

Lo studio del Sole fra passato e futuro

La Specola Solare Ticinese
e il Numero di Wolf



www.specola.ch

INDICE

Introduzione	2
La nostra stella	3
Studiare il Sole è importante?	5
Le anomalie del ciclo n. 24 e le previsioni per il ciclo n. 25	10
Le osservazioni dell'attività solare: dall'Antichità al SILSO	12
La storia dell'indice Ri: cinque epoche	16
L'utilità dell'indice Ri	18
La storia della Specola Solare Ticinese	19
Il futuro della Specola Solare Ticinese	23
Bibliografia	24

INTRODUZIONE

Il Sole è la fonte di energia quasi esclusiva per le forme di vita del nostro pianeta e la fonte principale per le attività umane. Ecco perché da sempre gli esseri umani hanno rivolto la propria attenzione verso quella che oggi sappiamo essere una stella ma nel passato era considerata una vera e propria divinità. Il Sole è stato ammirato, divinizzato, usato per l'agricoltura e l'orientamento e da circa quattro secoli studiato con il metodo scientifico galileiano.

Le conoscenze acquisite sul Sole si sono rivelate straordinariamente preziose per molti campi della scienza. La scoperta del suo meccanismo di produzione dell'energia attraverso la fusione termonucleare ha permesso di mettere alla prova i modelli della fisica nucleare. Il Modello Solare Standard, che descrive l'interno del Sole e i processi di produzione e di trasporto dell'energia verso l'esterno, è stato poi applicato a tutta l'astrofisica stellare, che oggi non può prescindere dalle conoscenze acquisite in fisica solare. Lo studio delle interazioni fra il Sole e la Terra è ormai imprescindibile per la comprensione dell'evoluzione climatica del nostro pianeta. Per questi motivi, **la fisica solare può essere considerata una delle discipline fondamentali dell'astrofisica** in particolare e delle scienze in generale.

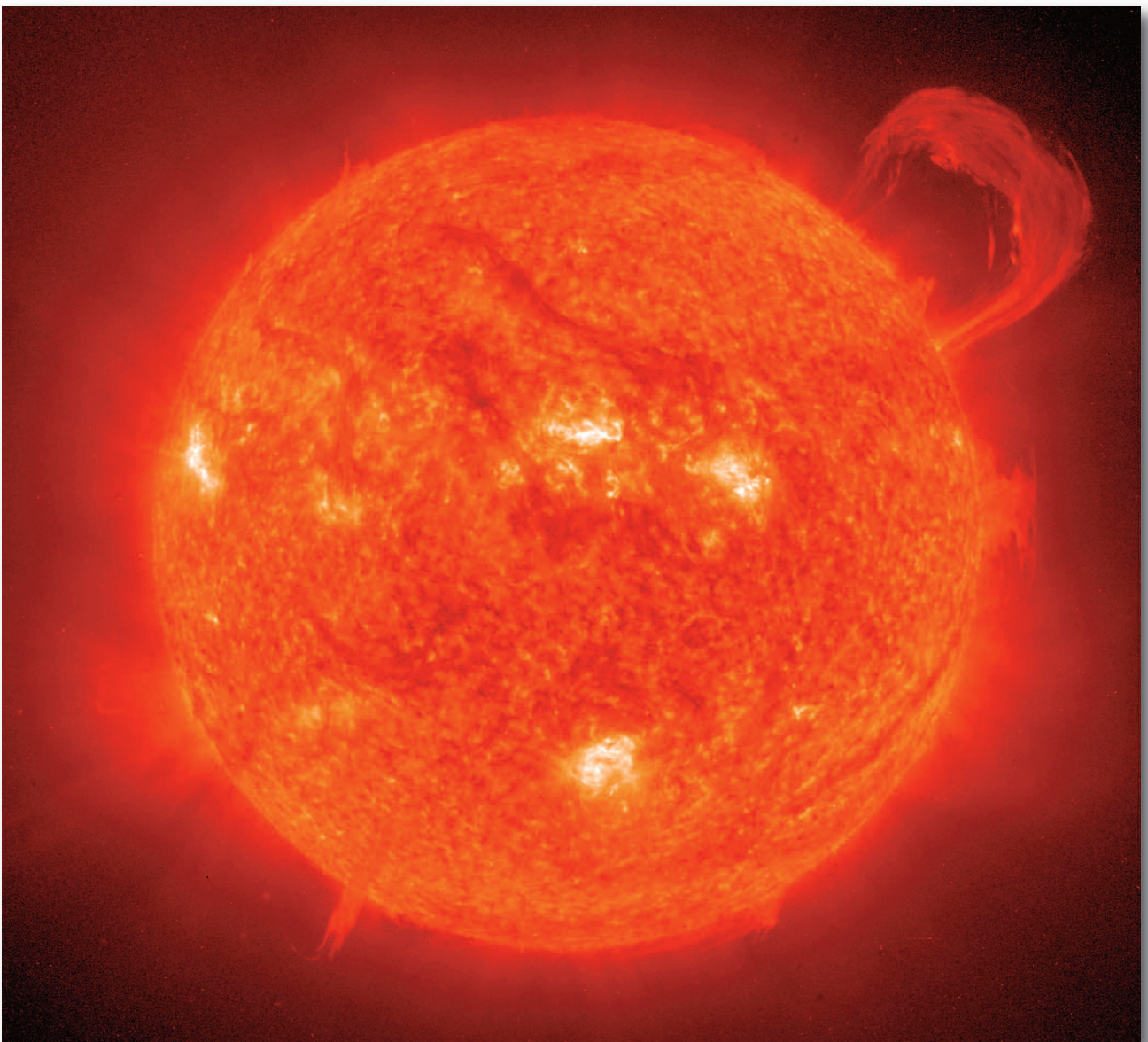
Migliaia di studiosi nel mondo partecipano a questi studi con la propria intelligenza e la propria passione. Nella Svizzera Italiana da più di mezzo secolo **un Osservatorio è erede della tradizione della registrazione scientifica rigorosa delle macchie solari**, inserendosi in un ampio network di Istituti nel quale è il riferimento internazionale: **si tratta della Specola Solare Ticinese.**

LA NOSTRA STELLA

Il Sole può essere definito in maniera semplice e solo in apparenza ingenerosa: una palla di gas. Né più né meno di questo. Beninteso, una simile massa di gas concentrata in uno spazio paragonabile al volume del Sole produce fenomeni che rendono la nostra stella un oggetto di indagine scientifica straordinariamente interessante.

Secondo il Modello Solare Standard, il paradigma nella comunità scientifica dei fisici solari, **la struttura del Sole è suddivisa in cinque parti:**

- il nucleo
- la zona radiativa
- la zona convettiva
- le regioni superficiali
- la corona



Il Sole ripreso nella riga dell'He II a 304 Ångstrom dal Solar and Heliospheric Observatory.

Nel nucleo viene prodotta l'energia attraverso il meccanismo di fusione termoneucleare: nuclei leggeri di idrogeno si fondono in nuclei sempre più pesanti, fino all'elio. Le masse dei nuclei prodotti sono inferiori alle masse dei nuclei iniziali e la perdita di massa corrisponde all'energia secondo la ben nota formula di Einstein:

$$E = m.c^2$$

Nella zona radiativa l'energia viene trasportata sotto forma di radiazione elettromagnetica. Nella zona convettiva per convezione: enormi colonne di gas a decine di migliaia di gradi si sollevano dalle profondità stellari, salgono raffreddandosi e poi ridiscendono, formando così delle celle di convezione.

È difficile stabilire dove sia esattamente la "superficie" del Sole, poiché, essendo composta da gas, la stella non possiede un confine solido ben definito. Sicché per le regioni superficiali (fotosfera, cromosfera, corona) si introduce una suddivisione convenzionale in funzione delle lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica emessa. Ovviamente, a seconda della frequenza della radiazione (dalle onde radio ai raggi gamma), lo sguardo umano con i suoi strumenti si spingerà più o meno in profondità.

Le conoscenze acquisite sulla struttura interna del Sole sono indirette: com'è ovvio, non è possibile inviare sonde nelle profondità della stella a causa delle elevatissime temperature. Queste conoscenze si fondano su quanto del Sole si è riusciti finora a osservare e misurare: intensità della radiazione elettromagnetica alle diverse frequenze, fenomenologia locale (macchie, facole, flare, protuberanze), campo magnetico globale e locale. Tutti fenomeni, in ogni caso, limitati alle regioni superficiali. Con due eccezioni: le vibrazioni superficiali studiate dall'eliosismologia e il flusso di neutrini, che proviene direttamente dalle profondità del Sole ed è strettamente legato al meccanismo di produzione dell'energia, poiché i neutrini sono pure un prodotto di alcune fasi della fusione termonucleare.

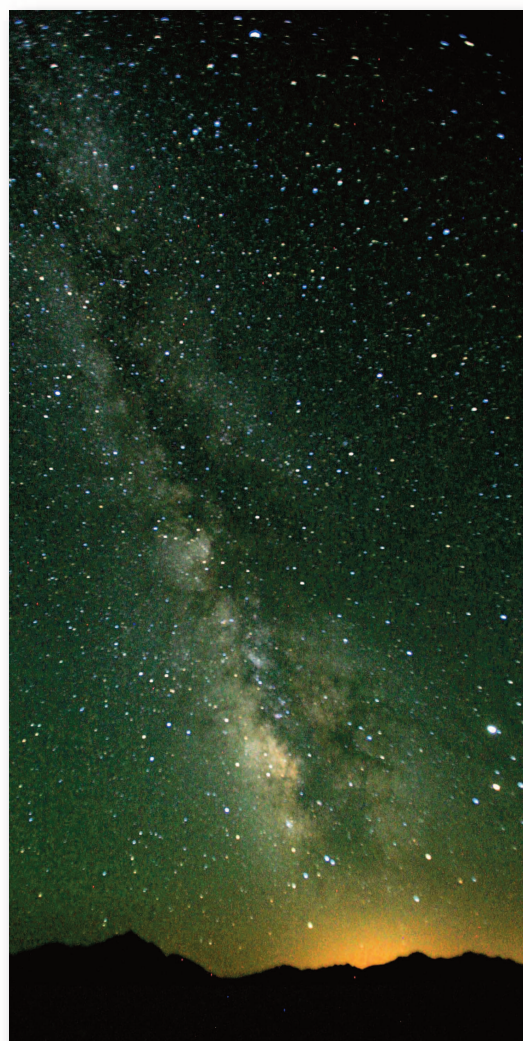
Sulla base di queste misure, **viene sviluppato il Modello Solare Standard:** in sostanza, una descrizione dei parametri fisici all'interno della stella (temperatura, pressione, densità eccetera) in funzione della distanza dal centro. Le nuove osservazioni e scoperte vanno interpretate nel quadro del Modello e, qualora fossero incompatibili con esso, contribuiscono a suggerirne le modifiche, in un continuo e fecondo confronto fra teoria e osservazioni. Poiché il Sole non è affatto immutabile nel tempo, il Modello Solare Standard deve pure rendere conto dei cambiamenti nella nostra stella: quelli su scala temporale geologica, desunti indirettamente, e quelli su scala più breve, osservati direttamente.

STUDIARE IL SOLE È IMPORTANTE?

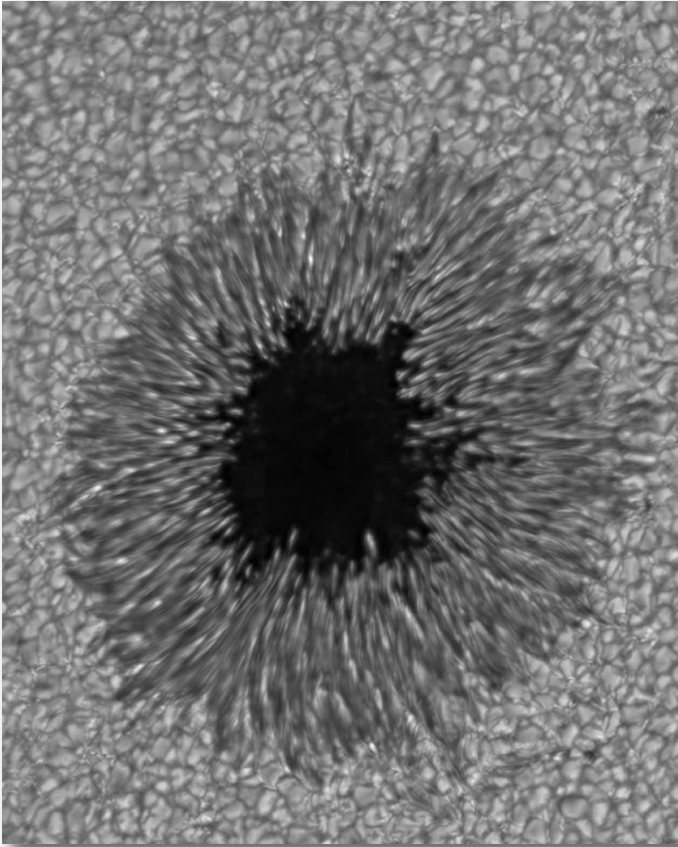
Il Sole è un oggetto naturale e di conseguenza rientra fra gli interessi degli studiosi di scienze naturali, alla stregua dei pianeti, delle farfalle, delle nuvole, delle galassie, dei virus, della psiche umana e dell'infinita ricchezza di strutture prodotte spontaneamente nell'universo dalle leggi di Natura. Tuttavia il Sole possiede alcune caratteristiche che lo rendono particolarmente prezioso e interessante agli occhi di uno scienziato.

1. Anzitutto **il Sole è un laboratorio naturale**. La materia si trova nelle varie regioni della nostra stella in condizioni fisiche per noi estremamente difficili o addirittura impossibili da riprodurre in laboratorio. Perciò è importante osservare quali fenomeni si verificano in quelle condizioni laddove esse si producono spontaneamente: all'interno del Sole, appunto. Un esempio importante aiuterà a chiarire il concetto: la fusione termonucleare. Si tratta di un meccanismo di produzione dell'energia che da più di mezzo secolo si cerca, con alterni risultati, di produrre in condizioni controllate. Quando questo risultato sarà stato raggiunto, l'umanità avrà a disposizione una fonte straordinariamente preziosa di energia. Purtroppo è un risultato ancora al di fuori della portata della tecnologia attuale, sebbene siano in fase avanzata di realizzazione alcuni progetti molto promettenti, il più importante dei quali è ITER, frutto di una collaborazione internazionale che entro il 2020 mira a rendere operativo un reattore a fusione capace di produrre più energia di quanta ne consumi. Le difficoltà incontrate dagli scienziati e dagli ingegneri in questa sfida scientifica e tecnologica sono quelle poste dalla materia in condizioni estreme di temperatura, dell'ordine delle decine di milioni di gradi. La fisica del plasma ricava molte informazioni dalle conoscenze, anche acquisite indirettamente, sulle regioni profonde del Sole, a 15 milioni di gradi, dove il meccanismo della fusione termonucleare si verifica spontaneamente.

2. Inoltre **il Sole**, fra le centinaia di miliardi di stelle che popolano la nostra galassia, la Via Lattea, **ha una caratteristica unica: è la stella più vicina a noi**. Questo fatto lo rende prezioso, poiché consente agli astrofisici di studiare la fenomenologia stellare in condizioni privilegiate. I modelli descrittivi dei meccanismi di produzione e di



200 miliardi di stelle nella nostra galassia: la Via Lattea. Conoscere il Sole consente di capire anche la struttura e l'evoluzione delle altre stelle.

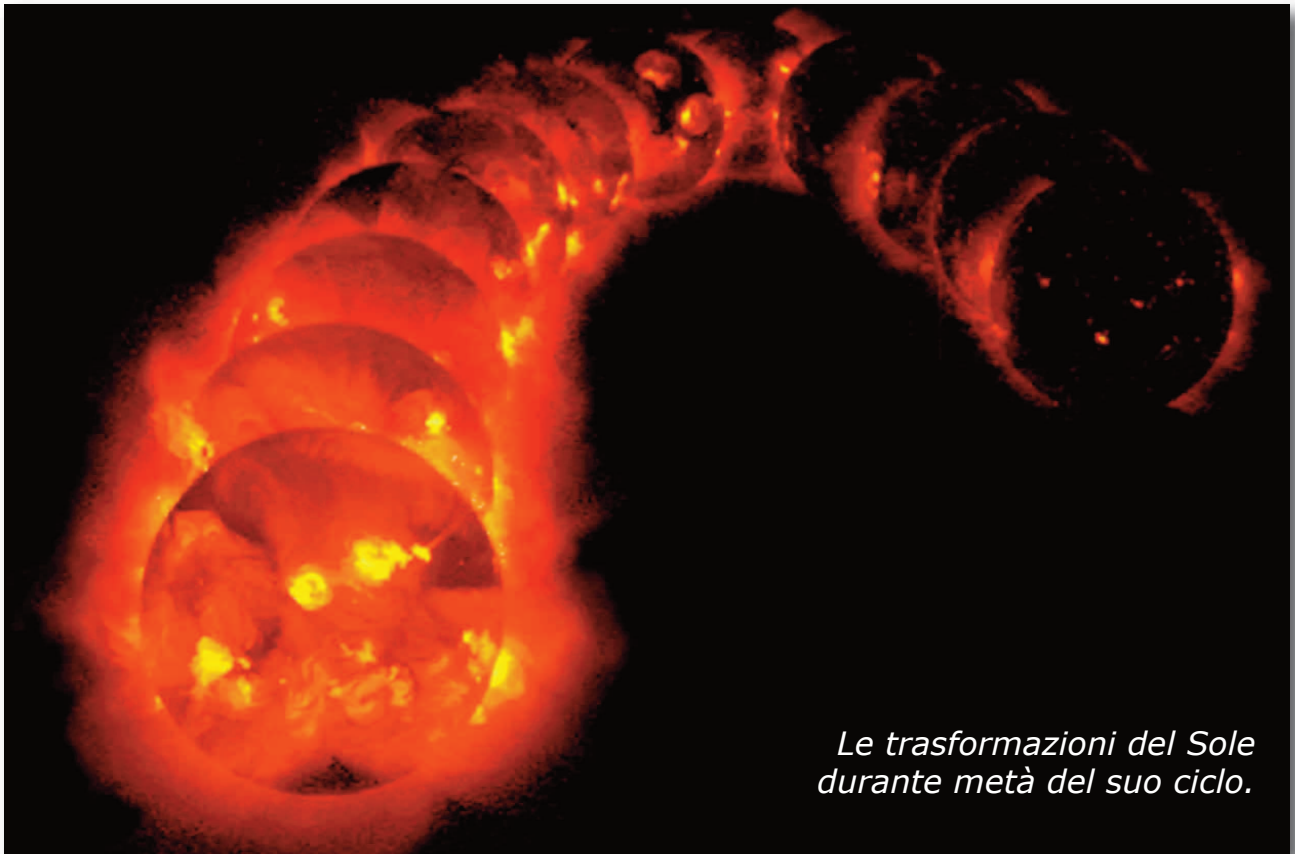


*Una macchia solare ripresa ad altissima risoluzione dal Big Bear Solar Observatory, negli Stati Uniti.
(Cortesia: BBSO)*

trasporto dell'energia nel Sole vengono poi estesi a stelle con caratteristiche di massa, di composizione chimica e di età molto differenti. I modelli stellari si fondano su quanto abbiamo scoperto e oggi pensiamo (con ragionevole sicurezza) di sapere sul Sole. Ogni perfezionamento e modifica del Modello Solare Standard si riverbera su tutta l'astrofisica stellare.

3. In terzo luogo, **la quasi totalità dell'energia usata sulla Terra dagli esseri viventi e dalla nostra civiltà è di origine solare.** Non solo l'energia che noi ricaviamo direttamente attraverso i pannelli fotovoltaici. Ma anche, per esempio, l'energia estratta dai combustibili fossili, frutto della trasformazione naturale di vegetali e animali vissuti decine di milioni di anni fa. Quegli organismi usarono l'energia solare per mezzo della fotosintesi e noi oggi la riutilizziamo. Lo stesso può dirsi per l'energia idroelettrica, che non potremmo sfruttare se il Sole non mantenesse il ciclo chiuso dell'acqua grazie all'evaporazione di mari e oceani, e per l'energia eolica, poiché i movimenti delle masse d'aria sono prodotti da un gradiente termico provocato dalle differenze nell'insolazione. Anche l'energia chimica immagazzinata nei nostri organismi e utilizzata per le attività quotidiane dei nostri corpi è, in ultima analisi, di origine solare. La ricaviamo infatti dalla carne, che prima era un animale e si nutriva di piante, che a propria volta sfruttavano la fotosintesi (i vegetariani saltano la carne e passano subito alle piante, ma il discorso non cambia). Soltanto le fonti di energia nucleare, geotermica e delle maree non sono di diretta derivazione solare. Le prime due sfruttano isotopi radioattivi formati miliardi di anni fa nei nuclei di antiche generazioni di stelle e inglobati all'interno della Terra. La terza è prodotta dall'influsso gravitazionale soprattutto della Luna.

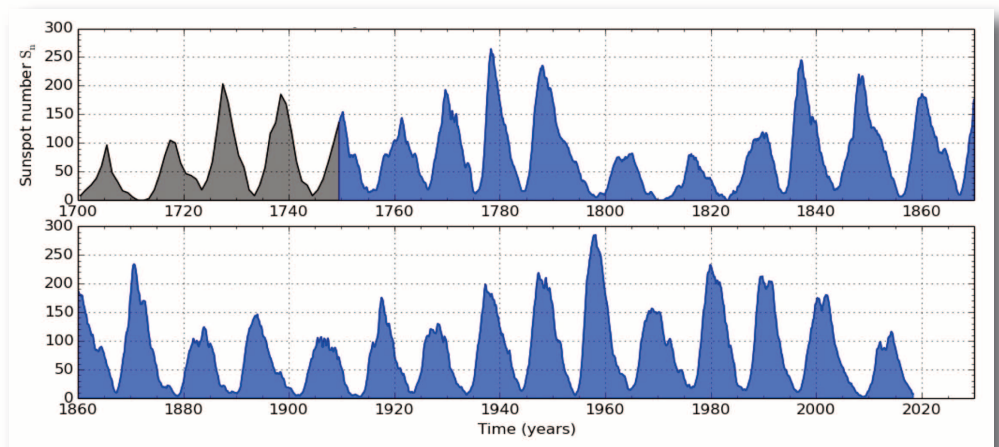
4. Infine, **la produzione di energia del Sole è determinante per il clima della Terra:** nessun altro fattore è altrettanto influente. In un periodo come quello attuale nel quale viene riscontrato un mutamento climatico globale, è essenziale comprendere le reali conseguenze per il clima terrestre delle variazioni dell'attività solare, in modo da poter discriminare fra le influenze dei fattori naturali e il contributo antropico.



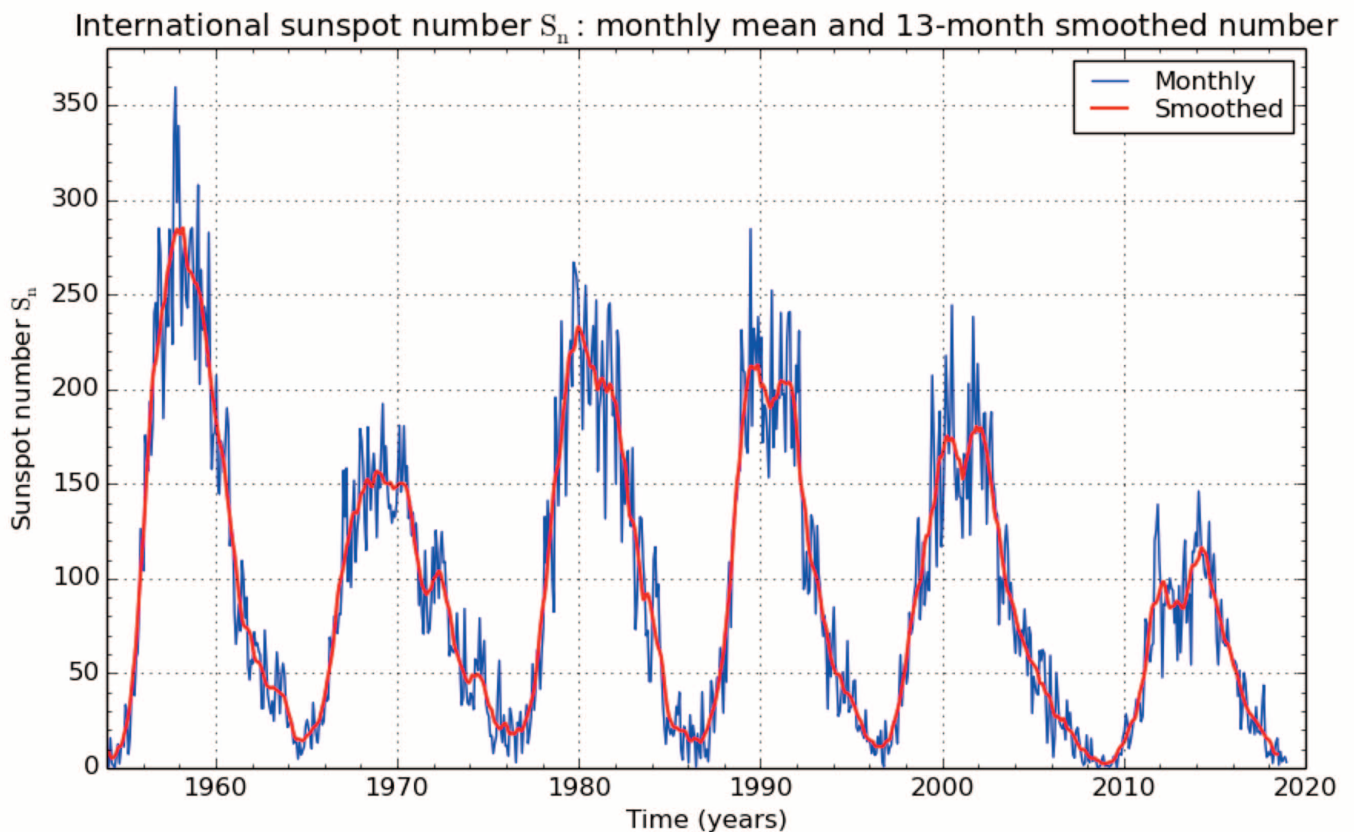
IL CICLO SOLARE

L'osservazione prolungata e metodica della fenomenologia solare ha mostrato che **la nostra stella manifesta un'attività periodica**, con momenti nei quali sono presenti in grande numero macchie, facole, protuberanze, brillamenti e perfino eruzioni coronali di massa (ossia espulsioni di grandi quantità di materia ad alta velocità), e altri momenti, cosiddetti di "Sole quieto", nei quali l'attività è assai più tranquilla, con una rarefazione e perfino la scomparsa totale per settimane dei fenomeni. **La periodicità**, scoperta intorno alla metà dell'Ottocento, è

pari a circa 11 anni, dove questo valore è medio, con cicli significativamente più corti (fino a 9 anni) e altri più lunghi (fino a 13 e perfino 14 anni). Di fatto, tuttavia, se si considera la polarità magnetica dei grup-



L'andamento del Numero di Wolf dall'inizio del Settecento. (Cortesia: SILSO)



Il valore del Numero di Wolf negli ultimi cinque cicli solari. (Cortesia: SILSO)

pi di macchie solari, che appare invertita a ogni nuovo ciclo (legge di Hale), bisogna concludere che il reale ciclo solare (che si completa quando il Sole ritorna alla configurazione magnetica iniziale) ha una durata media pari a 22 anni. Al ciclo solare undecennale si sovrappongono poi cicli di durata più lunga, come il ciclo di Gleissberg (70-90 anni), il ciclo di Suess (200-230 anni) e il ciclo di Hallstatt (circa 2.300 anni). Poiché le osservazioni visuali della fotosfera sono iniziate solo 400 anni fa e sono state eseguite con rigore scientifico solo negli ultimi 150 anni, la scoperta di questi cicli più lunghi è frutto dell'analisi di indicatori indiretti, come il carbonio-14 negli anelli di accrescimento delle piante e il berillio-10 nei ghiacci estratti con i carotaggi nelle regioni polari della Terra.

Gli ultimi sei cicli solari, a partire dal n. 19 alla fine degli Anni Cinquanta, **sono stati osservati e seguiti con continuità anche presso la Specola Solare Ticinese**. Il ciclo n. 24 ha preso avvio all'inizio del 2008 ma solo dalla fine del 2009 l'attività fotosferica è diventata significativa. Il ciclo ha avuto un doppio massimo: nel 2012 e nel 2014. Attualmente (gennaio 2019) siamo di nuovo in una fase di minimo, in attesa che inizi il ciclo n. 25.

L'origine del ciclo solare va ricercata nell'attività magnetica del Sole, per spiegare la quale è necessario sviluppare un modello coerente e completo della "dinamo solare": una sfida scientifica complessa e difficile, perché impone di spiegare come possa il campo magnetico solare assumere una configurazione poloidale (allineato ai meridiani solari) al minimo di attività e toroidale (allineato con i paralleli solari) al massimo, per poi tornare nella configurazione

iniziale. Sulla base del Modello Solare Standard, che rappresenta al momento attuale la migliore descrizione in nostro possesso dei meccanismi che producono la fenomenologia solare, si può affermare che il ciclo solare è frutto della combinazione di due fenomeni: il meccanismo di trasporto dell'energia all'interno dell'astro (dapprima radiativo e poi convettivo) e quello di rotazione differenziale superficiale. Si ritiene infatti che il campo magnetico solare sia prodotto dai moti del plasma elettricamente carico in profondità. La rotazione superficiale osservata è differenziale: più veloce nei pressi dell'equatore e più lenta ai Poli. Il Modello Solare Standard postula però una rotazione rigida più in profondità. E proprio sul confine fra le regioni in cui diversa è la rotazione della materia stellare, confine chiamato tachocline e situato a circa 0,7 raggi solari, si situa il meccanismo che produce il ciclo. Infatti la rotazione differenziale attorciglia il campo magnetico, in origine diretto lungo l'asse di rotazione del Sole. Il campo poi emerge localmente dalla fotosfera, dove inibisce la risalita di materia per convenzione e induce l'apparizione di macchie e gruppi di macchie, ciascuno caratterizzato da una polarità magnetica. A ciò si aggiungano i cosiddetti moti meridiani del plasma, che in superficie trasportano la materia e il campo magnetico dall'equatore verso i Poli e in profondità nella direzione opposta. I calcoli mostrano che la periodicità di questi moti dovrebbe essere intorno ai 20 anni: un valore coerente con la legge di Hale.

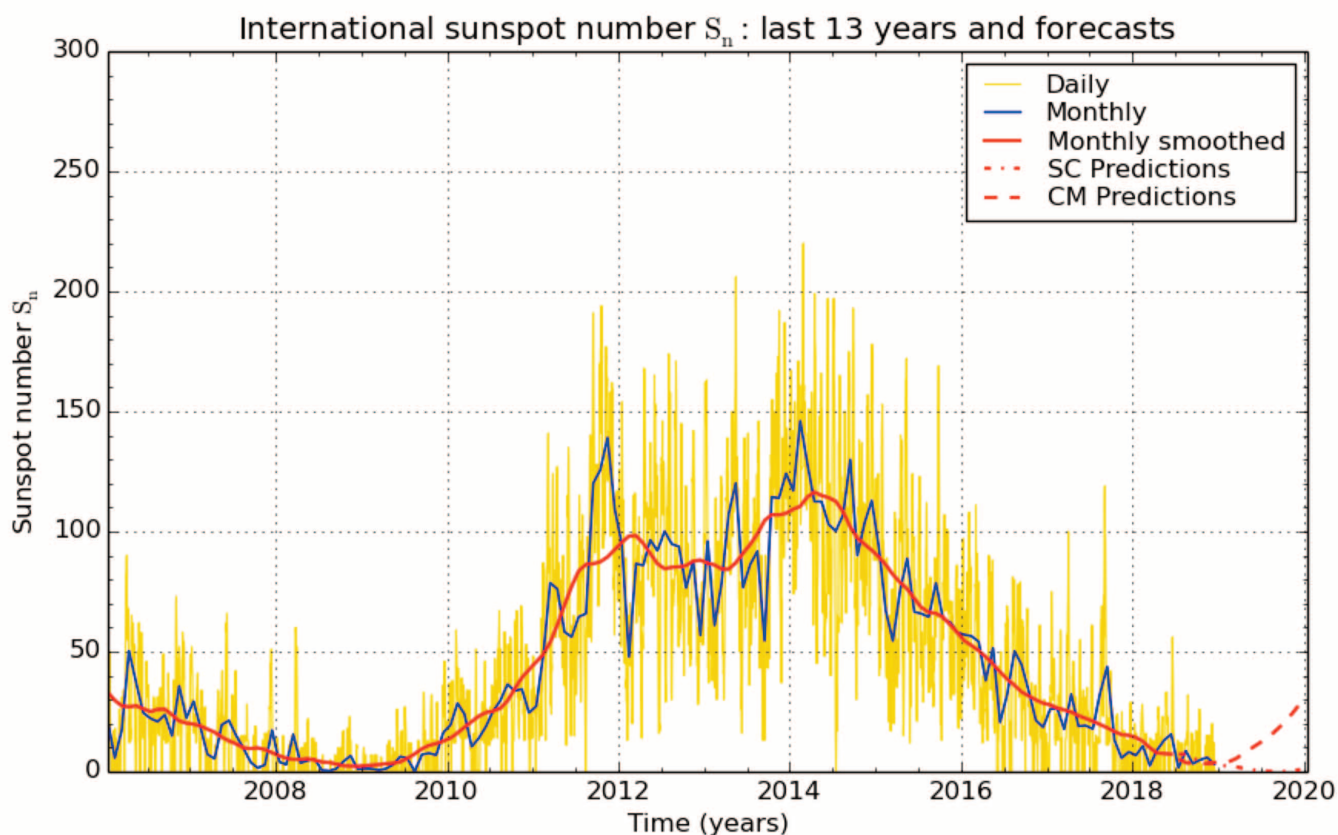
Il Modello Solare Standard, per quanto sofisticato e in gran parte coerente con le evidenze osservative recenti, non riesce tuttavia a spiegare la fenomenologia solare in tutta la sua completezza. In particolare, non è chiaro come si producano le variazioni da un ciclo all'altro, i cicli di più lunga durata e, soprattutto, le epoche durante le quali il ciclo solare scomparve completamente. E' il caso per esempio del famoso Minimo di Maunder (che prende il nome da Edward Walter Maunder, l'astronomo inglese che alla fine dell'Ottocento lo scoprì studiando le antiche osservazioni delle macchie solari): si tratta di un periodo di circa 70 anni, fra il 1645 e il 1715, durante il quale l'attività solare visibile scomparve quasi totalmente. Non si tratta di un effetto provocato dallo scarso interesse degli astronomi dell'epoca, ma di un fenomeno reale, documentato e tuttora, come abbiamo detto, non spiegato dal Modello Solare Standard.

La ricerca, sia teorica sia osservativa, sul ciclo solare è quindi di grande interesse e di grande attualità. Soprattutto nell'ambito delle osservazioni e delle misure, richiede molta pazienza, tenacia e rigore e si sviluppa su tempi lunghi, nell'arco di decenni. In quest'ambito, il Numero di Wolf (descritto più avanti in questo rapporto) si è rivelato essere un parametro importante e prezioso, sia per la sua significatività fisica sia perché, così com'è definito oggi, consente di effettuare un confronto coerente fra osservazioni recenti e antiche. **Al momento presente, inoltre,** il monitoraggio continuo dell'attività solare è importante perché **siamo di fronte a un'anomalia significativa.**

LE ANOMALIE DEL CICLO N. 24 E LE PREVISIONI PER IL CICLO N. 25

Il ciclo solare n. 23 ha raggiunto il proprio massimo a cavallo fra il 2000 e il 2001. Il ciclo solare n. 24, le cui prime avvisaglie sarebbero dovute comparire già nel 2006, è iniziato ufficialmente solo il 4 gennaio del 2008, quando la Regione Attiva NOAA 10981, con la polarità corretta per il nuovo ciclo, è stata rilevata e ha mostrato delle macchie. Di fatto, però, l'inizio del nuovo ciclo è stato molto lento. Addirittura, nell'estate del 2009, dal 10 luglio al 1. settembre, il Sole è rimasto del tutto privo di macchie. Si è quindi parlato di "minimo prolungato": un fenomeno che non era stato previsto dai modelli teorici. Una significativa presenza di macchie ha cominciato a essere rilevabile solo a partire dalla fine del 2009. Nel 2012 e nel 2014 il ciclo n. 24 ha poi raggiunto un doppio massimo: un fenomeno piuttosto comune, perché spesso i due emisferi del Sole raggiungono ciascuno il proprio massimo di attività in due momenti diversi. Tuttavia l'intensità osservata è stata inferiore a quella prevedibile considerando l'andamento medio dei cicli del passato. Inoltre i gruppi di macchie solari hanno fatto la propria comparsa a latitudini significativamente inferiori a quelle prevedibili. **In sostanza, il ciclo solare n. 24 ha smentito tutte le previsioni teoriche precedenti.**

Ora (gennaio 2019) ci troviamo al minimo di attività e **siamo in attesa dell'inizio del ciclo n. 25.** Dobbiamo aspettarci un minimo di durata normale oppure ancora un "minimo prolungato"? E in seguito come si svilupperà il ciclo



L'andamento del ciclo n. 24. (Cortesia: SILSO)

n. 25? Avrà un massimo intenso oppure proseguirà la diminuzione dell'intensità dei massimi riscontrata negli ultimi quattro cicli? È molto difficile fare delle previsioni, anche con i migliori modelli di fisica solare. L'osservazione del Sole con le conoscenze attuali è prevalentemente fenomenologica: si effettuano misurazioni e si prende atto dei risultati. Anche nel migliore dei casi, la correlazione fra previsioni teoriche ed evidenze osservative è tutt'altro che stringente e men che meno deterministica.

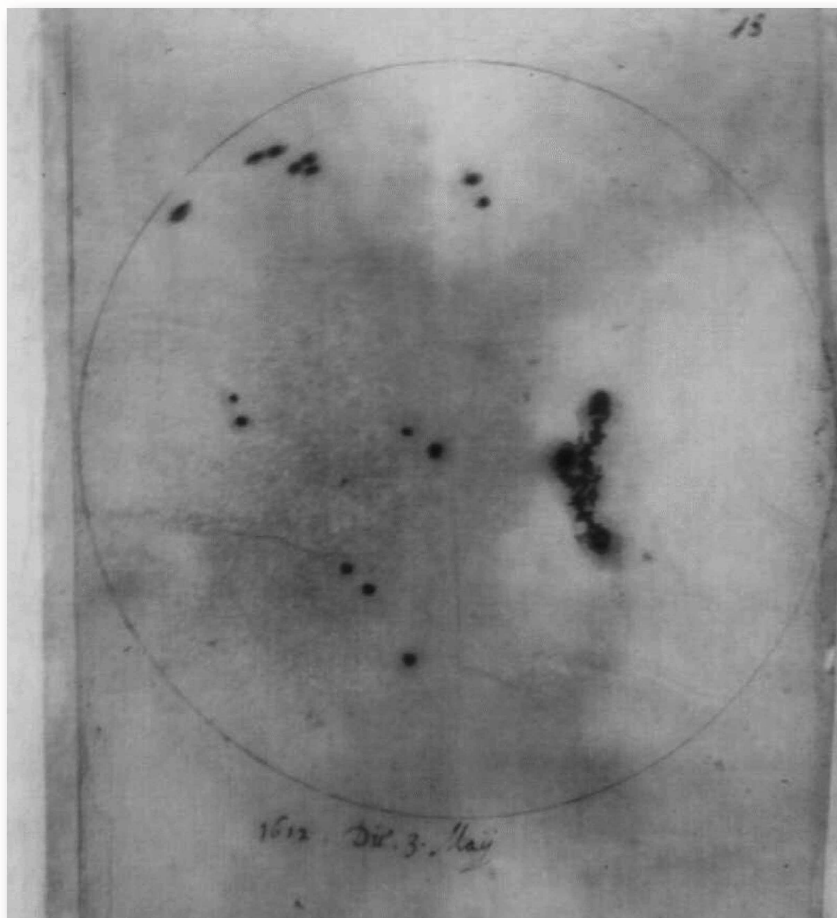
Un solo fatto è certo: **proprio la peculiarità del comportamento solare rende importante e preziosa la prosecuzione sistematica del rilevamento dell'attività fotosferica.**

LE OSSERVAZIONI DELL'ATTIVITÀ SOLARE: DALL'ANTICHITÀ AL SILSO

Il Sole, così regolare nel proprio percorso durante l'anno, era per gli Antichi un indicatore preciso del trascorrere del tempo e uno strumento indispensabile per determinare i momenti adatti alla semina e al raccolto. In apparenza immutabile nel tempo, il Sole venne trasformato perfino in divinità da molte civiltà. Eppure nelle antiche cronache cinesi e coreane si trovano indizi che possono essere interpretati come osservazioni a occhio nudo di "macchie" sul Sole. Il primo disegno di una macchia solare conosciuta nella letteratura occidentale si trova in uno scritto del cronista inglese John da Worcester (1118-1140).



Un disegno di John da Worcester che viene interpretato come la prima rappresentazione conosciuta delle macchie solari.



Un antico disegno di Galileo delle macchie solari.

Bisogna però giungere all'inizio del Seicento, con le prime indagini razionali e strumentali che seguono la nascita della scienza moderna, frutto dell'intuizione e del genio di Galileo Galilei, **per trovare la prima conferma delle macchie solari**. Intorno al 1610 sono numerosi gli osservatori europei, oltre a Galileo in Italia, che ne attestano la presenza: Thomas Harriot in Inghilterra, Christopher Scheiner in Germania, David e Johann Fabricius in Olanda. È difficile per quell'epoca fornire un'interpretazione teorica del fenomeno, che quindi di volta in volta viene collocato nell'atmosfera terrestre oppure sul Sole stesso.

Purtroppo **la seconda metà del XVII secolo vede una drastica diminuzione dell'attività solare**, fino quasi alla sua scomparsa: **è il Minimo di Maunder**. Conseguenza: gli astronomi del Settecento perdono interesse per i fenomeni superficiali del Sole e le osservazioni si diradano. Solo nel XIX secolo la nostra stella ridiventa oggetto di indagine scientifica rigorosa, grazie all'opera di Heinrich Schwabe e di Rudolf Wolf.

Heinrich Schwabe (1789-1875) era un farmacista tedesco appassionato di astronomia che si era prefisso il compito di rivelare l'eventuale esistenza di un pianeta interno all'orbita di Mercurio. La posizione così vicina al Sole ne avrebbe resa impossibile l'osservazione diretta, dunque Schwabe seguì un rigoroso programma di osservazione quotidiana delle macchie solari nella speranza di evidenziare uno o più transiti del pianeta. Non trovò ciò che cercava (oggi sappiamo che quel pianeta non esiste), ma **scoprì** qualcosa che non si sarebbe aspettato: **il ciclo solare**. Infatti le osservazioni di Schwabe mostrarono come il numero e l'estensione delle macchie solari segue una periodicità che il farmacista tedesco stimò intorno a 10-11 anni.

L'Ottocento è stato il secolo della rinascita dell'interesse scientifico per il Sole, con decine di Osservatori che rivolgevano i propri strumenti verso la stella a noi più vicina. In

questo panorama intellettuale, svolsero un ruolo centrale le ricerche effettuate in Inghilterra, in Germania e in Svizzera. Alla fine del secolo l'esistenza del ciclo solare era dimostrata al di fuori di ogni dubbio, così come la stretta influenza dell'attività magnetica del Sole sul clima terrestre, già sospettata da John Herschel.



Heinrich Schwabe.



Rudolf Wolf.

Nel 1847 **Rudolph Wolf (1816-1893)**, direttore dell'Osservatorio di Berna, **partì dalle osservazioni di Schwabe per iniziare un rigoroso programma di indagine del ciclo solare**. Trasferitosi nel 1855 a Zurigo, dove divenne professore presso il Politecnico Federale, **Wolf fondò l'Osservatorio di Zurigo nel 1865** e, fra gli altri, vi installò lo strumento con il quale aveva intrapreso la propria indagine: un cannocchiale Fraunhofer da 80 millimetri di apertura e 1.100 millimetri di lunghezza focale, che raggiungeva un ingrandimento di 64 volte. Non solo: Wolf intraprese una ricerca storica delle osservazioni precedenti raccolte nelle cronache per ricostruire l'andamento del ciclo solare nel passato.

L'intuizione principale di Rudolph Wolf consistette nel superare le precedenti osservazioni qualitative e nel quantificare in maniera precisa la presenza e l'estensione delle macchie. A questo scopo introdusse un indice, che da lui prese il nome: il Numero di Wolf, indicato con la lettera R. **La formula di Wolf**, tuttora impiegata, è la seguente:

$$R = k (10 g + f)$$

dove g è il numero di gruppi sulla fotosfera solare, f il numero totale di macchie e k un coefficiente di riduzione relativo all'osservatore che rende la sua misura confrontabile con quella di tutti gli altri osservatori.

Il programma di ricerca di Wolf sopravvisse al proprio creatore, che morì nel 1893. **I successivi direttori dell'Osservatorio di Zurigo proseguirono infatti le ricerche sull'attività solare: dapprima A. Wolfer** (dal 1894 al 1926), **poi William Brunner** (dal 1927 al 1944) **e infine Max Waldmeier** (dal 1945 al 1979).

In questo periodo è centrale il 1957, Anno Geofisico Internazionale. Nell'ambito delle ricerche sull'interazione fra il Sole e la Terra, si rivelò essenziale comprendere i meccanismi fisici che producono il ciclo solare. Dunque era essenziale potenziare la ricerca sul fenomeno e prolungare il più possibile la conoscenza del ciclo: nel passato con indagini storiche e nel futuro con ulteriori, sempre più precise osservazioni. L'Unione Astronomica Internazionale (IAU) e l'Unione Radio Scientifica Internazionale (URSI) designarono l'Osservatorio di Zurigo come uno dei World Data Center dell'IAU, per la determinazione ufficiale del quotidiano Numero di Wolf sulla base dei dati raccolti da una rete di Osservatori.

Nel 1957 Max Waldmeier, direttore dell'Osservatorio Federale di Zurigo, favorevolmente impressionato dalla qualità delle osservazioni dell'ingegner Karl Rapp, un collaboratore che viveva a Locarno, **decise di aprire una stazione per l'osservazione solare a sud delle Alpi. Nacque così la Specola Solare**, la cui attività di monitoraggio dell'attività solare è proseguita ininterrottamente per più di mezzo secolo.

Nel 1980 l'Osservatorio di Zurigo venne assorbito dall'Istituto di Astronomia del Politecnico Federale e gli indirizzi di ricerca vennero modificati. Il Politecnico decise di abbandonare la ricerca sul ciclo solare. Il programma intrapreso da Wolf, con una storia ormai superiore a 125 anni, sembrava destinato all'abbandono. Tuttavia il nuovo professore di fisica solare, Jan Stenflo, che si occupava di polarimetria di alta precisione, l'URSI e il Committee on Space Research (COSPAR) si attivarono e cercarono un nuovo istituto che raccogliesse l'eredità di Waldmeier e fungesse da centro di coordinamento dell'attività degli Osservatori. La scelta cadde



Max Waldmeier.

sull'Osservatorio Reale del Belgio, che già in precedenza apparteneva alla rete degli Osservatori partecipanti al programma e che aveva collaborato attivamente con l'Osservatorio di Zurigo.

Nel 1981 venne quindi creato a Bruxelles il Sunspot Index Data Center (SIDC), con lo scopo di proseguire la raccolta e l'elaborazione dell'indice visuale della macchie solari, il precedente Numero di Wolf, a quel punto ribattezzato International Relative Sunspot Number (IRSN) e indicato con Ri. Fin dall'inizio della propria attività, il SIDC ha implementato una forte informatizzazione dei dati e ampliato il network degli Osservatori, con lo scopo di migliorare la stabilità statistica dell'IRSN. Ulteriori indici sono stati introdotti per studiare nel dettaglio l'attività solare nei due emisferi della stella.

Nel 2000 il SIDC ha attraversato un'ulteriore trasformazione, inglobando il Centro d'Allarme Europeo che in precedenza era gestito dall'Osservatorio di Parigi-Meudon e diventando partner dell'International Space Environment Service (ISES). La denominazione attuale dell'istituto è Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO) (<http://www.sidc.be/silso/>). L'attività del SILSO è ora più estesa: oltre a proseguire l'antico programma di Wolf, che ormai ha superato i 150 anni di durata, si occupa anche di prevedere le eruzioni solari e le tempeste geomagnetiche.

Attualmente i destinatari dei dati e dei bollettini del SILSO sono circa 2.000, dei quali 500 sono interessati principalmente alle macchie solari. Vi sono enti individuali (dai ricercatori in meteorologia ai paleoclimatologi, dai radioamatori ai semplici appassionati) e grandi istituzioni nazionali e internazionali, pubblici e privati (l'IAU, l'UNESCO, le compagnie aeree, i centri militari).

Il network di Osservatori è composto da 86 unità distribuite in 29 Paesi, con una forte concentrazione nell'area europea: una conseguenza sia dell'eredità raccolta dall'Osservatorio di Zurigo sia della difficile coordinazione con gli Osservatori nordamericani, che per tradizione impiegano un diverso parametro di valutazione dell'attività solare, meno affidabile dell'attuale IRSN, e inviano le proprie osservazioni alla sezione solare dell'American Association of Variable Star Observer (AAVSO). Nel network del SILSO, il 34 per cento delle stazioni è costituito da Osservatori professionali e il rimanente 66 da collaboratori non professionali. Tutti devono però rispettare una serie di criteri: assiduità (almeno 10 osservazioni al mese), regolarità (nessun mese scoperto) e stabilità del coefficiente k , che determina la possibilità di un confronto con gli altri Osservatori.

Negli ultimi anni un lungo lavoro di ricerca ha consentito di migliorare l'omogeneità interna della serie di misure dell'attività solare, che ora si estende sull'arco di oltre 400 anni. In questo contesto, anche il Solar Spot Number è stato ridefinito, per eliminare derive e discontinuità.

In questo contesto, la Specola Solare Ticinese può offrire una ricca messe di osservazioni, proseguite senza interruzione per più di 60 anni. La discendenza diretta della Specola dalla tradizione di Zurigo ha indotto il SILSO ad attribuire alla Specola il ruolo di Osservatorio standard di riferimento (stazione pilota) all'interno del network di 86 stazioni di osservazione.

LA STORIA DELL'INDICE RI: CINQUE EPOCHE

L'indice Ri, conosciuto come Numero di Wolf o International Relative Sunspot Number (IRSN), è catalogato in una serie storica che si spinge nel passato fino all'inizio del Seicento. Questa serie non è però omogenea, ma può essere suddivisa in cinque epoche.

1. - La serie storica (1610-1848)

I valori di Ri nell'epoca compresa fra il 1610 e il 1848 sono estremamente difficili da determinare. Questo sforzo, intrapreso per la prima volta dallo stesso Wolf, ha però condotto a risultati significativi e interessanti e rimane tuttora un ambito aperto d'indagine. Le difficoltà sono di vario genere. Si tratta anzitutto di reperire le antiche osservazioni, rare, occasionali e sparpagliate fra molte opere e archivi, caratterizzate da diversa accuratezza e sensibilità dell'osservatore e qualità e caratteristiche della strumentazione impiegata. Su questa base già così disomogenea bisogna poi lavorare per ricavare da ciascuna osservazione una corrispondente stima di Ri compatibile con la metodologia introdotta da Wolf. Indagini svolte nella seconda metà degli Anni Novanta hanno però permesso di raddoppiare la quantità di osservazioni catalogate.

2. - Le osservazioni di Wolf (1848-1882)

Rudolph Wolf inizia per la prima volta uno studio sistematico e quantitativo delle macchie solari, applicando la formula di sua invenzione. Il riferimento è lui stesso con il suo strumento, coadiuvato da pochi altri osservatori europei. Il trattamento dei dati raccolti è, ovviamente, del tutto manuale. Non viene effettuato alcun disegno, ma solo il conteggio dei gruppi e delle macchie. Le macchie più piccole sono trascurate se le condizioni di osservazione non sono ottimali. Le ombre multiple all'interno della stessa penombra non sono conteggiate separatamente. Con queste indicazioni precise e rigorose, l'indice Ri diventa un parametro molto più affidabile.

3. - Il periodo di Zurigo (1882-1981)

Nel 1894 Alfred Wolfer succede a Rudolph Wolf nella direzione dell'Osservatorio di Zurigo. Fin dal 1882 Wolfer aveva introdotto una modifica nel metodo di conteggio delle macchie, rendendolo più completo, rigoroso e preciso. L'indice R viene ridefinito in modo da eliminare alcuni elementi di soggettività e da fornire una base solida per tutti i valori pubblicati a partire dal 1882. Al direttore dell'Osservatorio di Zurigo viene attribuito un coefficiente di riduzione $k_z = 0,6$. Sapendo che per definizione Wolf possedeva $k = 1$, in questo modo viene mantenuto possibile il confronto fra le osservazioni più recenti e quelle precedenti, almeno fino all'inizio delle osservazioni di Wolf. **Il Numero di Wolf** così definito **diventa** quindi **un parametro affidabile per la determinazione dell'attività solare**, con regole di calcolo chiare e sistematiche e, in questa fase, un trattamento dei dati ancora manuale. La stazione di Zurigo, dove quotidianamente vengono effettuati la stima di R e il disegno fotosferico, diventa

il riferimento mondiale per la determinazione di R, ma inserita nel contesto più ampio di un rete internazionale composta da una trentina di Osservatori in Europa e in Asia. Le loro osservazioni vanno a compensare le mancanze della stazione di Zurigo provocate dalle condizioni meteorologiche ostili. Alla guida del programma di osservazione e dell'Osservatorio federale di Zurigo si susseguono Alfred Wolfer (1894-1926), William Otto Brunner (1926-1945) e Max Waldmeier (1945-1979). Nel 1957, in occasione dell'Anno Geofisico Internazionale, per iniziativa di Waldmeier viene costruita a sud delle Alpi la stazione di Locarno, l'attuale Specola Solare Ticinese. Locarno offre infatti condizioni climatiche migliori e garantisce perciò un numero annuale di disegni e conteggi significativamente superiore. Waldmeier, che aveva sempre seguito il metodo di Wolf modificato da Wolfer, lo trasmette al proprio assistente Sergio Cortesi.

4. – Il periodo del SIDC, poi SILSO (1981-oggi)

Nel 1981 il Politecnico Federale di Zurigo abbandona il progetto di monitoraggio fotosferico del Sole, di cui inizia a farsi carico il SIDC (Sunspot Index Data Center), oggi SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations), presso l'Osservatorio Reale del Belgio a Bruxelles. Il SILSO arriva a coordinare un network di 86 Osservatori solari nel mondo, fra i quali la Specola Solare Ticinese mantiene il ruolo di riferimento. **La gestione e l'amministrazione della Specola passano nelle mani della neocostituita Associazione Specola Solare Ticinese (ASST)**, un ente non profit che ne garantisce la continuità scientifica. **Alla direzione della Specola viene nominato Sergio Cortesi**, che FINO AL 2011 prosegue così l'attività dei 25 anni precedenti e garantisce la continuità e la qualità delle osservazioni così come erano state iniziate da Wolf e proseguite da Wolfer, Brunner e Waldmeier. Grazie all'elevata qualità delle proprie osservazioni, **la Specola non perde il ruolo di riferimento internazionale**, sebbene il network sia esteso. Il trattamento dei dati avviene in modo automatico. La precisione collettiva delle misure raggiunge il 95 per cento. Il SILSO estende il proprio ambito di attività e sviluppa ulteriori indici dell'attività solare. Siamo al presente.



Il rifrattore da 15 centimetri con il quale ogni giorno, da più di mezzo secolo, viene effettuata l'osservazione fotosferica presso la Specola.

L'UTILITÀ DELL'INDICE RI

È pari a ben quattro secoli il periodo storico all'interno del quale è possibile ricostruire il valore del Numero di Wolf, sia attraverso stime effettuate su osservazioni precedenti il 1848 sia a seguito dell'inizio del programma nel 1848. In sostanza, **ben 35 cicli solari possono essere considerati coperti** e confrontabili con altri indicatori dell'attività solare, come le abbondanze isotopiche di berillio-10 nei carotaggi polari e di carbonio-14 negli anelli di accrescimento delle piante, indicatori che in questo modo possono essere tarati e consentono di spingere la conoscenza del ciclo solare ancora più indietro nel passato, in epoche pre-strumentali in cui l'osservazione scientifica rigorosa delle macchie solari non era possibile.

Nell'ambito della ricerca scientifica sul Sole, il Numero di Wolf è un dato di grande importanza. Nel solo periodo compreso fra il 2000 e il 2006, l'Abstract Distribution System ha catalogato più di 430 pubblicazioni scientifiche che si riferiscono a un generico "sunspot number". Rileviamo in particolare l'aumento dell'interesse per la ricerca associata all'attività superficiale del Sole: queste

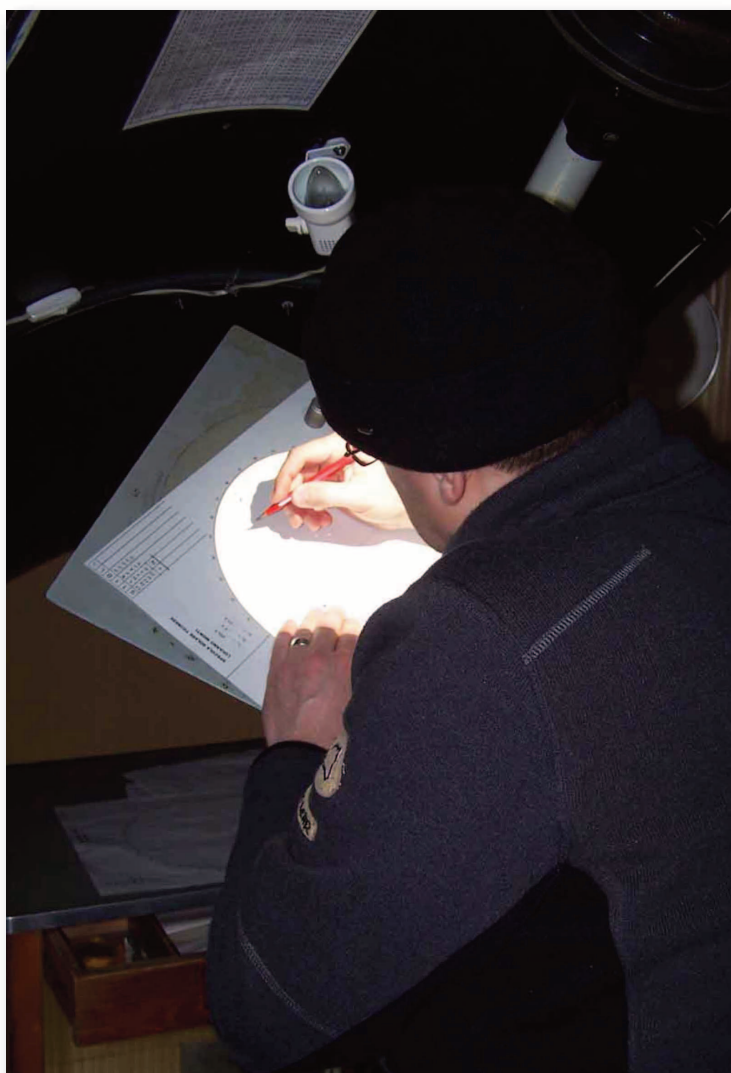
pubblicazioni costituiscono un quarto del totale catalogato a partire dalla fine del XIX secolo.

Lo spettro delle discipline interessate è molto ampio e

spazia dalla climatologia alla planetologia, dallo studio delle comete alle tecnologie spaziali.

In particolare, per quanto riguarda la fisica solare, l'IRSN viene impiegato per verificare la correttezza dei modelli della dinamo solare utilizzati per prevedere l'intensità dei cicli futuri e per ricostruire l'emissione di energia del Sole nel passato.

Inoltre si rivela prezioso per studiare la correlazione fra le variazioni climatiche del nostro pianeta e l'evoluzione secolare dell'emissione elettromagnetica e materiale del Sole. Non solo: l'IRSN è ormai indispensabile anche nell'ambito della previsione dell'impatto dei fenomeni solari sulle attività umane nello spazio (attività extraveicolari, satelliti in orbita bassa, telecomunicazioni, GPS) e al suolo (reti di distribuzione elettrica ad alta tensione, blackout).

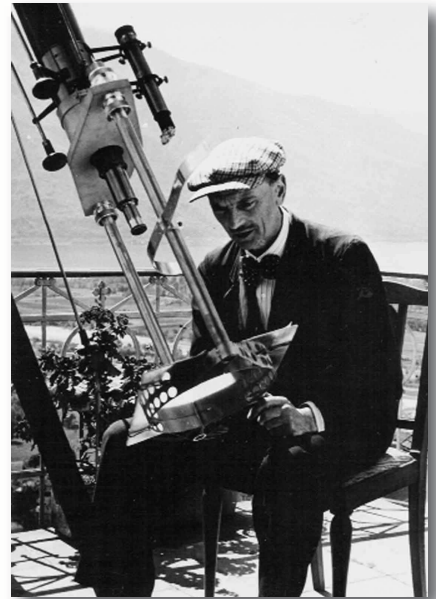


Il disegno fotosferico quotidiano effettuato con il telescopio in cupola.

LA STORIA DELLA SPECOLA SOLARE TICINESE

Le origini

Ufficialmente **la Specola Solare Ticinese viene fondata nel 1957, ma in quel momento già da almeno 20 anni il Locarnese è sede di attività di ricerca sull'attività fotosferica solare. Il merito è di Karl Rapp**, un ingegnere germanico che, ritiratosi in pensione a sud delle Alpi, stabilisce la propria residenza a Locarno Monti, dove persegue la propria passione per l'osservazione del Sole con un telescopio rifrattore da 14 centimetri di apertura. L'elevata qualità delle sue osservazioni attrae l'attenzione di William Otto Brunner, direttore dell'Osservatorio Federale di Zurigo, che si serve di Rapp come collaboratore perché avvantaggiato dalle condizioni climatiche migliori. La collaborazione prosegue con il successore di Brunner, Max Waldmeier. Quando questi decide di costruire una stazione in una condizione meteorologica migliore rispetto a quella zurighese, l'ottima esperienza con Rapp induce a far cadere la scelta in maniera quasi naturale sul Ticino. Dopo aver contemplato diverse possibili collocazioni (Isole di Brissago, Liceo cantonale di Lugano, Istituto Agrario di Mezzana), la scelta cade su un vasto appezzamento di terreno confinante con il vecchio fabbricato dell'Osservatorio Meteorologico, terreno appena acquistato dalla Confederazione nell'ottica di un ampliamento della stazione meteorologica a sud delle Alpi.



L'ingegner Karl Rapp al tavolo di proiezione del Sole del rifrattore sulla sua terrazza di Locarno-Monti nel 1950.



Da sinistra, Sergio Cortesi, Max Waldmeier e Araldo Pittini

La realizzazione

La Specola Solare, il cui edificio viene progettato dall'architetto Gull di Ascona, entra in attività nel 1957 grazie anche alle sovvenzioni stanziare per l'Anno Geofisico Internazionale. La direzione viene affidata a Max Waldmeier, che assume come assistenti scientifici dapprima l'astrofilo ticinese Sergio Cortesi, di Lugano, e poi Araldo Pittini, che già si trovava alle dipendenze dell'Osservatorio di Zurigo.

La Specola assume rapidamente il ruolo di stazione principale per la determinazione quotidiana del Numero di Wolf, specializzandosi

nello studio delle strutture fotosferiche (macchie e facole) e nella pubblicazione delle carte eliografiche. Il lavoro precedentemente effettuato a Zurigo viene razionalizzato e reso più rapido dai sistemi innovativi sviluppati da Cortesi e Pittini. **La strumentazione comprende**

- **un rifrattore coudé-Zeiss con obiettivo da 15 centimetri installato nella cupola** e usato per i disegni fotosferici quotidiani effettuati con la tecnica della proiezione e la determinazione quotidiana del valore di R,
- **un celostato orizzontale Kern a due specchi piani da 20 centimetri**, impiegato per ripresa di fotogrammi nelle righe H-alfa e K dello spettro solare e per la sorveglianza visuale del Sole nella riga H-alfa per rilevare le eruzioni cromosferiche.

La Specola pubblica regolarmente tutte le proprie osservazioni, insieme a quelle raccolte dal network di altri Osservatori solari coordinato dall'Osservatorio federale di Zurigo.

La crisi degli Anni Ottanta

Un momento estremamente delicato per il destino della Specola si presenta **all'inizio degli Anni Ottanta**, quando Max Waldmeier va in pensione. **Il Politecnico decide di sopprimere il programma di monitoraggio dell'attività fotosferica e di chiudere la Specola Solare.** La decisione è accompagnata da polemiche: da un lato si sottolinea come la tradizione di rilevazione del Numero di Wolf sia tutta elvetica fin dai tempi dello stesso Wolf e abbia raggiunto un livello notevole di affidabilità e di precisione, e dall'altro emerge il disappunto ticinese per la possibile chiusura di un prestigioso centro di ricerca scientifica che dà lustro alla Svizzera Italiana. La decisione del Politecnico federale è però irrevocabile e anche l'Osservatorio Federale viene ristrutturato ed entra a far parte dell'Istituto di Astronomia del Politecnico.

Il superamento della crisi

La Specola Solare Ticinese viene salvata dall'iniziativa di alcune importanti personalità ticinesi, fra le quali il dottor Alessandro Rima e Paul Utermohlen, che promuovono la fondazione dell'Associazione Specola Solare Ticinese. L'intento è quello di raccogliere fondi pubblici e privati per mantenere in attività l'Osservatorio. **Anche Jan Stenflo, nel frattempo diventato direttore dell'Istituto di Astronomia, si impegna affinché la Specola rimanga in attività. L'Unione Astronomica Internazionale raccomanda che l'attività di raccolta centralizzata delle osservazioni fotosferiche**, in precedenza affidata all'Osservatorio Federale di Zurigo, **sia rilevata dall'Osservatorio Reale del Belgio**, pur mantenendo la stazione di Locarno come riferimento internazionale. **La direzione della Specola viene affidata a Sergio Cortesi.** Il finanziamento è garantito in parte dal Canton Ticino attraverso i fondi della Lotteria Intercantonale e dello Sport-Toto, in parte dai Comuni del Locarnese e in parte da contributi di privati sensibili all'importanza della ricerca scientifica sul Sole e della divulgazione dell'astronomia nella società.

No. 135

2001.VI.21.302

7.15 T.U.

Osservatore: S. Cortesi

Immagini: 3 limpido

$\Delta p = +7.1$

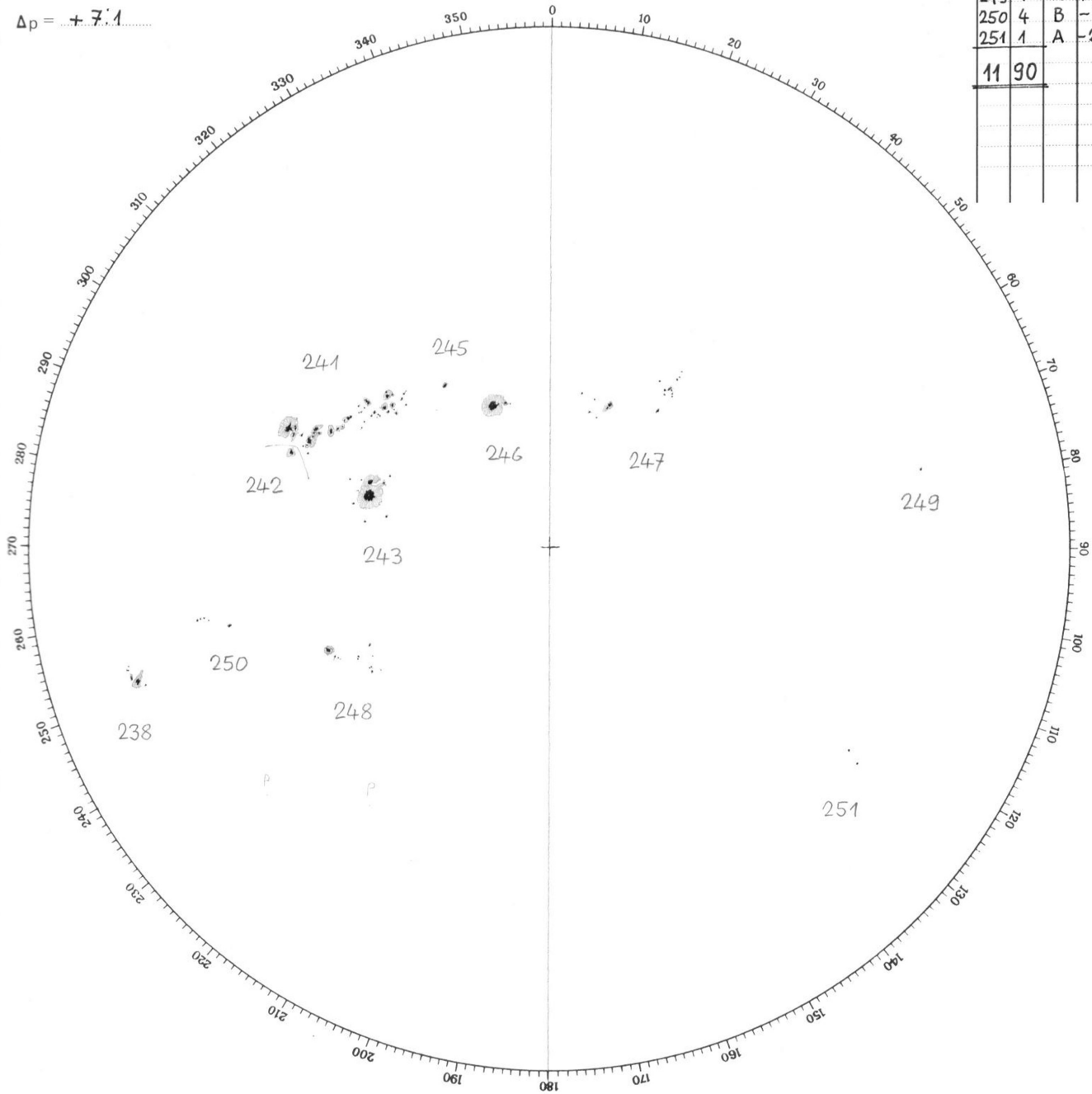
**SPECOLA SOLARE TICINESE
LOCARNO MONTI**

$L_o = 116.9$

$B_o = +1.8$

$p_o = -7.0$

g	f	t	B	L	Δ
238	7	J	-13	172	
241	36	E	+16	142	
242	3	J	+12	147	
243	10	H	+8	138	
245	3	J	+20	129	
246	5	J	+18	123	
247	12	C	+19	107	
248	8	C	-10	140	
249	1	A	+10	70	
250	4	B	-7	158	
251	1	A	-21	78	
11	90				



*Un disegno
della fotosfera
effettuato presso
la Specola
Solare Ticinese.*

Un Osservatorio indipendente

La nuova situazione impone una modifica delle priorità. L'attività di rilevamento quotidiano del Numero di Wolf, di antica tradizione, viene mantenuta perché rappresenta il motivo fondante della Specola. Dal 1982 vengono invece abbandonate la ripresa fotografica e la sorveglianza visuale delle eruzioni, peraltro ormai automatizzate in altri centri di ricerca. **Con la prosecuzione delle "Astronomische Mitteilungen"**, che riportano le osservazioni locarnesi delle macchie solari, **si riesce a godere di un finanziamento dalla Fondazione Wolf di Zurigo**. Inoltre vengono iniziati esperimenti di radioastronomia solare interferometrica, presto abbandonati per le condizioni osservative proibitive, e alcune ricerche di fotometria stellare con un telescopio riflettore da 50 centimetri progettato e costruito da Sergio Cortesi e dal suo assistente Michele Bianda. Bianda viene affiancato da altri osservatori che collaborano con Cortesi nel monitoraggio costante dell'attività solare.

Negli Anni Ottanta la Specola ospita pure alcuni dottorandi dell'Istituto di Fisica Applicata (IAP) dell'Università di Berna. L'Istituto in quel momento si occupa dell'emissione radio del Sole, in particolare in occasione di eruzioni solari. La mancanza a livello internazionale di Osservatori che forniscano immagini prese ad alta risoluzione temporale nelle righe dell'idrogeno H-alfa dell'idrogeno nel rosso e K del calcio nel violetto, suggerisce al gruppo del dottor Andreas Magun di occuparsi lui stesso della ripresa di tali dati. La scelta cade sulla Specola, un accordo viene presto stipulato e l'IAP installa a Locarno una strumentazione d'avanguardia unica al mondo per la ripresa ad alta risoluzione temporale nel visibile delle immagini solari. Questo lavoro permette ai ricercatori bernesi di essere all'avanguardia per alcuni anni in questo campo particolare, sviluppando strumenti innovativi. Basandosi sui dati misurati alla Specola, sei ricercatori conseguono il diploma in Fisica e tre di loro anche il dottorato. I risultati sono riportati in circa 40 pubblicazioni scientifiche. In seguito a una ristrutturazione interna dell'IAP, nel 1997 si decide di abbandonare la ricerca nel campo visibile e rinunciare alla collaborazione con la Specola. Siccome è appena iniziata la ricostruzione dell'IRSOL (altro importante e prestigioso centro di ricerca solare situato nel Locarnese), la Specola non ha la capacità di rilevare lei stessa il progetto bernese e gli strumenti vengono inviati a un gruppo di ricerca argentino.

La divulgazione, in risposta alle sollecitazioni del Cantone, **si concretizza attraverso l'attività effettuata nell'ambito della Società Astronomica Ticinese**, della quale Sergio Cortesi è presidente per molti anni: organizzazione di conferenze, visite di scolaresche alla Specola, partecipazione a incontri in televisione e alla radio, produzione di contenuti per i mezzi di comunicazione di massa e, soprattutto, la pubblicazione regolare del bimestrale "Meridiana", che con un migliaio di abbonati è il punto di riferimento per la divulgazione astronomica nella Svizzera Italiana.



Il telescopio da 30 centimetri usato per le attività divulgative.

IL FUTURO DELLA SPECOLA SOLARE TICINESE

La Specola Solare Ticinese si trova in una nuova, importante fase di transizione. L'inizio del XXI secolo vede l'Osservatorio toccato da cambiamenti e sfide.

Il monitoraggio continuo dell'attività fotosferica con il rifrattore da 15 centimetri ha sempre goduto della massima attenzione, proprio perché è la ragione fondante dell'esistenza dell'Osservatorio, in questo confermato dal mantenimento del proprio ruolo di riferimento mondiale nel network coordinato dal SILSO. Quest'attività di ricerca scientifica **è stata e rimarrà sempre la ragion d'essere della Specola.**

Il telescopio riflettore da 50 centimetri è stato sostituito da uno più maneggevole da 30 centimetri, occasionalmente impiegato da alcuni appassionati per misure di fotometria stellare. Soprattutto, questo strumento viene utilizzato in occasione delle serate divulgative organizzate con cadenza mensile dal Centro Astronomico del Locarnese (CAL): un consorzio informale fra la Specola e il vicino IRSOL per favorire la divulgazione scientifica. Sempre nell'ambito del CAL, vengono proposte con scadenza regolare mattine di osservazione del Sole per il pubblico. Tutte le attività sono a numero chiuso e su prenotazione e vengono organizzate solo in caso di meteo favorevole.

Sul piano della ricerca scientifica, l'attività della Specola si trova a una svolta. Nel 2011 **Sergio Cortesi è stato sostituito alla direzione dell'Osservatorio da Marco Cagnotti**, assistente scientifico assunto nel 2007. Il suo compito era delicato: mantenere l'elevato livello qualitativo delle osservazioni garantito per oltre mezzo secolo da Sergio Cortesi. In qualche modo, **si trattava di raccogliere il testimone di una tradizione osservativa antica più di un secolo e mezzo**, tradizione nel cui solco la Specola Solare Ticinese si è inserita al punto di diventare il riferimento mondiale per la determinazione del Numero di Wolf.

D'altronde lo stesso metodo di Wolf si trova in una situazione di evoluzione, confrontato con la necessità di un ulteriore perfezionamento delle tecniche di osservazione e rilevazione dell'attività fotosferica. L'intenzione è quella di andare verso una progressiva automatizzazione. Che però non potrà essere né rapida né semplice ma ancora per molti anni dovrà essere affiancata dalla modesta, tenace e preziosa attività di rilevazione umana, per ottenere infine una coerenza interna e una confrontabilità dei dati raccolti in 150 anni: condizioni indispensabili per poter effettuare con successo studi sul lungo periodo dell'attività della nostra stella.

Da ultimo, **a partire dal 2018 la Specola Solare Ticinese è stata coinvolta in un progetto della durata di cinque anni** in collaborazione con il Politecnico Federale di Zurigo, **con il fine di scansionare ad alta risoluzione e rendere disponibile e consultabile in formato digitale tutta la raccolta delle osservazioni e dei dati raccolti a Zurigo e a Locarno. Questo progetto**, considerata l'importanza del numero di Wolf negli studi climatologici, **è stato finanziato dal GCOS (Global Climate Observing System).**

BIBLIOGRAFIA

- F. Clette *et al.*, "Du nombre de Wolf à l'indice international des taches solaires: 25 ans de SIDC (1.ère partie)", *Ciel et Terre*, 124, 3 (2008), pp. 66-76
- F. Clette *et al.*, "Du nombre de Wolf à l'indice international des taches solaires: 25 ans de SIDC (2.ème partie)", *Ciel et Terre*, 124, 4 (2008), pp. 98-109
- S. Cortesi, "La storia della Specola - Prima parte", *Meridiana*, 187 (2007), pp. 8-13
- S. Cortesi, "La storia della Specola - Seconda parte", *Meridiana*, 188 (2007), pp. 8-12
- D.H. Hathaway, "The Solar Cycle", *Living Rev. Solar Phys.*, 7, (2010), 1 (<http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-1>)
- E. Landi Degl'Innocenti, *Fisica solare*, Springer Verlag (2007)

Marzo 2011, aggiornamento febbraio 2019

Copyright: Specola Solare Ticinese

Testo: Marco Cagnotti

Immagini: Archivio Specola Solare Ticinese/SILSO/BBSO

