. Ne esistono altri, con periodicità decennale, secolare e addirittura millenaria. Tra questi il meglio studiato è il ciclo di Gleissberg, che ha la durata di 8 cicli circa (circa 88 anni), all'interno del quale si trova sempre un ciclo più forte degli altri. Questo è stato il caso del ciclo 19 con il suo massimo tra il 1957 e il 1958. Il ciclo 24 si trova al minimo del ciclo di Gleissberg, il che farebbe pensare ad un futuro ciclo 25 più forte. Questo potrebbe essere confermato con la correlazione tra

gli angoli di tilt e la forza del ciclo successivo a quello in corso anche alla luce dei nostri risultati. La figura 4 mostra l'andamento degli ultimi cicli, i meglio studiati e conferma quanto detto:



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2016 April 1

Figura 4: andamento dei cicli di Wolf-Schwabe dal 19 al 24, quello in corso. La linea blu rappresenta le medie mensili di ogni anno, la linea rossa è la curva smoothed ottenuta dall'elaborazione dei dati del network di Osservatori compiuta dal SIDC/SILSO. Notare come il ciclo 19 sia molto più intenso degli altri ed il 24 sia il più debole. (Cortesia: SIDC/SILSO <http://sidc.be/silso>)

Per quanto riguarda la relazione tra l'angolo di tilt e la latitudine invece i dati sono molto dispersi ed irregolari e non permettono di confermare l'aumento dell'angolo con la latitudine. Basti pensare che il valore minimo ottenuto (tra l'altro per diversi gruppi) è 0, quindi gruppi "orizzontali" ed il massimo è stato 89. Per questo motivo è stato più opportuno, anziché impiegare la comune teoria degli errori assoluto, relativo e percentuale, calcolare le deviazioni standard sulle serie di dati, sia misurati che calcolati, per avere un indice più realistico della dispersione della popolazione delle misure. Anche questo è stato fatto utilizzando il foglio di calcolo. Con lo stesso è stato ottenuto l'indice di correlazione di Bravais-Pearson tra i valori degli angoli di tilt misurati e la latitudine eliografica. L'indice è risultato praticamente pari a zero, il che non depone né in termini di correlazione né di anticorrelazione. La tabella seguente riporta una sintesi dei risultati ottenuti:

α_{mis}	21°	Valore medio angolo di tilt misurato
α_{cal}	26°	Valore medio angolo di tilt calcolato
$\Delta\alpha$	4.7°	Valore medio dello scarto misurato-calcolato secondo la formula di Wang -Sheeley
$\delta\alpha_{\text{mis}}$	15.33	Deviazione standard sugli angoli misurati
$\delta\alpha_{\text{cal}}$	13.00	Deviazione standard sugli angoli calcolati
$r_c(\alpha_{\text{mis}} - B)$	0.04	Coefficiente di Bravais - Pearson angolo di tilt misurato - latitudine eliografica

Una considerazione particolare merita invece il numero di gruppi che presentano inclinazioni contrarie, non in accordo con la legge di Joy, nel senso che è la macchia seguente ad essere più prossima all'equatore, per entrambi gli emisferi. Tenendo conto di una ridondanza di dati dovuta al fatto che diversi gruppi portano lo stesso numero NOAA in quanto l'osservatore e compilatore del relativo disegno ha ritenuto di dover "spezzare" una singola AR in due o più gruppi che quindi risultano avere lo stesso numero NOAA e sono stati utilizzati più volte per più date, si ottiene

comunque un totale di 198 gruppi su 850 considerati con inclinazione contraria, pari al 23% (stima in eccesso a causa della ridondanza dei dati come spiegato). Uno scatter (deviazione) dalla legge di Joy non è certo una scoperta di questo lavoro: ogni ciclo presenta centinaia di gruppi non in accordo con la legge. La nostra è solo la conferma di questa tendenza. Per studiare l'andamento dell'angolo con la latitudine abbiamo considerato come ad alta latitudine i gruppi superiori ai 20° sia N che S (valore non elevato, ma nel ciclo 24 i gruppi con latitudini prossime a valori più alti, come 30° ad esempio sono veramente un numero irrisorio): ne sono risultati 166 su 850 pari al 20% (sempre stimati in eccesso per i motivi sopracitati). I due grafici che seguono illustrano la non correlazione tra α_{mis} e B (I) e l'andamento dei gruppi nel tempo per il periodo da noi considerato (II):

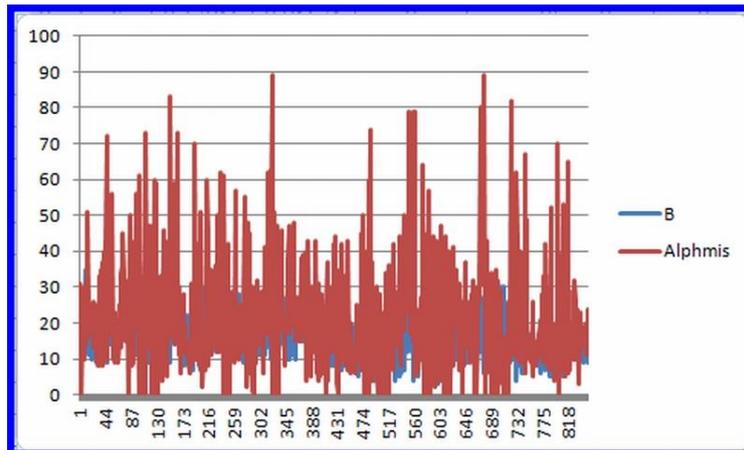


Grafico I: impossibilità di correlare l'angolo calcolato con la latitudine vista la dispersione dei dati.

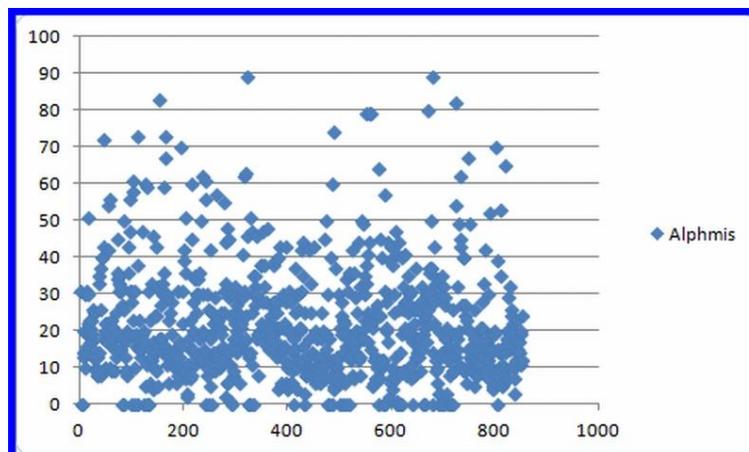


Grafico II: andamento degli angoli misurati in funzione delle date di osservazione. In ascissa è riportata una coordinata temporale arbitraria.

4) Conclusioni e discussione

Questo lavoro presenta sicuramente molte limitazioni. In primo luogo il breve intervallo temporale sul quale si è forzatamente dovuto lavorare, seguito da probabili errori dovuti al metodo empirico utilizzato. Una seria analisi degli angoli di tilt richiederebbe l'utilizzo dei magnetogrammi nei quali risultano sempre evidenti le polarità delle ARs. Nei disegni invece è possibile (e spesso frequente) che l'osservatore, seguendo il suo criterio personale, decida di classificare come monopolar i gruppi che in realtà non lo sono. Ad esempio un gruppo classificato come J (o H) e non come C se la separazione tra le macchie con penombra e quelle senza è ritenuta troppo piccola perché le due

macchie possano appartenere a due poli diversi. Oppure il contrario: due singole macchie distanti in longitudine vengono classificate come gruppi bipolari B (o G in caso entrambe siano in penombra) quando in realtà appartengono allo stesso polo di un AR molto estesa in longitudine, tipico delle regioni di ritorno o presenti da molto tempo sul disco.

D'altra parte sono emerse indicazioni attendibili circa la conferma della debolezza del ciclo in corso e la forza di quello successivo visti i valori medi elevati degli angoli di tilt.

Riteniamo quindi comunque sufficientemente significativo il lavoro svolto, che potrà senza dubbio essere migliorato se altri in futuro lo continueranno alla luce di ulteriori dati disponibili sul ciclo 24.

Ringraziamenti

Si ringraziano la Prof.ssa Laura Zini per aver coordinato il Progetto Alternanza Scuola-Lavoro ed averci quindi dato la possibilità di svolgere questo stage, la Prof.ssa Lara Cafiero, Responsabile del Progetto Astro.Net e il Sig. Pierangelo Orlandi per la paziente attività di fotocopiatura dei disegni.

Un ringraziamento particolare al Prof. Mario Gatti, Direttore dell'Osservatorio Solare dell'Istituto, per la collaborazione prestata durante il lavoro e per la stesura di questo articolo.

Riferimenti

- 1) Hale, G.E. , Ellermann, F. , Nicholson, S.B. and Joy, A.H. , 1919, “*The Magnetic Polarity of Sunspots*”, *Astrophys. J.*, **49**, 153-178.
- 2) Zirin, H., 1988, *Astrophysics of the Sun*, Cambridge University Press, Cambridge; New York.
- 3) Babcock, H.W. : 1961, *Astrophys. J.* **133**,572
- 4) Leighton, R.B. : 1964, *Astrophys. J.* **140**,1547
- 5) Leighton, R.B. : 1969, *Astrophys. J.* **156**,1
- 6) V. Senthamizh Pavai, R. Arlt, A. Diercke, C. Denker, J.M. Vaquero, “*Sunspot group tilt angle measurements from historical observations*”. In corso di pubblicazione su *Advances in Space Research* disponibile su ArXiv:1603.02510v1.
- 7) M. Dasi-Espuig, S.K. Solanki, N.A. Krivova, R. Cameron, and T. Peñuela, “*Sunspot group tilt angles and the strenght of the solar cycle*” disponibile su ArXiv:1005.1774v1.
- 8) Wang, Y.-M. and Sheeley, N.R. , Jr.: 1989 *Solar Phys.* **124**, 81.

Considerazioni

Riteniamo che questa opportunità sia stata per noi molto utile e importante per la nostra formazione culturale. Pensiamo sia stato un lavoro istruttivo in quanto grazie ad esso sappiamo lavorare in ambito scientifico e sappiamo quanto è impegnativo, ma allo stesso tempo interessante. In particolare il conteggio delle macchie, come abbiamo constatato dal nostro lavoro, non è fine a se stesso, ma può essere utile anche in altri campi, come l'attività sopracitata. Se in futuro ne avessimo l'occasione lo rifaremmo volentieri.