



19992024

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

25 ANNI DI GEOSCIENZE PER LA SOCIETÀ

MISCELLANEA INGV

Dal Sole alla Terra: un viaggio alla
scoperta del nostro pianeta



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

90

Direttore Responsabile

Daniela VERSACE

Editor in Chief

Milena MORETTI (editorinchief.collane-editoriali@ingv.it)

Editorial Board

Laura ALFONSI (laura.alfonsi@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Simona CARANNANTE (simona.carannante@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Luca COCCHI (luca.cocchi@ingv.it)
Luigi CUCCI (luigi.cucci@ingv.it)
Lorenzo CUGLIARI (lorenzo.cugliari@ingv.it)
Alessia DI CAPRIO (alessia.dicaprio@ingv.it)
Roberto DI MARTINO (roberto.dimartino@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Domenico DORONZO (domenico.doronzio@ingv.it)
Filippo GRECO (filippo.greco@ingv.it)
Alessandro IAROCCI (alessandro.iarocci@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Daniele MELINI (daniele.melini@ingv.it)
Anna NARDI (anna.nardi@ingv.it)
Lucia NARDONE (lucia.nardone@ingv.it)
Marco OLIVIERI (marco.olivieri@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Pierangelo ROMANO (pierangelo.romano@ingv.it)
Maurizio SOLDANI (maurizio.soldani@ingv.it)
Sara STOPPONI (sara.stopponi@ingv.it)
Umberto TAMMARO (umberto.tammaro@ingv.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)
Stefano URBINI (stefano.urbini@ingv.it)

Ufficio Editoriale

Francesca DI STEFANO - Coordinatore e Segreteria di Redazione

Produzione e grafica-redazionale

Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Francesca DI STEFANO
Patrizia PANTANI

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia | Rappresentante legale:

Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

MISCELLANEA INGV

Dal Sole alla Terra: un viaggio alla
scoperta del nostro pianeta

*From Sun to Earth: a journey to discover
our planet*

Lili Cafarella*, Igino Coco, Paola De Michelis, Fabio Giannattasio, Michael Pezzopane, Roberta Tozzi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

*Corresponding author

Accettato 8 novembre 2024 | Accepted 8 November 2024

Come citare | How to cite Cafarella L., Coco I., De Michelis P., Giannattasio F., Pezzopane M., Tozzi R., (2024). Dal Sole alla Terra: un viaggio alla scoperta del nostro pianeta. Misc. INGV, 90: 1-186, <https://doi.org/10.13127/misc/90>

In copertina | Cover Aurora boreale a Myrland Viken, Norvegia, di Stein Egil Liland | Northern light in Myrland Viken, norway, di Stein Egil Liland

90



Direttore Responsabile Dipartimento Ambiente
Massimo CHIAPPINI

Coordinamento scientifico del blog
Lili CAFARELLA e Leonardo SAGNOTTI

Redazione scientifica del blog
Lili CAFARELLA, Chiara CARICCHI, Igino COCO, Domenico DI MAURO,
Fabio GIANNATTASIO, Ingrid HUNSTAD

Blog administrator
Lili CAFARELLA

Supporto grafico
Barbara ANGIONI

La piattaforma di comunicazione INGVambiente si articola nei seguenti social media:

Facebook: <https://www.facebook.com/INGVambiente>

Instagram: <https://www.instagram.com/ingvambiente/>

Threads: <https://www.threads.net/@ingvambiente>

Twitter/X: <https://x.com/INGVambiente>

Mastodon: <https://mastodon.uno/@INGVambiente>

Youtube: <https://www.youtube.com/c/ingvambiente>

Blog: <http://ingvambiente.com>



INDICE

Prefazione	9
<i>Preface</i>	<i>10</i>
Introduzione	11
<i>Introduction</i>	<i>12</i>
 LA NOSTRA STELLA	 13
Perché è importante studiare il Sole? Fabio Giannattasio	15
Com'è fatto il Sole? Fabio Giannattasio	18
L'atmosfera del Sole Fabio Giannattasio	22
Il Sole perde massa! Fabio Giannattasio	26
È nata una stella (storia e destino del Sole) Fabio Giannattasio	29
Una stella viva: il campo magnetico del Sole Fabio Giannattasio	33
Come osservare il Sole? Cos'è un telescopio solare Fabio Giannattasio	40
I terremoti solari Fabio Giannattasio	44
2019, l'anno senza macchia Fabio Giannattasio e Domenico Di Mauro	46
 L'INTERAZIONE CON IL NOSTRO PIANETA	 51
Il campo magnetico terrestre: il motore del nostro pianeta Lili Cafarella, Paola De Michelis, Stefania Lepidi e Giovanna Piangiamore	53
Che tempo fa nello spazio? Fabio Giannattasio	60

Danzando tra le stelle: lo spettacolo delle aurore	65
Fabio Giannattasio	
SuperDARN: come “fotografare” la ionosfera con i radar	72
Igino Coco	
Quanta turbolenza c'è nel cielo!	78
Paola De Michelis, Igino Coco, Fabio Giannattasio, Silvia Pau, Michael Pezzopane e Roberta Tozzi	
Una settimana di ordinaria follia... Solare!	81
Igino Coco	
I pericoli legati al Sole: la lezione della costellazione Starlink	87
Fabio Giannattasio	
Il GPS non funziona!	91
Lucilla Alfonsi	
Eruzione solare in corso: rischiamo un blackout?	94
Roberta Tozzi, Igino Coco, Paola De Michelis e Fabio Giannattasio	
La Magnetotellurica: una alleata contro le Tempeste Solari.	
Il Progetto MARGE in azione	98
Paola De Michelis e Giovanna Lucia Piangiamore	
L'intelligenza artificiale al servizio della Meteorologia Spaziale	103
Lucilla Alfonsi	
EVENTI DEL PASSATO... E DEL PRESENTE	107
L'aurora boreale del 1582	109
Lili Cafarella e Igino Coco	
I grandi eventi solari del passato: la tempesta di Carrington del 1859	114
Domenico Di Mauro	
La “Grande Aurora” del 4 febbraio 1872	117
Igino Coco, Francesco Berrilli e Luca Giovannelli	
Maggio 1921: la più grande tempesta magnetica del XX secolo	124
Lili Cafarella e Ingrid Hunstad	
La catastrofe del dirigibile Italia di Umberto Nobile: perché i naufraghi non furono ascoltati?	128
Bruno Zolesi e Michael Pezzopane	

Profezie e luci nel cielo: l'aurora di Fatima nel 1938 Lili Cafarella	132
Un'aurora rosso sangue Lili Cafarella, Domenico Di Mauro e Fabio Giannattasio	136
Luci nel buio della guerra: le aurore boreali del 1941 Lili Cafarella e Isabella Munda	140
La tempesta geomagnetica del luglio 1962: quando l'uomo accese aurore nei cieli del Pacifico Fabio Giannattasio	144
La grande tempesta del 13 marzo 1989 Domenico Di Mauro e Stefania Lepidi	148
Le tempeste solari di Halloween del 2003 Luca Spogli	151
Il Sole torna a farsi sentire: la prima intensa tempesta del nuovo ciclo Mauro Regi, Loredana Perrone, Luca Spogli e Alfredo Del Corpo	156
Sotto i raggi del Sole: il brillamento solare del 31 dicembre 2023 Riccardo Vagni, Giorgiana De Franceschi e Claudio Cesaroni	161
10 maggio 2024: la più forte tempesta magnetica degli ultimi vent'anni Igino Coco e Roberta Tozzi	166
L'ITALIA NELLO SPAZIO	175
San Marco 1: l'Italia alla conquista dello spazio Fabio Giannattasio e Igino Coco	177

Prefazione

Negli ultimi decenni, il nostro rapporto con il Sole e le sue interazioni con il pianeta Terra ha assunto una rilevanza crescente. Questo volume, nato per celebrare insieme la **Giornata Nazionale dello Spazio** e il **25° anniversario dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)**, rappresenta un viaggio affascinante attraverso le scoperte e le sfide che caratterizzano lo studio dello **Space Weather** e dei suoi effetti sulla nostra vita quotidiana.

La raccolta di articoli qui presentata, pubblicata originariamente sul blog **INGVambiente**, offre una panoramica completa e accessibile su temi di grande attualità scientifica. Partendo dalla nostra stella, il Sole, esploriamo la sua struttura, il campo magnetico e i fenomeni che lo caratterizzano, fino ad arrivare alle interazioni con il nostro pianeta: le aurore boreali, le tempeste geomagnetiche, i rischi per le tecnologie satellitari e terrestri.

La sezione finale ci guida attraverso gli eventi storici più significativi, ricordandoci come il Sole abbia sempre influenzato l'umanità, dal passato remoto fino ai giorni nostri. Dall'aurora boreale del 1582 alle tempeste solari del XXI secolo, ogni capitolo sottolinea l'importanza di comprendere questi fenomeni per proteggere le infrastrutture moderne e pianificare un futuro più resiliente.

Con il passare del tempo, lo studio dello Space Weather è destinato a diventare sempre più centrale. La protezione delle infrastrutture critiche, la pianificazione delle missioni spaziali e la sicurezza della vita sulla Terra dipenderanno dalla nostra capacità di prevedere e mitigare gli effetti delle tempeste solari e dei fenomeni geomagnetici. Lo Space Weather non è solo una sfida scientifica e tecnologica, ma anche un campo che unisce il passato, il presente e il futuro del nostro rapporto con il Sole e con il cosmo.

Questa pubblicazione non è solo un tributo alla tradizione di eccellenza scientifica dell'INGV, ma anche un invito a riflettere sull'importanza della ricerca e della divulgazione. La nostra intenzione è creare curiosità, entusiasmo e un rinnovato impegno verso le sfide che ci attendono nello studio del Sole e delle sue interazioni con il nostro pianeta, rendendo voi lettori i nostri compagni di viaggio.

Massimo Chiappini

Preface

In recent decades, our relationship with the Sun and its interactions with planet Earth has become increasingly important. This volume, created to jointly celebrate National Space Day and the 25th anniversary of the National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV), is a fascinating journey through the discoveries and challenges that characterize the study of Space Weather and its effects on our daily lives.

The collection of articles presented here, originally published on the INGVambiente blog, offers a comprehensive and accessible overview of topical scientific issues. Starting with our star, the Sun, we explore its structure, magnetic field and phenomena, and finally interactions with our planet: northern lights, geomagnetic storms, and risks to satellite and terrestrial technologies.

The final section guides us through the most significant historical events, reminding us how the Sun has always influenced humanity, from the distant past to the present day. From the aurora borealis of 1582 to the solar storms of the 21st century, each chapter emphasizes the importance of understanding these phenomena to protect modern infrastructure and plan for a more resilient future.

As time goes on, the study of Space Weather is set to become increasingly central. The protection of critical infrastructures, the planning of space missions and the security of life on Earth will depend on our ability to predict and mitigate the effects of solar storms and geomagnetic phenomena. Space Weather is not only a scientific and technological challenge, but also a field that unites the past, present and future of our relationship with the Sun and the cosmos.

This publication is not only a tribute to INGV's tradition of scientific excellence, but also an invitation to reflect on the importance of research and outreach. Our intention is to create curiosity, enthusiasm and a renewed commitment to the challenges that lie ahead in the study of the Sun and its interactions with our planet, making you readers our fellow travelers.

Massimo Chiappini

Introduzione

Questo volume nasce in occasione della Giornata Nazionale dello Spazio, il 16 dicembre, e si inserisce nelle attività per celebrare i 25 anni dalla fondazione dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Una ricorrenza importante che ci invita a riflettere sui traguardi raggiunti nella ricerca scientifica e sulle nuove sfide che ci attendono, in particolare nel campo della Meteorologia Spaziale. Lo *Space Weather* è infatti uno degli ambiti di ricerca di punta del nostro Dipartimento Ambiente, in grado di offrire nuove prospettive sulla comprensione dei fenomeni di interazione tra il Sole e la Terra.

Spesso, quando si parla di esplorazione spaziale, il pensiero corre automaticamente alle grandi potenze mondiali e alle rispettive agenzie spaziali. Tuttavia, pochi sanno che l'Italia è stata tra i primi Paesi a superare la barriera dell'atmosfera e ad accedere allo spazio, con il lancio del satellite *San Marco 1* nel 1964.

In questo contesto, lo studio dello *Space Weather* assume un'importanza fondamentale. Molti fenomeni che avvengono sul Sole influiscono direttamente sul nostro pianeta, con ripercussioni sulla sicurezza delle comunicazioni satellitari, sul funzionamento dei GPS e persino sulle infrastrutture elettriche terrestri, che possono essere danneggiate dalle correnti geomagneticamente indotte. Gli articoli selezionati in questo volume, pubblicati sul blog INGVambiente, offrono un'ampia panoramica su questi fenomeni, illustrandone l'evoluzione e le implicazioni per la nostra vita quotidiana. Dalla comprensione della dinamica solare alle tempeste geomagnetiche e ai rischi che queste comportano per le tecnologie terrestri, il volume affronta temi di grande attualità e rilevanza scientifica.

Questa raccolta di articoli non solo celebra il lavoro svolto dall'INGV, ma contribuisce anche a sensibilizzare il pubblico su un tema di grande rilevanza per la ricerca internazionale. In occasione della Giornata Nazionale dello Spazio e dei 25 anni dalla fondazione dell'INGV, vogliamo rendere omaggio alla tradizione di eccellenza e innovazione che contraddistingue il nostro Istituto, con l'auspicio che questo volume possa ispirare una maggiore consapevolezza del ruolo fondamentale della ricerca in questo ambito e del suo impatto sulle tecnologie e sulla vita quotidiana.

Introduction

This volume was created for National Space Day, on December 16, and is part of the activities to celebrate 25 years since the foundation of the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). This significant milestone invites us to reflect on the goals achieved in scientific research and the new challenges that await us, particularly in the field of Space Weather. Space Weather is one of the leading research areas of the INGV Environment Department, providing new perspectives on the phenomena of interaction between the Sun and the Earth.

Often, when discussing space exploration, thoughts automatically turn to the major world powers and their respective space agencies. However, few are aware that Italy was among the first countries to break through the atmosphere and access space with the launch of the San Marco 1 satellite in 1964. In this context, the study of Space Weather takes on fundamental importance. The behavior of the Sun directly affects our planet, impacting satellite communication security, GPS functionality, and ground based infrastructures such as power lines and pipelines, that can be subject to geomagnetically induced currents related to strong geomagnetic storms. The articles selected for this volume have been published on the INGVambiente blog, and provide a comprehensive overview of these phenomena, illustrating their evolution and implications for our daily lives. From the Sun and its magnetic field to solar storms and their risks to terrestrial technologies, this volume addresses highly relevant scientific topics.

This selection of articles not only celebrates INGV's work but also raises public awareness about a topic at the heart of international research. On the occasion of National Space Day and INGV's 25th anniversary, we aim to honor the tradition of excellence and innovation that characterizes our Institute, hoping that this volume will inspire an increased consciousness on the fundamental role of research in this field and its impact on everyday life.

Keywords Sole; Spazio circumterrestre; Meteorologia Spaziale | Sun; Circumterrestrial space; Space Weather

LA NOSTRA STELLA

Perché è importante studiare il Sole?

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Ci sono diversi ottimi motivi per cui studiare il Sole, vediamone i principali

Fin dalle origini dell'umanità il Sole ha rappresentato un oggetto di grande interesse e venerazione, imprescindibile per la vita e lo sviluppo di tutte le civiltà. Per questo la sua osservazione ha radici antichissime, che affondano nella necessità, ad esempio, delle prime popolazioni stanziali di conoscere l'alternarsi di solstizi ed equinozi al fine di identificare i migliori periodi di semina e raccolto. A distanza di millenni osservare e studiare il Sole riscuote sempre un altissimo interesse, e la nostra stella non ha mai cessato di occupare quel posto d'onore che ha nella conoscenza umana.

Il motivo? Si tratta di una necessità oltreché di un legittimo interesse scientifico. Per di più i progressi fatti nella conoscenza del Sole hanno coinciso con grandi progressi in altre branche della scienza. Insomma, ci sono diversi motivi per cui ancora oggi e nel futuro è di primaria importanza studiare il Sole.

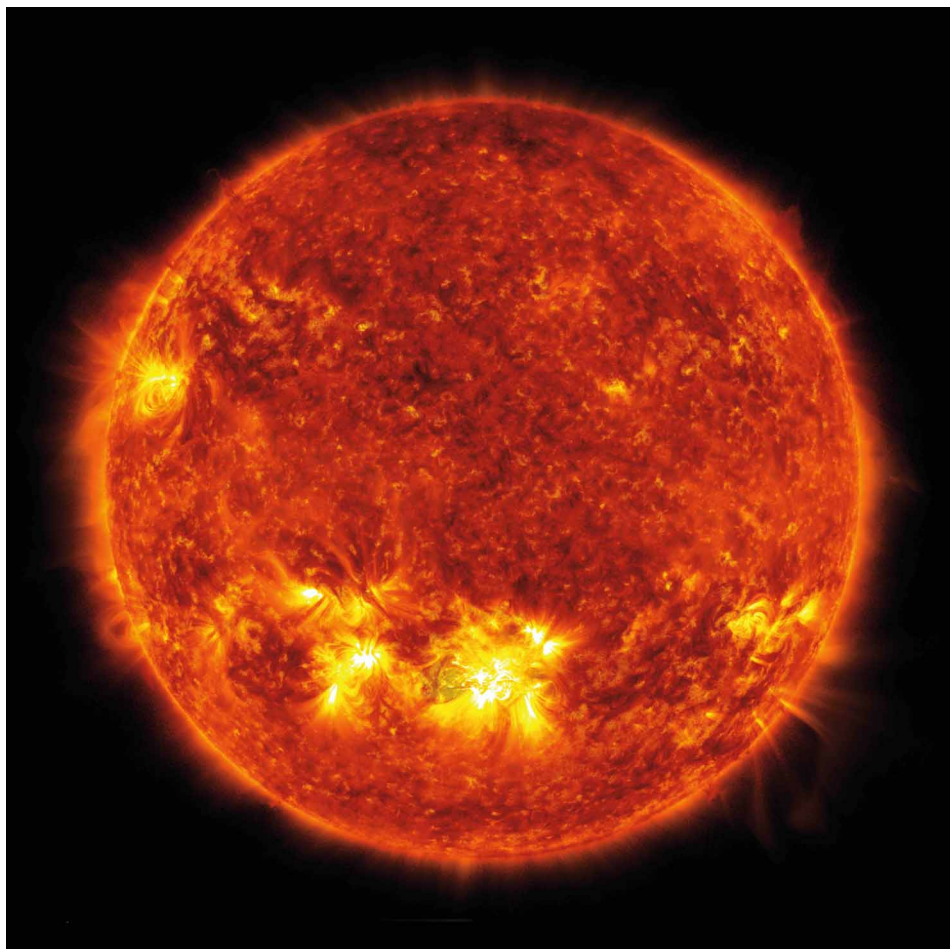


Figura 1 Immagine del Sole. (Crediti: NASA/SDO).

Figure 1 Image of the Sun. (Credits: NASA/SDO).

Ecco i principali:

Perché è la nostra stella

Quasi tutta l'**energia** che investe la Terra dallo spazio sotto forma di radiazione e particelle e che la tiene viva proviene dal Sole. La nostra stella è imprescindibile per lo sviluppo della vita come la conosciamo, regola il bilancio energetico del nostro pianeta, il clima e la composizione chimica della sua atmosfera, ed allo stesso tempo è alla distanza giusta perché ci sia acqua liquida in superficie. Il suo campo magnetico, che permea il sistema solare, ci protegge da particelle energetiche potenzialmente dannose provenienti da ogni angolo dell'Universo. Ovviamente, se da una parte la vita sulla Terra come la conosciamo non avrebbe potuto svilupparsi senza un Sole, al tempo stesso la nostra stella può investirci di particelle e radiazioni talmente energetiche da essere potenzialmente pericolose e danneggiare le infrastrutture a terra e nello spazio da noi costruite e che regolano la nostra vita quotidiana. Nondimeno, tali emissioni possono essere un pericolo diretto e indiretto per la salute umana. Per questo motivo negli ultimi decenni gli scienziati dedicano sempre maggiori sforzi allo studio dei fenomeni legati allo **Space Weather**, la Meteorologia Spaziale, ossia l'insieme delle condizioni fisiche del Sole, dello spazio interplanetario e degli effetti che la variazione di tali condizioni può avere sui pianeti del Sistema Solare, con particolare enfasi su ciò che accade nell'ambiente circumterrestre e nell'atmosfera del nostro pianeta.

Perché è vicino

Il Sole è praticamente dietro l'angolo, dista "soltanto" **150 milioni di km**. Un valore enorme per la nostra sensibilità, ma davvero irrisorio in astronomia. La sua vicinanza, unitamente allo sviluppo delle più sofisticate tecnologie che ci consentono di costruire telescopi solari sempre più grandi e performanti, permette di studiarlo in grande dettaglio e da molto vicino. Così conosciamo abbastanza bene il Sole, e con i moderni telescopi siamo in grado di osservarlo con una risoluzione tale da poter distinguere nella sua atmosfera, ad esempio alle frequenze dello spettro visibile, strutture tra loro distanti soltanto un centinaio di km. Questa distanza potrebbe sembrarci grande se paragonata alle distanze a cui siamo abituati, ma equivarrebbe a poter distinguere due oggetti a pochi centimetri tra loro da una distanza di 100 km! E non è finita qui: i telescopi di ultimissima generazione, che possono raggiungere i 4 metri di diametro, ci permettono di osservare ancora più in dettaglio l'atmosfera solare, con una risoluzione di poche decine di km. Abbiamo quindi la possibilità unica di poter vedere com'è fatta una stella, una stella attiva, senza ricorrere troppo a modelli ed ipotesi non direttamente verificabili, né fare troppe assunzioni sulla sua variabilità. Siamo (e lo saremo sempre di più) in grado di studiare e misurare alcuni parametri fondamentali che descrivono le proprietà fisiche della nostra stella, e in futuro speriamo di svelarne tutti i misteri, rispondendo ai tanti quesiti che ad oggi sono ancora irrisolti. Ma è pur vero che le nuove osservazioni oltre che tante risposte probabilmente porteranno con sé anche tante altre domande...

Perché è un laboratorio naturale

Sul Sole siamo in grado di studiare una varietà di fenomeni tale da consentire un salto enorme nella conoscenza di molteplici processi all'opera in natura. Per questo il Sole è un laboratorio unico per studiare la fisica alla base di tali processi, ad esempio **la fisica dei plasmi, l'interazione**

della materia con intensi campi elettrici e magnetici, i meccanismi di trasporto di energia, le reazioni termonucleari, le proprietà di alcune particelle emesse dal Sole, il comportamento della radiazione e la sua propagazione, ecc. Insomma, il Sole è un laboratorio come non saremo mai in grado di realizzare sulla Terra. Non è possibile, infatti, realizzare esperimenti sulla Terra che possano caratterizzare il comportamento di un corpo rotante, magnetizzato, con un'atmosfera e un interno stratificati e il sovrapporsi di dinamiche complesse e con parametri fisici estremi come quelli associati al Sole. Non siamo in grado di realizzarlo, ma siamo in grado di osservare il sistema complesso Sole, dove tutto ciò avviene ogni istante. Il laboratorio Sole ha permesso, ad esempio, di scoprire l'elio (l'elemento più abbondante nell'Universo dopo l'idrogeno, e il cui nome non a caso deriva dal greco *hèlios*, cioè Sole), verificare per la prima volta e con grande precisione la teoria della relatività generale di Einstein, scoprire le righe spettrali e dare quindi origine alla spettroscopia, scoprire l'oscillazione tra i tre diversi sapori (diciamo diversi tipi) dei neutrini (particelle elementari la cui esistenza era stata postulata nel 1930 dal fisico tedesco Wolfgang Pauli) contribuendo così al "miglioramento" del modello standard (la teoria che descrive alcune delle forze fondamentali dell'Universo e le particelle ad esse associate). E tanto altro ancora.

Perché è una stella come tante nell'Universo

Per ultimo, ma non meno importante, il Sole è il *frontman* di un gruppo di miliardi di stelle ad esso simili. Conoscere nel dettaglio i processi che caratterizzano il Sole vuol dire conoscere tante altre stelle come il Sole, che si trovano nello stesso stato evolutivo, che hanno pressappoco la stessa massa, la stessa composizione e condividono lo stesso destino. I parametri fisici osservati sul Sole con ottima accuratezza possono essere utilizzati per tantissime altre stelle simili al Sole, la stragrande maggioranza delle quali non riusciremo mai ad osservare, almeno nel prossimo futuro. Tali parametri fisici sono a buon diritto dei valori di riferimento dai quali i modelli di evoluzione stellare non possono prescindere. Insomma, **conoscere il Sole ci permette di conoscere tantissime altre stelle** prima ancora di raggiungere la tecnologia necessaria per osservarle direttamente. Non solo. Per la sua vicinanza un quadrato di lato 600 metri sul Sole fornisce tanta luce (e quindi tante informazioni) quanta ne avremmo da un'intera stella posta a 10 parsec (1 parsec corrisponde a circa 30,000 miliardi di km) di distanza! Quindi ogni elemento di risoluzione della nostra stella può essere pensato come un'atmosfera stellare a sé, e la disomogeneità del Sole (che approfondiremo nei prossimi post) ci permette di studiare atmosfere stellari con diverse caratteristiche fisiche.

Il Sole in pillole

Massa $\cong 2 \times 10^{30}$ Kg (Massa della Terra $\cong 6 \times 10^{24}$ Kg)

Raggio $\cong 700,000$ Km (Raggio della Terra $\cong 6371$ Km)

Luminosità $\cong 3.8 \times 10^{33}$ erg/s

Temperatura efficace (di corpo nero) $\cong 5776$ K

Età $\cong 1.4 \times 10^{17}$ s (vale a dire circa 4.5 miliardi di anni)

Com'è fatto il Sole?

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Molti sanno che il Sole è una stella, la *nostra* stella. Ma com'è fatta una stella? Di cosa è costituita? Come fa ad emanare l'enorme quantità di energia che investe lo spazio circostante?

Se dovessimo spiegare ad un bambino cos'è una stella, potremmo definirla come una gigantesca palla di fuoco. Oltre ad essere un concetto facilmente codificabile, questa definizione cattura una caratteristica fondamentale e distintiva di una stella: quella di "bruciare", ossia produrre energia e trasferirla sotto forma di radiazione e particelle.

Certamente il Sole, in quanto stella, è un oggetto molto complesso e dinamico, per cui rispondere in maniera scientificamente rigorosa e soddisfacente alla domanda "Com'è fatto il Sole?" richiede necessariamente nozioni complicate e non facilmente accessibili. Proviamo a farlo in modo semplice immaginando di intraprendere un viaggio dal centro del Sole verso l'esterno, fino a raggiungere la sua "superficie". Possiamo seguirne le tappe consultando l'immagine seguente.

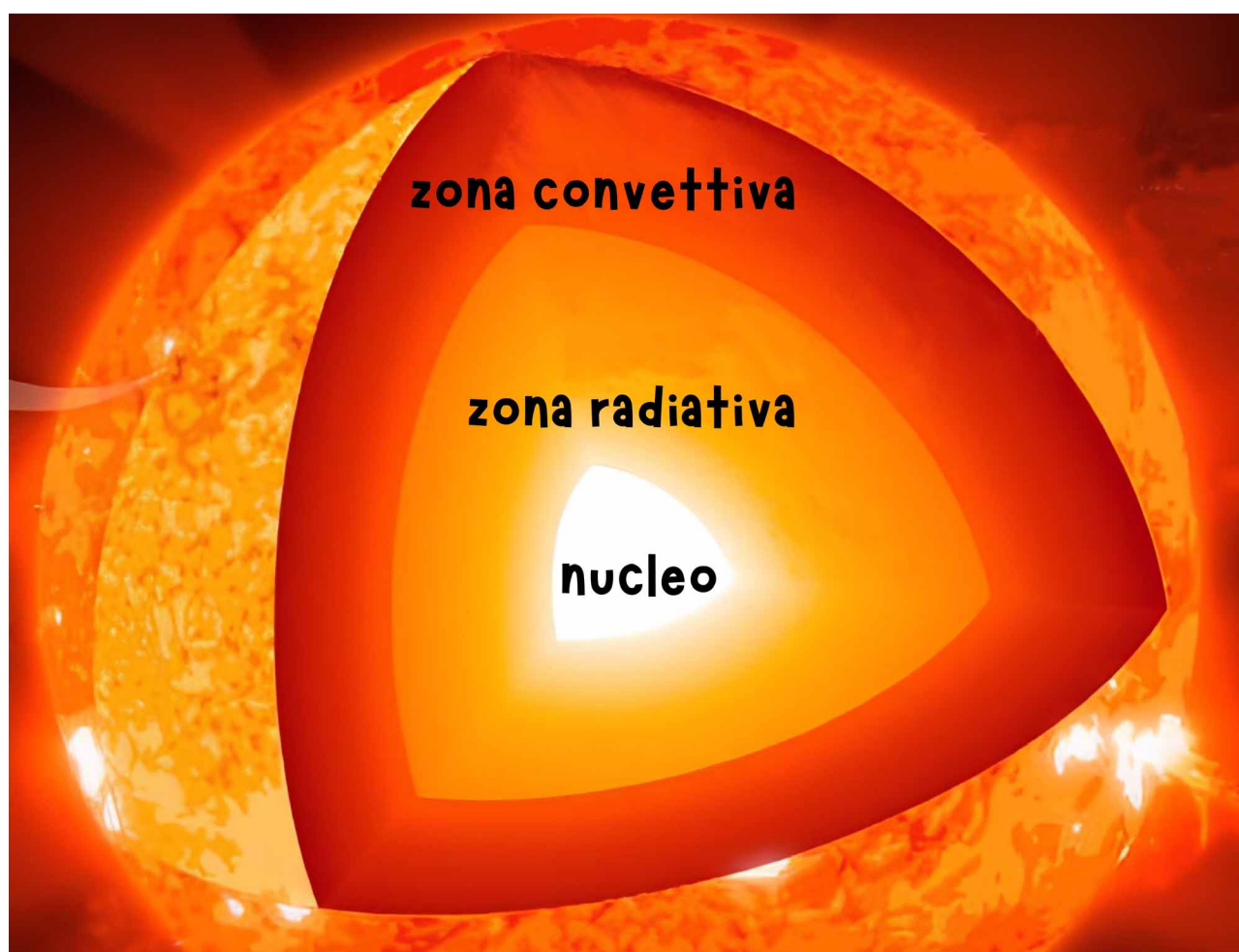


Figura 1 Schema in sezione della struttura del Sole. (Adattamento da Kelvinsong).
Figure 1 Sectional diagram of the Sun's structure. (Adapted from Kelvinsong).

Di cosa è fatto il Sole?

La massa del Sole è di circa 2000 miliardi di miliardi di miliardi di chilogrammi, cioè 2 seguito da 30 zeri, quasi un milione di volte la massa della Terra. Per renderci conto dell'enormità di questo numero pensiamo che tutti i pianeti del Sistema Solare messi insieme hanno una massa totale poco più di un millesimo di quella del Sole, il quale da solo rappresenta circa il 99.86% della massa dell'intero Sistema Solare.

L'enorme massa solare è per il 71% circa costituita di **idrogeno**, per il 27% circa costituita di **elio**, e per il restante 2% circa di tutti gli altri elementi. La cosa non deve sorprenderci visto che idrogeno ed elio sono di gran lunga i più abbondanti elementi dell'intero Universo: insieme contano per il 98% circa della materia ordinaria che riempie il cosmo. Quindi, fondamentalmente nel Sole troviamo per lo più questi due elementi: idrogeno ed elio, con piccolissime tracce di tutti gli altri elementi.

Partiamo dal centro. Che ambiente ci aspettiamo di trovare?

Il nucleo vero e proprio della nostra stella si estende per circa il 20-25% del suo raggio. In questa regione le temperature raggiungono valori dell'ordine di dieci milioni di gradi e la pressione circa 250 miliardi di atmosfere. Siamo nel vero e proprio motore della stella: qui il calore e la pressione sono talmente elevati da mantenere a regime **processi di fusione nucleare** che utilizzano come combustibile nuclei di idrogeno per formare nuclei di elio. In pratica i nuclei di idrogeno collidono tra di loro, e l'energia con cui lo fanno è talmente grande che nella collisione i nuclei si fondono fino a formare nuclei di elio, che sono più massicci.

Nel processo di fusione viene liberata un'enorme quantità di energia che sostiene e alimenta la nostra stella. Si pensi che **ogni secondo nel Sole vengono fusi circa 600 milioni di tonnellate di idrogeno per produrre elio**, mentre lo 0.7% di tale massa viene convertita in energia **producendo circa 400 quadrilioni di Watt, ossia circa diecimila miliardi di volte il consumo mondiale medio di energia!**

La parte centrale del Sole ha un'altra caratteristica: in esso l'energia che si propaga verso l'esterno viene irradiata in tutte le direzioni come da un gigantesco braciere. Viaggiando verso l'esterno, la regione in cui ciò avviene si estende oltre il nucleo fino a circa il 70% del raggio solare, e per questo viene denominata **zona radiativa**. Può sembrare un fatto banale, scontato, ma non lo è! Non in tutte le stelle nella parte più interna l'energia è trasportata attraverso irraggiamento. Questo dipende principalmente dalla massa della stella non appena essa si forma.

Stelle di massa molto piccola, diciamo da circa metà a circa 1.5 volte la massa del Sole, tendono ad avere un nucleo radiativo, mentre negli strati più esterni (detto *involuppo*) l'energia tende ad essere trasportata per **convezione**, come ad esempio avviene in una pentola di acqua bollente, in cui l'acqua a contatto con il fondo della pentola si scalda, tende a salire verso la superficie e nel farlo si raffredda, per poi precipitare nuovamente verso il fondo della pentola e ricominciare a salire in un alternarsi continuo di moti verso la superficie dell'acqua e verso il fondo della pentola. È esattamente quanto avviene nel Sole. Al contrario, stelle con massa circa 1.5 maggiore di quella del Sole tendono ad avere un nucleo convettivo e un involucro radiativo.

Continuiamo il viaggio, spostandoci verso l'esterno

Ci muoviamo verso la superficie visibile della nostra stella. Qui la materia stellare è in continuo movimento proprio come una enorme pentola di acqua bollente. Siamo nella cosiddetta **zona convettiva**. Questa regione è davvero importante, perché il continuo movimento della materia

stellare causa l'instaurarsi di correnti elettriche molto intense. Queste a loro volta generano intensi campi magnetici, che originati alla base della zona convettiva, tendono a risalire per "galleggiamento" verso la superficie ed emergere in forma di tubi di flusso magnetico in corrispondenza delle macchie solari.

Alla base della zona convettiva la temperatura è ancora molto alta, dell'ordine del milione di gradi, mentre in cima a tale zona, in corrispondenza della superficie visibile del Sole, la temperatura crolla a circa 5500 gradi. Questo crollo violentissimo di temperatura è di per sé consistente con l'esistenza della convezione stessa. Infatti, la materia riscaldata alla base di questa regione si espande, riduce la sua densità, e inizia a salire in un meccanismo simile al galleggiamento.

Arrivato sulla cima della zona convettiva in prossimità della superficie visibile, l'energia può scappare via poiché irradiata verso l'esterno. La materia perdendo energia si raffredda rapidamente, diventa più densa e tende a tornare nuovamente in basso verso la base della zona convettiva, dando inizio nuovo ciclo di risalita e discesa. Il tutto prosegue ininterrottamente lasciando sulla superficie visibile del Sole una traccia ben visibile della convezione: la **granulazione**. Infatti, osservando con un moderno telescopio la superficie visibile del Sole ci accorgiamo che su di essa appaiono delle strutture brillanti simili a mattonelle, i *granuli*, circondati da corridoi scuri, i *corridoi intergranulari*.

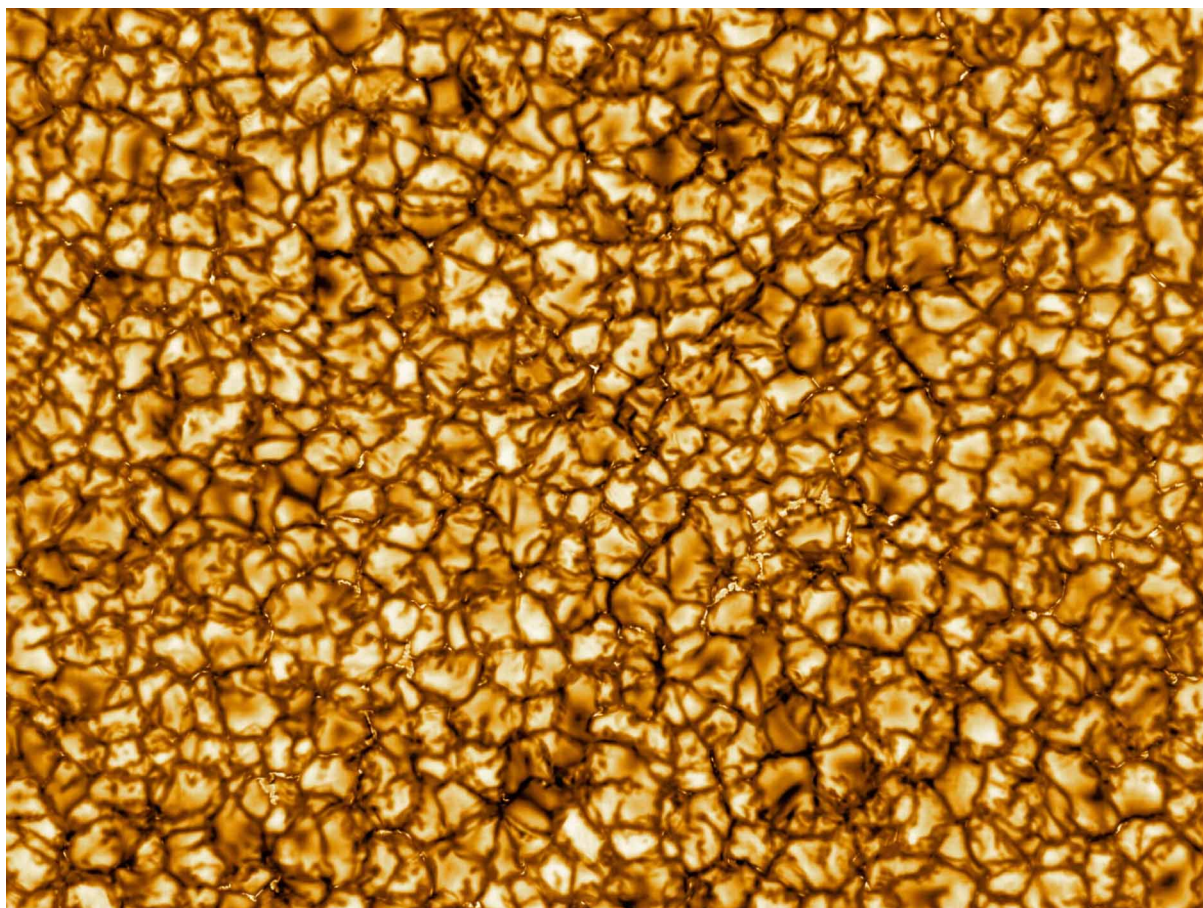


Figura 2 Immagine della superficie visibile del Sole acquisita dal telescopio americano Daniel K. Inouye Solar Telescope. Le immagini originali hanno un livello di dettaglio di 30 chilometri. Ogni "cella" ha in media un'estensione di 700,000 km², circa due volte l'area della Germania [1].

Figure 2 Image of the Sun's visible surface acquired by the American Daniel K. Inouye Solar Telescope. Images have a 30 kilometer resolution. Every "cell" has, on average, an area of about 700,000 km², about two times the surface area of Germany [1].

La parte brillante, i granuli, corrisponde a regioni in cui la materia solare calda emerge dalle profondità come una fontana. Ricade ai lati una volta raffreddata per fare ritorno nelle profondità della zona convettiva.

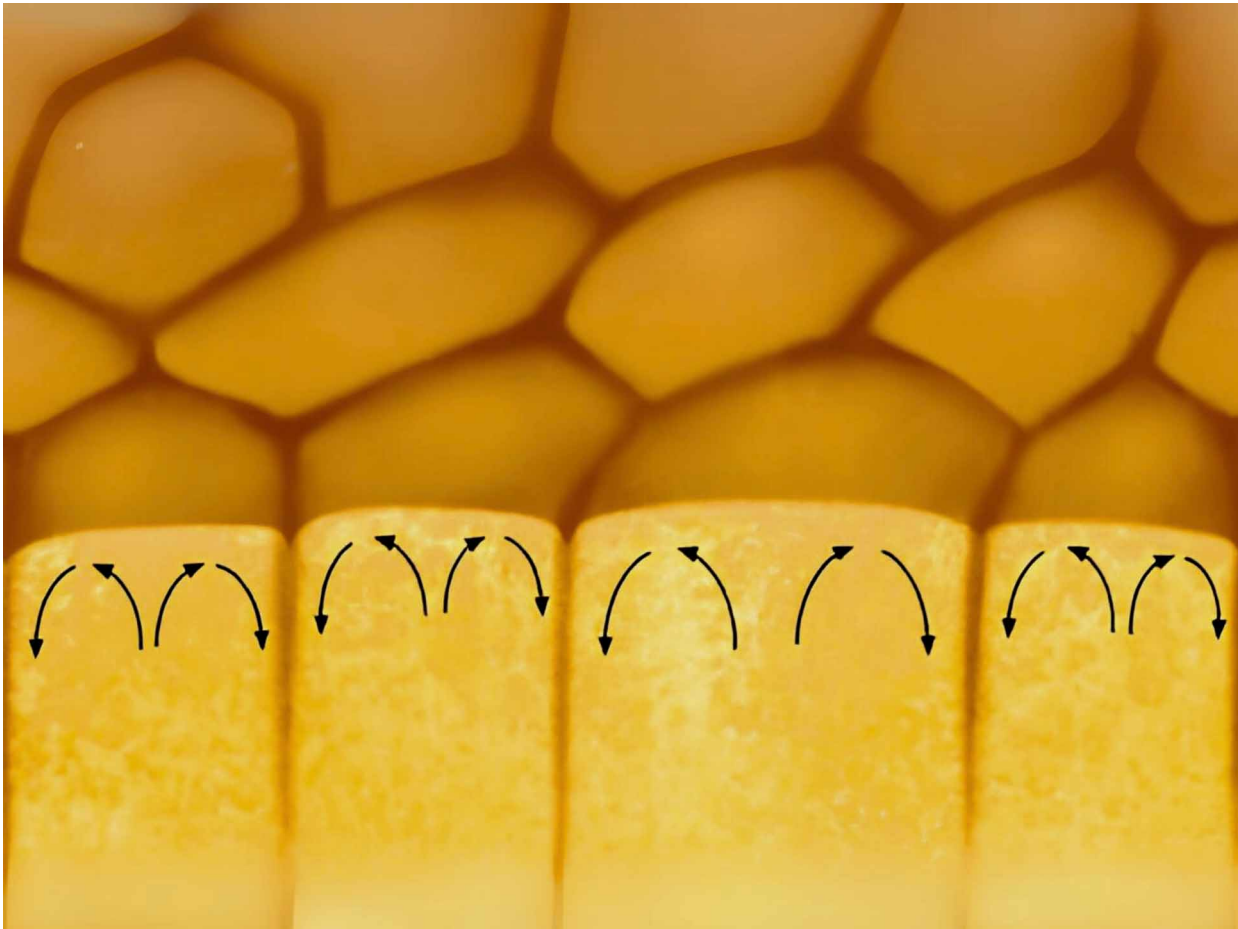


Figura 3 Schema della granulazione per effetto della convezione. La materia calda affiora in cima alla zona convettiva dando origine a strutture brillanti, i granuli. Raffreddandosi ricade ai bordi in corrispondenza dei corridoi intergranulari, che appaiono più scuri. (Crediti: [2]).

Figure 3 Schematics of granulation driven by convection. Hot matter emerges on top of the convective zone, generating bright structures: the solar granules. When it cools down, it falls along the borders, in correspondence of “intergranular corridors”, which appear darker. (Credits: [2]).

Siamo arrivati sulla superficie visibile del Sole. Ed il viaggio continua...

Sitografia

[1] <https://nso.edu/press-release/inouye-solar-telescope-first-light/>

[2] <http://www.coe.edu>

L'atmosfera del Sole

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Il Sole ha un'atmosfera. E la luce che ne emerge ha viaggiato per migliaia di anni all'interno della nostra stella prima di affiorare e rendersi visibile. Ma com'è fatta l'atmosfera del Sole? E perché, al contrario di quanto ci aspetteremmo, la sua temperatura aumenta nella parte più esterna? Scopriamo i fenomeni che caratterizzano l'atmosfera del Sole e che hanno un ingrediente fondamentale per capirne i segreti: il campo magnetico.

Può sembrare sorprendente, ma anche il Sole ha un'atmosfera!

Cosa significa?

L'energia viene prodotta dal Sole nelle regioni più interne attraverso reazioni nucleari che trasformano l'idrogeno in elio liberando radiazione elettromagnetica (e particelle) *irraggiata* verso gli strati più esterni. Tuttavia, essendo l'interno del Sole molto denso, la radiazione prodotta al centro non riesce ad attraversarlo imperturbata, ma è continuamente deviata dallo scontro con la materia densa che costituisce l'interno stellare.

La radiazione è quindi continuamente *assorbita* dalla materia e *ri-emessa* prontamente, non riuscendo a proseguire in linea retta verso l'esterno della stella. Al contrario, ha un cammino molto tortuoso, a zig-zag, frutto del continuo incontro con le particelle che costituiscono l'interno del Sole.

Il risultato è che **la radiazione emessa al centro del Sole** a causa delle continue deviazioni, **impiega un bel po' di tempo per raggiungere la superficie, tipicamente da migliaia a centinaia di migliaia di anni!** Man mano che si procede verso l'esterno la densità del gas diminuisce sempre più e la radiazione subisce sempre meno deviazioni. Ad un certo punto la radiazione riemessa dal gas non trova ostacoli (ossia assorbitori) e può uscire liberamente all'esterno, attraversare l'atmosfera sempre meno densa, ed eventualmente giungere fino a noi.

Quello strato di Sole che permette che la radiazione inizi a sfuggire senza ulteriori scontri è denominata **fotosfera**, e corrisponde alla "superficie visibile" della nostra stella. La luce del disco giallo nel cielo che associamo al Sole dunque, a rigore, è stata emessa per l'ultima volta nella fotosfera solare pur essendo stata "generata" nell'interno più profondo della stella.

Cosa ci aspettiamo di trovare intorno a noi? Di cosa è fatta la materia tenue che costituisce l'atmosfera?

Ormai lo sappiamo. Il Sole è composto per la quasi totalità di idrogeno ed elio. Ma ci sono tracce di altri elementi pesanti come ad esempio ossigeno, carbonio, azoto, silicio, magnesio, neon, ferro, zolfo. E siamo in grado di capirlo e addirittura di stimare le abbondanze di ciascun elemento anche dalla Terra, analizzando la luce che proviene dal Sole. Ma ancor più che caratterizzare l'atmosfera solare mediante le specie chimiche che la compongono, **risulta molto più interessante andare a vedere come cambia la temperatura** muovendoci attraverso l'atmosfera stessa. Il motivo ci sarà svelato tra poco.

La fotosfera è il luogo dove è possibile osservare le famose **macchie solari**, che sono la manifestazione della presenza di intensi campi magnetici e rappresentano una vera e propria spia dell'attività solare in corso. La **presenza di tante macchie** e gruppi di macchie **indica una marcata attività**, che al contrario è assente o minima quando le macchie sono assenti o in esiguo numero.

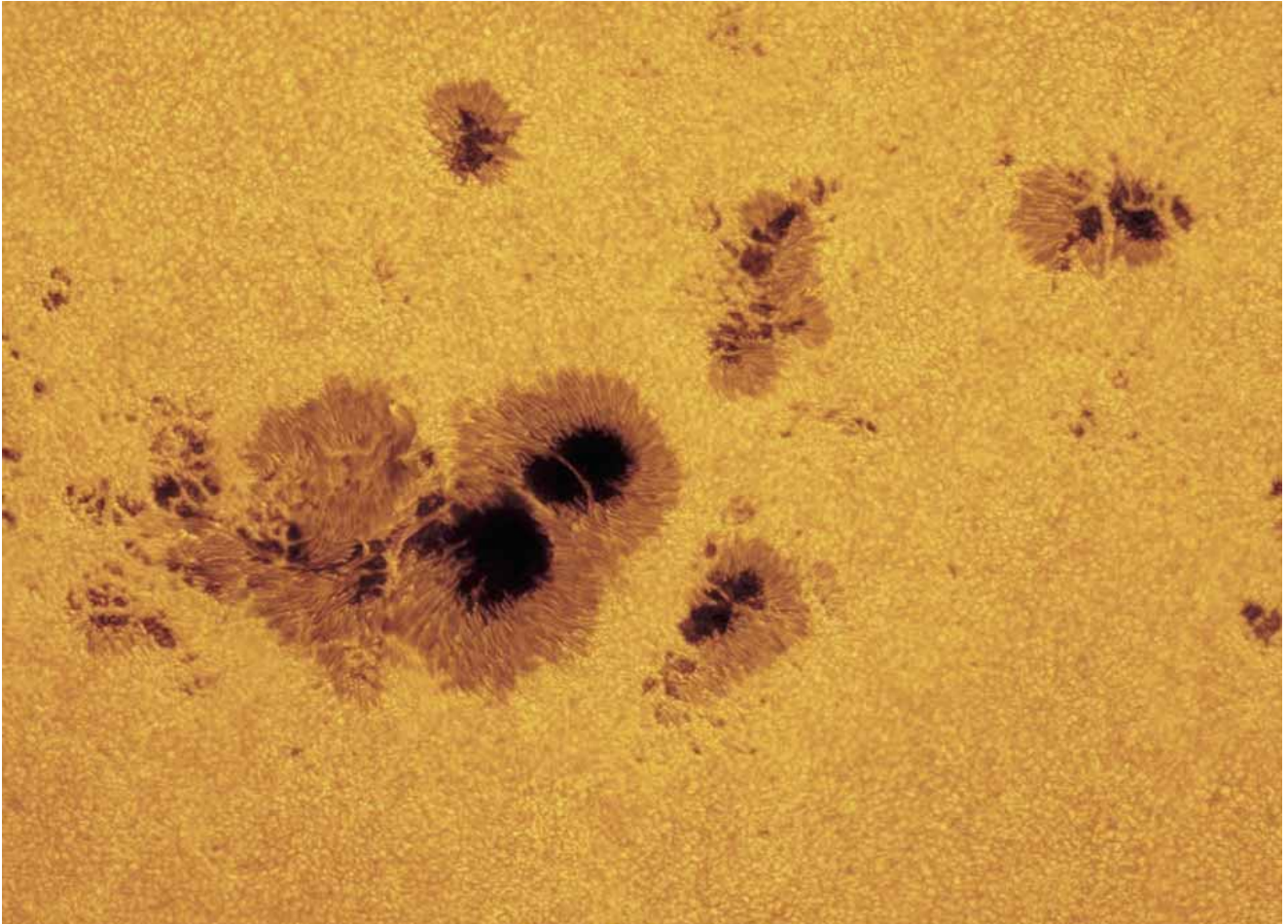


Figura 1 Immagine di macchie solari in fotosfera. (Crediti: NASA).

Figure 1 Image of sunspots in the photosphere. (Credits: NASA).

In effetti però, se si osserva la fotosfera ad alta risoluzione con opportuni strumenti in grado di rivelare i campi magnetici, si vede che essa è quasi interamente coperta da una sorta di **tappeto magnetico**. Sono quindi presenti pressoché ovunque campi magnetici molto più piccoli e meno intensi di quelli associate alle macchie.

Man mano che ci spostiamo verso l'alto troviamo che la densità del gas diminuisce, e per tutto lo spessore della fotosfera, circa 500 km, anche la temperatura scende, fino a valori compresi tra i 4000 e i 5000 gradi. Fin qui nulla di sorprendente. Man mano che ci allontaniamo da una fonte di calore registriamo una temperatura gradualmente minore. Di conseguenza, via via che ci allontaniamo dal centro del Sole, ci aspetteremmo di trovare temperature sempre minori. Eppure, proseguendo il viaggio nell'atmosfera solare accade qualcosa di imprevisto. Infatti, raggiunto un minimo di temperatura al limite esterno della fotosfera, **la temperatura inizia a risalire**. Abbiamo attraversato il confine con un altro strato dell'atmosfera solare: **la cromosfera**.

Per quanto sembri inaccessibile essa è visibile dalla Terra, ma soltanto all'inizio e alla fine di una eclissi totale, come un alone di colore rossastro che avvolge il disco solare. La cromosfera è costituita da strutture simili a "fiammelle", chiamate **spicole**. Al di fuori di una eclissi, la luce emessa dalla cromosfera è troppo debole rispetto a quella che fuoriesce dalla fotosfera.

La cromosfera si estende da circa 500 a circa 2000 km di altezza. Il nostro termometro da viaggio segna che la temperatura aumenta fino a circa una decina di migliaia di gradi. Una teoria che potrebbe spiegare questo aumento di temperatura è che le spicole siano strutture associate a campi magnetici attraverso i quali si incanala l'energia proveniente dal basso.

Ma i fenomeni più interessanti e spettacolari che possiamo osservare in questa regione dell'atmosfera sono senza dubbio le **protuberanze solari**. Si tratta di enormi getti di gas che si innalzano per migliaia di chilometri, fino ad inoltrarsi nella corona solare. Quando la gravità del sole riesce ad attrarli nuovamente a sé, tali getti ricadono verso il basso formando una struttura arcuata i cui piedi affondano saldamente nella fotosfera.

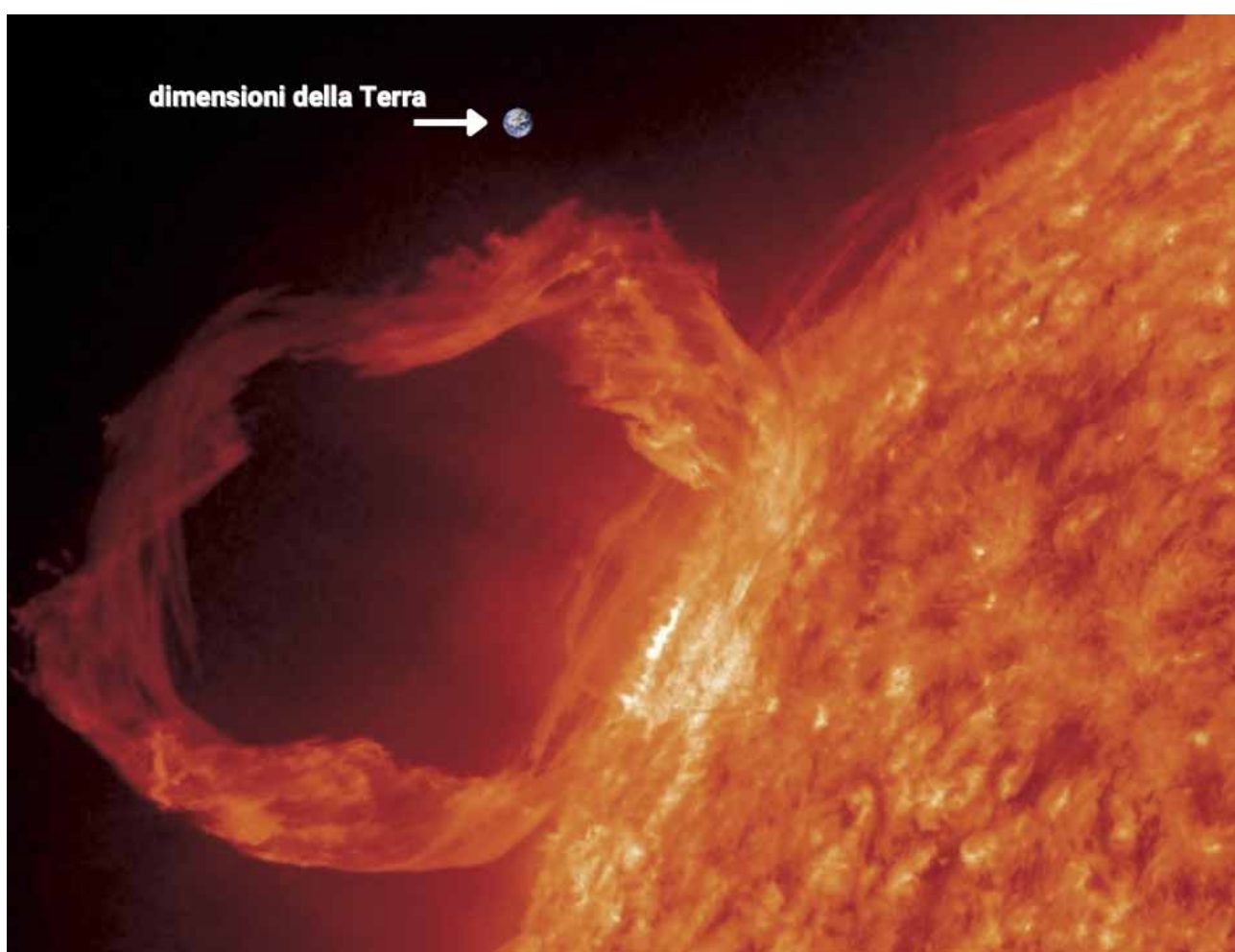


Figura 2 Immagine di una protuberanza solare. (Adattato da una immagine NASA).

Figure 2 Image of a solar prominence. (Adapted from a NASA image).

Continuando il viaggio, si incontra una regione davvero particolare, spesso appena qualche centinaio di chilometri. In questa regione la temperatura si impenna fino a centinaia di migliaia di gradi. È nota come **regione di transizione** e costituisce una sorta di sottile intercapedine tra la cromosfera e la **corona solare**. In quest'ultima regione la temperatura supera il milione di gradi! Siamo giunti nello strato più esterno dell'atmosfera solare, il cui confine non è definito poiché

esso si fa sempre meno denso fino a sfumare nello spazio interplanetario. Anche questo strato dell'atmosfera solare è interessato dalla presenza di campi magnetici arciformi che affondano le loro radici fin dalla fotosfera in corrispondenza di macchie e facole e prendono le sembianze di **archi coronali**. Queste strutture sono un concentrato di energia e possono dare origine a fenomeni estremamente intensi come **brillamenti** ed **emissioni di massa coronale** (di questo ci occuperemo quando parleremo di Meteorologia Spaziale).

L'idea è comunque che questi enormi tubi si comportino come magneti i cui piedi hanno polarità opposta. Laddove invece questi tubi non si richiudono sulla fotosfera si disperdono verso l'esterno e poggiano su un solo piede, si osservano i cosiddetti **buchi coronali**. Qui la corona è discontinua ed appare "bucata" quando la si osserva nello spettro ad altissima energia (nei raggi X). In tali tubi il gas è espulso lungo il campo magnetico a velocità impressionante, fino a qualche migliaio di chilometri al secondo. Questo gas costituisce il **vento veloce**, che soffia a circa 750 km/s e si distingue dal **vento lento**, che invece ha origine nelle regioni equatoriali del Sole ed ha velocità tipiche di circa 300-500 km/s.

Non è per nulla semplice spiegare il comportamento anomalo della temperatura nell'atmosfera solare. Come abbiamo visto infatti da una certa quota in poi cresce notevolmente con l'altezza anziché diminuire. **Ancora oggi la questione è assai dibattuta** e il mistero ancora non svelato completamente. Quel che si sa con certezza, è che dalla cromosfera alla corona si innescano dei processi fisici che coinvolgono il campo magnetico e sono in grado di riscaldare l'atmosfera depositando enormi quantità di energia in queste regioni. I due principali meccanismi che si pensano siano in grado di scaldare l'atmosfera solare sono le **riconessioni magnetiche** e l'instaurarsi e il propagarsi di **onde**. Nel primo caso avviene che polarità opposte di tubi di flusso magnetico solare vengano a contatto liberando una grande quantità di energia. Nel secondo scenario invece tali tubi magnetici incanalano onde che possono instaurarsi negli strati più bassi dell'atmosfera solare e dissiparla nelle regioni più alte.

Probabilmente entrambi contribuiscono al riscaldamento, ma la spiegazione ultima e definitiva di questo mistero non è ancora stata trovata.

E intanto noi siamo finalmente fuori dall'atmosfera solare e ci godiamo lo spettacolo da una posizione privilegiata.

Il Sole perde massa!

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

La massa del Sole diminuisce costantemente; come molte stelle simili, però, è un oggetto dinamico e complesso. Esploriamo insieme le caratteristiche di questo fenomeno

Nella ricca varietà di fenomeni che si verificano all'interno del Sole e nella sua atmosfera, è necessario menzionare il fatto, non a tutti noto, che la massa del Sole diminuisce costantemente: la nostra stella "dimagrisce" secondo dopo secondo. Ma cosa significa questo? Quanta massa perde il Sole ogni secondo?

Il Sole ha una massa di circa 2×10^{30} (cioè 2 seguito da 30 zeri!) kg, che corrisponde a oltre 300 mila volte la massa della Terra. La massa del Sole corrisponde a quasi il 99.9% di quella di tutto il Sistema Solare!

Questa enorme massa ogni secondo è erosa a causa sia di **fenomeni di routine**, che si verificano continuamente sul Sole (come la produzione di energia o l'accelerazione del vento solare), sia da **fenomeni impulsivi**, che si verificano quando si raggiungono le condizioni fisiche per innescarli (come ad esempio le CME e i flares).

La perdita di massa di "routine"

Il **vento solare** è un flusso principalmente di protoni, elettroni e piccole percentuali di particelle alfa (nuclei di elio). Queste particelle vengono accelerate nella corona solare ad energie talmente elevate da sfuggire all'attrazione gravitazionale del Sole ed essere spinte nello spazio a velocità che possono arrivare a 750-800 km/s.

Le particelle del vento solare hanno massa. Questo vuol dire che **nella loro fuga portano con sé un po' di massa del Sole**. Sappiamo inoltre che i protoni sono molto più massicci degli elettroni, ed hanno una massa 1836 volte maggiore di questi ultimi. Quindi la stragrande maggioranza della massa portata via dal vento solare è nei protoni. Con queste informazioni avremo una buona stima della massa persa ogni secondo dal Sole per via del vento solare calcolando la sola massa di protoni persa.

Considerando la massa di un singolo protone moltiplicata per il flusso misurato da missioni satellitari (come ACE della NASA, lanciata nel 1997) e considerando le particelle soffiate in tutte le direzioni attorno al Sole, risulta che il Sole perde **poco più di un miliardo di Kg al secondo!** Una dieta dimagrante piuttosto drastica!

Oltre alla perdita di massa dovuta all'espulsione di particelle del vento solare, sappiamo che il Sole emette luce, traendo l'energia dalle reazioni di fusioni termonucleari che avvengono nel suo interno.

Ma l'energia è legata alla massa, come ci ricorda la celeberrima equazione di Einstein, $E=mc^2$, dove E è la quantità di energia associata alla massa m e c è la velocità della luce, che è pari a circa 300,000 km al secondo.

In altre parole, la **quantità di energia che il Sole emette** ogni secondo, cioè la sua *luminosità*, **ha un corrispettivo in massa**. Quindi anche l'emissione di luce comporta una perdita di massa da parte del sole.

Partiamo ancora una volta dalle evidenze osservative. L'energia totale irradiata dal Sole ogni secondo in tutte le direzioni (la *luminosità* appunto) è di circa 3.8×10^{26} (cioè 38 seguito da 25 zeri) Watt. **Quanto è la massa associata a questa energia?** Applicando l'equazione di Einstein descritta sopra, si ottiene che **l'emissione di energia da parte del sole sotto forma di radiazione costa in termini di massa circa 4.22 miliardi di chilogrammi al secondo!**

E ancora non è tutto!

Dobbiamo anche considerare che nella produzione di energia che avviene nel nucleo della nostra stella tramite la trasformazione di idrogeno ed elio, la radiazione non è il solo prodotto. Vengono infatti prodotte anche altre particelle. In particolare, i *neutrini*, che sono talmente agili e veloci (la loro velocità è prossima a quella della luce) che tendono a fuggire via senza incontrare/scontrare nulla, riuscendo a fuoriuscire indisturbati dal Sole e portando con sé la loro seppur piccolissima massa (meno di un milionesimo della massa degli elettroni). Considerando anche il contributo dei neutrini la produzione di energia coinvolge circa **4.38 miliardi di chilogrammi al secondo!**

Da quanto detto emergono due fatti:

1. **il Sole perde più massa per via della produzione di energia che per via del vento solare** (circa 2-3 volte di più);
2. sommando entrambi gli effetti il Sole nelle sue operazioni di routine perde circa **5.53 miliardi di Kg al secondo!**

Ovviamente **questo valore non considera le variazioni dovute, ad esempio, all'attività solare**, né il fatto che il vento solare non è composto da soli protoni. Tiene comunque conto di quasi il 90% della massa effettiva totale persa dal Sole.

Tutta questa massa sembra spaventosamente grande!

Ma quant'è effettivamente?

E cosa dobbiamo aspettarci riguardo al suo impatto sulla vita del Sole?

Niente panico: anche se 5.53 miliardi di kg al secondo corrispondono a 1.74×10^{17} Kg all'anno, questo numero rappresenta soltanto **0.0000000000087% della sua massa totale.**

Quindi ci vorrebbero circa 10 mila miliardi di anni prima che il Sole esaurisca la sua massa, ammesso che il ritmo di perdita di massa rimanga costante. Ma sappiamo che il Sole smetterà di bruciare idrogeno al suo interno tra circa 4.5 miliardi di anni, innescando una serie di processi che modificheranno drasticamente il suo aspetto e le sue proprietà fisiche.

Non c'è quindi nessuna conseguenza a breve termine per via della perdita di massa del Sole?

In realtà una conseguenza interessante c'è ed è l'influenza che la massa del Sole ha sull'orbita terrestre. Secondo i principi della Fisica fondamentale, **se il Sole perde massa l'orbita della Terra si espande in modo proporzionale.** In altre parole, se il Sole in un anno perde lo 0.0000000000087% della sua massa, l'orbita terrestre si sposta verso l'esterno della stessa quantità.

Visto che la distanza media Sole-Terra è di circa 150 milioni di km, in un anno tale distanza aumenta di circa 1.3 cm. **Nell'ipotesi che il ritmo di perdita di massa solare rimanga costante ci vorranno quasi 77 mila anni prima che l'orbita terrestre si sposti di 1 km.** Ce ne vorranno 980 milioni prima che l'orbita si sposti di una lunghezza pari al diametro terrestre!

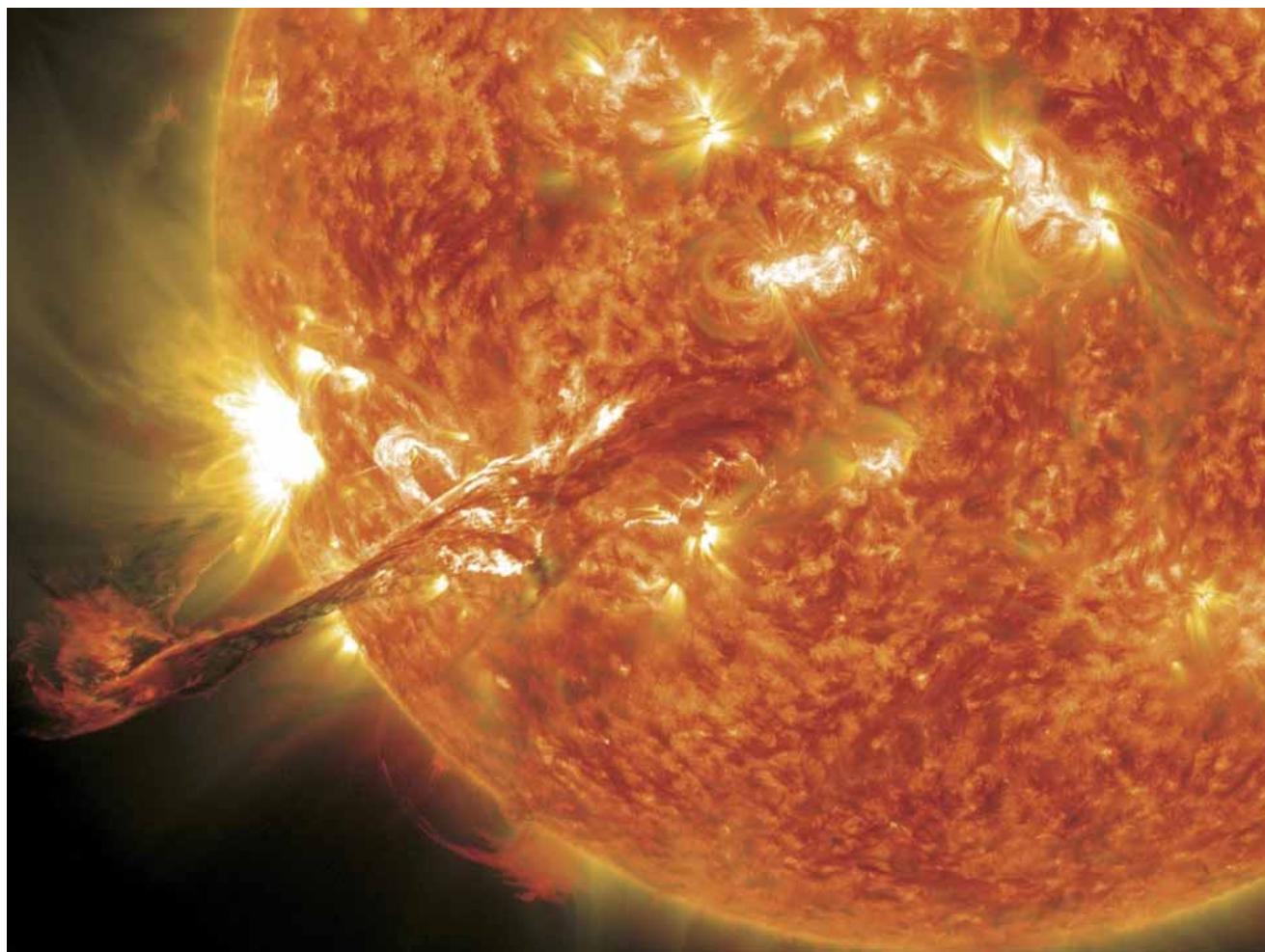


Figura 1 Eruzione solare. (Crediti: NASA-SDO).

Figure 1 Solar eruption. (Credits: NASA-SDO).

Quindi per adesso possiamo dormire sonni tranquilli: la nostra stella continuerà ad illuminare le nostre giornate per ancora molto molto tempo!

È nata una stella (storia e destino del Sole)

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

La nostra stella è nata circa 4.5 miliardi di anni fa. Scopriremo che l'intera vita di una stella, da quando essa si è completamente formata in poi, è una continua ricerca dell'energia necessaria per sopperire a quella irradiata nello spazio. E il modo più efficiente per ottenere tale energia è la continua trasformazione della materia che compone la stella.

Qual è la storia e il destino del Sole? Quali eventi scandiscono la sua storia?

La storia del Sole inizia con una nube densa di materia (costituita principalmente da idrogeno) fluttuante nello spazio, che iniziò a collassare sotto l'azione della propria gravità. **Cosa abbia innescato questo meccanismo non è ancora esattamente noto.** Forse fu causata da una perturbazione di densità, un raffreddamento del gas che ne favorì l'addensamento, o la compressione provocata da un'onda d'urto prodotta dalla deflagrazione di una stella nei paraggi. Di certo si verificò un'aggregazione di gas tale che la sua gravità superò l'energia delle particelle che la componevano e che tendevano a disperderla.

In balia della forza di gravità, la nube iniziò a contrarsi. Nella contrazione l'energia liberata riscaldò la nube sempre più, finché la temperatura centrale non divenne abbastanza alta da iniziare a ionizzare (strappare gli elettroni più esterni dagli atomi) il gas. E il gas, che prima lasciava passare la radiazione come una bolla trasparente, divenne sempre più opaco, iniziando ad intrappolare la radiazione proveniente dalla nube stessa. Questa energia imprigionata aumentò ulteriormente la temperatura centrale e la densità della nube.

Si formò così una **stella "primordiale"**, che probabilmente assomigliava ad una gigantesca massa piena di materia in ebollizione, proprio come una pentola d'acqua sul fuoco. La temperatura centrale continuò ad aumentare, l'opacità iniziò a diminuire, così che il nucleo della protostella tornò ad essere trasparente alla radiazione.

Al crescere delle dimensioni del nucleo la temperatura "superficiale" della protostella aumentò. Nel frattempo, le reazioni nucleari, che fondono nuclei di gas e producono energia, divennero sempre più efficienti, a tal punto da coprire il fabbisogno energetico della protostella che non ebbe più necessità di contrarsi per produrne. Il sistema raggiunse in tal modo una situazione di pseudo-equilibrio, in cui la contrazione si arrestò per via dell'energia liberata dalle prime reazioni nucleari al centro del Sole.

Quanto tempo è passato dal momento in cui la materia primordiale ha iniziato il collasso fino al momento in cui il Sole si è "acceso" mandando a regime la combustione dell'idrogeno?

Già dopo alcune decine di migliaia di anni si accesero le primissime (non molto efficienti) reazioni nucleari che hanno iniziato a dare il loro contributo in energia per sorreggere la nostra stella. Ci sono però voluti circa 30 milioni di anni prima che tali reazioni fossero veramente efficienti e tali da poter sostenere completamente il Sole.

Dal momento in cui la composizione chimica dell'interno del Sole raggiunse un equilibrio per garantire l'efficienza delle reazioni nucleari, la nostra stella si trovò improvvisamente con un surplus di energia che ha dovuto smaltire raffreddandosi leggermente per diminuire il ritmo di produzione dell'energia stessa. Questo periodo intermedio è durato circa 50 milioni di anni. Soltanto successivamente la combustione dell'idrogeno è entrata a regime, facendo entrare il Sole nella cosiddetta **Sequenza Principale**¹. Insomma, quando la produzione di energia è andata pienamente a regime, il Sole aveva iniziato a formarsi già da circa 80 milioni di anni!

La vita di una stella è dunque definita dalla costante ricerca di un equilibrio tra l'energia persa, principalmente irradiata nello spazio, e quella prodotta dalle reazioni di **fusione nucleare**. L'equilibrio tutt'ora vigente, persiste nel Sole da circa 4.5 miliardi di anni e continuerà per un periodo altrettanto lungo, fino all'esaurimento dell'idrogeno nel nucleo. E quando l'idrogeno nel nucleo finirà il Sole, come tutte le stelle, inizierà una nuova fase della sua vita. **Si ritiene che il Sole continuerà a bruciare idrogeno nel nucleo ancora per diversi miliardi di anni.**

E poi? Cosa accadrà?

Durante la fase di Sequenza Principale l'idrogeno presente nel nucleo viene convertito gradualmente in elio. Ciò continuerà ad avvenire per i prossimi 4.5-5 miliardi di anni. Dopodiché l'idrogeno nel nucleo si esaurirà e, con ciò, terminerà la parte più "stabile" della vita della stella. Inizierà una fase di trasformazioni. Per prima cosa, l'aumento di temperatura all'interno del Sole renderà ancora più efficienti le reazioni di fusione dell'idrogeno laddove questo è ancora abbondante, ossia in un guscio (in inglese *shell*) molto sottile attorno al nucleo di elio. Infatti, una così grande efficienza delle reazioni nucleari renderà sufficiente un volume "ridotto" di combustibile per sopperire alle perdite radiative del Sole. Di conseguenza, entrando a regime queste reazioni in shell, non ci sarà più bisogno di mantenere la temperatura così alta, che quindi diminuirà. In tutto ciò la luminosità della stella rimarrà, per il momento, costante.

L'unico modo per far sì che il Sole continui ad avere la stessa luminosità pur raffreddandosi è che si espanda notevolmente. Sarà la fase di **Gigante Rossa**, in cui il Sole si espanderà fino ad inglobare i pianeti interni del sistema solare, probabilmente compresa la Terra! Ovviamente, nel frattempo, anche l'idrogeno che brucia in shell si trasformerà in elio e diventerà parte del nucleo. Questo vuol dire che il nucleo diverrà sempre più grande e ricco di elio (quindi più massiccio) mentre il guscio interno, in cui è bruciato idrogeno, si espanderà sempre più verso l'esterno. Si arriverà ad un punto in cui il nucleo sarà talmente massiccio da far collassare la stella su se stessa.

Cosa accadrà dopo?

Secondo alcuni modelli di evoluzione stellare la fase di Gigante Rossa durerà per circa un miliardo di anni prima che l'aumento di concentrazione di elio darà inizio a quei processi che ne favoriranno la fusione. E a questo punto il Sole sarà migliaia di volte più luminoso dell'attuale. Successivamente anche l'elio, proprio come l'idrogeno, brucerà producendo elementi più pesanti come carbonio e ossigeno mediante reazioni termonucleari che però sono meno efficienti di quella che trasforma l'idrogeno in elio.

Con la produzione di elementi più pesanti (quali carbonio e ossigeno) il Sole si contrarrà nuovamente sotto la propria gravità. Questa volta però la contrazione non genererà abbastanza energia da innescare nuove reazioni nucleari. La fornace stellare sarà interrotta, e il Sole espellerà la sua parte più esterna stabilizzandosi in una configurazione fisica nota come **Nana Bianca**.

¹La Sequenza Principale (SP) è una linea immaginaria nel diagramma evolutivo di Hertzsprung-Russel Temperatura VS Luminosità che le stelle tipicamente percorrono da destra verso sinistra finché bruciano il loro combustibile nel loro nucleo. La posizione di ingresso nella SP di una stella che inizia a bruciare idrogeno dipende fondamentalmente dalla sua massa: piccole masse si trovano in basso a destra nella SP, grandi masse nella parte in alto a sinistra.

L'espulsione nello spazio circostante dell'involucro esterno (costituito principalmente dall'idrogeno e dall'elio che non sono finiti a loro volta nella fucina solare), genererà una spettacolare Nebulosa Planetaria, come quella in Figura 1.



Figura 1 Immagine del telescopio Hubble di una delle nebulose planetarie più famose e spettacolari: la NGC 6720, Ring Nebula [1].

Figure 1 Hubble Telescope image of one of the most famous and spectacular planetary nebulae: NGC 6720, Ring Nebula [1].

Nella sua configurazione di **Nana Bianca** il Sole avrà una massa circa la metà dell'attuale, tutta concentrata in un corpo celeste di carbonio e ossigeno di dimensioni simili a quelle della Terra. La contrazione da Gigante Rossa a Nana Bianca riscalderà la nostra stella facendola passare da circa 3000 a circa 20,000 gradi. Per cui, contrariamente all'immaginario comune, il Sole sarà ben più caldo di quello attuale, nonostante apparirà come un minuscolo puntino bianco. E quel puntino bianco continuerà a brillare ancora per molto, molto tempo prima di spegnersi. Nell'arco di circa 14 miliardi di anni, pressappoco l'età attuale dell'Universo, il nostro Sole si raffredderà di appena qualche decina di gradi! Soltanto dopo centinaia di migliaia di miliardi di anni e oltre il Sole sarà tanto freddo (pochi gradi sopra lo zero assoluto) da diventare, di fatto, invisibile, in uno stato di cosiddetta **Nana Nera**. Avremo quindi un corpo freddo, alla deriva nell'Universo.

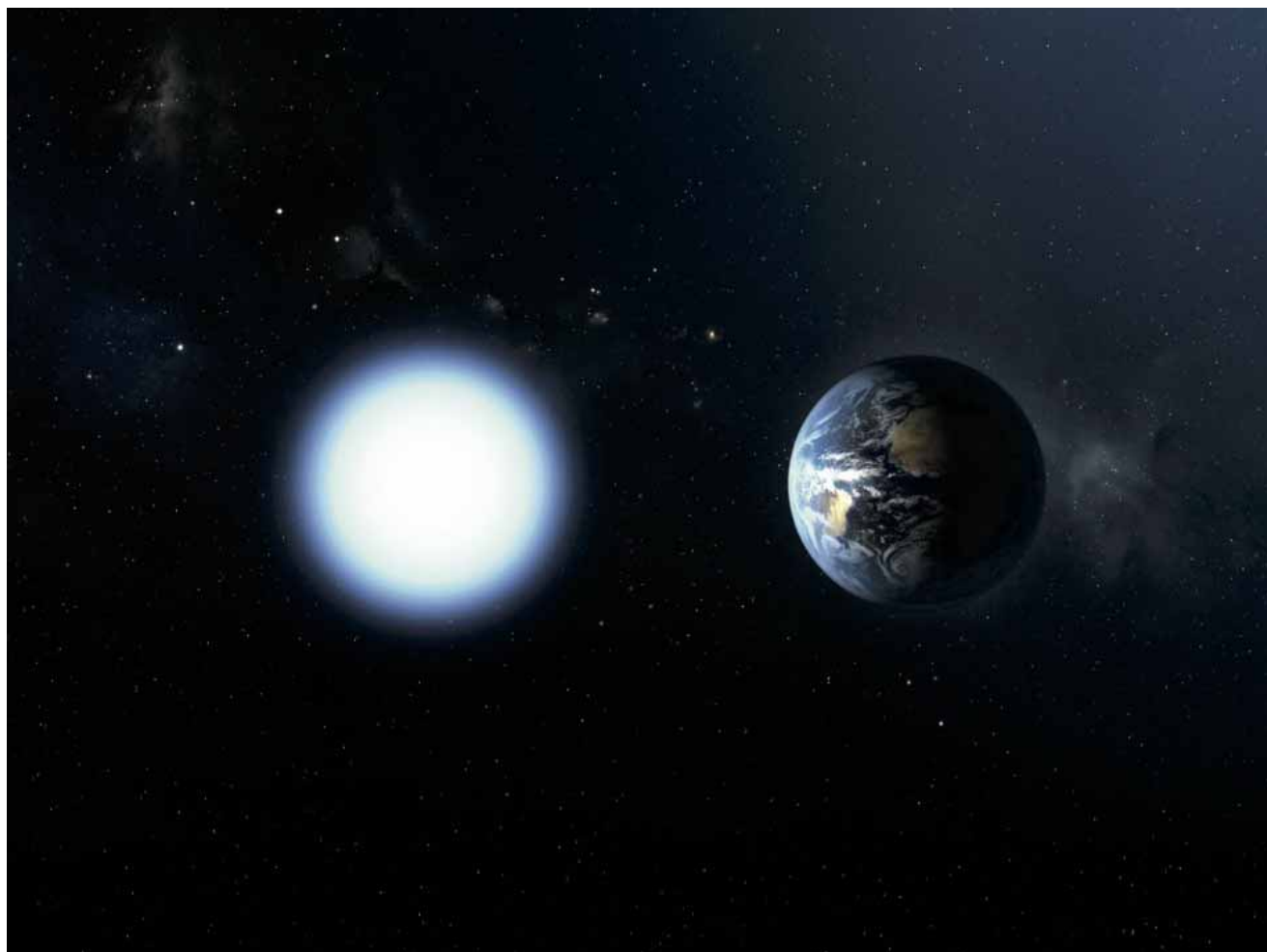


Figura 2 Confronto tra le dimensioni della Terra (a destra) e della nana bianca Sirius B (a sinistra), la nana bianca più vicina alla Terra [2].

Figure 2 Comparison of the size of Earth (right) and the white dwarf Sirius B (left), the closest white dwarf to Earth [2].

E nonostante tutto, neppure a quel punto potremmo dire che il Sole è giunto al termine della sua lunga vita! Ci sono diversi scenari, diverse possibilità di ulteriore evoluzione, diversi incontri che possono continuare ad arricchire la storia infinita della nostra stella, e a spostare ancora più lontano il momento della sua vera e propria fine.

E dopo tutto, dopo una storia così, anche se saremo già estinti, cancellati un'enormità di tempo prima, non possiamo non augurarci che sia una meravigliosa fine.

Sitografia

[1] https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2003/05/

[2] https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2005/12/Sirius_B_compared_to_Earth

Una stella viva: il campo magnetico del Sole

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Uno degli aspetti fisicamente più interessanti del Sole è il suo campo magnetico. Gran parte dei fenomeni più rilevanti e spettacolari che avvengono sulla nostra stella hanno infatti come ingrediente principale proprio questa sua peculiarità. Ma come si manifesta il campo magnetico solare? A quali fenomeni può dare origine e come influenza le proprietà dinamiche del Sole rendendolo così una stella “viva”?

La seconda metà dell'800 e la prima del '900 furono teatro di una vera e propria rivoluzione nella storia della Fisica, tante furono le scoperte di immenso spessore conseguite in quel periodo. E questo enorme progresso di conoscenze ovviamente non risparmiò nemmeno l'Astronomia. Questa aveva iniziato a svilupparsi notevolmente sia grazie al grande miglioramento degli strumenti per le osservazioni, sia perché aveva fatto propri i metodi e gli approcci scientifici della Fisica, trasformandosi in Astrofisica.

In questo contesto, nei primi anni del '900, dopo decenni di scoperte sensazionali e rivoluzionarie sulle proprietà spettrali della luce proveniente dalla nostra stella, **George Hale** scoprì che **il Sole ha un campo magnetico**, grazie alle osservazioni sulle macchie solari che risultarono essere sede di intensi campi magnetici.

La portata di questa scoperta fu enorme. Da qui si iniziò a comprendere **lo stretto legame esistente tra campo magnetico e attività solare**. Il campo magnetico solare infatti è all'origine di molti fenomeni che avvengono sul Sole e che vengono indicati genericamente come *attività solare*.

Ciò che sulla scia di Hale è stato scoperto sul magnetismo solare, è che il Sole è caratterizzato dalla presenza di campi magnetici **a tutte le scale spaziali**. Dalla *scala globale* (il Sole nella sua interezza) alla scala più piccola osservabile con gli attuali telescopi (come si dice, al *limite di risoluzione*) il Sole è permeato da un campo magnetico.

Come si manifesta il campo magnetico del Sole?

Sotto quale veste ci appare il campo magnetico solare? All'osservazione, la manifestazione più evidente (e forse più nota) della presenza di campi magnetici è costituita dalle **macchie solari**, che hanno un tempo di vita caratteristico di alcune settimane. Si tratta di regioni che si differenziano dalle zone circostanti a causa della temperatura minore e dalla forte intensità magnetica.

Macchie solari

In una macchia solare il campo magnetico che emerge in fotosfera è abbastanza intenso da inibire il trasporto di energia per convezione dagli strati più interni a quelli più superficiali della stella. Per via di questo approvvigionamento di energia meno efficiente la parte più interna delle macchie, l'ombra, è caratterizzata da temperature più basse (circa 4000 K) rispetto alle regioni circostanti alla macchia (la fotosfera, che ha una temperatura tra i 5600 e i 5800 K). Questo contrasto di temperatura corrisponde ad un contrasto di intensità della luce che proviene da

questa regione di ombra, motivo per cui essa appare più scura rispetto al resto. Tipicamente l'ombra è circondata da una zona all'apparenza filamentare in cui la temperatura (e quindi l'intensità luminosa) è un poco più alta ed intermedia tra l'ombra e la fotosfera, motivo per cui si parla di penombra. Anch'essa è chiaramente associata alla presenza di campi magnetici, ma a differenza dell'ombra dove il campo emerge pressoché verticalmente, nella zona di penombra si ritiene che il campo magnetico abbia una pronunciata componente orizzontale, quasi aprendosi ed appoggiandosi sulla fotosfera.

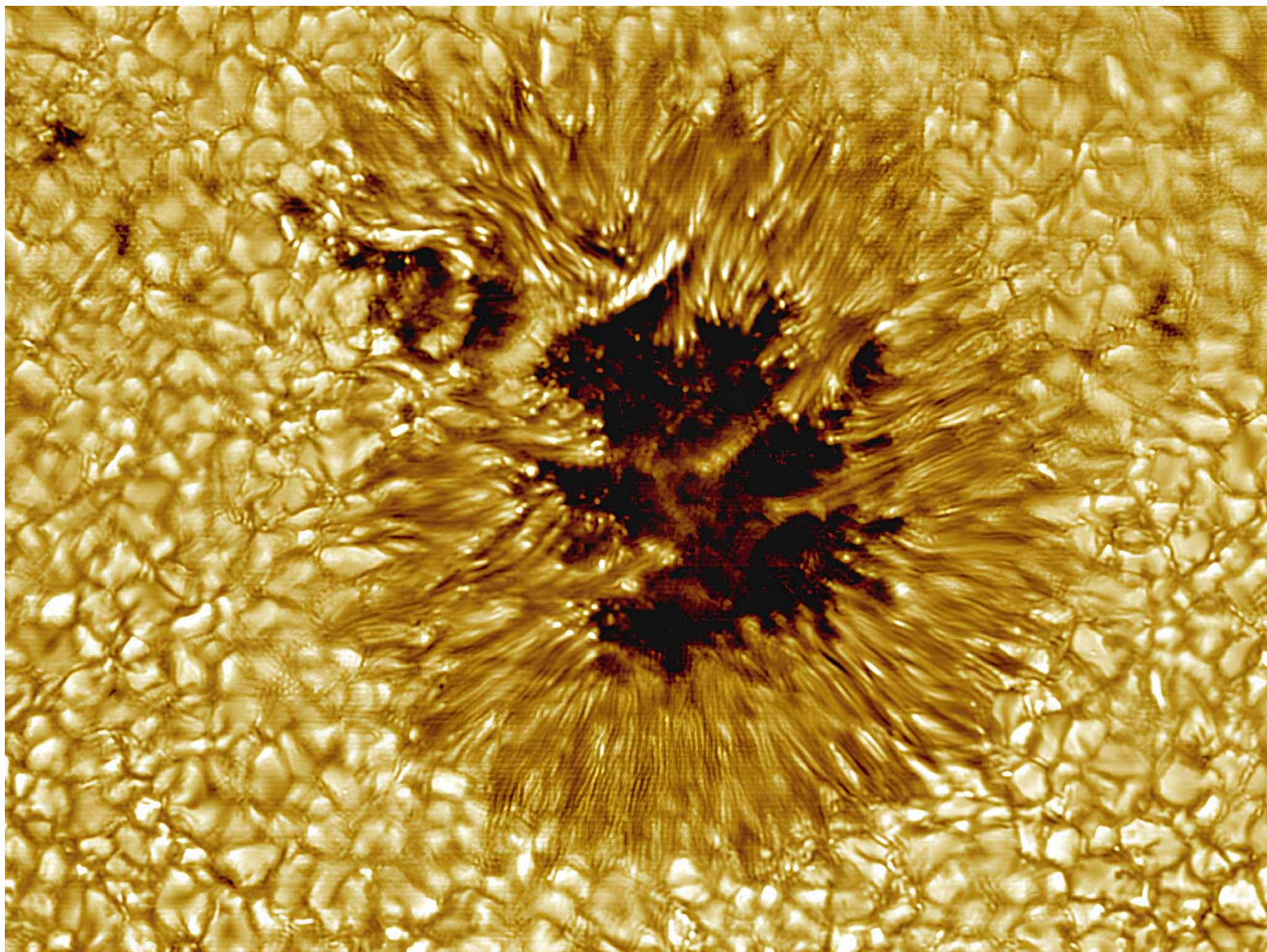


Figura 1 Immagine di macchia solare acquisita il 6 novembre 2005 dal telescopio VTT presso l'osservatorio NSO in Colorado, USA. (Crediti: NSO).

Figure 1 Sunspot image acquired on 6 November 2005 by the VTT telescope at the NSO Observatory in Colorado, USA. (Credits: NSO).

Altre strutture complesse possono essere osservate nelle macchie solari. Ad esempio, i **light bridges** ("ponti di luce"), ovvero strutture associate a intrusioni di plasma caldo tra le linee di campo magnetico. Si ritiene siano uno dei segnali del decadimento della macchia.

Gli **umbral dots** (letteralmente "punti nell'ombra") appaiono invece come puntini brillanti nell'ombra. La loro natura è ancora molto dibattuta. Potrebbero corrispondere a intrusioni di plasma dovute ad instabilità, oppure rappresentare quelle regioni in cui il plasma caldo (e quindi brillante) tenta di emergere nell'ombra prima di raffreddarsi e ricadere verso il basso.

Oltre alle macchie solari, altre strutture facilmente identificabili in fotosfera sono i **pore** (letteralmente “pori”). Si tratta di strutture che appaiono come piccole macchie prive di penombra, e che similmente all'ombra delle macchie, sono associate all'emersione in fotosfera di campi magnetici verticali. Rispetto alle macchie, che sono molto più longeve, il loro ciclo di vita si esaurisce tipicamente in ore o al massimo pochi giorni.

Macchie e pori (soprattutto le prime) tendono ad **organizzarsi in gruppi** (spesso in coppia) con polarità magnetica opposta. Il numero e la posizione delle macchie sono una spia del livello di attività del Sole e dello stato del ciclo solare. In particolare, più l'attività solare è elevata, maggiore è il numero di macchie e gruppi di macchie presenti in fotosfera.

Le leggi di Hale e il modello di Babcock

E questo ci riporta nuovamente ad Hale ed ai suoi studi. Via via che gli scienziati misuravano i campi magnetici sul Sole e a determinare la loro polarità (positiva o negativa) era sempre più chiaro che:

Prima legge di Hale. Nei sistemi bipolari di macchie, la macchia che precede (nel senso della rotazione solare) nell'emisfero Nord ha polarità opposta rispetto alla macchia che precede nell'emisfero Sud. Inoltre le macchie che precedono hanno segno opposto rispetto a quelle che seguono in entrambi gli emisferi.

Seconda legge di Hale. La polarità di macchie che precedono o seguono si alterna, in entrambi gli emisferi, nei cicli successivi. Per questo quando si tiene conto anche della polarità magnetica delle macchie si dice che il ciclo solare è di 22 anni. Dopo tale tempo, le macchie che precedono (o che seguono) in un emisfero hanno la stessa polarità.

Le leggi di Hale possono essere spiegate, come fece l'astronomo americano **Horace W. Babcock** nella metà del secolo scorso, tenendo presente che **il Sole non ruota uniformemente come un corpo rigido intorno al proprio asse di rotazione**. Piuttosto mostra una cosiddetta *rotazione differenziale* in virtù della quale, **la velocità di rotazione all'equatore solare è maggiore di quella in prossimità dei poli**. Questo fa sì che il campo magnetico trascinato dal plasma solare si avvolga intorno al Sole più velocemente all'equatore che ai poli. In questa matassa di campo magnetico, tanto più complessa quanto più procede la rotazione, si creano strutture di campo stirate in cui il campo aumenta in intensità fino a diventare talmente intenso da espellere il plasma intorno a sé. Il campo magnetico “svuotato” di plasma inizia a galleggiare verso la fotosfera, come un pallone tenuto sott'acqua e poi lasciato andare. Sono proprio questi campi magnetici galleggianti che affiorano in fotosfera e danno origine a pori, macchie, gruppi di macchie e, in generale, a *regioni attive*.

Non solo macchie. Altri indizi sull'attività solare

L'attività solare non si manifesta soltanto attraverso la presenza di macchie in fotosfera. Ci sono infatti numerosi altri fenomeni variabili modulati dall'attività e che, anche in questo caso, vedono coinvolto il campo magnetico solare.

All'aumentare dell'attività, ad esempio, aumenta la frazione di disco solare coperto da campi magnetici a piccola scala (di piccola estensione), che possono essere modellati come tubi di flusso magnetico sottili. All'osservazione appaiono come punti più brillanti del contesto in cui sono immersi, cosa che si ritiene essere dovuta alla loro sottigliezza e al fatto di avere una bassa densità di plasma al loro interno, come fossero trasparenti, motivo per cui lasciano trasparire il plasma caldo che invece li circonda.

Insieme alle macchie queste strutture giocano un ruolo fondamentale nel modificare l'**irradianza solare**, ossia la potenza per metro quadro ricevuta dal Sole sulla sommità dell'atmosfera terrestre. Questa grandezza, indicata storicamente come *costante solare* è di circa 1361 W/m^2 . In effetti costante non lo è affatto, in quanto mostra variazioni sia su diverse scale temporali (dai giorni al ciclo solare) sia nelle diverse bande spettrali. In particolare, l'irradianza solare varia tipicamente di circa lo 0.1% con il ciclo solare, raggiungendo il massimo in fase con lo stesso.

Gli effetti delle variazioni di campo magnetico solare sulla corona

Anche la **corona solare**, la parte più esterna dell'atmosfera solare, subisce grandi variazioni legate alle variazioni di campo magnetico. La sua stessa forma cambia, passando da una forma quasi regolare (dilatata soltanto in prossimità dell'equatore) e poco estesa durante i minimi di attività, ad una forma molto più irregolare ed estesa nei periodi di massimo.

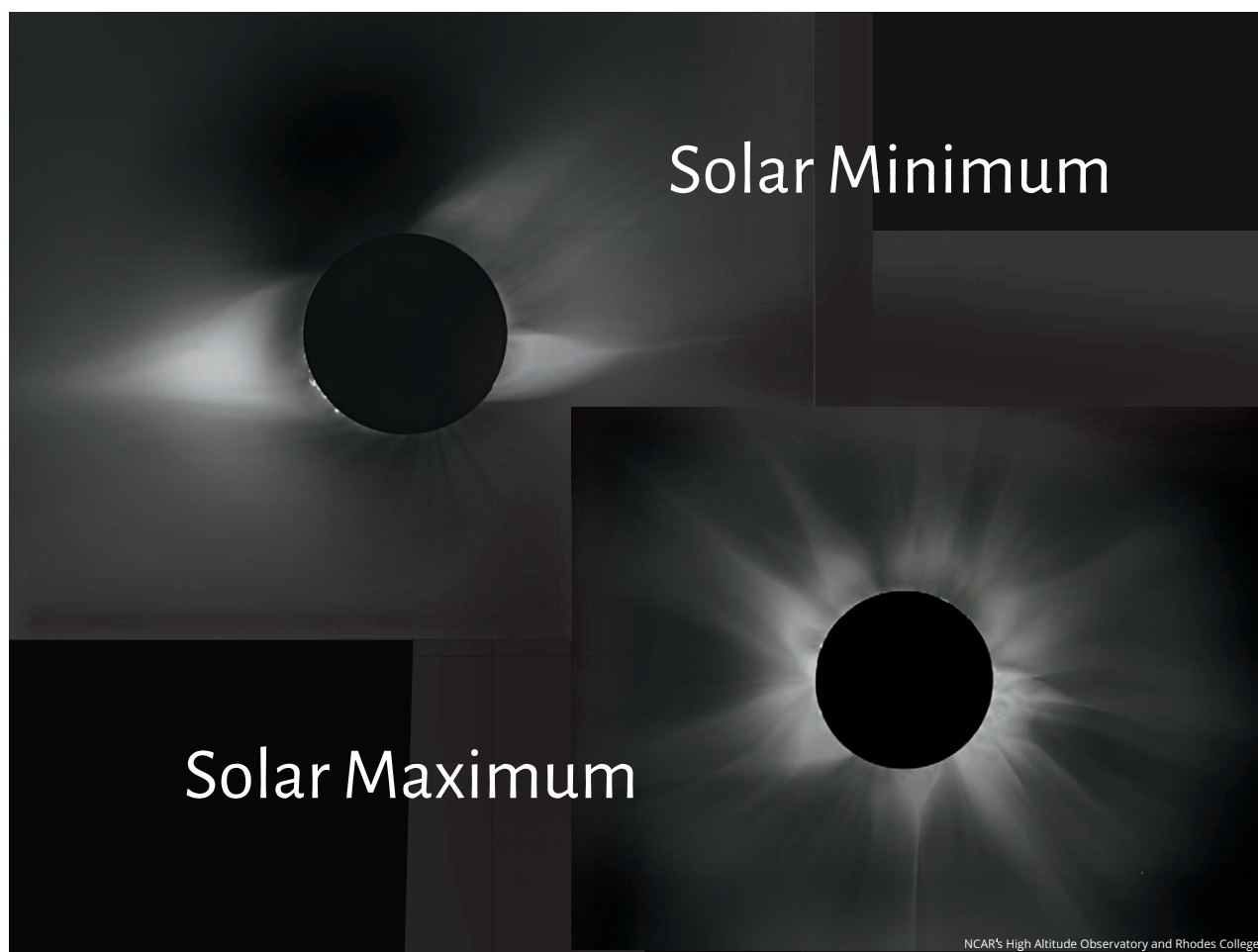


Figura 2 Immagini della corona solare al minimo di attività (in alto) e al massimo (in basso). (Crediti: NCAR's High Altitude Observatory and Rhodes College).

Figure 2 Images of the solar corona at minimum activity (top) and maximum (bottom). (Credits: NCAR's High Altitude Observatory and Rhodes College).

Le osservazioni e i modelli teorici suggeriscono che quando la struttura del campo magnetico di una regione attiva diventa estremamente complessa, si può generare una instabilità che può dar luogo a fenomeni che rilasciano grandi quantità di energia. Ne sono esempio i **flares**

("brillamenti"), la comparsa di prominenze eruttive e l'eventuale espulsione di massa coronale (Coronal Mass Ejection, CME) dall'atmosfera solare nello spazio circostante.

I **flares** sono violente esplosioni che consistono in improvvisi rilasci di energia (da cento a centomila volte il consumo mondiale di energia) sotto forma di radiazione. Hanno tempi caratteristici di evoluzione che vanno dalle decine di minuti alle ore, ma la loro fase impulsiva dura un tempo dell'ordine del minuto. Sono tipicamente suddivisi, in ordine di flusso di energia espulsa crescente, nelle classi A, B, C, M, X, a cui eventualmente segue un numero. Il legame tra questi fenomeni e le regioni attive è molto forte, ed infatti essi sono più frequenti in prossimità di un massimo solare che in prossimità di un minimo.

Il flare più intenso mai osservato nell'era spaziale è l'evento di Halloween 2003. Inizialmente classificato come X28, negli anni successivi alcune evidenze osservative dei suoi effetti anche sulla ionosfera terrestre hanno suggerito che in realtà si trattasse di un flare di classe X45. La stima di un evento così intenso risulta infatti essere piuttosto difficile, a causa del rischio di saturazione degli strumenti di osservazione.

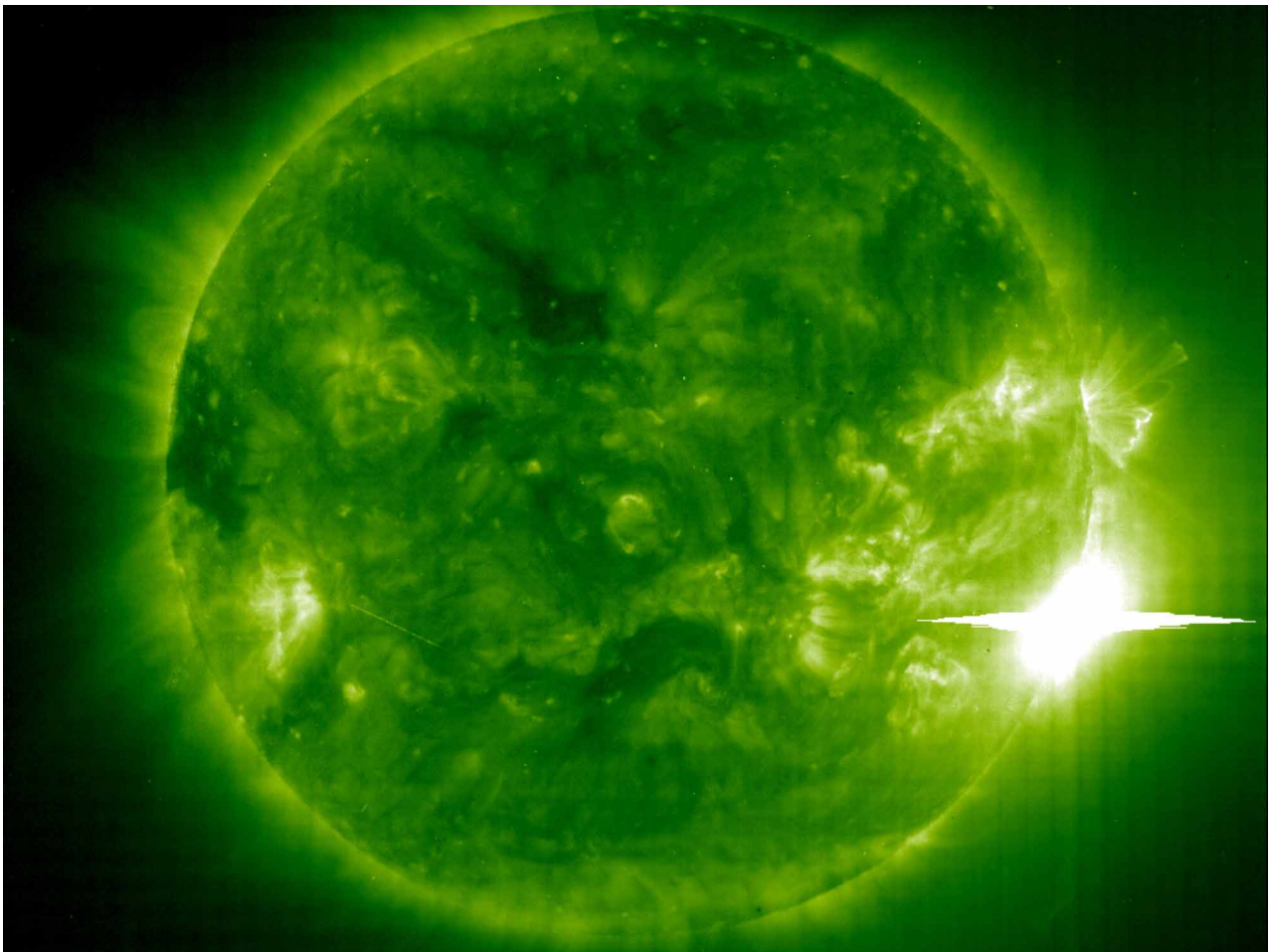


Figura 3 Immagine acquisita dalla missione SOHO del flare di classe X45 osservato il 4 novembre 2003. Ad oggi il flare risulta essere il più intenso mai osservato nell'era spaziale. (Crediti: NASA/ESA/heliviewer.org).

Figure 3 Image acquired by the SOHO mission of the X45-class flare observed on 4 November 2003. To date, the flare is the most intense ever observed in the space age. (Credits: NASA/heliviewer.org).

Spesso, ma non sempre, ai flares sono associate le CME. In questo caso si può affermare che flares e CMEs sono due controparti dello stesso fenomeno che scaturisce nell'atmosfera solare. Il plasma magnetizzato espulso dalle **CME** può raggiungere velocità tra i 300 e i 2000-3000

km/s. Vale a dire fino a circa un centesimo della velocità della luce! Un singolo evento mediamente è in grado di espellere decine di miliardi di tonnellate di plasma solare nello spazio circostante. Nei periodi di attività si possono verificare anche diverse CME al giorno. Fortunatamente non tutte sono di portata potenzialmente dannosa, e soprattutto non tutte sono dirette verso la Terra.

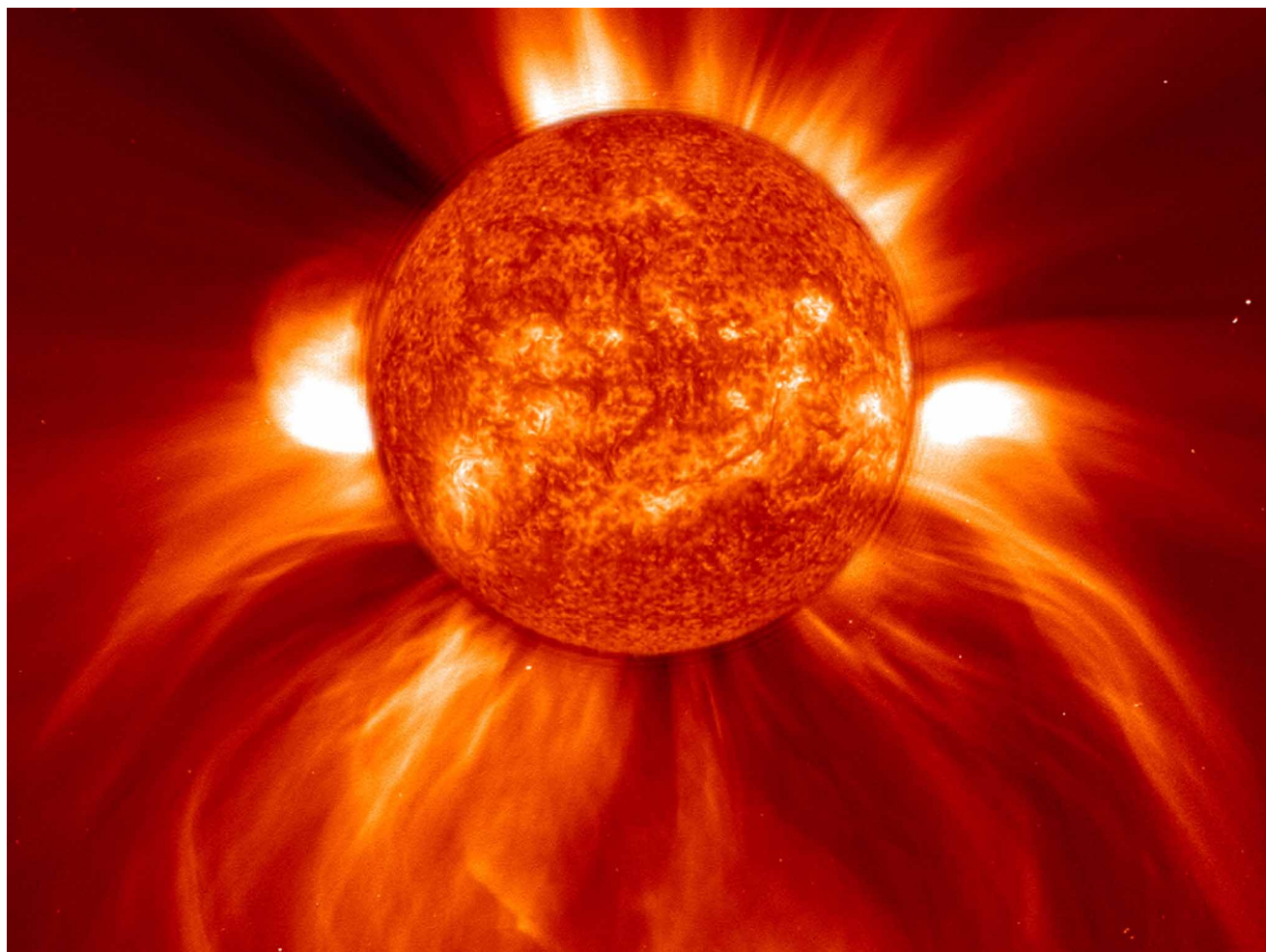


Figura 4 Immagine di una CME (in basso) acquisita l'8 gennaio 2002 dal coronografo LASCO C2 a bordo della missione SOHO. (Crediti: NASA/ESA).

Figure 4 Image of a CME (bottom) acquired on 8 January 2002 by the LASCO C2 coronagraph on board the SOHO mission. (Credits: NASA/ESA).

Il vento solare

I processi che avvengono nella corona solare convertono l'enorme energia magnetica accumulata, in calore ed energia di movimento delle particelle. In altre parole, parte dell'energia a disposizione viene spesa per riscaldare l'alta atmosfera solare, mentre parte viene spesa per accelerare il plasma solare. Proprio quest'ultimo processo dà origine al **vento solare**.

Il vento solare è un flusso continuo ma non costante di particelle quali soprattutto protoni ed elettroni e in misura più limitata di particelle alfa (nuclei di elio). Tale flusso, allontanandosi dal Sole, trascina con sé anche un po' del proprio campo magnetico.

La velocità tipica del vento solare nell'ambiente circumterrestre è solitamente tra i 400 e gli 800 km/s circa. Gli estremi di questo intervallo di velocità caratterizzano quello che viene chiamato il **vento lento** e il **vento veloce** rispettivamente. Il primo è originato a basse latitudini solari e quindi, poiché fluisce sul piano dell'eclittica, costituisce la componente principale di vento che investe la Terra. Tuttavia, quando sul disco solare si presenta, in direzione della Terra, un **buco coronale** (una regione in cui le linee del campo magnetico solare si aprono verso lo spazio consentendo al vento solare di fluire più velocemente), il nostro pianeta può essere raggiunta anche dal vento veloce. Esso, infatti, si origina proprio in quelle regioni della corona che appaiono poco luminose all'osservazione (da cui il termine "buchi" coronali).

All'aumentare dell'attività solare, il disco solare si riempie di regioni attive e buchi coronali, per cui in periodi di alta attività è più frequente misurare a Terra un flusso di vento veloce.

Il vento solare, le CME e i flares sono fenomeni che scaturiscono dalla presenza di campo magnetico sul Sole e che hanno effetto su tutto lo spazio interplanetario. Talvolta possono raggiungere il nostro pianeta e avere, potenzialmente, forti ripercussioni. Per fortuna la Terra ha a sua volta un campo magnetico che la protegge dai fenomeni più estremi, salvaguardando la nostra stessa esistenza sul pianeta.

Come osservare il Sole? Cos'è un telescopio solare

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Come si osserva il Sole? Quali sono le caratteristiche fondamentali dei telescopi solari e degli strumenti dediti all'osservazione della nostra stella?

Che cos'è un telescopio solare?

Sembra una domanda banale, ma non lo è. Volendo semplificare la risposta potremmo dire che un telescopio non è che un **collettore di fotoni**. Un collettore cioè di quei pacchetti di energia che caratterizzano la radiazione elettromagnetica e che viaggiano alla velocità della luce. Per collezionare i fotoni, storicamente si sono realizzate due soluzioni che hanno portato allo sviluppo di telescopi *rifrattori* e *riflettori*. Si tratta di strumenti che sfruttano rispettivamente i principi fisici della rifrazione e della riflessione della luce proveniente da una sorgente. Senza entrare nei particolari, ci basti sapere che la maggioranza dei moderni telescopi sono riflettori. Si tratta di veri e propri specchi che convogliano la luce sugli strumenti che la analizzano e che permettono agli scienziati di ricavare una grande quantità di informazioni.

Essendo un "cacciatore di fotoni", più un telescopio è di grande apertura più grande sarà il numero di fotoni raccolti. Dunque, maggiore sarà il numero di informazioni dell'oggetto osservato che ci aspettiamo di collezionare.

E proprio in questo concetto risiede la più grande differenza tra i telescopi solari e quelli utilizzati per l'osservazione di altre stelle.

Grazie alla vicinanza del Sole, infatti, siamo in grado di catturare un numero di fotoni solari enormemente maggiore rispetto a quello che potremmo raccogliere nello stesso intervallo di tempo se puntassimo il telescopio su un'altra stella. Questo perché il flusso di energia prodotto da una sorgente luminosa diminuisce all'aumentare della distanza dalla sorgente abbastanza rapidamente, più precisamente con l'inverso del quadrato della distanza. Per capire meglio: se osservassimo una stella identica al Sole posta alla distanza di 4.24 anni luce¹ (la distanza di *Proxima Centauri*, la stella più vicina al Sole) il numero di fotoni che arriverebbe nell'unità di tempo è circa 140 miliardi di volte minore rispetto al numero di fotoni che nello stesso tempo riceviamo dal Sole.

I grandi telescopi: la sfida da affrontare

Una tale abbondanza di fotoni potrebbe indurre a pensare che per osservare il Sole non siano necessari telescopi enormi come i grandi telescopi ottici usati per l'osservazione di altri oggetti astrofisici.

In realtà riuscire a costruire un grande telescopio solare avrebbe in sé grandi vantaggi. Purtroppo, non è una cosa semplice da portare a termine. Tra i vari motivi che ne ostacolano la realizzazione ne menzioniamo tre:

¹L'anno luce è una unità di misura utilizzata in astronomia. Corrisponde alla distanza che la luce nel vuoto percorre in un anno. Considerando che essa percorre 300,000 chilometri al secondo, in un anno copre una distanza pari a quasi 9461 miliardi di chilometri.

1. Il costo. Si stima che il costo di un telescopio aumenti con il suo diametro (D), seguendo la legge di potenza $D^{2.45}$. Il *Gran Telescopio Canarias* (uno specchio di 10.4 metri di diametro) e il *Large Binocular Telescope* (due specchi gemelli da 8 m di diametro ciascuno), ad esempio, sono costati rispettivamente oltre 90 e oltre 110 milioni di dollari, senza considerare i costi relativi alla gestione e al mantenimento sia delle strutture che della strumentazione.
2. La troppa energia che un telescopio di grande apertura riceverebbe dal Sole potrebbe provocare danni agli strumenti o quantomeno riscaldare la superficie dello specchio. In questo modo si creano fenomeni di *microturbolenza* in prossimità dello specchio, provocando il degradamento delle immagini catturate.
3. Costruire specchi di grande apertura implica aumentarne sostanzialmente il peso. Si rischia quindi di comprometterne la struttura, o comunque provocarne la deformazione con il conseguente degradamento delle immagini prodotte. Per ovviare a questo problema è necessaria la messa a punto di specifici e non banali meccanismi di compensazione della deformazione, oppure la costruzione di specchi *segmentati*, formati cioè da più specchi più piccoli uniti tra loro.

A fronte di questi svantaggi, quali sono i vantaggi di avere telescopi solari sempre più grandi?

La risposta alle domande che il progresso della conoscenza porta con sé richiede sempre maggiori sforzi tecnologici. Nel caso del Sole, come in altri rami dell'Astrofisica, questi sforzi vanno verso una direzione ben precisa: **ottenere contemporaneamente altissime risoluzioni spaziali, spettrali e temporali**. Ottenere altissime risoluzioni spaziali consente di poter distinguere sul Sole strutture a piccola scala, dell'ordine delle decine di chilometri. Disporre di spettri ben campionati significa essere in grado di ricavare da essi più e più precise informazioni sulle proprietà fisiche del Sole. Infine l'alta risoluzione temporale implica la possibilità di catturare processi molto rapidi sul Sole, che possono essere all'origine dell'immagazzinamento, trasporto e liberazione dell'energia responsabile dei fenomeni più interessanti.

Per ottenere tutto questo simultaneamente è necessario disporre di un numero di fotoni estremamente elevato. Vogliamo infatti catturare informazioni da piccole regioni del Sole in un certo intervallo di lunghezze d'onda il più rapidamente possibile. Per questo risulta necessario, anche nel caso del Sole, disporre di specchi di grande apertura.

Il limite invalicabile

In ogni caso dobbiamo considerare che seppure avessimo a disposizione un insieme di strumentazioni ottiche perfette, non otterremmo comunque risoluzioni spaziali arbitrariamente elevate. Esiste infatti **un limite fisico invalicabile** chiamato *limite di diffrazione*. La luce è un'onda elettromagnetica. Quando impatta contro un'apertura, ad esempio, circolare (in questo caso lo specchio del telescopio), si verifica il fenomeno della diffrazione. La luce che si propaga in seguito all'impatto non lo fa in modo semplicemente "rettilineo", ma tende a sparpagliarsi anche in altre direzioni intorno all'apertura stessa. Questo, nel caso di un telescopio, fa sì che anche la luce proveniente da un puntino luminoso sul Sole produca un'immagine sul piano focale che non è un puntino, ma un cerchio. La dimensione di tale cerchio è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda della luce incidente e inversamente proporzionale al diametro dell'apertura del telescopio. Ne consegue quindi, che **a fissata lunghezza d'onda osservata, un telescopio più grande può abbattere questo limite fisico di risoluzione**.

Infine, dobbiamo tener presente che il numero di fotoni che mediamente arrivano sullo specchio nell'unità di tempo non è sempre lo stesso. Ci sono fluttuazioni intrinseche ineliminabili nel conteggio dei fotoni che però sono in percentuale sempre minore al crescere del numero di fotoni catturato. Quindi aumentando l'apertura del telescopio si avranno fluttuazioni più piccole sui segnali ottenuti e quindi sulle grandezze fisiche che da essi sono ricavate.

Il più grande telescopio solare del mondo

Esiste attualmente un **compromesso che bilancia i vantaggi e gli svantaggi** ora menzionati nella costruzione di telescopi solari di grande apertura. Tale compromesso consiste nell'impiego di telescopi di diametro di **4 metri**. È questo il caso del **telescopio solare più grande del mondo** attualmente in operazione, il Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST), nelle isole Hawaii, che ha visto la luce nel gennaio 2020. Un tale specchio ha bisogno di essere montato su di una struttura imponente e perfettamente stabilizzata. Inoltre, la gestione necessita di soluzioni sofisticate atte, ad esempio, a eliminare il calore in eccesso sullo stesso.



Figura 1 Fotografia del Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST). (Crediti: NSO).

Figure 1 Picture of Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST). (Credits: NSO).



Figura 2 Fotografia dello specchio del telescopio più grande del mondo, il DKIST, Daniel K. Inouye Solar Telescope. (Crediti: NSO).

Figure 2 Picture of the mirror of the world's largest telescope, the Daniel K. Inouye Solar Telescope. (Credits: NSO).

Ma osservare il Sole in modo adeguato significa affrontare anche molti altri problemi, quali il degradamento delle immagini indotto dall'atmosfera solare. In quel caso sono necessarie adeguate soluzioni tecnologiche, che possono fare la differenza nell'aiutarci a comprendere meglio come funziona la nostra stella.

I terremoti solari

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Nel luglio 1996 si è avuta la prima evidenza osservativa dell'esistenza di terremoti sul Sole, i cosiddetti *sunquakes*. Sono simili a quelli che avvengono sulla Terra ma sono molto più potenti.

Sarebbe più giusto chiamarli “**solemoti**” in italiano (dall'inglese “*sunquakes*”), ma affinché si possa intuire immediatamente di cosa si tratta preferiamo chiamarli *terremoti solari*.

Come suggerisce il nome, i terremoti solari sono **eventi sismici che si verificano sul Sole**. Sono estremamente potenti, molto più potenti dei ben noti corrispettivi a Terra. Negli ultimi decenni il loro studio si è intensificato. Oggi è ritenuto importantissimo perché potrebbe aiutare gli scienziati a comprendere, ad esempio, la complessa relazione che intercorre tra *macchie* e *regioni attive solari* e l'occorrenza di brillamenti (*flares*). Nel corso degli anni si è infatti osservato che i terremoti solari sembrano essere concomitanti proprio con i brillamenti, anche se non sempre. Proprio come i loro parenti terrestri, gli eventi sismici solari **danno origine ad onde che si propagano attraverso le regioni interne della nostra stella**.

In un terremoto solare le onde di compressione, simili alle cosiddette onde “P” generate in un terremoto a Terra, si propagano inizialmente ad una velocità di oltre 30,000 km orari per poi accelerare **fino ad arrivare ad una velocità di propagazione di circa 400,000 km orari**, prima di scomparire improvvisamente e misteriosamente nell'arco di un'ora circa.

Quanto sono potenti i terremoti solari?

La scoperta dei terremoti solari risale all'estate del 1996, quando furono osservati per la prima volta dalla missione “Solar and Heliospheric Observatory” (SOHO), lanciata il 2 dicembre 1995 e tuttora operativa. Lo studio del terremoto solare del 1996 e di centinaia di altri eventi successivi ha permesso di capire quanta energia questi fenomeni sono in grado di rilasciare.

Si calcola che tipicamente l'energia coinvolta in un terremoto solare sia circa 40 mila volte maggiore dell'energia rilasciata dal famoso terremoto di San Francisco del 18 aprile 1906, di magnitudo momento stimata 7.9, che distrusse oltre l'80% della città causando oltre 3000 morti. **L'energia rilasciata da un terremoto solare è stata stimata essere equivalente a quella rilasciata da un terremoto di magnitudo superiore a 11**, una quantità di energia immane, equivalente a quella consumata in vent'anni negli Stati Uniti.

Il primo terremoto solare del venticinquesimo ciclo

Nel maggio del 2022 è stato osservato il primo terremoto solare del venticinquesimo ciclo (quello in corso). In particolare, **le increspature dell'atmosfera solare generate dall'evento sono succedute ad un brillamento di classe X1.5** verificatosi il 10 maggio 2022. L'evento è stato catturato dagli strumenti a bordo della missione *Solar Dynamic Observatory* (SDO) lanciata dalla NASA l'11 febbraio del 2010.

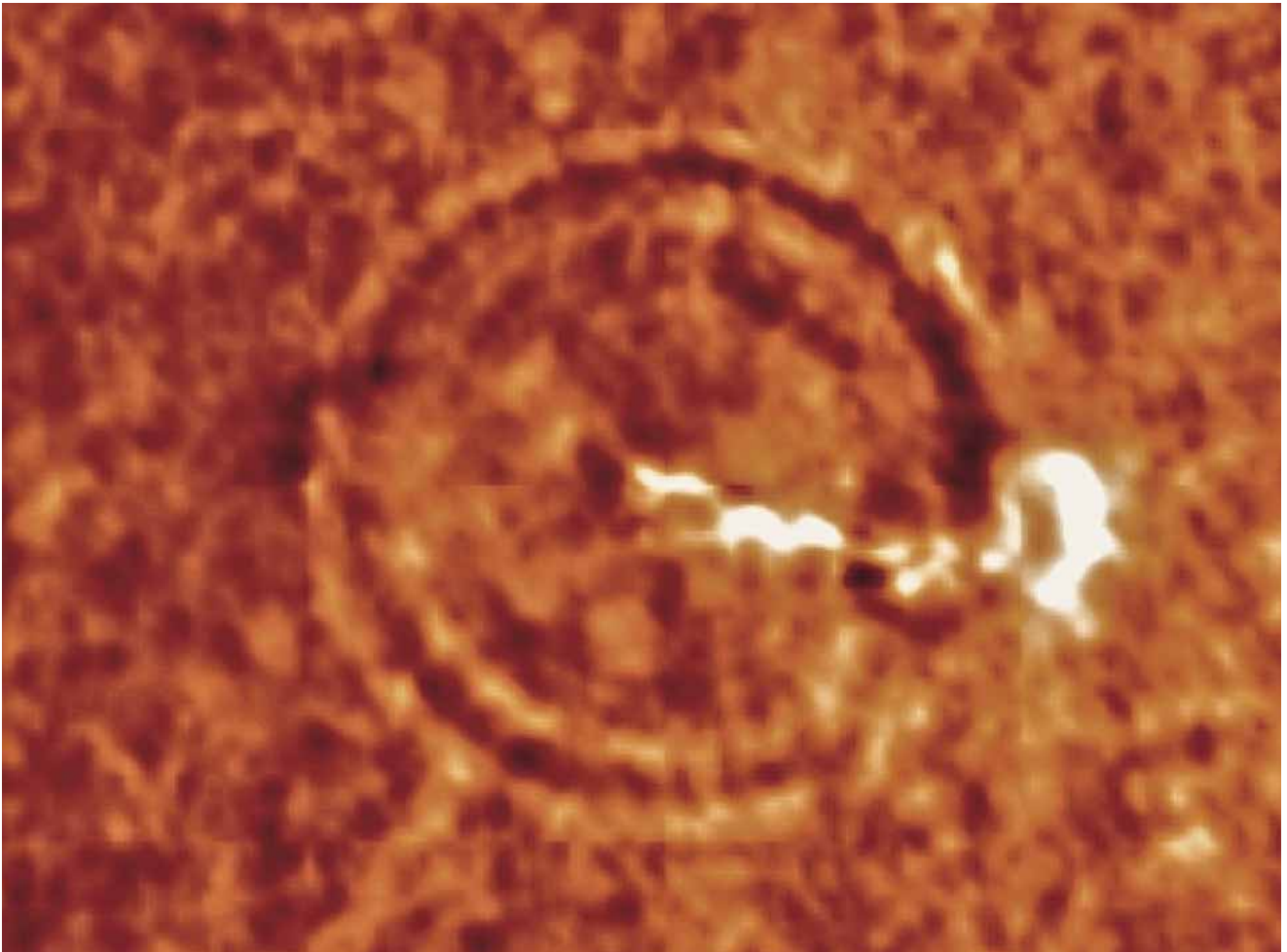


Figura 1 Increspature visibili nell'atmosfera solare in seguito al terremoto solare osservato il 9 luglio del 1996 dallo strumento "Michelson Doppler Imager" (MDI) a bordo della missione della NASA con collaborazione ESA "SOlar and Heliospheric Observatory" (SOHO). Sono simili a quelle generate da un sasso lanciato su uno specchio d'acqua. (Crediti: NASA/ESA).

Figure 1 Ripples visible in the solar atmosphere as a result of the solar earthquake observed on 9 July 1996 by the Michelson Doppler Imager (MDI) instrument on board NASA/ESA's SOlar and Heliospheric Observatory (SOHO) mission. They are similar to those generated by a stone thrown onto a body of water. (Credits: NASA/ESA).

Nonostante l'enorme progresso delle tecniche di osservazione e della nostra capacità di progettare e realizzare strumenti sempre più performanti, l'osservazione dei terremoti solari è tutt'altro che semplice. Nella grande maggioranza dei casi, infatti, la loro individuazione è ostacolata dai processi dinamici turbolenti costantemente in atto nell'atmosfera solare, che "soffocano" le deboli tracce dell'evento sismico nei segnali registrati dagli strumenti.

Con l'intensificarsi dell'attività solare e al picco del ciclo solare, si potrebbero osservare sempre più terremoti solari. Una grande occasione per studiare questi fenomeni e tentare di rispondere alle tante domande che la scoperta di questi incredibili eventi ha generato.

2019, l'anno senza macchia

Fabio Giannattasio e Domenico Di Mauro

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Per ben 271 giorni, nel 2019, non è stata osservata alcuna macchia sul Sole. Per trovare un numero maggiore di giorni senza macchie bisogna risalire al 1913, quando un Sole pulitissimo durò per ben 311 giorni. Ciò ha un effetto sul clima terrestre?

Il 2019 è stato caratterizzato da un numero molto esiguo di macchie sul disco della nostra stella. Questo fenomeno è stato registrato dagli studiosi come parte dell'evoluzione normale del ciclo di attività solare, durante il passaggio da un minimo, come quello osservato nel 2019, a un massimo. Anche in passato sono stati rilevati minimi solari così bassi, anche solo restringendosi agli ultimi 30 anni.

Il 2019 ha segnato la chiusura del ciclo solare numero 24. Con l'aumento dell'attività solare nel 2020, ha avuto inizio il nuovo ciclo 25. Ma andiamo con ordine.

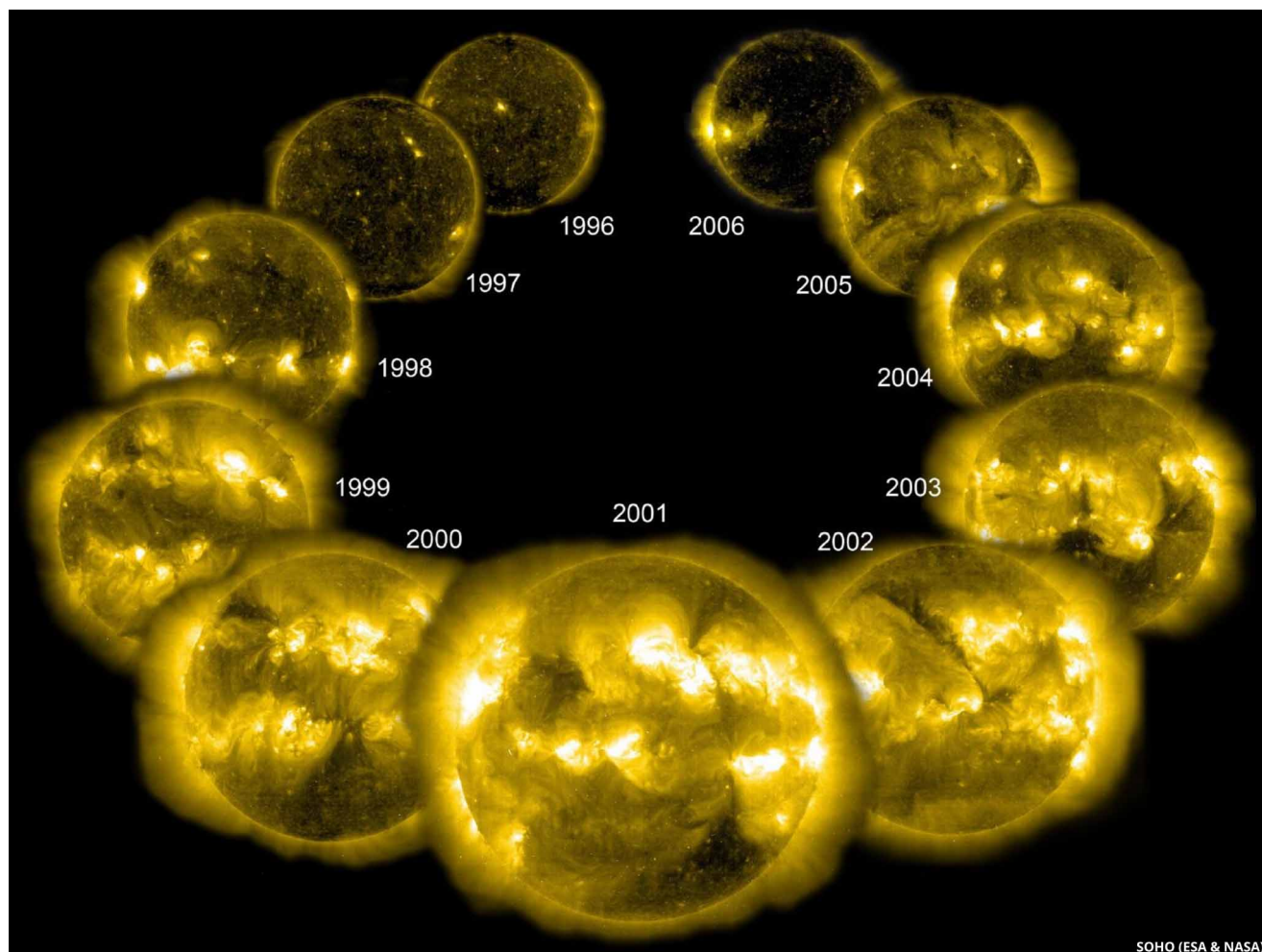
Come misuriamo l'attività solare?

Le macchie solari erano già conosciute nell'antichità (ad esempio dai cinesi, almeno dal I sec. a. C.) ma fu **Galileo** il primo ad osservarle in modo sistematico avvalendosi dell'uso del telescopio. Oggi sappiamo che le macchie solari non sono altro che concentrazioni di campo magnetico così intense da inibire il trasporto di energia negli strati più "superficiali" della stella, risultando quindi più fredde e di conseguenza più scure rispetto alle regioni circostanti.

La presenza di macchie solari quindi è intimamente legata all'attività della nostra stella e alla sua capacità di generare intensi campi magnetici nel suo interno. Questi campi magnetici rappresentano un mezzo efficientissimo per trasportare energia verso gli strati più esterni dell'atmosfera solare, rilasciandola nello spazio attraverso processi fisici piuttosto complessi. Per questo motivo, **il numero di macchie solari** ha storicamente rappresentato **un criterio semplice ed immediato per misurare l'intensità dell'attività solare**. Tale attività non è costante, ma segue un ciclo regolare di circa 11 anni, con alternanza di minimi e massimi di attività. La presenza di macchie sul disco solare è persino osservabile ad occhio nudo, adottando sempre le dovute protezioni, indispensabili quando si guarda direttamente il Sole.

Il confronto tra un minimo e un massimo di attività solare ci rivela un fatto importante: la nostra stella diventa più attiva ogni circa 11 anni, innescando fenomeni significativi di **espulsione di energia** sotto forma di radiazioni e particelle che possono raggiungere il nostro pianeta e dare origine, a loro volta, ad altri fenomeni come le tempeste geomagnetiche o le spettacolari aurore polari.

Come per ogni buona regola, però, esistono delle eccezioni. Si sono verificati infatti dei periodi in cui la regolarità dell'attività solare è venuta meno, dando origine a minimi e massimi piuttosto prolungati. Un esempio è il celebre **Minimo di Maunder** tra il 1645 e il 1715, ed altri meno "intensi" quali il **Minimo di Dalton** tra il 1790 e il 1830 circa, e il cosiddetto **Modern Maximum** tra il 1914 e il 2000.



SOHO (ESA & NASA)

Figura 1 Il numero delle regioni attive sul Sole cambia durante un ciclo solare. In figura il ciclo solare 23. (Crediti: ESA/NASA).

Figure 1 Variation of solar activity during a solar cycle. (Credits: ESA/NASA).

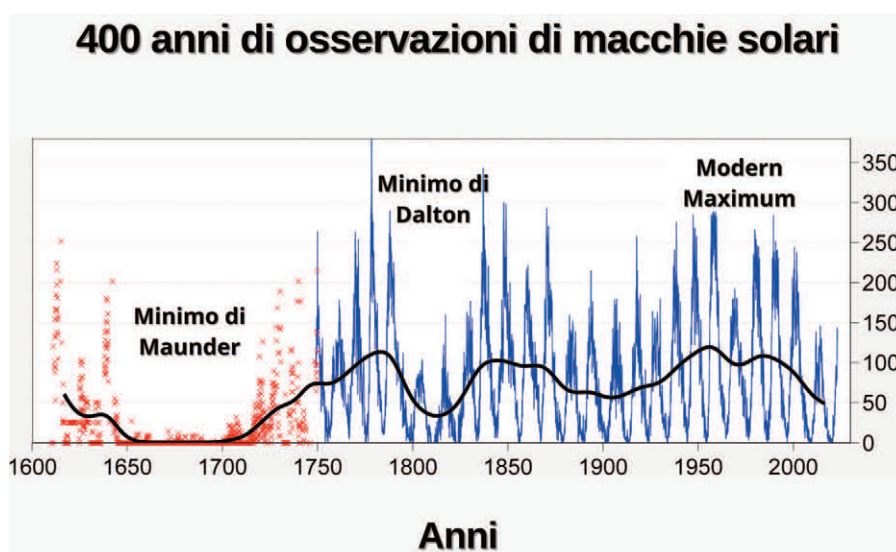


Figura 2 Numero di macchie solari dal 1600 ad oggi, con riferimento ai più celebri periodi di minimo e massimo. (Adattamento da Wikimedia Commons/Global Warming Art).

Figure 2 Sunspot number from 1600 to today, where the most famous periods of minima and maxima are evidenced. (Adapted from Wikimedia Commons/Global Warming Art).

Durante il periodo di minimo più estremo, il *Minimo di Maunder*, si registrò un **abbassamento di temperatura in alcune aree dell'emisfero nord terrestre, con picchi locali negativi di circa un grado in meno**. Questo periodo è stato soprannominato "*Piccola era glaciale*".

Il ciclo solare 24 è stato di gran lunga il meno "intenso" rispetto ai precedenti dai tempi del Minimo di Dalton. Il successivo ciclo, il numero 25, è iniziato nel 2020 e ha raggiunto il massimo nell'ottobre 2024, secondo quanto dichiarato in una conferenza stampa congiunta di NASA, NOAA e Solar Cycle Prediction Panel [1]. La bassa intensità del ciclo solare 24 e la prolungata assenza di macchie sul disco solare (con conseguente ritardo dell'inizio del ciclo 25) potrebbero far pensare ad un abbassamento della temperatura del pianeta. Tuttavia, sono altri i fattori che influenzano in maniera molto più incisiva il clima terrestre!

Quanto incide l'attività solare sul clima terrestre?

La Commissione Intergovernativa per i cambiamenti climatici delle Nazioni Unite (Intergovernmental Panel on Climate Changes, IPCC) sottolinea l'esistenza di un ampio consenso nella comunità scientifica sul fatto che **le variazioni dell'attività solare, siano esse a breve o a lungo termine, hanno un impatto molto ridotto sul clima terrestre**. La commissione sottolinea come il **riscaldamento prodotto dai gas serra di origine antropica sia molto maggiore di qualunque altro effetto associato alle variazioni dell'attività solare**.

Il grafico in figura 3 mostra il confronto tra l'andamento dell'*irradianza solare* (il flusso di energia che la Terra riceve dal Sole) e l'andamento della temperatura superficiale globale del nostro pianeta dal 1880 ad oggi [2]. Ebbene, si nota come, a dispetto delle variazioni dell'irradianza dovute all'attività solare (l'irradianza varia dello 0.1% circa tra un massimo e un minimo di attività, per quanto siano intensi o prolungati), la temperatura media globale non ha fatto che aumentare, e ancor peggio, con un ritmo sempre maggiore.

Siamo certi che il raffreddamento delle temperature durante il Minimo di Maunder fosse attribuibile esclusivamente all'attività solare?

Alcuni studiosi sostengono che un ruolo molto importante nell'irrigidimento del clima di quel periodo sia imputabile anche ad altri fattori come un'**intensa attività vulcanica** e una **variazione della circolazione oceanica**. Inoltre recenti studi hanno mostrato come, in realtà, l'abbassamento delle temperature in corrispondenza del Minimo di Maunder **non fu un fenomeno globale** ed effettivamente continuativo, ma avvenne in momenti diversi (l'identificazione e la durata dei periodi sono questioni ancora molto dibattute) e **fu a carattere regionale**, non globale. In altre parole non ci furono temperature estreme simultanee su tutto il globo terrestre. **Al contrario di quanto accade oggi, quando il riscaldamento per mano dell'uomo colpisce pressoché tutto il globo**.

Insomma, è scientificamente e inequivocabilmente provato che il riscaldamento prodotto dall'emissione di gas serra è ben maggiore di quello che potrebbe essere il raffreddamento associato a un lungo periodo di minima attività solare, ed ha un carattere effettivamente globale. In conclusione, semmai dovesse esserci un periodo prolungato di minimo solare, molto probabilmente non riuscirà a incidere sul clima terrestre in maniera così profonda da abbassare la temperatura media globale del nostro pianeta e bilanciare gli effetti disastrosi sul clima prodotti dalle emissioni di gas serra. Così è stato ad esempio per il minimo solare del ciclo 24.

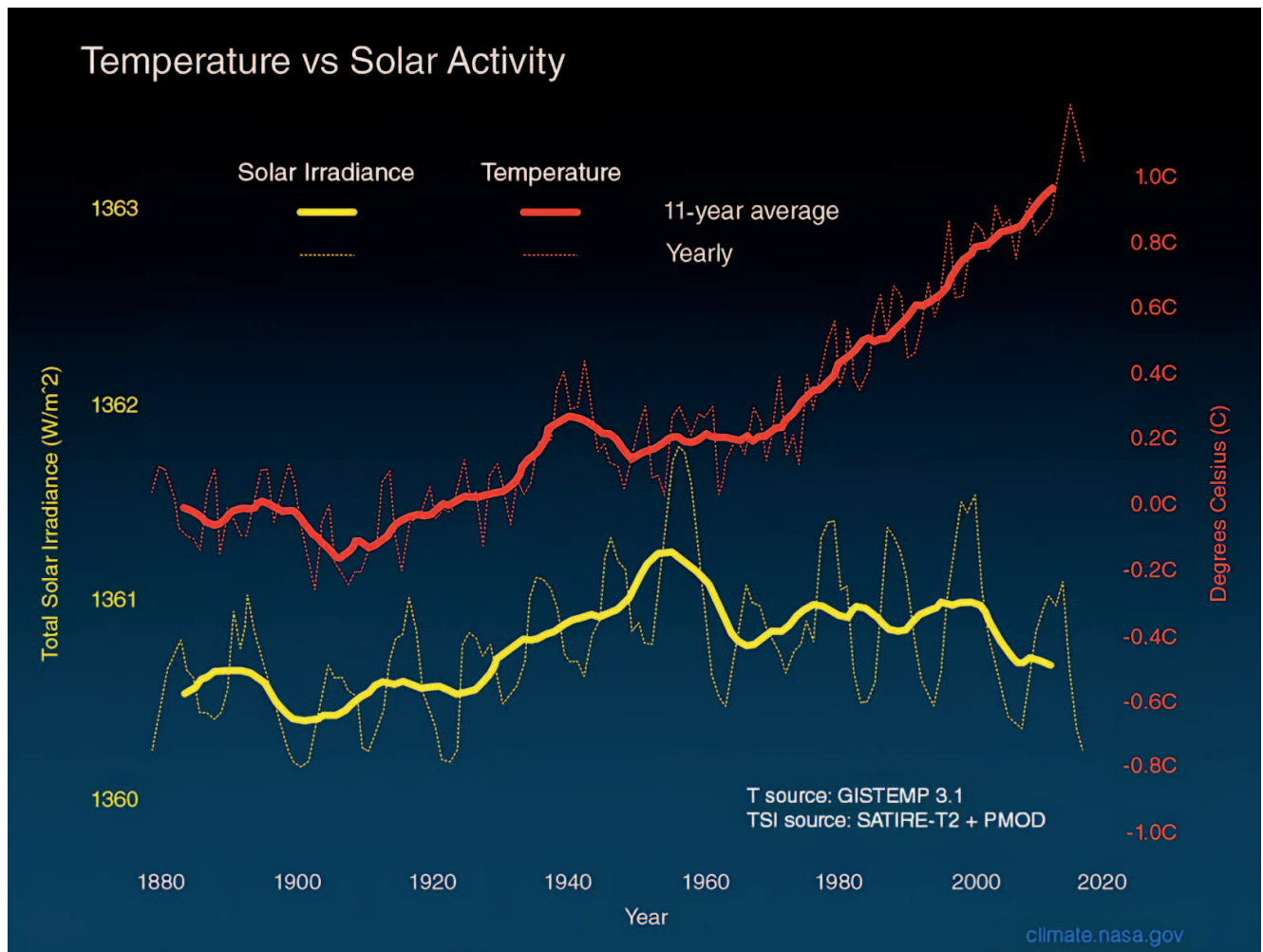


Figura 3 Variazione della temperatura media a Terra (in rosso) e dell'irradianza solare (in giallo) dal 1880 ad oggi. (Crediti: NASA).

Figure 3 Variation in mean Earth temperature (in red) and solar irradiance (in yellow) since 1880. (Credits: NASA).

Sitografia

- [1] <https://svs.gsfc.nasa.gov/14683>
- [2] <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/what-is-the-suns-role-in-climate-change/>

L'INTERAZIONE CON IL NOSTRO PIANETA

Il campo magnetico terrestre: il motore del nostro pianeta

Lili Cafarella, Paola De Michelis, Stefania Lepidi e Giovanna Lucia Piangiamore

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Il campo magnetico terrestre è un fenomeno affascinante che ha incuriosito generazioni di studiosi. Nonostante i progressi della scienza, rimane uno dei grandi misteri della geofisica. Scopriamo insieme cosa lo genera, come varia nel tempo e quale impatto ha non solo sulla Terra, ma anche sugli altri pianeti del sistema solare.

La questione di cosa sia e come nasca il campo magnetico terrestre è una questione che ha affascinato e attratto intere generazioni di ricercatori e di scienziati.

Un **campo magnetico** è un campo di forze generato nello spazio circostante un magnete, una carica elettrica in movimento o un campo elettrico variabile nel tempo. I magneti possono essere di **materiali e forme diverse** ma tutti, a causa della loro particolare struttura atomica, **hanno due estremità di segno opposto**, chiamate polo nord e polo sud. Ne abbiamo esperienza quando giochiamo con una calamita o con le barrette del gioco Geomag.

È facile sperimentare che un magnete esercita intorno a sé un'azione di attrazione o repulsione rispetto ad altri magneti. Se avviciniamo infatti due magneti, osserveremo che **poli uguali si respingono**, mentre **poli opposti si attraggono**, anche ad una certa distanza. L'ago di una bussola, in prossimità di un magnete, ne verrà irresistibilmente attratto. È questo il motivo per cui, in qualsiasi punto della superficie terrestre, sotto l'azione del campo magnetico terrestre, l'ago della bussola si orienta sempre verso una determinata posizione, il nord magnetico.

Dentro la Terra c'è dunque un grande magnete?

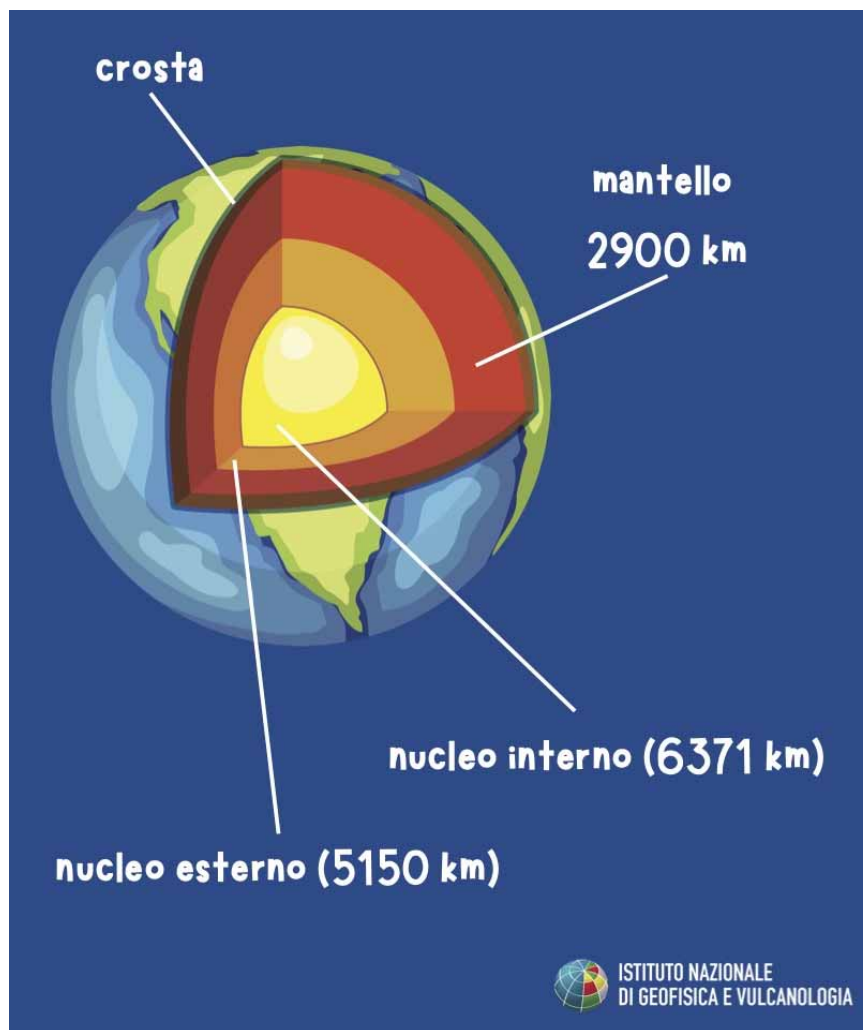
È una delle ipotesi formulate dagli **antichi studiosi** di questo affascinante fenomeno. Le teorie moderne però ci insegnano che **non può essere un magnete il generatore del campo magnetico terrestre**. All'interno del nostro pianeta infatti, già a poche decine di km di profondità, la temperatura delle rocce raggiunge il cosiddetto "**punto di Curie**", la temperatura alla quale un magnete perde le sue proprietà e si smagnetizza. **Cosa genera allora il campo magnetico terrestre?** Come nasce quello che possiamo considerare il motore del nostro pianeta?

La sorgente di questo fenomeno non è ancora del tutto nota ma sicuramente va ricercata nelle profondità della Terra.

Al suo interno il nostro pianeta ha una struttura che ricorda la struttura di un uovo: ha una parte esterna, la buccia dell'uovo (crosta terrestre) molto sottile, al di sotto della quale c'è l'albume (il mantello terrestre) e il tuorlo (il nucleo). A sua volta il nucleo terrestre ha una parte interna solida e una parte più esterna, fluida.

La parte esterna del nucleo è composta principalmente da **ferro e nichel**. Sotto l'azione della rotazione terrestre e dei moti convettivi ascensionali generati dal calore proveniente dal nucleo interno, il nucleo esterno ha dei lenti movimenti a spirale. Ma tutto questo non basterebbe senza un elemento chiave: un campo magnetico primordiale, presente sin dai primi giorni della Terra, che ha dato il via al processo. Questo campo iniziale ha permesso ai movimenti nel nucleo di creare correnti elettriche, che a loro volta generano un campo magnetico. Il ciclo si autoalimenta: il campo magnetico induce nuove correnti, che rinforzano ulteriormente il campo. Questo meccanismo, chiamato dinamo ad autoeccitazione, è ciò che mantiene il nostro campo magnetico attivo e vitale.

Figura 1 Interno della Terra.
(Crediti: L. Cafarella).
Figure 1 Earth's interior.
(Credits: L. Cafarella).



Che forma ha il campo magnetico terrestre?

Il nostro campo magnetico nasce quindi oltre tremila chilometri sotto i nostri piedi e si estende per decine di migliaia di chilometri nello spazio. Lo possiamo immaginare come un guscio che circonda il nostro pianeta e lo possiamo rappresentare attraverso delle linee, dette linee di forza, che escono dal Polo Sud della Terra e rientrano nel Polo Nord.

Come tutti i campi magnetici, il campo magnetico terrestre **è invisibile** ma c'è, e fa sentire i suoi effetti tutto intorno a noi. Tutti i magneti, grandi o piccoli, che si trovano immersi nel campo magnetico terrestre ne subiscono l'influenza e tendono ad orientarsi lungo le sue linee di forza, attratti dai poli opposti.

Il campo magnetico terrestre varia nel tempo?

Il campo geomagnetico **varia nel tempo**, su scale temporali che vanno da qualche frazione di secondo a migliaia di anni. Le variazioni brevi e brevissime sono legate all'**interazione con le particelle provenienti dal Sole** e modificano il campo per un periodo limitato di tempo. Quelle lunghe sono dovute invece ai **complessi movimenti del nucleo esterno fluido del pianeta**. Questi cambiamenti lenti ma inesorabili sono responsabili del **movimento dei poli geomagnetici** [1] (il polo nord magnetico si sta spostando a una velocità di circa 50 Km/anno!) e possono arrivare fino alla **completa inversione di polarità del magnetismo terrestre** [2]; negli ultimi 170 milioni di anni si sono verificate circa 250 di queste inversioni.

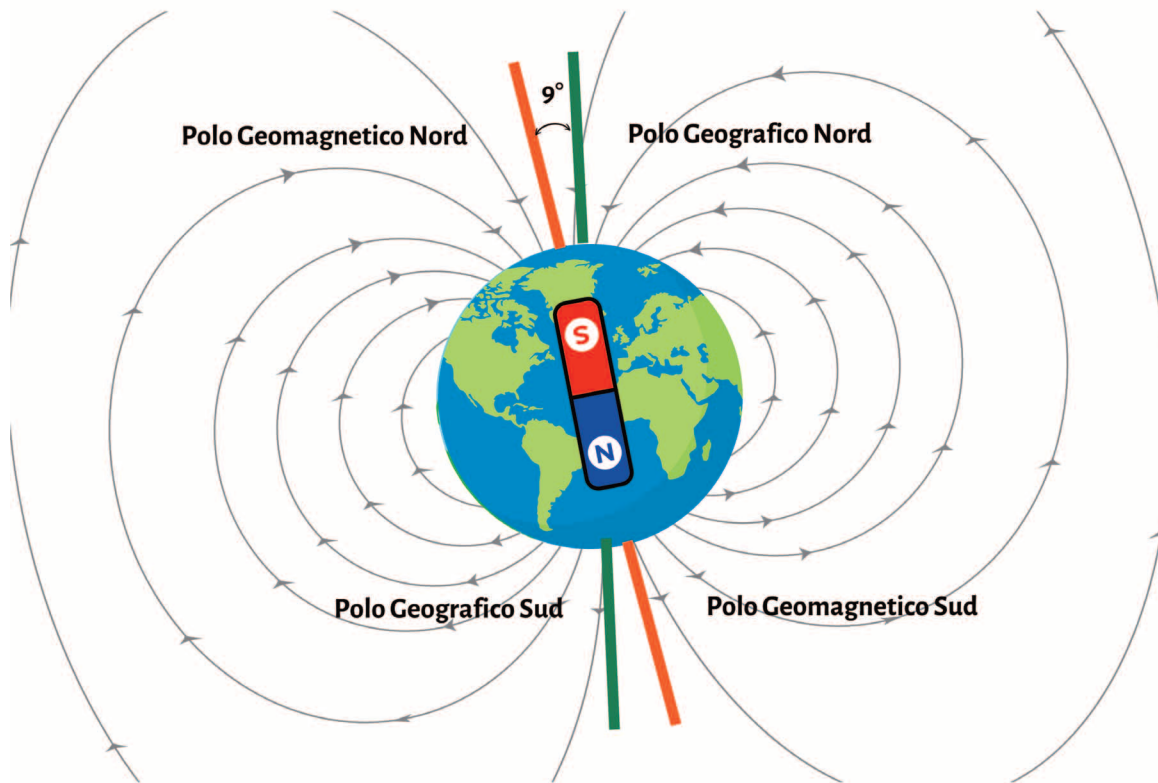


Figura 2 Il campo magnetico terrestre. (Crediti: L. Cafarella).

Figure 2 Geomagnetic field. (Credits: L. Cafarella).

Ma **perché e per quale motivo il campo magnetico cambia?** Esistono varie ipotesi, ma nessuna è davvero esauriente. La verità è che nessuno può scendere nel cuore della Terra. Possiamo solo limitarci a intuire quello che succede a quelle profondità, cercando di interpretare quello che è uno dei più grandi misteri della Geofisica.

Ma la Terra non è l'unico pianeta dotato di un campo magnetico. Lo studio del nostro campo geomagnetico ci offre importanti indizi per comprendere il funzionamento dei campi magnetici degli altri corpi celesti nel sistema solare. Ogni pianeta ha una storia magnetica unica, legata alla sua composizione interna e alle sue dinamiche. Alcuni campi sono più forti e potenti, come quelli di Giove e Saturno, mentre altri sono deboli o addirittura assenti, come su Marte o Venere. Queste differenze sono legate a fattori complessi, tra cui la struttura interna dei pianeti e la loro rotazione. Il confronto tra il campo magnetico terrestre e quelli del sistema solare è quindi fondamentale per comprendere le dinamiche magnetiche su scala cosmica.

E allora, quali pianeti del sistema solare possiedono un campo magnetico?

I campi magnetici planetari variano ampiamente tra i diversi pianeti, riflettendo le diverse caratteristiche dei corpi celesti. Nei pianeti rocciosi come la Terra, Mercurio, Venere e Marte, il campo magnetico si forma principalmente dall'interazione tra **materiali conduttori interni** e la **rotazione planetaria**. Nei giganti gassosi come **Giove** e **Saturno**, invece, la storia è diversa. Si pensa che i loro campi magnetici, dato che questi giganti sono composti principalmente da

idrogeno ed elio senza una superficie solida, siano generati da **correnti di idrogeno metallico** all'interno dei loro mantelli gassosi. Questi campi magnetici sono incredibilmente potenti: Giove, ad esempio, vanta un campo magnetico circa 20,000 volte più intenso della Terra. Saturno, sebbene meno intenso, mantiene comunque un magnetismo notevole.

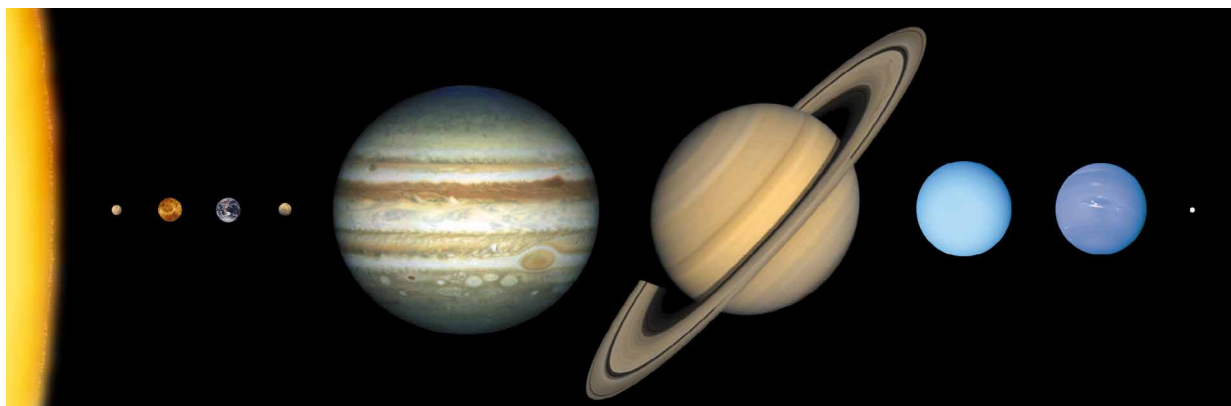


Figura 3 Dimensioni planetarie a confronto: da sinistra a destra, Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Plutone, quest'ultimo come pianeta nano. La scala delle posizioni rispetto al Sole non è rispettata. [Crediti: NASA/Lunar And Planetary Institute].

Figure 3 This illustration shows the approximate sizes of the planets relative to each other. Outward from the Sun, the planets are Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune, and Pluto. The planets are not shown at the appropriate distance from the Sun. [Credits: NASA/Lunar And Planetary Institute].

Tuttavia, non tutti i pianeti possono contare su campi magnetici così intensi. **Mercurio**, con la sua lenta rotazione, mostra un campo magnetico debole. **Venere**, invece, sembra non possedere un campo magnetico globale, forse a causa di una limitata attività di convezione nel suo nucleo interno fuso. Allo stesso modo, **Marte** presenta segni di un campo magnetico frammentato e debole, sebbene in passato ne avesse uno; col tempo, però, il suo interno si è solidificato, compromettendo la forza del campo magnetico.

L'inclinazione del campo magnetico rispetto l'asse di rotazione è importante

Una peculiarità affascinante dei campi magnetici planetari è la loro **inclinazione rispetto all'asse di rotazione dei pianeti**. Questa diversa angolazione ha un ruolo cruciale nel comportamento magnetico planetario e nell'interazione con lo spazio circostante.

Sulla Terra, con un campo magnetico inclinato di circa 9 gradi rispetto all'asse di rotazione, il campo mantiene nel tempo una configurazione stabile che ci protegge in modo continuativo dalle radiazioni cosmiche e dal vento solare.

Invece su Urano, dove l'inclinazione del campo magnetico è di circa **60 gradi rispetto all'asse di rotazione**, il campo magnetico sembra muoversi lateralmente rispetto al modo di rotazione del pianeta. Questo movimento crea **oscillazioni nel campo magnetico**, generando effetti magnetici unici e complessi che influenzano le interazioni con il **vento solare**.

Il vento solare costituito da particelle cariche provenienti dal Sole, interagisce con la magnetosfera di ciascun pianeta. L'orientamento dell'asse magnetico gioca un ruolo fondamentale nella forma e nella stabilità di questa magnetosfera, influenzando la difesa del pianeta dal vento solare e plasmando l'ambiente spaziale circostante.

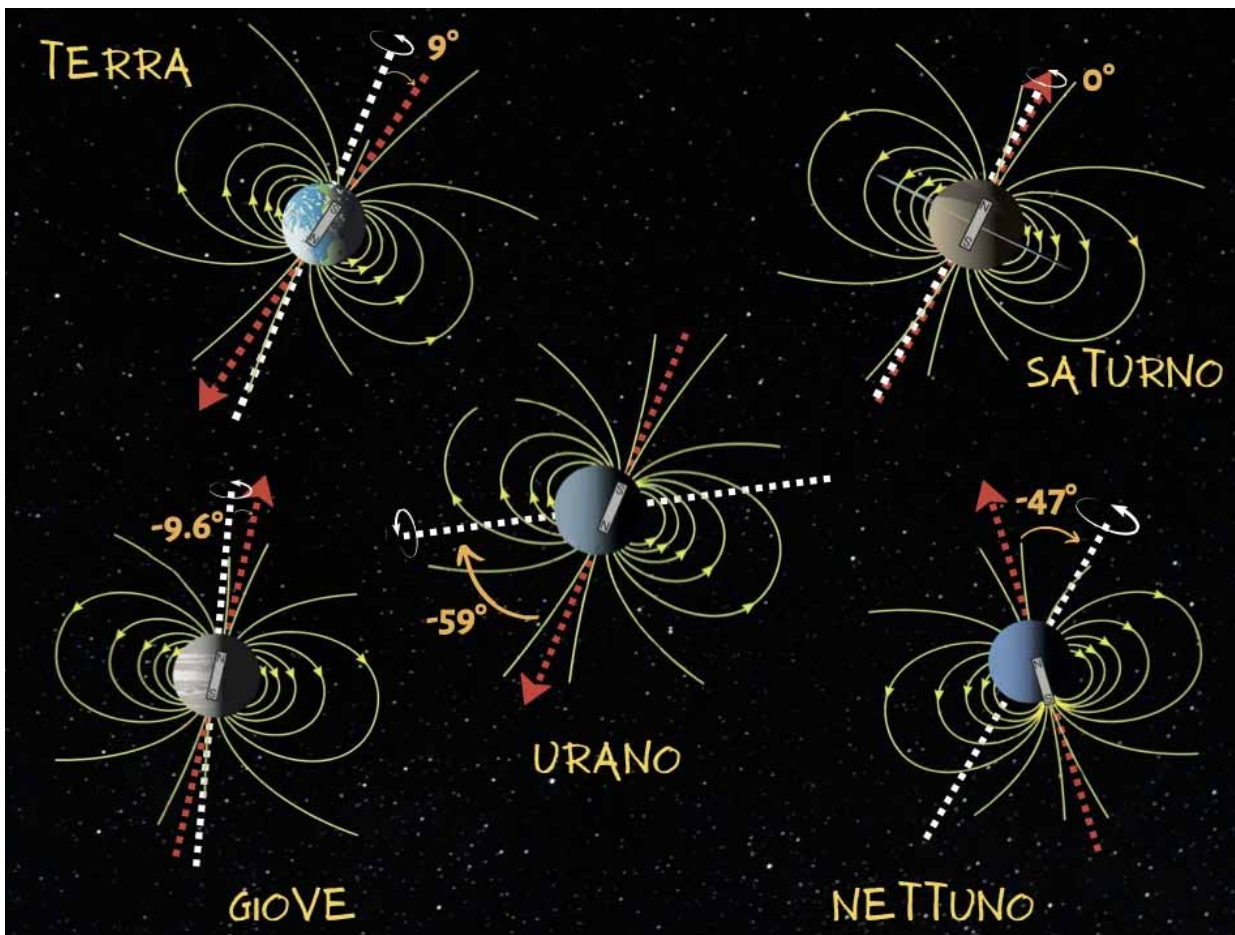


Figura 4 Campo magnetico: Inclinazione dell'asse (in rosso) rispetto all'asse di rotazione (in bianco) di alcuni pianeti nel sistema solare. (Crediti L. Cafarella).

Figure 4 Magnetic field: Inclination of the axis (in red) with respect to the rotation axis (in white) of some planets in the solar system. (Credits L. Cafarella).

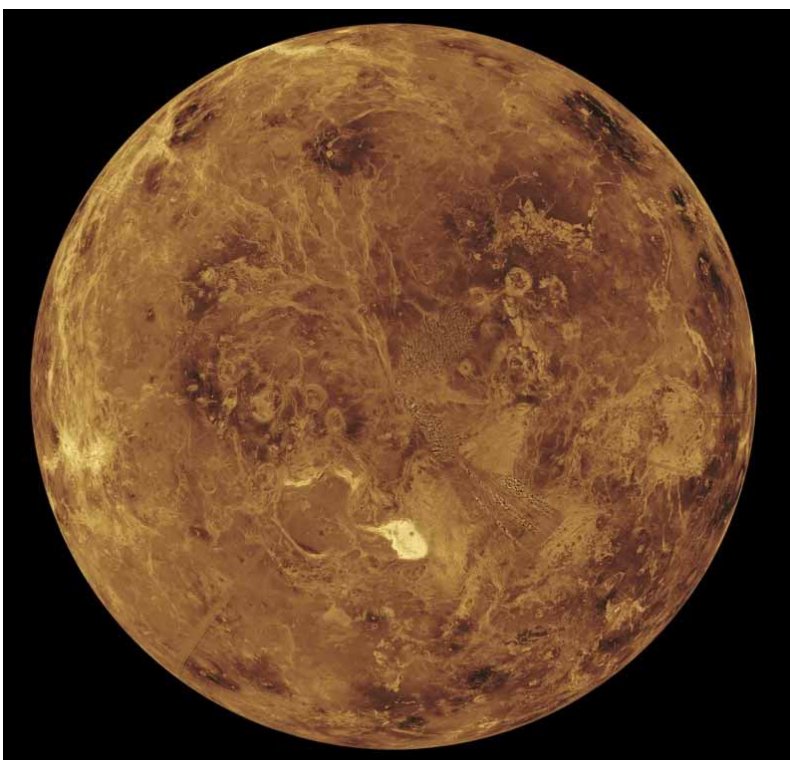


Figura 5 Un'immagine di Venere risultato di dati provenienti dal satellite Magellano della NASA e dal Pioneer Venus Orbiter. (Crediti: NASA/JPL-Caltech).

Figure 5 A picture of Venus resulting from data of NASA's Magellano satellite and Pioneer Venus Orbiter. (Credits: NASA/JPL-Caltech).

Campi magnetici planetari e abitabilità

I campi magnetici planetari svolgono un ruolo cruciale nell'atmosfera e nella protezione planetaria. Influenzano la capacità di mantenere un'atmosfera densa, proteggendo i pianeti dalle radiazioni cosmiche e dal vento solare. L'assenza o la debolezza dei campi magnetici planetari può incidere sull'**abitabilità** di un pianeta e sull'esistenza di **acqua liquida in superficie**. Ad esempio, la mancanza di un campo magnetico significativo su Venere potrebbe aver contribuito allo stato attuale della sua atmosfera estremamente ostile, caratterizzata da temperature superficiali incredibilmente alte e una densa copertura di anidride carbonica.

Cosa succede sulla Terra?

Per nostra fortuna la Terra è dotata di campo magnetico e di una magnetosfera che proteggono la nostra atmosfera e i nostri oceani dalle particelle cariche provenienti dal Sole. Grazie a questa barriera invisibile, il nostro pianeta può interagire con il Sole senza subire gli effetti distruttivi del vento solare. Tuttavia, questa interazione produce anche fenomeni spettacolari. Uno dei più noti avviene quando le particelle del vento solare riescono a penetrare la barriera della magnetosfera (in corrispondenza dei poli), l'urto con le molecole e gli atomi dell'aria libera una grande quantità di energia sotto forma di luce. Da terra, l'arrivo delle particelle è visibile sotto forma di grandi cortine di luce colorata in lento ma continuo movimento. Si tratta di uno dei più straordinari spettacoli della natura: le **aurore polari**.

L'importanza della ricerca

L'analisi e la comprensione approfondita del campo magnetico terrestre hanno giocato e giocano un ruolo fondamentale in questo campo di ricerca in quanto ci consentono di elaborare teorie e modelli essenziali per interpretare e comprendere i campi magnetici presenti nel nostro sistema solare e al di là di esso. Questo campo di ricerca in continua evoluzione apre nuove strade nella comprensione dei misteri nascosti degli ambienti spaziali e delle intricatissime relazioni tra i pianeti e il loro magnetismo. La ricerca continua sull'argomento non solo migliora la nostra conoscenza sulla diversità e sull'evoluzione dei pianeti, ma offre anche una preziosa **prospettiva sull'abitabilità** e sulla **potenziale presenza di vita** al di là della Terra.

Sitografia

[1] <https://ingvambiente.com/2019/11/19/quando-i-poli-vanno-a-spasso/>

[2] <https://ingvambiente.com/2019/01/16/inversioni-campo-magnetico-terrestre/>



Figura 6 Aurora boreale alle isole Lofoten. (Crediti: Canva).

Figure 6 Northern light at Lofoten Island. (Credits: Canva).

Che tempo fa nello spazio?

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Perché studiare il Sole? C'è una necessità pratica per farlo? Studiare la nostra stella ci permette di capire molti processi che avvengono nel sistema Sole-Terra e che sono alla base della cosiddetta Meteorologia Spaziale, lo Space Weather.

Cos'è la Meteorologia Spaziale (Space Weather)?

Questa domanda non ha una sola risposta, per il semplice motivo che non esiste un'unica definizione di **Space Weather**. Secondo il Programma Nazionale per lo Space Weather degli Stati Uniti d'America, per Space Weather si intende l'insieme delle condizioni del Sole, del vento solare, della magnetosfera, ionosfera e termosfera che possono **influenzare la prestazione e l'affidabilità di sistemi tecnologici** nello spazio e a Terra e che possono mettere in pericolo la vita e la salute. Tale definizione è piuttosto complessa ed esprime concetti legati ad una ricchissima fenomenologia che interessa principalmente l'interazione Terra-Sole, e non solo, dal momento che l'interesse della comunità scientifica è volto anche all'interazione tra il Sole e gli altri pianeti del sistema solare.

L'origine di tutto

Secondo questa definizione, dunque, all'origine di tutti i fenomeni inerenti allo Space Weather c'è il **Sole**. Esso è in grado di immagazzinare immense quantità di energia e liberarla dallo strato più esterno della sua atmosfera, la **corona solare**, verso l'intera eliosfera, ovvero tutta quella regione dello spazio interstellare che "sente" principalmente l'influenza del Sole.

Il Sole è un corpo **estremamente dinamico** che varia su tutte le scale spaziali e temporali. La scala di variazione forse più celebre è rappresentata dal **ciclo undecennale**, con il quale il Sole alterna periodi di massimi e minimi di attività. In corrispondenza di tali periodi è possibile osservare un maggiore o un minore numero di **macchie solari** e di regioni attive, che sono proprio le strutture in grado di immagazzinare l'energia che può essere poi rilasciata, ad esempio, attraverso eventi impulsivi che qui rivediamo brevemente:

- I **brillamenti solari** (Solar Flares) veri e propri lampi di energia rilasciata in forma di onde elettromagnetiche in tutto lo spettro, dalle onde radio ai raggi gamma. Possono durare da minuti a ore, durante i quali viene rilasciata una quantità di energia pari a miliardi di bombe H.
- Le **espulsioni di massa coronale** (Coronal Mass Ejections, CME) espulsioni di miliardi di tonnellate di plasma solare magnetizzato in grado di viaggiare tipicamente ad una velocità dai 200-250 km/s ai 2000-2500 km/s circa.
- Le **Solar Energetic Particles** (SEP) sciame di particelle ad alta energia che possono durare giorni e che sono accelerate da eventi concomitanti a flares e/ CME, o dagli shock che si generano quando una espulsione di plasma ad alta velocità sopravanza plasma solare precedentemente emesso.

A questi eventi impulsivi si accompagna un vento di plasma magnetizzato (**vento solare**) soffiato dal Sole ad una velocità che varia tra i 300-400 km/s agli 800-1000 km/s circa. Queste velocità,

e dunque queste energie, sembrano davvero impressionanti rispetto a quanto da noi sperimentato quotidianamente.

E allora ci chiediamo: quale impatto e quali effetti può avere sulla Terra l'arrivo di tutta questa energia in forma di radiazione e particelle?

Gli effetti del Sole sui nostri sistemi tecnologici

I primi ad essere colpiti sono i **satelliti**, o più in generale le infrastrutture nello spazio (Stazione Internazionale compresa). Le particelle ad altissima energia possono penetrare al loro interno e depositarvi la propria carica elettrica, provocando anomalie o danni all'elettronica di bordo. Nei casi peggiori possono portare anche alla perdita del satellite stesso. Una circostanza terribile, oltre che per i costi dei satelliti e della loro messa in orbita, per i danni ai servizi che essi garantiscono (telecomunicazioni, navigazione, ecc.).

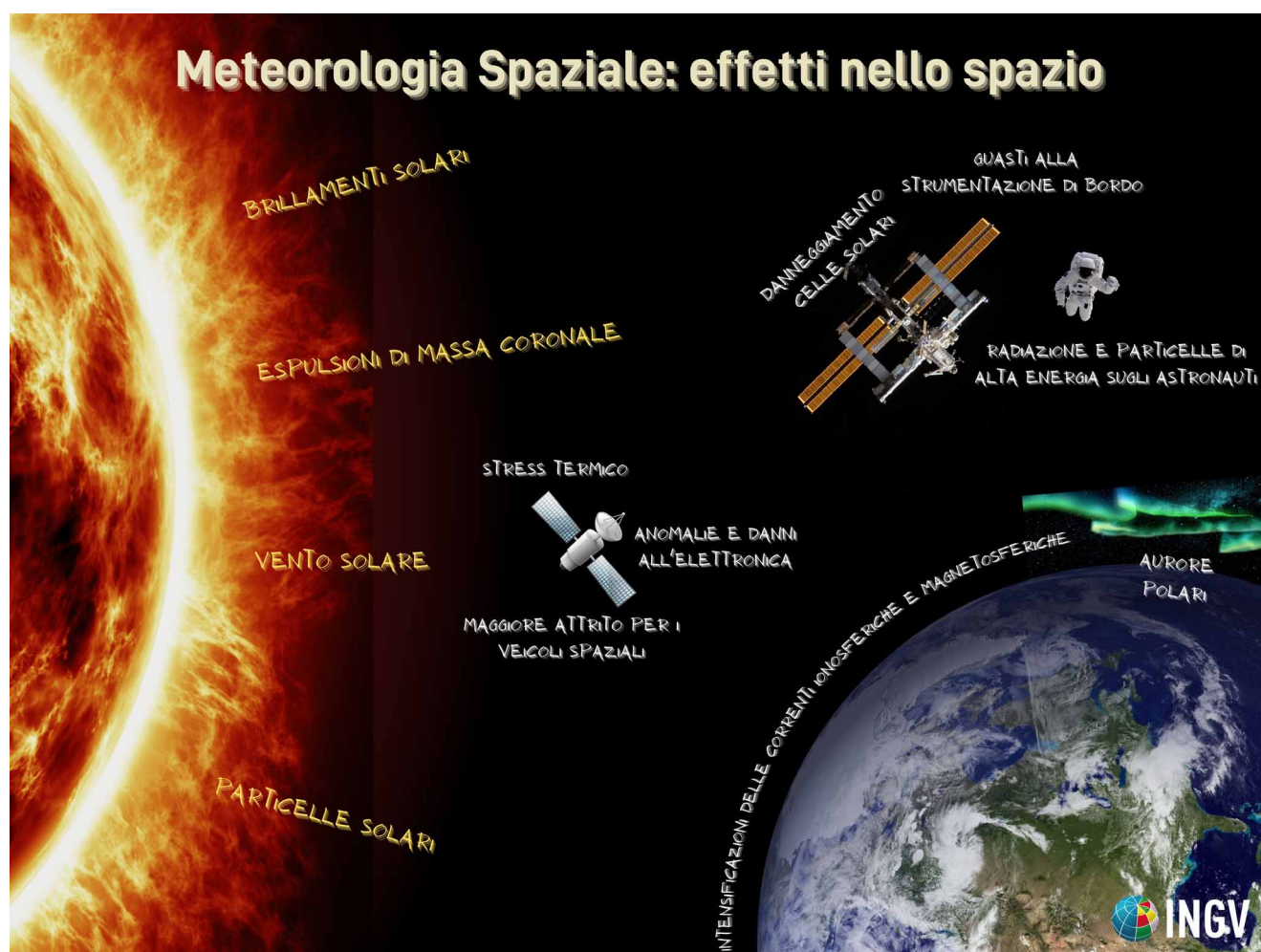


Figura 1 Rappresentazione dell'impatto nello spazio circumterrestre del plasma di origine solare nell'ambito della cosiddetta Meteorologia Spaziale (Space Weather). (Crediti: L. Cafarella).

Figure 1 Representation of the impact of solar-origin plasma on the circumterrestrial space within the framework of so-called Space Weather. (Credits: L. Cafarella).

Il flusso di radiazione ad altissima frequenza nello spettro elettromagnetico è quella più pericolosa per la salute umana. Può aumentare ad un livello tale da mettere in serio pericolo la

vita dell'equipaggio della Stazione Internazionale, o ancor peggio, degli astronauti impegnati nelle missioni di manutenzione all'esterno della struttura, denominate passeggiate spaziali. Ad un rischio simile, seppure minore, sono sottoposti anche i **componenti degli equipaggi aerei** che volano soprattutto nelle **rotte ad altissime latitudini**, dove le particelle ad alta energia possono penetrare più facilmente perché guidate verso il basso dal campo magnetico terrestre.

Le particelle ionizzanti che precipitano nella ionosfera possono alterarne la densità, modificandone le proprietà fisiche. Ciò può comportare l'alterazione delle proprietà di rifrazione delle onde elettromagnetiche a bassa frequenza, le **onde radio**, che rimbalzano nella ionosfera garantendo i contatti radio a distanza. Il segnale radio può quindi essere modificato, degradato, o addirittura completamente assorbito, inficiando quindi il corretto funzionamento delle comunicazioni. Allo stesso modo, in linea di principio, può degradarsi il segnale inviato dai satelliti di navigazione e posizionamento (GPS), rendendo cieca, nella peggiore delle ipotesi, la posizione di aerei, navi, autoveicoli.

Altra conseguenza relativa all'iniezione di energia nell'atmosfera terrestre deriva dal fatto che in risposta ad essa l'**atmosfera può espandersi**. Di conseguenza la parte bassa e più densa dell'atmosfera può elevarsi a quote maggiori in modo tale che aumenti la densità in corrispondenza delle quote a cui volano i satelliti. Questo comporta un **maggiore attrito**, un frenamento (noto come *drag atmosferico*) che può comportare la modifica dell'orbita dei satelliti stessi al punto da rendere più frequentemente necessarie manovre correttive dell'orbita stessa. Queste operazioni esauriscono più rapidamente il propellente a bordo dei satelliti, accorciando quindi la vita del satellite stesso.

Il drag ha effetto non solo sui satelliti, ma anche sulla miriade di **detriti spaziali** che pure orbitano intorno alla Terra. Si tratta di centinaia di migliaia di frammenti e parti di missioni dismesse rimaste in orbita e che vengono monitorate costantemente per scongiurare collisioni con satelliti e missioni in operazione. La perturbazione delle orbite di questi detriti comporta, laddove si abbiano modifiche sostanziali, la necessità di ricatalogarne la posizione.

Gli effetti del Sole sulla ionosfera e magnetosfera terrestre

L'energia che arriva in ionosfera per effetto di fenomeni di Space Weather può instaurare e amplificare correnti nella ionosfera. Queste correnti introducono variazioni del campo magnetico terrestre che a loro volta generano **correnti indotte** al suolo (correnti geomagneticamente indotte). Le correnti geomagneticamente indotte (**GIC**) si possono insinuare, ad esempio, nelle reti elettriche generando sovracorrenti e danneggiando i trasformatori delle reti di distribuzioni. Questo, nella peggiore delle ipotesi, può provocare diffusi **black-out**.

Tra gli effetti degli eventi di Space Weather, probabilmente l'unico genuinamente spettacolare è rappresentato dalle **aurore boreali** (o australi). Esse si verificano alle alte latitudini dove le linee del campo geomagnetico guidano le particelle ad alta energia a precipitare nell'atmosfera. Tali particelle, principalmente elettroni, mettono in vibrazione gli atomi e le molecole dell'atmosfera causando l'emissione nello spettro visibile dai colori caratteristici verde, rosso, blu e viola.

Gli eventi del passato

Ci sono stati eventi nel passato dove si siano manifestati alcuni degli effetti di cui abbiamo parlato e che siano dunque riconducibili ad eventi di Space Weather? Ve ne sono stati diversi, e hanno provocato danni anche importanti. Ne menzioniamo soltanto alcuni tra i più rilevanti.

Il primo violento evento di Space Weather di cui si abbia testimonianza è il famoso evento "**Carrington-Hodgson**", l'1 e il 2 settembre **1859**, che prende il nome dai due astronomi britannici

che lo osservarono e studiarono. Tale evento fu in grado di mettere **fuori uso le reti telegrafiche in Europa e Nord America**. I cavi fusero perché condussero correnti indotte estremamente intense e si videro aurore boreali persino a medie e basse latitudini (ad esempio a Cuba, Hawaii, Cina, Messico, Italia). I giornali dell'epoca riportarono testimonianze di cittadini che videro il cielo notturno illuminarsi a giorno. In molti pensarono si trattasse di vasti incendi scoppiati nei dintorni. Molti operatori telegrafici ricevettero scosse elettriche.



Figura 2 Rappresentazione dell'impatto sulla Terra del plasma di origine solare nell'ambito della cosiddetta Meteorologia Spaziale (Space Weather). (Crediti: L. Cafarella).

Figure 2 Representation of the impact of solar-origin plasma on the Earth's surface within the framework of so-called Space Weather. (Credits: L. Cafarella).

L'evento del maggio del **1921** è invece passato alla storia come la “*New York Railroad Superstorm*”. Infatti, oltre a incendi in diverse stazioni telegrafiche svedesi, le fiamme avvolsero anche la stazione di Brewster, a circa 80 km dalla stazione centrale di New York. Coinvolsero anche la torre di controllo della ferrovia proprio in prossimità della Grand Central Station di New York City. Fuori uso finirono anche reti telegrafiche in Australia, Brasile, Danimarca, Francia, Giappone, Nuova Zelanda, Norvegia, Svezia, Stati Uniti e Gran Bretagna. Le aurore boreali furono visibili persino a Los Angeles, Atlanta, Texas, Samoa, Tonga.

Nel maggio del **1967** poi, si sfiorò una **guerra mondiale**. I tre radar operativi del Ballistic Missile Early Warning System in Alaska finirono fuori uso simultaneamente. Nel pieno della Guerra Fredda si pensò inizialmente ad un sabotaggio ad opera dei sovietici. Fortunatamente, prima

della reazione di rappresaglia fu interpellato (e ascoltato) un esperto di fisica del Sole, il quale ricondusse il fenomeno ad un evento solare, e dunque di Space Weather.

Nel marzo del **1989** si verificò uno degli eventi più celebri, il blackout del Quebec. Il sovraccarico sulla rete di distribuzione dell'energia elettrica del Quebec danneggiò i trasformatori causando un diffuso blackout. 6 milioni di persone rimasero così senza energia elettrica per 9 ore nella fredda regione canadese. Le aurore boreali associate a questo evento di Space Weather furono osservabili fino in Florida e a Cuba.

Ed infine arriviamo all'evento più intenso degli ultimi decenni, l'evento di Halloween a cavallo tra l'Ottobre e il novembre del **2003**. Per circa un'ora 50000 persone in Svezia rimasero senza energia elettrica. Nelle Americhe, le aurore boreali furono osservate fino in Texas.

Quale sarebbe oggi la conseguenza di un evento intenso come quello di Carrington-Hodgson?

Nel 1859 i sistemi tecnologici erano relativamente limitati. I danni furono comunque ingenti, ma nulla al confronto di ciò che accadrebbe ai giorni nostri, in un'epoca sempre più dipendente dalla **tecnologia**. Diversi studi provano a quantificare i danni che si avrebbero se un tale evento colpisse la Terra oggi. Gli scenari non sono molto confortanti.

Anzitutto almeno il 50% dei **satelliti in orbita sarebbero compromessi**, in primis i satelliti di navigazione, posizionamento e comunicazione, rendendo "invisibili" aerei, navi, automobili, ed impedendo le transazioni finanziarie, ad esempio il funzionamento dei circuiti bancomat.

Successivamente, le forti **correnti indotte** potrebbero danneggiare in maniera severa le reti elettriche, causando l'interruzione dell'erogazione dell'energia elettrica e, a cascata, la cessazione del funzionamento, nel giro di alcuni giorni (il tempo di scarica delle batterie, laddove presenti) degli impianti di distribuzione dell'acqua, degli elettrodomestici, dei riscaldamenti, dei treni e delle metropolitane, i distributori di benzina, i gasdotti e gli oleodotti. Gli ospedali rimarrebbero senza energia, verrebbe meno la distribuzione di medicinali e alimenti di prima necessità. Solo per citare alcuni danni possibili.

Tradotto: **miliardi di dollari di danni**, e ci vorrebbero anni per ripristinare le condizioni pre-crisi.

Le infrastrutture di monitoraggio

Tale scenario ha spinto alcuni paesi, Stati Uniti in testa, a dotarsi di **infrastrutture di monitoraggio e previsione dello Space Weather**, e a consolidare piani di emergenza coordinati a livello nazionale che possano fronteggiare il verificarsi di eventi estremi legati allo Space Weather come quello di Carrington-Hodgson. Tali piani prevedono l'intervento della **Protezione Civile** e dell'Esercito per la distribuzione dei beni di prima necessità come cibo, acqua e carburante, nonché di generatori elettrici.

Finalmente anche nel nostro Paese si sta prendendo sempre più consapevolezza dell'importanza dello studio dei fenomeni inerenti allo Space Weather. Istituzioni, università ed enti di ricerca e servizi italiani, INGV compreso, sono sempre più coinvolti in progetti nazionali e internazionali volti allo studio di questi fenomeni: un primo passo verso la ricerca delle soluzioni ai problemi che la complessa fenomenologia qui brevemente descritta può comportare.

Il motore di tali fenomeni è il Sole, e la conoscenza dei processi che da esso scaturiscono e che mostrano i loro effetti fino a Terra (e oltre) è fondamentale per avere, in futuro, previsioni sempre più accurate e in grado di fornire un preavviso sufficiente ad elaborare efficaci strategie di mitigazione.

Danzando tra le stelle: lo spettacolo delle aurore

Fabio Giannattasio

INGV| Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Chi ha avuto la fortuna di assistere dal vivo alle *aurore polari* potrà dire quanto uniche e spettacolari siano. Ma quali sono i meccanismi principali alla base dell'apparizione e dei colori dell'aurora, magnifici nastri colorati che solcano il cielo notturno?

Il **Sole**. Sempre lui. Anche alla base di questo incredibile fenomeno c'è il fatto che la nostra stella è un corpo estremamente dinamico. Molti fenomeni interessanti a cui dà luogo sono da attribuire all'energia immagazzinata e liberata dalla sua atmosfera e all'interazione di questa energia con il campo magnetico e l'atmosfera del nostro pianeta.

Così può accadere che dalla parte più esterna dell'atmosfera solare, la *corona*, vengano espulse in grande quantità particelle cariche ad alta energia (principalmente protoni ed elettroni) proiettate nello spazio in tutte le direzioni, anche verso la Terra.

Cosa accade quando le particelle di origine solare si scontrano con il campo magnetico terrestre?

Il campo magnetico terrestre si può rappresentare come una grande bolla di forma allungata, idealmente simile alla forma di una cometa, che avvolge il nostro pianeta e che viene chiamata "magnetosfera".

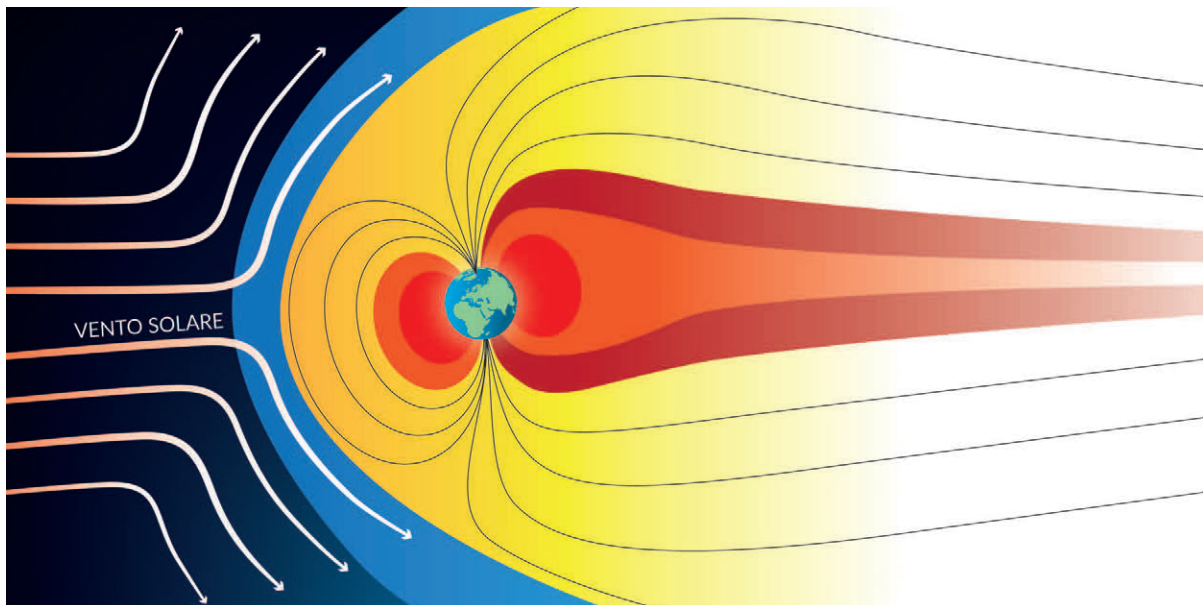


Figura 1 Il vento solare che incide sul campo magnetico terrestre. (Crediti: B. Angioni).

Figure 1 The solar wind that flows around the Earth's magnetic field. (Credits: B. Angioni).

Questa bolla costituisce una vera e propria **barriera** che protegge il nostro pianeta come uno scudo protettivo, impedendo alle particelle di entrare e raggiungere l'atmosfera, facendole fluire

lungo la superficie della bolla come lungo dei binari. Tuttavia, alcune particelle riescono ad entrare nell'atmosfera terrestre in corrispondenza delle **regioni polari**, dove precipitando incontrano i gas presenti nell'atmosfera, per lo più l'**azoto** e l'**ossigeno**, che inizialmente sono nel loro stato "a riposo" o "fondamentale".

Questo incontro tra particelle solari e particelle dell'atmosfera terrestre dà vita a un meccanismo per il quale, se l'energia trasferita è sufficientemente elevata, porta gli atomi dell'atmosfera (inizialmente a riposo) ad eccitarsi, ad accendersi, rispetto allo stato fondamentale.

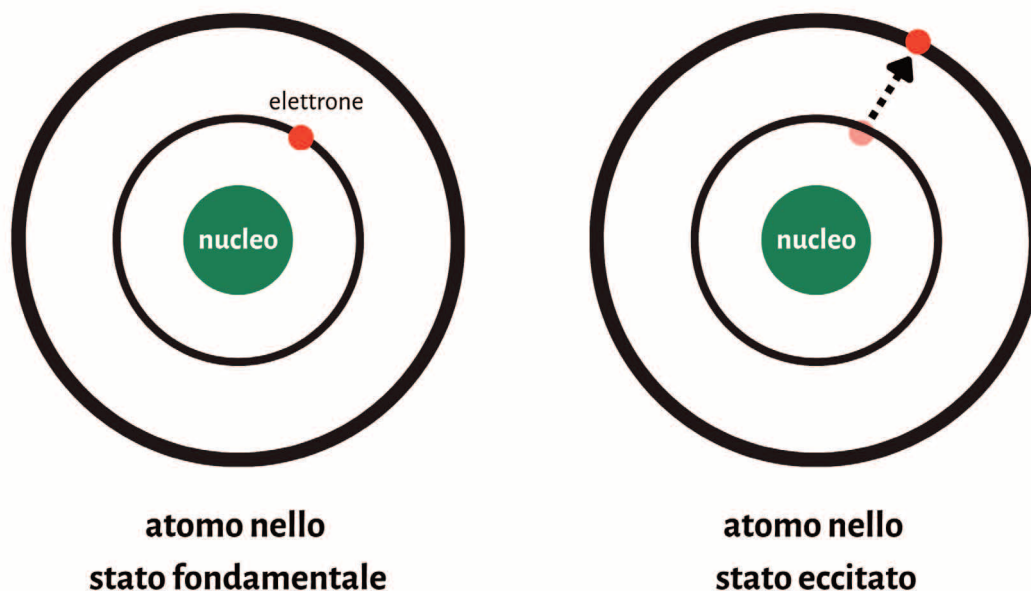


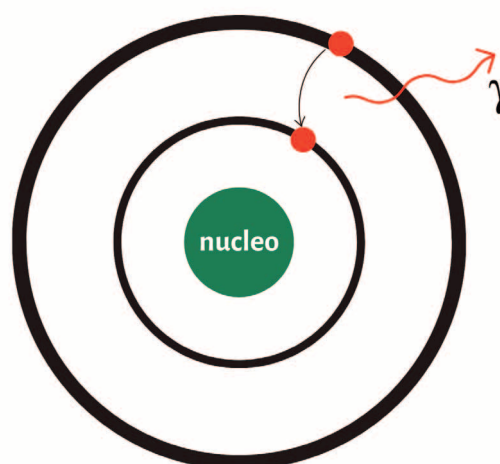
Figura 2 schema di eccitazione di un livello atomico. (Crediti: L. Cafarella).

Figure 2 scheme of the excitation of an atomic level. (Credits: L. Cafarella).

Tuttavia questa nuova condizione di stato eccitato, ovvero a più alta energia, **non è stabile**, in quanto le particelle tendono a voler tornare nello stato fondamentale meno energetico. Per far ciò devono quindi liberarsi dell'eccesso di energia che hanno ricevuto. Lo fanno ad esempio attraverso l'emissione di **onde elettromagnetiche**, che nella parte dello spettro catturata dai nostri occhi, è comunemente chiamata "luce visibile".

Figura 3 Ritorno allo stato stabile di un livello atomico eccitato tramite emissione di fotoni (Crediti: L. Cafarella).

Figure 3 Decay of an excited atomic level to its stable state through photon emission. (Credits: L. Cafarella).



Cosa definisce i colori dell'aurora?

Abbiamo visto come gli atomi eccitati dalle particelle solari emettano luce nel momento in cui tornano allo stato fondamentale. Naturalmente la luce emessa dipende da vari fattori, tra cui la tipologia dell'atomo eccitato. Ad esempio, l'**ossigeno** emette principalmente una luce nelle gradazioni del **verde-giallo**, mentre l'**azoto** irradia una luce nelle gradazioni del **rosso-viola**. E questo spiega perché le aurore polari si presentano solitamente in colori dalle tonalità del verde, giallo, rosso e viola. Quindi è questo è uno dei meccanismi che definisce i colori dell'aurora!



Figura 4 Aurora polare nei cieli dell'Europa del Nord. (Crediti: Andrei Baskevich per Canva).

Figure 4 Polar aurora above Northern Europe. (Credits: Andrei Baskevich, Canva archive).

Altri fattori che definiscono i colori dell'aurora

Ci sono altri fattori importanti che determinano i colori dell'aurora come la **quota** a cui questi urti avvengono. Infatti, va ricordato che la composizione della nostra atmosfera **non è la stessa** allontanandoci dalla superficie terrestre. Pertanto, la miscela di atomi di azoto, ossigeno ed altre specie meno abbondanti (come, ad esempio, l'idrogeno e l'elio) varia via via che ci spostiamo in altezza. Sopra i **240 km** di quota le aurore sono generate principalmente da transizioni energetiche dell'azoto, che abbiamo detto dare origine a emissioni di luce color rosso quando investito di energia di origine solare.

A quote più basse, dai **160 km** circa, le aurore sono generate principalmente dalle transizioni energetiche dell'ossigeno, esibendo quindi principalmente un colore verde. Ancora più in basso, intorno ai **95 km** di quota, le aurore appariranno per lo più di colore **blu/viola**, e dominerà il blu più in basso e il viola più in alto di questa quota.

Altro fattore importante che determina il colore delle aurore è l'**energia delle particelle solari**. Una stessa specie, ad esempio l'ossigeno, può originare aurore di diversi colori se investita da particelle a più bassa o a più alta energia.

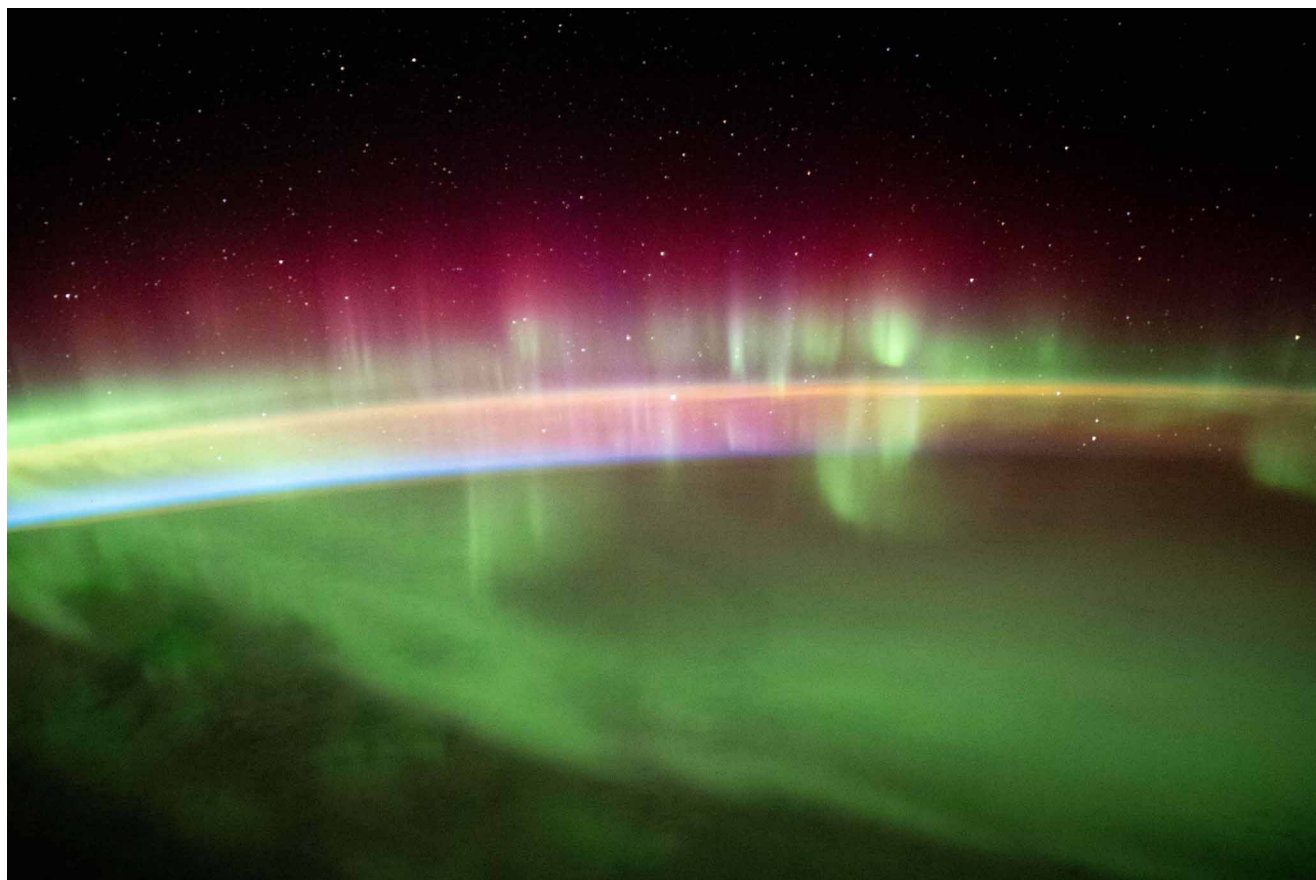


Figura 5 Immagine dell'aurora australe dalla Stazione Spaziale Internazionale. (Crediti: NASA).
Figure 5 A picture of the Southern hemisphere aurora from the International Space Station. (Credits: NASA).

Il mistero dell'arancione

Tuttavia non è sempre così semplice trovare una spiegazione ai colori dell'aurora. Recentemente per esempio sono state osservate in Canada delle aurore del tutto particolari, poiché esibivano un nastro centrale di uno spettacolare **colore arancione**. Eppure non dovrebbero in quanto nell'atmosfera terrestre non ci sono particelle che eccitandosi e poi rilassandosi emettono luce di quella specifica gradazione. Più precisamente, le molecole di azoto e gli ioni di azoto, nonché l'ossigeno molecolare, potrebbero in teoria produrre emissioni alle lunghezze d'onda corrispondenti al colore arancione. Tuttavia, tali emissioni dovrebbero essere molto più deboli di quelle associate ai colori tipicamente prodotti da quelle specie, sarebbero per questo motivo "nascoste".

Un'analisi più attenta delle aurore osservate potrebbe rivelare la **soluzione** all'arcano. Se aurore rosse appaiono a quote più alte e aurore verdi a quote più basse, la **sovrapposizione dei due colori** potrebbe aver prodotto le gradazioni arancioni-gialle osservate. Infatti, si possono originare aurore rosse a quote tra i 200 e i 400 km per via dell'eccitazione degli atomi di ossigeno da parte di elettroni a bassa energia, mentre si possono generare aurore verdi a quote più basse,

tra i 100 e i 150 km, per via dell'eccitazione sempre degli atomi di ossigeno da parte di elettroni a più alta energia. Nel mezzo, quindi, potrebbero essere presenti entrambi i processi e risultare in una combinazione che i nostri occhi percepiscono come aurore arancioni.

Dove si possono osservare le aurore?

Le *aurore polari*, come suggerisce il nome, sono visibili tipicamente ad **alte latitudini**. Il motivo risiede nella forma che ha il campo magnetico terrestre. Infatti in zona polare il campo magnetico è più intenso. Qui è in grado di guidare più facilmente le particelle cariche giù nell'atmosfera, dove collideranno con le particelle che costituiscono l'alta atmosfera terrestre.

Quando l'evento solare all'origine delle aurore è particolarmente intenso, non è da escludere la possibilità di osservare aurore anche a **latitudini ben più basse**. È il caso, ad esempio, di due eventi tra i più intensi mai osservati e registrati sulla Terra. Si tratta dell'evento del **Marzo 1989** [1] che provocò un vasto blackout nella regione canadese del Québec e quella che è passata alla storia come **tempesta di Halloween** [2] a cavallo tra l'Ottobre e il Novembre del 2003. In entrambi i casi le aurore polari furono visibili anche a basse latitudini, nei cieli della Florida e di Cuba, nei cieli del Texas. Al riguardo, è possibile trovare ulteriori approfondimenti in [3].

L'agenzia americana *Space Weather Prediction Center* [4] fornisce previsioni a breve termine (tipicamente a 30 minuti) dell'occorrenza di aurore nei cieli polari terrestri, liberamente consultabili.

Quando si possono osservare le aurore?

Le aurore si verificano tipicamente **seguendo le variazioni dell'attività solare**. In prossimità dei periodi di massima attività del Sole le aurore sono più comuni. È infatti più probabile che in questo periodo si verifichino eventi intensi di espulsione di particelle energetiche dall'atmosfera della nostra stella. Al contempo, ciò non esclude del tutto la possibilità di osservarle anche in periodi di attività solare relativamente quieti. Inoltre, i periodi migliori per osservare le aurore sono **intorno agli equinozi di primavera e autunno**, dove seppure le ore di buio sono ridotte rispetto all'inverno, l'orientamento reciproco tra il campo magnetico terrestre e quello di origine solare è più favorevole ad un eventuale ingresso di particelle nell'atmosfera terrestre. Dopodiché in inverno la maggiore lunghezza della notte e la sua maggiore "oscurità" favoriscono la possibilità di contemplare aurore. Ovviamente si devono scegliere notti senza luna. Insomma, i migliori periodi per godersi lo spettacolo delle aurore sono da **fine agosto – primi giorni di settembre fino ai primi giorni di aprile**. Una grande opportunità per gli appassionati!

Si possono osservare aurore polari su altri pianeti del Sistema Solare?

Già le sonde *Pioneer* e *Voyager* negli anni '70 e '80 avevano dimostrato l'esistenza di aurore sui giganti gassosi di Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Le osservazioni di *Pioneer Venus Orbiter* avevano mostrato poi le emissioni alle frequenze dell'ultravioletto dell'atmosfera notturna di Venere, a volte talmente intense da coprire l'intero emisfero. Altre scoperte emozionanti sono seguite all'avvento dell'era del telescopio spaziale *Hubble*. Ad esempio, **Ganimede**, la luna vulcanica di Giove, è sede di aurore di colore verde con processi generativi del tutto simili a quelli terrestri.

I colori dell'aurora su Marte, Venere e Giove...

Anche **Marte e Venere**, che non hanno un nucleo fuso fluido come la Terra e dunque non hanno un campo magnetico globale che li avvolge, mostrano aurore, seppur molto deboli. Al contrario, le aurore di **Giove** sono spettacolari per intensità (fino a 30 volte maggiore di quelle osservate a Terra) e vastità (hanno un'estensione diverse volte le dimensioni della Terra). Giove, il più grande dei pianeti del Sistema Solare, è in grado di generare un campo magnetico circa 16 volte più intenso di quello della Terra. Le aurore su quel pianeta sono generate dalla compressione della magnetosfera ad opera del vento solare ad alta densità.

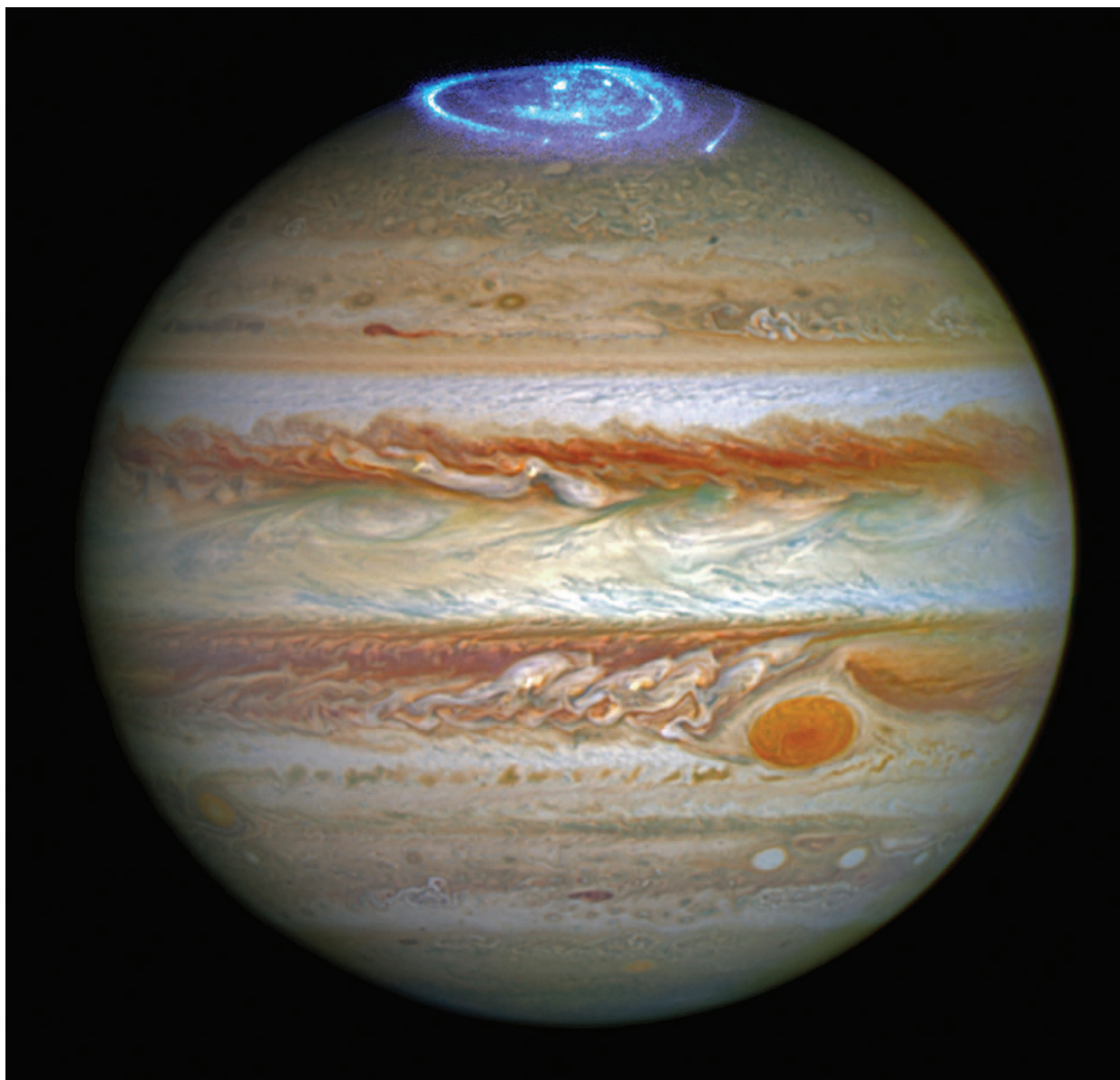


Figura 6 Immagine nella banda del lontano ultravioletto di un'aurora su Giove, ripresa dal telescopio spaziale Hubble. (Crediti: NASA).

Figure 6 Picture in the far ultraviolet band of an aurora on Jupiter, taken by the Hubble space telescope. (Credits: NASA).

... e su Saturno, Urano e Nettuno

E le aurore su **Saturno** non sono di certo meno spettacolari, e anche in questo caso avvengono secondo meccanismi simili a quelli che osserviamo sul nostro pianeta. Tuttavia, nel caso dei giganti gassosi, la maggior parte dell'energia è emessa alle frequenze infrarosse dello spettro elettromagnetico e in misura minore nel visibile, nei raggi X e alle frequenze radio. Per continuare, nell'atmosfera di **Urano** i gas più abbondanti sono idrogeno ed elio, e le aurore sono generate principalmente alle frequenze dell'ultravioletto e del radio nello spettro elettromagnetico, risultando dunque invisibili all'occhio umano. Infine, la complessa magnetosfera di **Nettuno** è tale da creare diverse regioni aurorali sparse nell'atmosfera del pianeta.

Pertanto, le aurore esistono e sono osservate (non solo nel visibile) anche sugli altri pianeti, ciascuno con le proprie peculiarità e caratteristiche.

Intanto, chi ha la fortuna di ammirarle dal vivo nei suoi colori multiformi se le gode qui, sul nostro piccolo, blu e accogliente patrimonio da preservare chiamato Terra.

Sitografia

[1] <https://ingvambiente.com/2023/03/13/la-grande-tempesta-magnetica-del-13-marzo-1989/>

[2] <https://ingvambiente.com/2018/10/31/le-tempeste-di-halloween/>

[3] <https://ingvambiente.com/2021/12/16/che-tempo-fa-nello-spazio/>

[4] <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>

SuperDARN: come “fotografare” la ionosfera con i radar

Igino Coco

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Tutti sappiamo, a grandi linee, cosa sia un “radar”. Al cinema e in televisione spesso lo vediamo in azione nella sua applicazione più nota, ovvero in ambito militare, per identificare oggetti volanti in avvicinamento ben prima che ci raggiungano. Ma, ai poli, esistono anche radar che guardano dritto sopra le nostre teste per studiare l’alta atmosfera terrestre.

La Terra si trova immersa nel **vento solare**, un flusso di particelle elettricamente cariche che il Sole emette nello spazio e che permea tutto il sistema solare. Grazie al **campo magnetico** di cui è dotato, il nostro pianeta ne viene efficacemente schermato. Se il vento solare riuscisse a penetrare in modo massiccio nell’atmosfera, ne perturberebbe seriamente gli equilibri chimici, mettendo a rischio lo sviluppo della vita stessa. Il “guscio” formato dal campo magnetico terrestre sotto l’azione di spinta del vento solare prende il nome di **magnetosfera**. L’attività del Sole modula continuamente il flusso di particelle, con effetti di varia natura ed intensità osservabili sia dalla superficie della Terra, sia a bordo di satelliti in orbita. Gli effetti che osserviamo a terra dell’interazione tra vento solare e magnetosfera spesso sono dovuti alle correnti elettriche che si inducono nella **ionosfera**, la parte più alta dell’atmosfera terrestre la quale, a sua volta, contiene una elevata percentuale di particelle elettricamente cariche.

Capire come queste correnti evolvano dinamicamente è di grandissima importanza proprio a causa dell’impatto che, secondo diverse modalità, possono avere sulla vita di tutti i giorni. Per esempio, esse possono disturbare fortemente i segnali che arrivano dai satelliti della rete GNSS, causando errori di posizione del nostro GPS o, addirittura, la perdita totale del segnale, rendendo inutili i nostri sofisticati sistemi di orientamento.

Per questo motivo è importante monitorare lo stato della ionosfera e osservare i fenomeni che qui hanno luogo, in particolare nella ionosfera polare dove essi hanno maggiore impatto.

In questo quadro, importanti osservazioni arrivano dall’utilizzo di particolari radar, che costituiscono la rete **SuperDARN**.

La rete SuperDARN

L’acronimo “SuperDARN” significa **Super Dual Auroral Radar Network**, e identifica una rete di installazioni radar situate alle medie e alte latitudini, sia nell’emisfero Nord sia nell’emisfero Sud. Ogni installazione funziona in modo sincronizzato a tutte le altre e senza interruzioni (eccezion fatta per sporadici malfunzionamenti o periodi di manutenzione pianificata), ed è costituita da una schiera di 16 antenne, per un’estensione pari a circa quattro campi da calcio. La geometria è studiata per poter indirizzare, nel modo più efficace possibile, un fascio di onde radio lungo un certo numero di direzioni contigue (da 16 a 24 a seconda del radar), in maniera da coprire un campo di vista ampio fino a circa 78°.

I campi di vista di tutti i radar attualmente operativi si possono vedere schematizzati in Figura 1. Si può notare come questi spesso si sovrappongano, dando luogo a un intreccio (“DARN”, in inglese, significa proprio questo: trama, rammendo, cucitura) che ricopre una vastissima porzione di spazio, in modo da coprire spesso una stessa regione di spazio ma da differenti angolature.

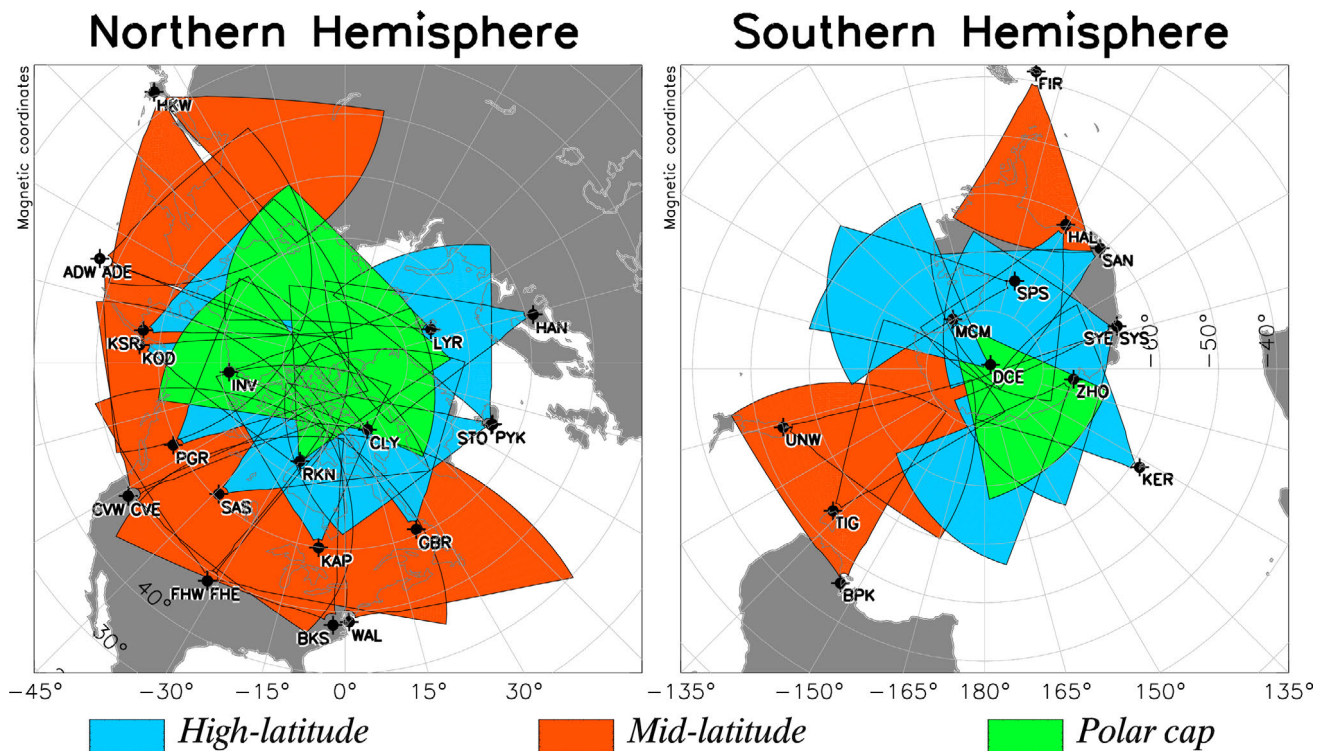


Figura 1 I campi di vista dei radar della rete SuperDARN. (Crediti: Virginia Tech. [1]).

Figure 1 SuperDARN radars fields of view. (Credits: Virginia Tech. [1]).

Come funzionano i radar SuperDARN?

Per poter capire il funzionamento di un radar del tipo di SuperDARN, dobbiamo partire un po' da lontano e fornire qualche informazione di base sul concetto di radar.

Le nostre orecchie sono dei radar?

La risposta a questa bizzarra domanda è: in un certo senso sì. L'apparato uditivo degli esseri umani come di molti altri animali, infatti, è in grado di decodificare le vibrazioni e modulazioni contenute nelle onde sonore, che si propagano nell'aria o in qualunque altro mezzo denso. Se ci trovassimo fermi rispetto a un oggetto in movimento che emette onde sonore, noteremmo che l'altezza del suono cambia, passando da più acuto a più grave man mano che l'oggetto si avvicina a noi e poi si allontana di nuovo. Tale fenomeno si chiama **"effetto Doppler"**, e lo sperimentiamo continuamente, per esempio quando un'ambulanza o un'auto della polizia a sirene spiegate ci passano vicino (Figura 2). La sorgente, in realtà, continua a emettere onde sempre con la stessa frequenza, ma il moto relativo tra sorgente e osservatore (o, in questo caso, sarebbe meglio dire "ascoltatore") causa una compressione o dilatazione della frequenza percepita. Se il nostro cervello contenesse un oscilloscopio, saremmo in grado di misurare questa nuova frequenza e, calcolando il rapporto con la frequenza originale della sirena, potremmo ricavare la velocità con cui si muove la sorgente.

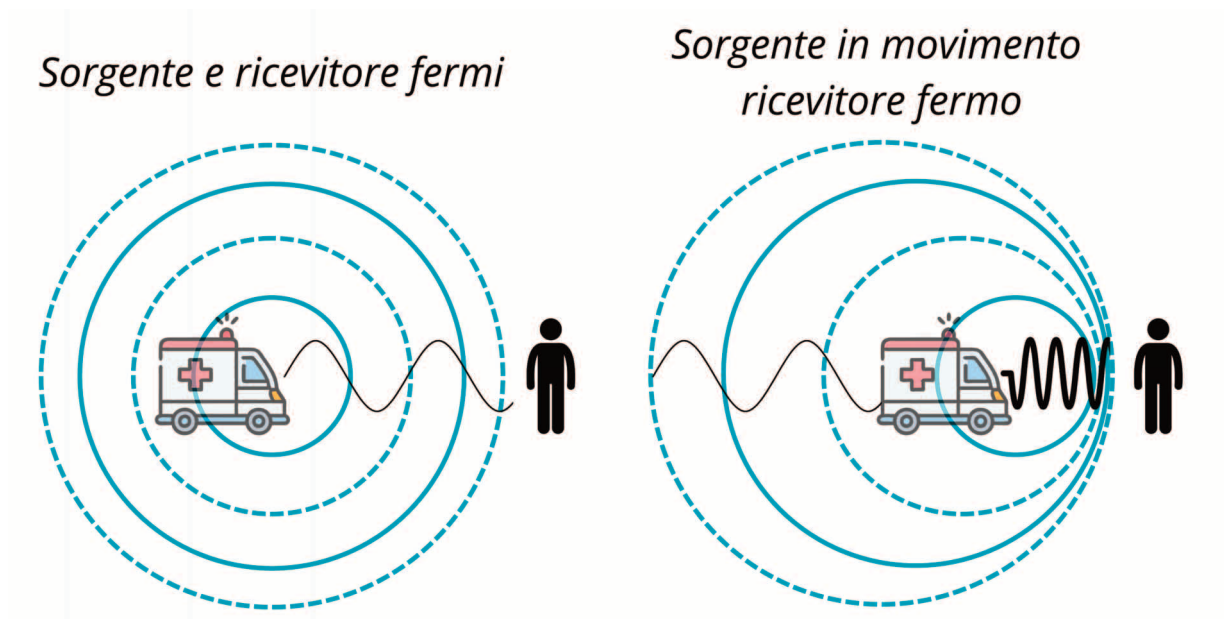


Figura 2 Visualizzazione schematica dell'effetto Doppler. (Crediti: I. Coco con Canva).

Figure 2 A schematic view of the Doppler effect. (Credits: I. Coco using Canva).

Il radar a effetto Doppler

Un radar a effetto Doppler funziona, tutto sommato, in modo piuttosto simile alle nostre orecchie. La differenza fondamentale è che in questo caso lui, il radar, è sia sorgente che osservatore. Esso emette un segnale elettromagnetico di frequenza nota che rimbalzando contro un oggetto in movimento, viene totalmente riflesso all'indietro. Il radar, infine, lo misura con una frequenza leggermente modificata da cui si può risalire alla velocità dell'oggetto, in avvicinamento o in allontanamento.

In questo modo, un radar militare esegue una “spazzata” focalizzando la sua emissione lungo direzioni via via differenti del suo campo di vista coprendo, al limite, un'intera circonferenza. Se l'onda emessa incontra, ad esempio, un aereo in avvicinamento, esso apparirà sullo schermo del radar e sarà possibile capire da che direzione proviene e a che velocità sta andando. Inoltre, misurando il lasso di tempo che intercorre tra il segnale emesso e quello ricevuto indietro, si può determinare quanto è lontano da noi l'oggetto in questione.

Le applicazioni del radar, al giorno d'oggi, sono sterminate: dall'ambito dell'aviazione e navigazione civile o militare, all'indagine del sottosuolo (il cosiddetto “georadar”).

Vi sono anche applicazioni che riguardano la ricerca scientifica in campo atmosferico e ionosferico. Di fatto, il primo prototipo di un simile apparato fu proprio la cosiddetta “ionosonda”, realizzata negli anni 20 dello scorso secolo. La ionosonda sfrutta la riflessione verticale di strati di atmosfera ionizzati, ovvero molto ricchi di ioni ed elettroni liberi, che si trovano tra circa 100 e 300 km di quota. Tale apparato fu poi modificato e perfezionato durante la Seconda Guerra Mondiale fino ad ottenere il moderno radar.

Cosa misurano nella pratica i radar SuperDARN?

Immaginiamo un torrente di montagna che scorra in una certa direzione. Il moto dell'acqua, in generale, non è quasi mai liscio e omogeneo, ma presenta onde o piccoli vortici e mulinelli.

In alcuni casi questi vortici restano stazionari in un punto (ad esempio se si formano in prossimità di ostacoli come rocce affioranti o variazioni di pendenza). In altri casi vengono trasportati dalla corrente per un tratto, finché non si dissolvono.

Anche l'atmosfera terrestre può essere pensata come un fluido. All'acqua è necessario sostituire le masse d'aria che si spostano sotto l'azione dei gradienti termici e di pressione. Agli strati più alti, nella ionosfera, la dinamica delle masse di particelle ionizzate è pilotata da un complesso sistema di correnti elettriche, a loro volta generate dall'interazione del campo magnetico terrestre con il vento solare, come abbiamo accennato sopra.

In Figura 3 possiamo vedere uno schema degli effetti di tale interazione alle alte latitudini. La catena di eventi è più o meno la seguente:

1. le particelle cariche del vento solare raggiungono la Terra ma vengono in gran parte fermate dal suo campo magnetico, e non riescono a penetrare, se non in minima parte, nella magnetosfera;
2. scivolando lungo i fianchi della magnetosfera, il vento solare induce delle correnti elettriche nel suo lato interno che si propagano in direzione opposta al Sole;
3. il campo magnetico terrestre funge da guida per tali correnti che scendono nella ionosfera e poi risalgono (correnti allineate al campo), attraversando le cappe polari nella direzione alba-tramonto (correnti perpendicolari al campo, o **correnti di Pedersen**);
4. le particelle cariche della ionosfera, seguendo le leggi dell'elettrodinamica, vengono messe in movimento da queste correnti lungo due grandi vortici (le linee gialle in figura), proprio come se fossero dei fiumi.

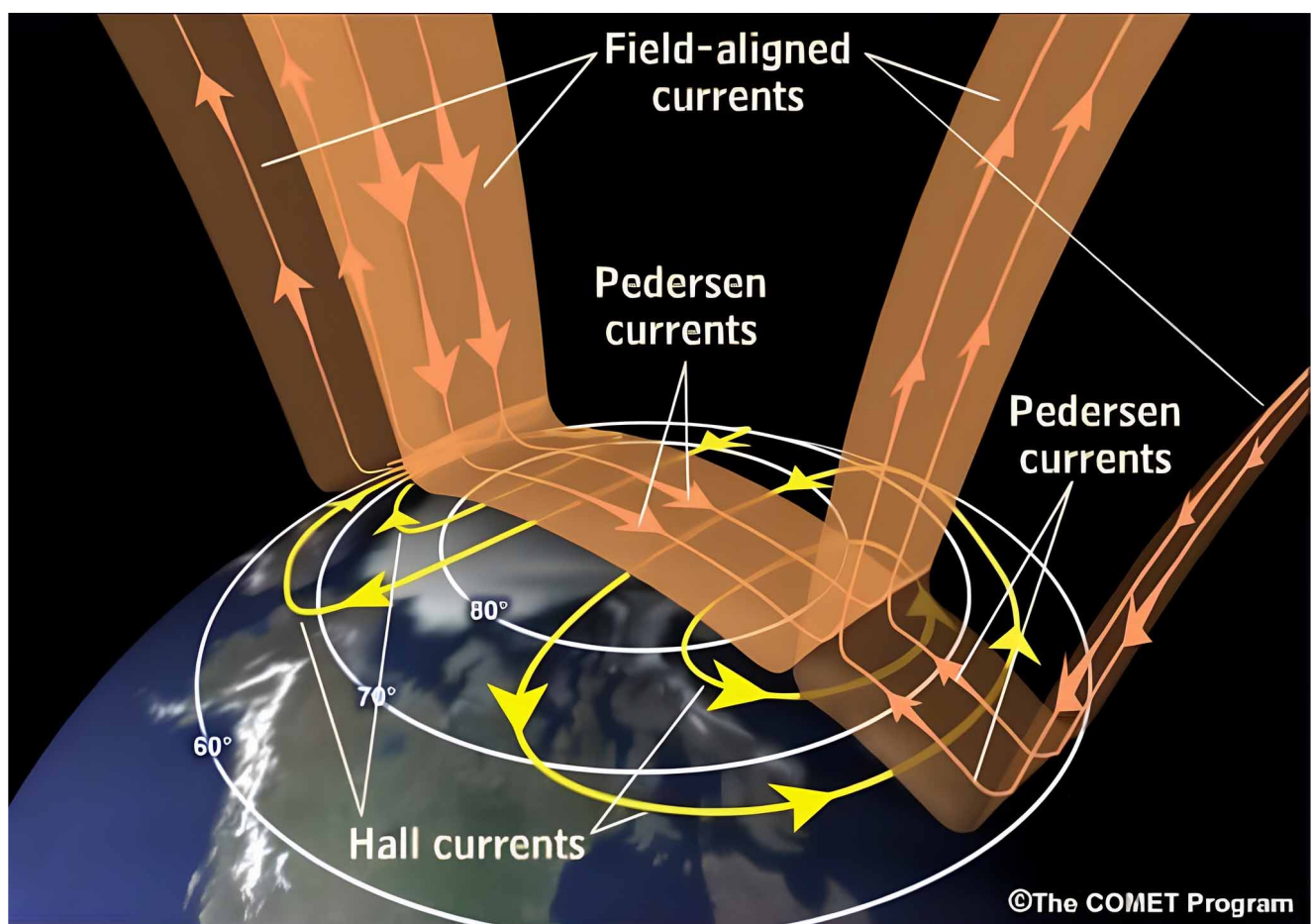


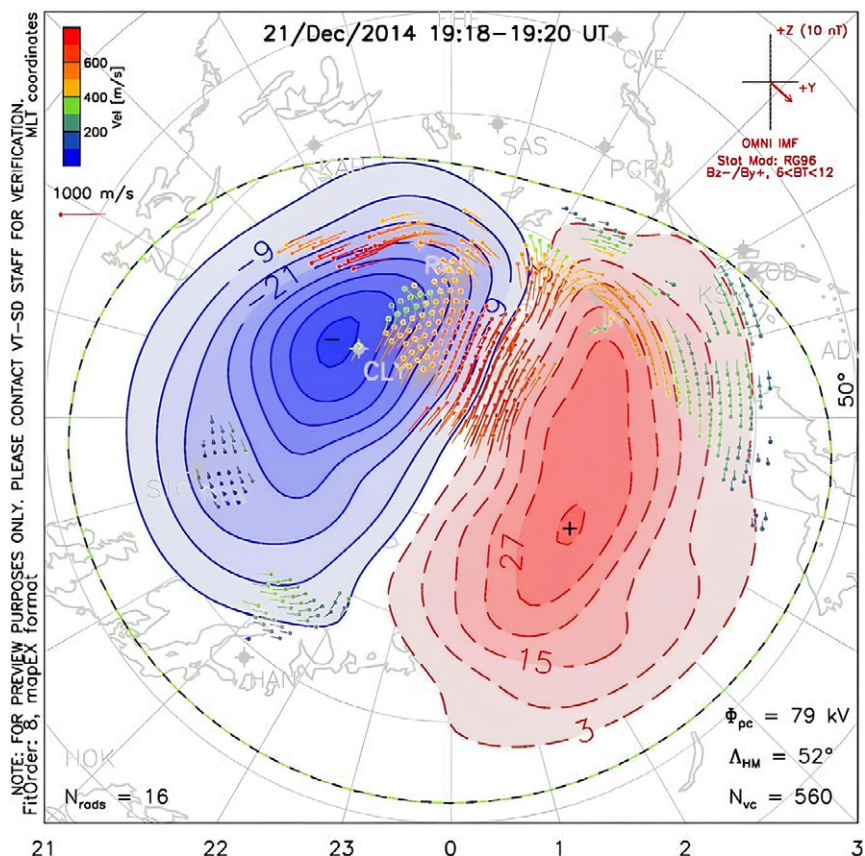
Figura 3 Schema delle correnti ionosferiche alle alte latitudini. (Crediti: The COMET Program [2]).

Figure 3 A schematic representation of the ionospheric currents at high latitudes. (Credits: The COMET Program [2]).

All'interno di questo flusso ordinato è presente un gran numero di cosiddette “irregolarità”. Sono l'equivalente dei piccoli vortici nel fiume di cui abbiamo parlato poco sopra, che si formano e si rompono in modo molto dinamico. Nel caso della ionosfera, più che di veri e propri vortici, parliamo di compressioni e rarefazioni locali della densità del flusso di particelle. Si comportano come se fossero dei piccoli “tappi” di flusso più denso che si muovono insieme al flusso principale. Quando un'onda radio di opportuna frequenza viene inviata verso la ionosfera, se la dimensione spaziale di questi tappi è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda, essa viene rimbalzata all'indietro ritornando verso il punto di partenza. Il radar rileva l'onda di ritorno, sfasata per effetto Doppler rispetto all'onda emessa, perché l'ostacolo incontrato si muove rispetto al radar con una certa velocità. Così, proprio come avviene per i radar usati in modo più tradizionale, riusciamo a determinare la velocità di un certo punto del flusso ionosferico. Infine, puntando tanti radar in direzioni diverse, ricostruiamo il moto complessivo delle particelle cariche nella ionosfera. È un po' come fare una fotografia o una lastra a raggi X. In Figura 4 è possibile vedere un esempio di ricostruzione del moto delle particelle cariche nella ionosfera polare dell'emisfero Nord. Tale moto si organizza in due grandi vortici, come detto sopra, o **celle di convezione**, che “respirano” al variare delle condizioni del vento solare. Quando ci sono le cosiddette emissioni di massa coronale dal Sole, flussi molto intensi di particelle arrivano nei pressi della Terra. Il sistema di correnti sopra descritto si intensifica enormemente e il campo magnetico terrestre risulta perturbato a livello globale (**tempeste magnetiche**). Come conseguenza le celle di convezione diventano molto più estese. Poiché molte particelle precipitano nella ionosfera, aumenta anche il numero delle irregolarità e diventa più intenso il segnale misurato dai radar.

Figura 4 Esempio di convezione ionosferica ricostruita grazie ai radar SuperDARN. Mappa generata on line [1].

Figure 4 Example of ionospheric convection reconstructed by means of SuperDARN measurements. On-line generated map [1].



L'Italia e SuperDARN

Nell'ambito di SuperDARN, il Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (**PNRA**) ha finanziato la costruzione di due radar. Il sito che le ospita è la base italo-francese **Concordia**, a Dome C, nel mezzo del plateau antartico, a più di 3000 metri di quota. L'impresa ha richiesto uno sforzo logistico e tecnico considerevole. Sono state impegnate diverse istituzioni italiane (**INAF**, **CNR** ed **ENEA**) ed estere (**CNRS** e **IPEV** da parte francese, e un supporto dall'università del Saskatchewan, Canada) per più di quindici anni. Alla fine del 2013 il primo radar, denominato "**Dome C East**" (**DCE**) ha iniziato le operazioni, seguito da "**Dome C North**" (**DCN**) a inizio 2019. Entrambi i radar sono gestiti dall'Istituto Nazionale di Astrofisica (**INAF**) e ricercatori **INGV** collaborano attivamente con i colleghi dell'**INAF** per l'analisi dei dati.

L'immagine in Figura 5 mostra una veduta della schiera di antenne del radar DCE con lo sfondo del sole che tramonta sul plateau antartico. Quando la lunga notte polare ha inizio, i radar sono completamente isolati per più di sei mesi. Nessuno può raggiungere il sito, che dista solo pochi chilometri dalla base, poiché d'inverno le temperature possono arrivare fino a -90° . Sarebbe troppo pericoloso rimanere all'aperto anche solo per pochi minuti. Questo rende l'idea di come l'apparato debba essere il più possibile robusto, affidabile, e automatizzato.

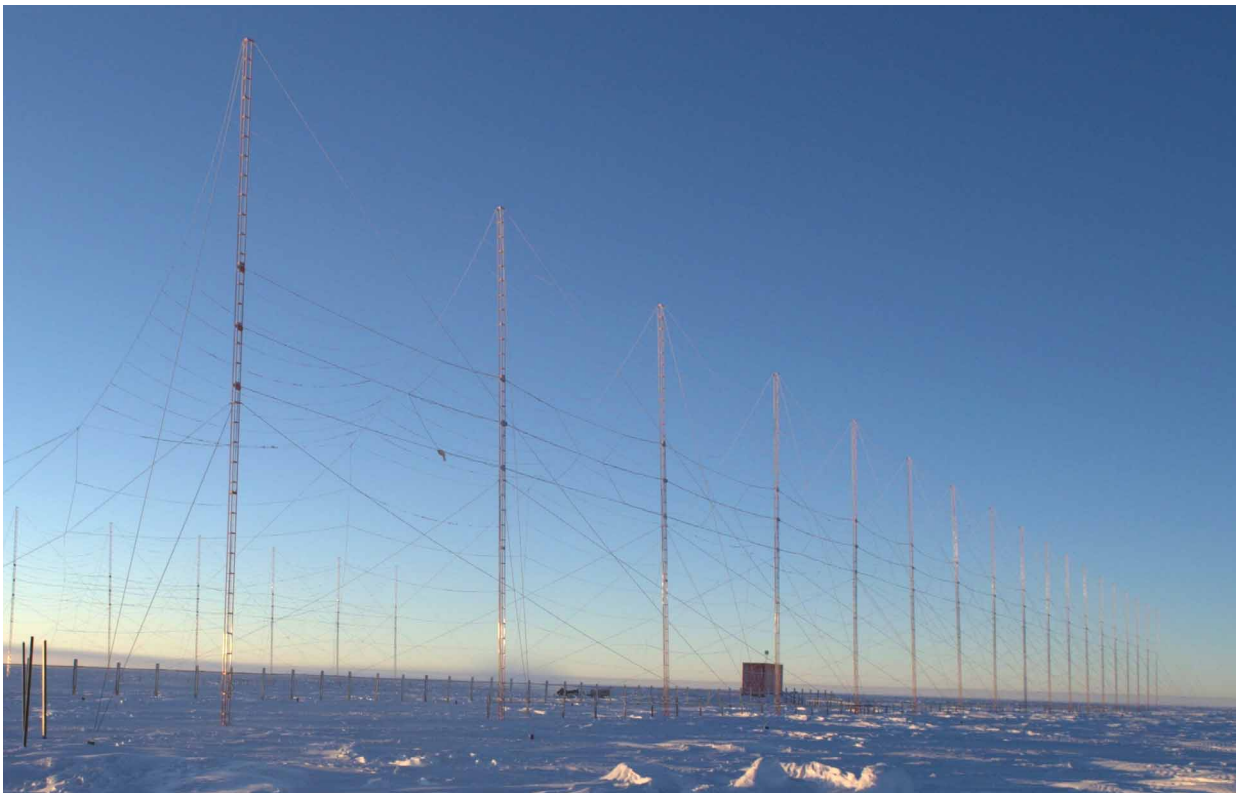


Figura 5 Il sole tramonta sul sito SuperDARN DCE, presso la base italo-francese di Concordia, sul plateau antartico. (Crediti: PNRA/IPEV).

Figure 5 Sun sets on DCE SuperDARN site, nearby the Italian-French base of Concordia, in the middle of the Antarctic plateau. (Credits: PNRA/IPEV).

Sitografia

- [1] <http://vt.superdarn.org/>
- [2] <https://www.comet.ucar.edu/>

Quanta turbolenza c'è nel cielo!

Paola De Michelis, Igino Coco, Fabio Giannattasio, Silvia Pau, Michael Pezzopane e Roberta Tozzi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

I dati dallo spazio ci aiuteranno a capire come il fenomeno fisico della turbolenza nella ionosfera influenzi la propagazione dei segnali radio e l'accuratezza dei sistemi GPS.

Cos'è la turbolenza?

Sebbene conosciuta fin dai tempi di Leonardo da Vinci, la turbolenza (dal latino “*Turba*”, ovvero folla, disordine, confusione) rappresenta un problema non ancora risolto nell'ambito della fisica. Scientificamente, il termine “turbolenza” descrive il moto irregolare e apparentemente casuale di un fluido. Da oltre sei secoli, i fisici cercano di cogliere l'essenza di questo fenomeno, che si manifesta nelle situazioni più svariate: dall'incontro di un fiume con i piloni di un ponte, negli arabeschi formati dal fumo di una sigaretta o nelle volute del fumo che sale da un falò fino ai ghirigori creati dal caffè versato in un bicchiere di latte. La turbolenza è visibile anche nel moto vorticoso delle masse nuvolose che siamo soliti vedere nelle immagini satellitari e nelle scie lasciate dagli aerei che continuamente attraversano i nostri cieli (Figura 1).



Figura 1 Esempi di dinamiche turbolente nei fluidi. A partire dall'alto e da sinistra: i) il flusso d'acqua di un torrente che incontra una rapida (crediti: jatin_kumar, flickr.com); ii) volute di fumo di una sigaretta; iii) espansione di una “macchia” di latte nel caffè (crediti: Connie_Ma, Flickr.com); iv) sotto, formazioni nuvolose a vortice. (Crediti: P. Chartier).

Figure 1 Examples of turbulent dynamics in fluids. Starting from the top left: i) the water flow of a stream encountering a rapid (credits: jatin_kumar, flickr.com); ii) swirls of cigarette smoke; iii) the spreading of a “splash” of milk in coffee (credits: Connie_Ma, Flickr.com); iv) below, swirling cloud formations. (Credits: P. Chartier).

Perché è importante studiare la turbolenza nello spazio che circonda il nostro pianeta?

Anche il Sole, con la sua attività, può dar vita a una serie di fenomeni di carattere turbolento, che possono influire sull'uomo e più in generale sull'attività antropica. Il Sole emette continuamente un flusso di particelle elettricamente cariche, noto come "vento solare", che si propaga nello spazio interplanetario e raggiunge anche la Terra, interagendo con il campo magnetico del nostro pianeta. Una delle principali funzioni del campo magnetico terrestre è proprio quella di proteggerci dal vento solare, deviandone la maggior parte (Figura 2). Tuttavia una parte di queste particelle riesce a penetrare all'interno della cavità magnetica che circonda la Terra, chiamata "magnetosfera", e arriva fino alla ionosfera, che è in parte composta da particelle elettricamente cariche. L'interazione genera un complesso sistema di correnti elettriche e un ambiente fortemente instabile: i flussi di ioni ed elettroni finiscono per instaurare moti vorticosi, simile ai moti d'acqua che si formano in un torrente quando incontra ostacoli lungo il suo percorso. **Questi "vortici ionosferici" possono interferire con le radiotrasmissioni e con il sistema globale di navigazione satellitare (GNSS – Global Navigation Satellite System) utilizzato per la navigazione e il posizionamento preciso dei sistemi GPS ("Global Positioning System").**

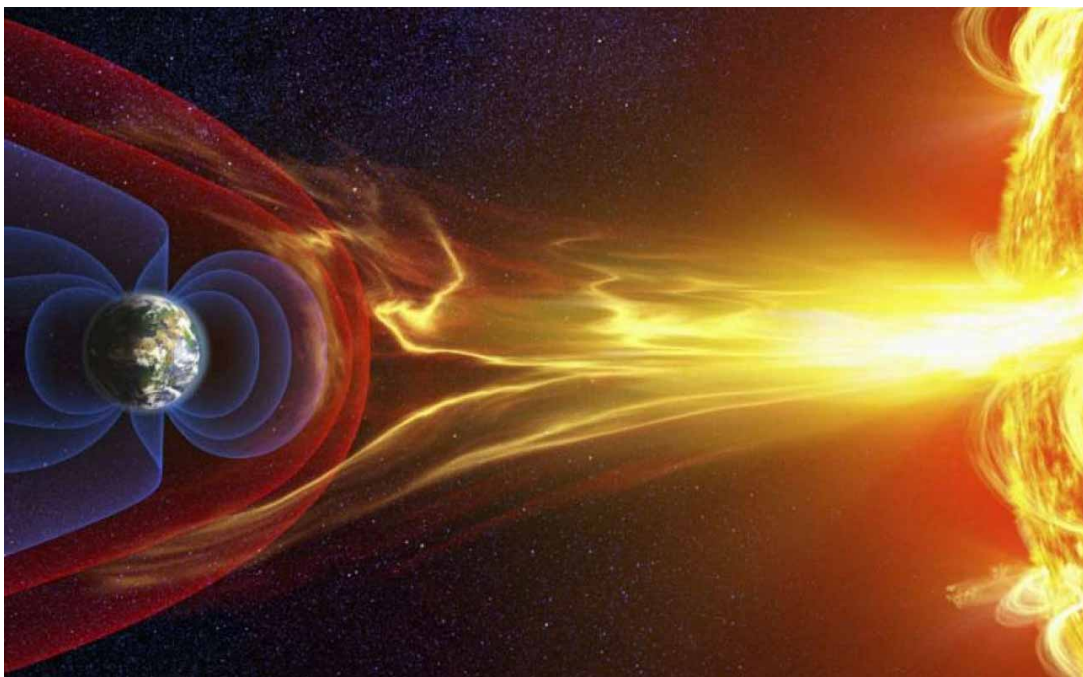


Figura 2 Il vento solare viene deflesso dal campo magnetico terrestre. (Crediti: NASA).

Figure 2 The solar wind is deflected by the Earth's magnetic field. (Credits: NASA).

Negli ultimi decenni, la nostra dipendenza dai sistemi di navigazione satellitare è cresciuta enormemente. L'aviazione e la marina utilizzano massivamente i servizi GNSS e ne dipendono, così come numerose applicazioni critiche: il controllo ferroviario, la gestione del traffico autostradale, l'agricoltura di precisione, la risposta alle emergenze. Anche molte attività quotidiane, come le operazioni bancarie, le operazioni di telefonia mobile, e il controllo delle reti elettriche, sono facilitate dal *timing* preciso fornito dal GPS. Poiché le infrastrutture critiche nazionali e l'economia sono sempre più dipendenti dai servizi di posizionamento, navigazione e temporizzazione, **la società è vulnerabile alle interruzioni che possono derivare da particolari condizioni meteorologiche spaziali e che possono influenzare i sistemi tecnologici.**

In questo quadro è perciò di fondamentale importanza capire nel dettaglio **come e dove la turbolenza nella ionosfera si forma e si sviluppa, al fine di prevenire ed eventualmente mitigare possibili problemi legati alle comunicazioni radio e satellitari**. Infatti, anche se la turbolenza è considerata ancora un problema aperto, per il quale non disponiamo di una teoria completa ed esaustiva, negli ultimi anni sono stati fatti molti passi avanti che hanno consentito di elaborare, tra l'altro, una teoria statistica della turbolenza superando in questo modo l'ostacolo posto dall'impredicibilità e caoticità del moto stesso.

In questo contesto, **l'Agenzia Spaziale Europea (ESA)** ha finanziato il progetto **"INTENS"** (Characterisation of IoNospheric TurbulENCE level by Swarm constellation), guidato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e in collaborazione con l'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) e il National Observatory of Athens (NOA). Utilizzando i dati raccolti dai satelliti Swarm (Figura 3), il progetto ha permesso di monitorare il campo magnetico e la densità elettronica della ionosfera per studiare **l'impatto dei processi di turbolenza sui segnali GPS**. Si tratta della prima analisi completa condotta su un così vasto campione di misure in situ, impiegando diverse quantità fisiche e permettendo studi sia a livello locale che globale.

I risultati hanno rivelato che le irregolarità nella densità del plasma ionosferico, generate da processi turbolenti, possono interferire con i segnali GPS, causando interruzioni temporanee o una riduzione della loro precisione. Questa ricerca fornisce dati preziosi per affinare i modelli di previsione, consentendo di mitigare tali disturbi e migliorare l'affidabilità dei sistemi di navigazione satellitare, che sono diventati essenziali per numerosi settori chiave della nostra società.

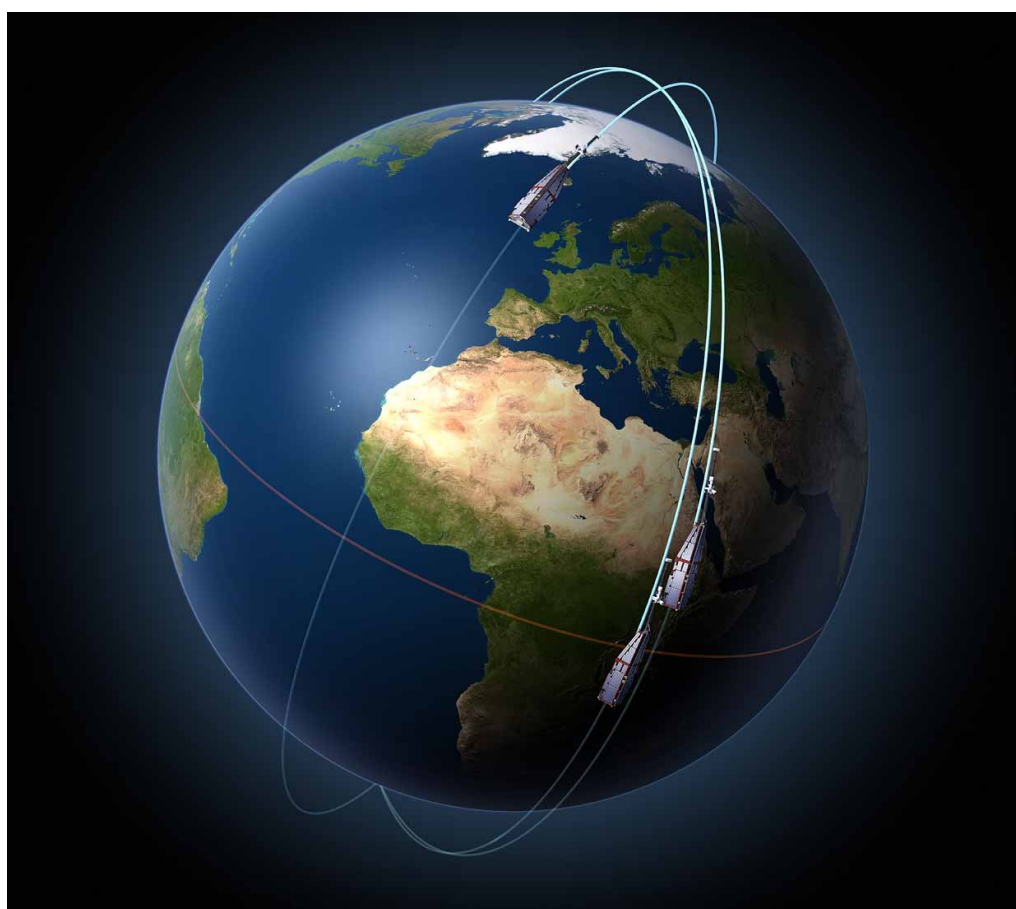


Figura 3 Le configurazioni orbitali dei tre satelliti Swarm dell'ESA. (Crediti: ESA–P. Carril, 2013).
Figure 3 The orbital configurations of the three ESA Swarm satellites. (Credits: ESA–P. Carril, 2013).

Una settimana di ordinaria follia... Solare!

Igino Coco

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

L'attività solare in questi anni sta aumentando. Brillamenti più intensi potrebbero diventare più frequenti e causare danni alle comunicazioni e ai sistemi di posizionamento. Un team di esperti INGV controlla da vicino l'evoluzione e gli effetti offrendo ogni settimana informazioni sulla Meteorologia Spaziale.

Il ciclo solare è in prossimità del suo massimo. Questo vuol dire che l'attività del Sole è particolarmente elevata e ne abbiamo avuto la prova **nella seconda metà di marzo 2024**, in cui i "meteorologi spaziali" non si sono certo annoiati! In questo contributo vi mostreremo una panoramica di una tipica catena di eventi di Meteorologia Spaziale, dal Sole alla Terra, durante una settimana piuttosto attiva dal punto di vista dell'attività solare.

Partiamo dal Sole...

Attualmente ci troviamo nel **ciclo solare 25**. La numerazione identifica il ciclo da quando abbiamo cominciato ad esserne consapevoli, ossia a partire dal **1755**.

Il ciclo in corso è iniziato nel 2019 e terminerà, plausibilmente, intorno al 2030. Siamo circa a metà, in prossimità dunque del massimo dell'attività per questo decennio. In queste situazioni, sul disco solare sono visibili molte macchie, testimonianza di alta attività. Nell'immagine seguente è presentata la situazione del Sole a metà marzo 2024, quando erano ben visibili almeno sette gruppi di macchie. Tra questi uno, identificato come 3615, è risultato particolarmente attivo (Figura 1, regione cerchiata in rosso). Dove sono presenti gruppi di macchie si formano degli "anelli" magnetici in grado di accumulare energia che può essere eventualmente rilasciata sotto forma di esplosioni di radiazione, chiamati **"brillamenti" (Solar Flares)**.

Dal **gruppo di macchie 3615** sono partiti numerosi **brillamenti di notevole intensità**. In particolare, quattro di essi hanno superato la soglia di **rischio per l'assorbimento dei raggi X nell'atmosfera** (scala fissata dal *National Oceanic and Atmospheric Administration* statunitense). Infatti, i flussi di **raggi X associati ai brillamenti raggiungono la Terra in pochi minuti** dando spesso luogo a **forti ionizzazioni nello strato più alto dell'atmosfera**, la ionosfera. L'arrivo dei raggi X sulla ionosfera provoca un aumento della densità di elettroni rispetto allo stato non perturbato.

Perché ci dovremmo preoccupare di questo eccesso di elettroni?

Perché esso nuoce alle **trasmissioni radio** nella particolare banda di frequenze che viene utilizzata soprattutto nella navigazione marittima e aerea per comunicare su lunghe distanze. Inoltre, una densità di elettroni molto elevata nella ionosfera può **degradare i segnali che provengono dai satelliti GNSS** e influenzare la precisione nel posizionamento restituito dai ricevitori e dagli apparati che utilizzano il sistema **GPS**.

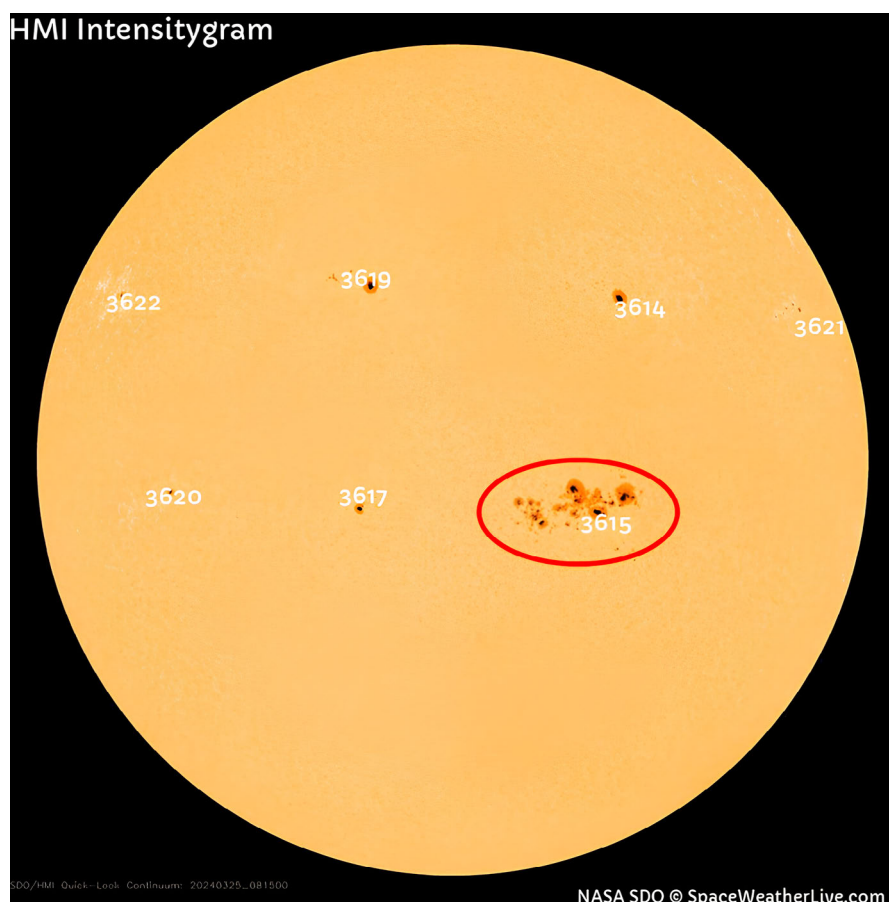


Figura 1 Un'immagine del sole del 25 marzo 2024. Sono ben visibili almeno sette gruppi di macchie. Tra questi uno, identificato come 3615, è risultato particolarmente attivo. (Crediti: NASA/SDO tramite [1]).

Figure 1 An image of the Sun on 25 March 2024. At least seven sunspot groups are clearly visible. Among them one, identified as 3615, proved to be particularly active. (Credits: NASA/SDO through [1]).

I brillamenti simpatici

Per capire l'impatto che può avere un brillamento solare sul sistema Terra prendiamo come esempio uno dei brillamenti osservati il **23 marzo 2024**. Questo è stato un brillamento particolarmente intenso, classificato come **classe X, la più intensa nella scala delle classificazioni dei brillamenti solari**. La classificazione prevede cinque classi di intensità (in ordine crescente di intensità esse sono A, B, C, M e X, ed ogni classe è dieci volte più intensa di quella precedente). Il brillamento di marzo ha presentato una interessante particolarità: era costituito in realtà da due brillamenti pressoché simultanei, verificatisi "in tandem" in due diverse regioni attive. Tali fenomeni prendono il nome di "**brillamenti simpatici**" (Sympathetic solar flares), dall'etimologia greca del termine: syn (con) + pathos (passione, sentire). In sostanza vuol significare che le due regioni sono in risonanza tra loro e partecipano allo stesso fenomeno fisico.

Il brillamento simpatico ha prodotto una accelerazione di particelle molto energetiche (**Solar Particle Event**, o SPE [2]) e **potenzialmente pericolose** poiché **sono in grado di causare danni alle strumentazioni a bordo dei satelliti, penetrare nella ionosfera soprattutto nelle regioni polari, aumentando il rischio di assorbimento di radiazioni per gli equipaggi degli aerei e provocando, ancora una volta, assorbimenti delle onde radio**.

Inoltre, con il brillamento, è stata emessa una **bolla di particelle cariche (Coronal Mass Ejection o CME)** che ha raggiunto la Terra dopo poco più di 24 ore e ha causato una **tempesta geomagnetica** di grado intenso.

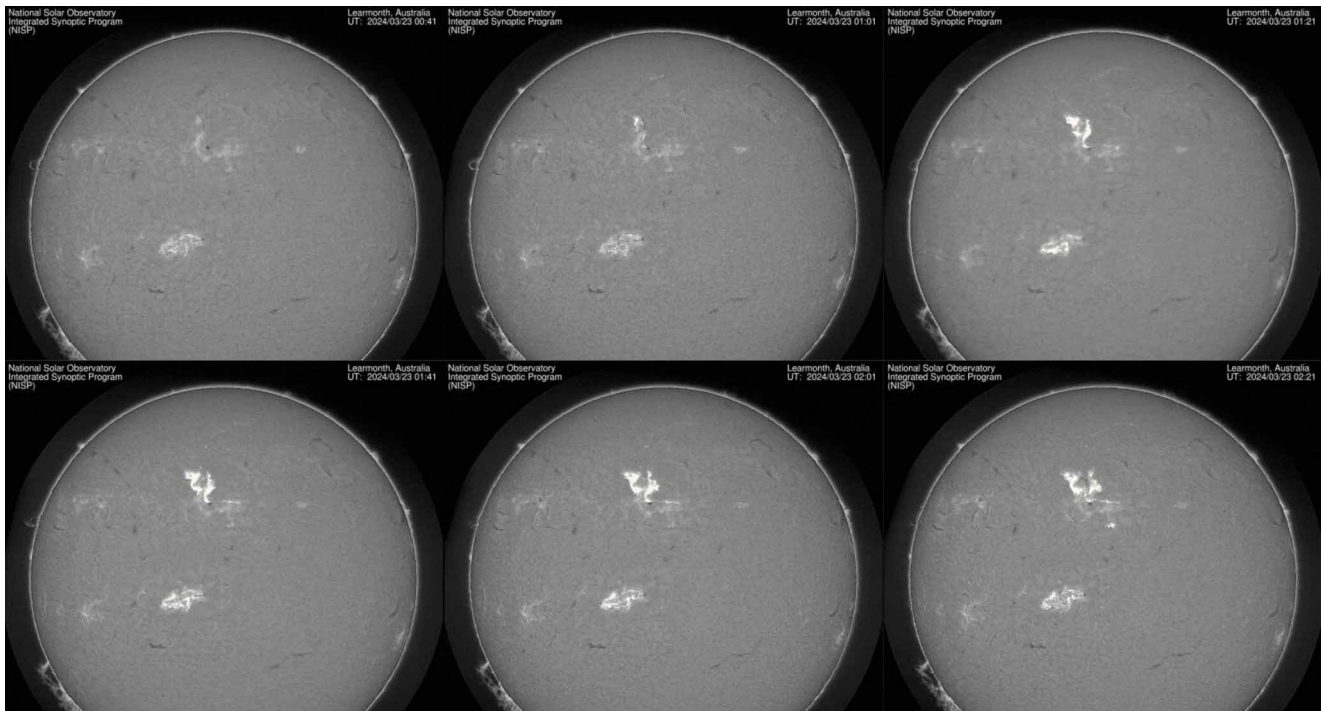


Figura 2 Sequenza di immagini che mostra lo sviluppo del “brillamento simpatico” del 23 marzo 2024. (Crediti: Australian National Solar Observatory).

Figure 2 Sequence of images showing the formation of the “sympathetic” solar flare of 23 March 2024. (Credits: Australian National Solar Observatory).

Cosa abbiamo osservato da terra?

In caso di tempesta magnetica la maggiore attività viene registrata nelle aree polari. Qui la manifestazione più diretta è rappresentata dall'innesco di fenomeni di grande impatto visivo come le **aurore polari**. Nel caso in cui si verifichi una serie di condizioni fisiche, le aurore si possono osservare anche a latitudini più basse. In concomitanza di alcuni eventi nel passato particolarmente intensi le aurore sono state osservate anche alle nostre latitudini.

Nell'attuale ciclo, benché ancora non abbiamo assistito a tempeste globali intense come quelle del passato, vari eventi hanno avuto impatti non trascurabili. Nel caso preso ad esempio del marzo 2024, quando la CME è arrivata nei pressi della Terra, ha causato **una intensa tempesta geomagnetica** osservata nei giorni 24 e 25 marzo. È stata questa **una delle più intense dell'attuale ciclo solare**. Non solo. Anche i brillamenti dei giorni precedenti sono stati accompagnati da CME che, a loro volta, hanno provocato tempeste magnetiche, anche se di minore intensità.

I punti di osservazione INGV

La serie di tempeste è stata osservata e registrata anche dagli **osservatori geomagnetici** dell'INGV [3] situati lungo la penisola italiana e designati al **monitoraggio magnetico del nostro Paese**.

La Figura 4 mostra la registrazione effettuata dall'osservatorio di Castello Tesino, in provincia di Trento. I valori alterati del campo magnetico terrestre sono racchiusi nelle bande colorate e variano fino a 250 nT (nanoTesla), un valore molto elevato per località a medie latitudini, ove si colloca il nostro paese, laddove la variazione media che si osserva in momenti di quiete è solo di qualche decina di nT.

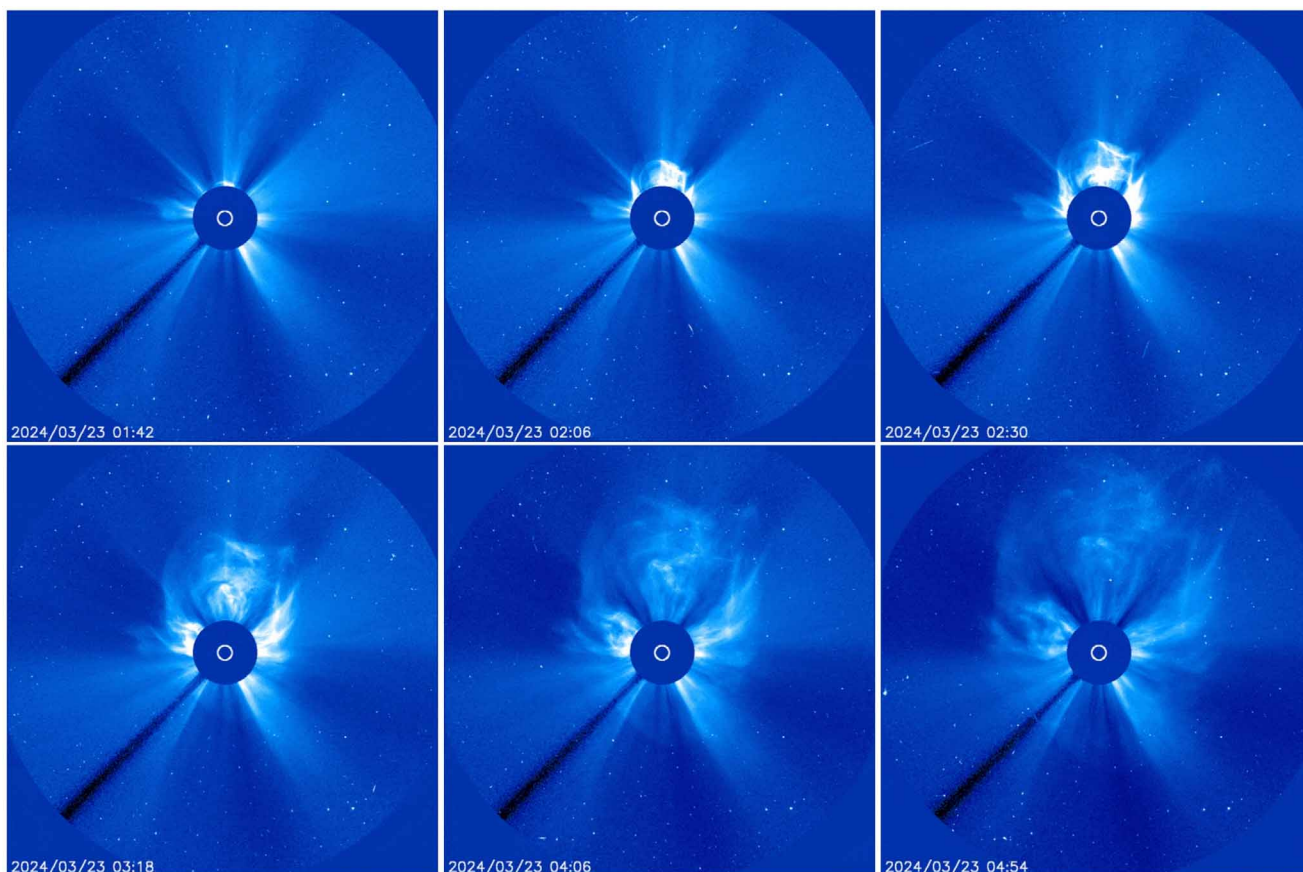


Figura 3 Sequenza di immagini che mostra l'espulsione di massa coronale del 23 marzo 2024, presa dalla sonda SOHO di ESA/NASA.

Figure 3 Sequence of images showing the Coronal Mass Ejection of 23 March 2024, taken from the ESA/NASA SOHO probe.

L'INGV, oltre ad eseguire il monitoraggio del campo magnetico terrestre mediante gli osservatori magnetici, esegue anche il **monitoraggio della ionosfera** [4] sulla nostra penisola, valutandone la variazione di densità elettronica. Tra il 21 e il 26 marzo 2024 la rete di strumenti dedicata a questo tipo di monitoraggio (ricevitori GNSS) ha registrato **notevoli oscillazioni nel contenuto totale di elettroni (Total Electron Content - TEC)**, rispetto ai valori medi di riferimento, ossia quelli dei periodi di quiete. Questo fenomeno prende il nome di **tempesta ionosferica** positiva o negativa, a seconda che i valori siano superiori o inferiori alla media (Figura 5). Questi eventi possono dare problemi al posizionamento a terra, basato sui segnali satellitari GNSS e alle comunicazioni radio in banda HF.

Il gruppo di monitoraggio di Space Weather INGV

Anche se la catena di eventi sopra descritta non ha provocato effetti drammatici alle nostre latitudini, non dobbiamo mollare la presa sul monitoraggio del Sole, della ionosfera e del campo magnetico terrestre.

L'INGV ha costituito un **gruppo di monitoraggio della Meteorologia Spaziale**, che ha come scopo quello di tenere sott'occhio l'attività solare e le sue ripercussioni sul nostro pianeta, utilizzando i dati prodotti dall'INGV ma anche alcuni parametri forniti da altre istituzioni internazionali. Il frutto di questo lavoro viene pubblicato settimanalmente in bollettini [5], documenti tecnici che raccontano minuziosamente tutta l'attività registrata durante la settimana, corredati di grafici e

mappe. Lo scopo è quello di offrire uno strumento utile ed attendibile per chi è interessato all'argomento e vuole basarsi su una corretta informazione degli eventi che riguardano l'attività solare e l'impatto che questa può avere sulla tecnologia e sulla nostra salute.

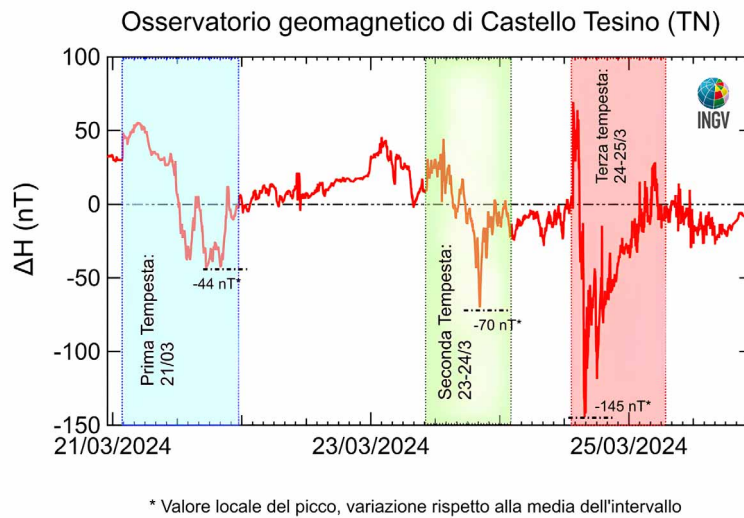


Figura 4 Tracciato della componente orizzontale del campo magnetico terrestre, misurata all'Osservatorio geomagnetico INGV di Castello Tesino nella settimana del 21-26 marzo 2024. Le tempeste geomagnetiche che si sono susseguite sono evidenziate dalle bande colorate. (Crediti: INGV).

Figure 4 Time series of the horizontal component of the geomagnetic field, as measured at the INGV geomagnetic observatory of Castello Tesino in the week 21-26 March 2024. The geomagnetic storms occurring during this period are enclosed in colored boxes. (Credits: INGV).

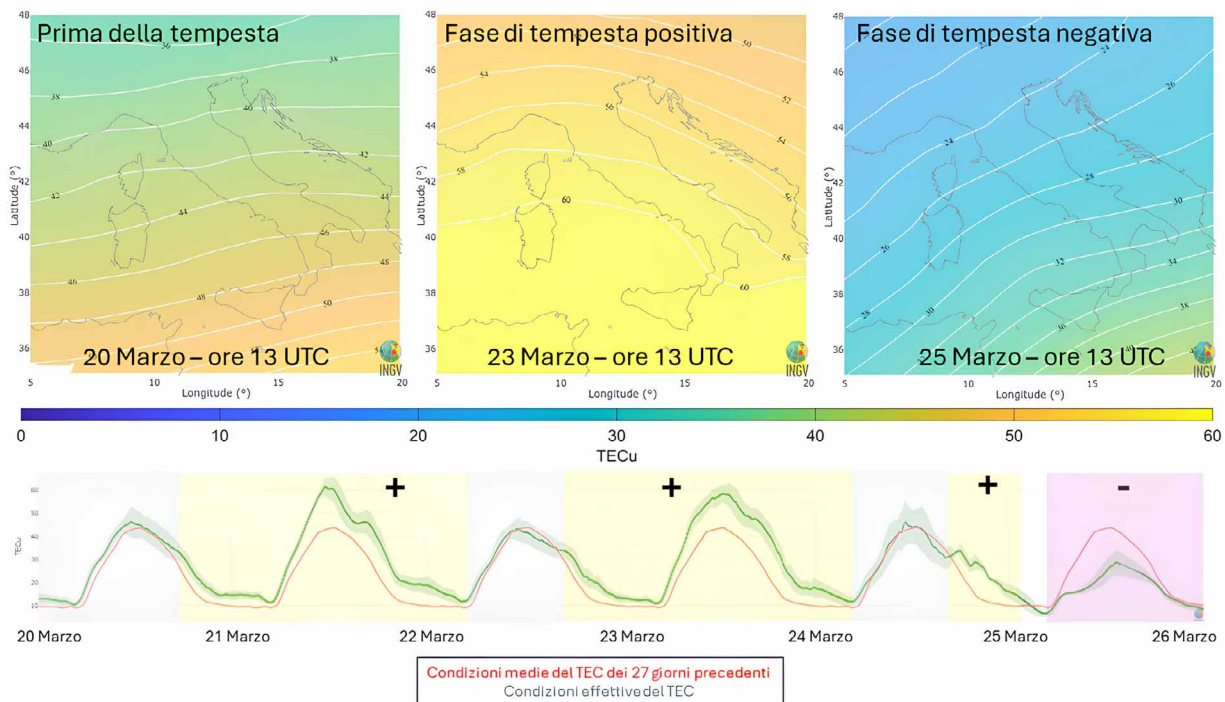


Figura 5 Misure del contenuto elettronico totale nella ionosfera sopra l'Italia (Total Electron Content - TEC) ottenute dalla rete di ricevitori GNSS dell'INGV [4]. (Crediti: L. Spogli)

Figure 5 Measures of the Total Electron Content (TEC) in the ionosphere over Italy, obtained from a network of GNSS receivers handled by INGV [4]. (Credits: L. Spogli).

Sitografia

- [1] <https://www.spaceweatherlive.com/>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_particle_event
- [3] <http://geomag.rm.ingv.it/index.php>
- [4] <http://eswuax.rm.ingv.it/index.php>
- [5] <https://roma2.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-sorveglianza/prodotti-del-monitoraggio/bollettini-di-space-weather>

I pericoli legati al Sole: la lezione della costellazione Starlink

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Uno dei rischi naturali a cui è esposto il nostro pianeta è quello inerente agli eventi di **Space Weather**. Questi eventi possono avere un impatto sostanziale sulla società civile, sul commercio, sulla sicurezza, sulle comunicazioni, sul corretto funzionamento delle infrastrutture a terra, dei satelliti e sulla vita stessa degli astronauti in missione. E non è necessario che siano eventi estremamente violenti per avere un impatto importante sulla nostra società.

Il tema dei rischi naturali a cui è esposto il nostro pianeta legato all'attività solare non è trascurabile. È argomento di studio di una nuova disciplina della Fisica, lo **Space Weather**. Gli eventi di Space Weather possono avere un impatto sostanziale sulla società civile, sul commercio, sulla sicurezza, sulle comunicazioni, sul corretto funzionamento delle infrastrutture a terra (ad esempio reti elettriche, oleodotti, ecc.), dei satelliti e, non da ultimo, sulla vita degli astronauti in missione.

Anche eventi non particolarmente rilevanti possono avere un impatto importante sulla nostra vita e in particolare sulla nostra tecnologia. Ne è un esempio il caso dei danni subiti dalla costellazione Starlink.

La flotta degli Starlink

Il 3 febbraio 2022 un razzo Falcon 9 posizionò 49 satelliti **Starlink** su un'orbita iniziale ad una quota di circa 210 km sulla superficie terrestre. Starlink è una costellazione di satelliti (Figura 1) attualmente in costruzione dal produttore privato aerospaziale americano SpaceX di Elon Musk, per l'accesso a internet satellitare globale in banda larga a bassa latenza.



Figura 1 60 Falcon 9 dispiega il suo carico di satelliti Starlink durante il lancio del 24 maggio 2019. (Crediti: Mark Crawford per NSF/L2).

Figure 1 Falcon 9 deploys its payload of Starlink satellites on 24 May 2019. (Credits: Mark Crawford for NSF/L2).

Il giorno successivo al lancio, ben **38 satelliti della costellazione furono distrutti** prima di essere innalzati alla loro orbita definitiva, **causando un danno economico stimato di diverse decine di milioni di dollari**.

Il *drag* atmosferico

Seppur rarefatta, l'atmosfera superiore tra 100 e 600 km, dove volano i satelliti in orbita bassa, "ostacola" il volo dei satelliti opponendo quello che viene tecnicamente definito ***drag* atmosferico**. Minore l'altezza dal suolo terrestre, maggiore il *drag* sperimentato dai satelliti. Ciò comporta la necessità di consumare carburante per correggere la traiettoria dei satelliti per far sì che essi mantengano la stessa orbita, e quindi la stessa quota, rispetto al suolo terrestre (Figura 2). Ma un maggior consumo di carburante implica operare una scelta: o aumentare il carico e il costo della missione in modo da garantire la quantità di carburante necessaria ad effettuare tutte le manovre (previste e non), o diminuire la durata della missione.

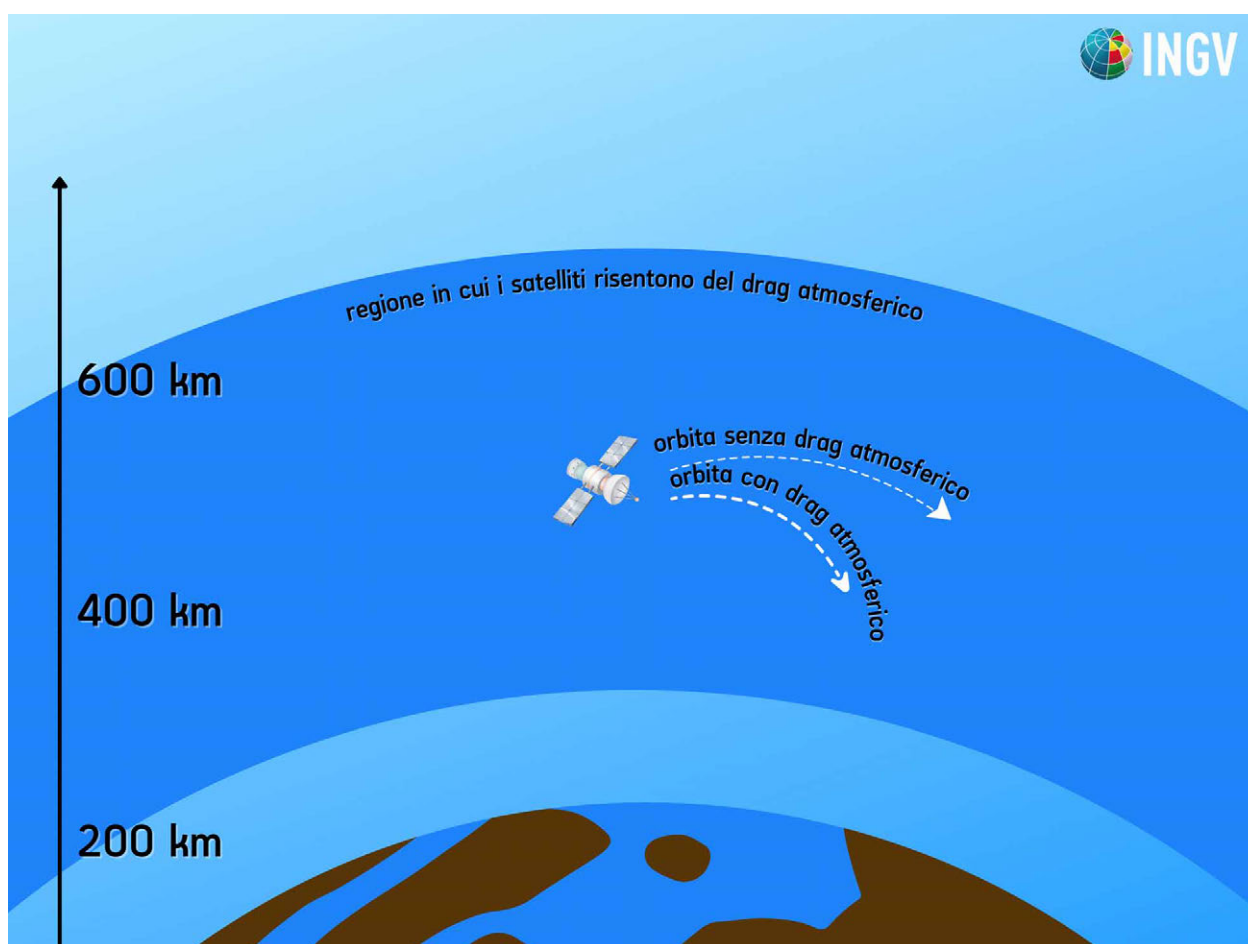


Figura 2 Esempio degli effetti del *drag* atmosferico sui satelliti in orbita bassa. In caso di aumento del drag e senza correzione di orbita, quest'ultima tende a decadere provocando, nei casi peggiori, la perdita dei satelliti. (Crediti: L. Cafarella).

Figure 2 Example of the effects of atmospheric drag on low Earth orbit satellites. In the event of increased drag and without orbit correction, the orbit tends to decay causing, in the worst case, the loss of the satellites. (Credits: L. Cafarella).

Cosa è successo agli Starlink?

Un recente studio [Fang et al., 2022] ha fatto luce su quanto avvenuto in quei primi giorni di febbraio 2022. Nell'arco di tempo che comprende il lancio della costellazione di satelliti Starlink e la messa in operazione delle prime manovre, si sono susseguite due tempeste geomagnetiche di piccola entità tra il 3 e il 4 febbraio in seguito all'impatto di due Coronal Mass Ejections espulse dal Sole. Tra gli effetti che le tempeste geomagnetiche possono avere sull'ambiente circumterrestre c'è quello di innescare il riscaldamento e quindi l'espansione dell'atmosfera. In questo modo si espande anche la regione in cui i satelliti risentirebbero del *drag* atmosferico.



Figura 3 Immagine dei detriti dei satelliti Starlink distrutti in atmosfera ripresa da Puerto Rico. (Crediti: Caribbean Astronomical Society).

Figure 3 Image of debris of the Starlink satellites destroyed in the atmosphere from Puerto Rico. (Credits: Caribbean Astronomical Society).

La prima fase delle operazioni della costellazione Starlink prevedeva l'inserimento in orbita dei satelliti ad una quota iniziale di 210 km. Questo passaggio aveva uno scopo ben preciso: una volta testati gli strumenti di bordo, i satelliti giudicati malfunzionanti sarebbero stati facilmente fatti decadere proprio sfruttando il *drag* atmosferico, che a questa bassa quota è piuttosto significativo. Quello che è accaduto (e che non era stato previsto) è che le tempeste geomagnetiche hanno provocato un aumento della densità atmosferica globale di circa il 23% rispetto al giorno precedente, che ha causato un **aumento del *drag* di circa il 50%, sufficiente a provocare la distruzione dei satelliti** (Figura 3). Infatti l'aumento di densità atmosferica favorisce il decadimento dell'orbita e nei casi più gravi il rientro del satellite in atmosfera, dove brucia e viene quindi distrutto.

Le simulazioni successive al disastro della perdita dei satelliti Starlink hanno confermato che **anche un'attività geomagnetica minore o moderata è sufficiente ad incrementare di molto la densità dell'alta atmosfera tra i 200 e i 400 km** con le conseguenze a cui abbiamo accennato. In seguito alla perdita, la SpaceX ha deciso di fissare l'orbita iniziale dei prossimi satelliti ad una quota più alta, circa 300 km, per ridurre sostanzialmente l'effetto del *drag*.

Quale lezione ci lascia la vicenda dello Starlink?

La complessità dei fenomeni legati allo **Space Weather** ci obbliga a continuare a studiare i processi coinvolti, cosa fondamentale per poter fornire delle previsioni solide ed attendibili in futuro, anche nel caso di tempeste geomagnetiche di piccola entità, che possono avere conseguenze importanti sociali ed economiche.

La vicenda dello Starlink si è verificata in coda al ventiquattresimo ciclo solare, un periodo di attività solare estremamente debole. Attualmente è in corso una intensificazione dell'attività solare, che giungerà al massimo presumibilmente tra il 2025 e il 2026. È previsto quindi un aumento sostanziale dell'attività e del numero di eventi di Space Weather. Per questo ci si aspetta che i satelliti in orbita bassa si troveranno a dover affrontare numerosi eventi che comporteranno un aumento del *drag* atmosferico, anche se attualmente il verificarsi di essi non è predicibile in modo certo. Soltanto la ricerca sempre più approfondita dei processi fisici coinvolti e la conseguente messa in opera di strategie di mitigazione efficaci possono effettivamente evitare una perdita di satelliti come quella subita da SpaceX. È la consapevolezza che l'epopea della costellazione Starlink, distrutta nei primi di febbraio del 2022, ci lascia in eredità.

Bibliografia

Fang T.-W., Kubaryk A., Goldstein D., Li Z., Fuller-Rowell T., Millward G., et al., (2022). *Space weather environment during the SpaceX Starlink satellite loss in February 2022*. Space Weather, 20, e2022SW003193. <https://doi.org/10.1029/2022SW003193>

Il GPS non funziona!

Lucilla Alfonsi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

L'interferenza causata dall'atmosfera della Terra disorienta i navigatori satellitari.

Quanti di noi hanno usato un navigatore GPS almeno una volta nella vita? Tanti, è sicuro! Specie da quando i navigatori sono disponibili sui nostri cellulari e integrati a bordo delle nostre automobili.

Ma come funziona un navigatore satellitare?

Un navigatore combina le informazioni fornite da un ricevitore GPS (integrato nel navigatore stesso) con le mappe dei luoghi di interesse. Il navigatore riceve i segnali trasmessi dalle costellazioni **GNSS** (Global Navigation Satellite Systems), di cui la prima e più famosa è la costellazione **GPS** (Global Positioning System). I satelliti GPS attualmente operativi sono 31 e orbitano a circa 26,500 km dalla superficie della Terra. Questi satelliti comunicano continuamente ai ricevitori posti a terra la loro posizione e il tempo segnato dagli orologi atomici a bordo. Da queste informazioni il navigatore è in grado di calcolare la sua posizione precisa rappresentandola sulla mappa di interesse. Il posizionamento è possibile se il ricevitore riesce a ricevere il segnale da almeno 4 satelliti contemporaneamente.

Questo, però, è vero a meno di interferenze sul segnale che ne compromettano la qualità, pregiudicandone il funzionamento. Fra le interferenze, **il passaggio dei segnali nell'alta atmosfera**, ed in particolare nella sua parte ionizzata, la ionosfera, **rappresenta una minaccia al posizionamento satellitare**. Perché? Perché, quando i segnali GPS passano attraverso la ionosfera le proprietà elettromagnetiche dell'atmosfera a quelle quote (centinaia di km dalla Terra) provocano due effetti. Il primo è una **deviazione della direzione e della velocità di propagazione del segnale**, dovuto alla variazione dell'indice di rifrazione del mezzo. Questo effetto è analogo, nel caso dell'ottica, a quello che rende apparentemente deformato il cucchiaino immerso in una tazzina contenente del liquido (Figura 1).



Figura 1 Effetto della rifrazione: l'immagine delle cannuce è deformata nel passaggio da un mezzo (aria) ad un altro (liquido). (Crediti: Pat Hastings per Canva).

Figure 1 Effect of refraction: the image of the straws is deformed in the passage from one medium (air) to another (liquid). (Credits: Pat Hastings for Canva).

In quel caso la diversa velocità di propagazione della luce nell'aria e nel liquido (che hanno diversi indici di rifrazione) inganna il nostro cervello facendoci percepire come deformato il cucchiaino. Nel caso dei GNSS la deviazione del segnale nel passaggio attraverso la ionosfera è causato dalla presenza di **elettroni liberi** ed è proporzionale alla loro concentrazione. Diminuendo la velocità di propagazione che aveva prima di attraversare la ionosfera, il segnale GNSS impiega più tempo ad arrivare al ricevitore. Questo ritardo si traduce in un errore sul posizionamento, tanto più grande quanto più ricca di elettroni è la ionosfera attraversata dal segnale utilizzato dal navigatore. Questo errore determina, di conseguenza, un grado di incertezza sul posizionamento che può essere minimizzato (ma non eliminato del tutto) tramite l'uso di modelli fisici e matematici che mitigano l'effetto di ritardo introdotto dalla ionosfera.

Ciò che invece è molto più difficile da limitare è un effetto occasionale ma non raro: la degradazione dei segnali GNSS dovuta alle **scintillazioni ionosferiche**. Il termine scintillazione ricorda bene il tremolio della luminosità delle stelle quando vengono osservate direttamente dall'occhio umano. Analogamente, con il termine scintillazioni ionosferiche intendiamo riferirci alle fluttuazioni rapide dell'intensità dei segnali GNSS registrati dal ricevitore a terra, dovute al passaggio attraverso una ionosfera disturbata (Figura 2).

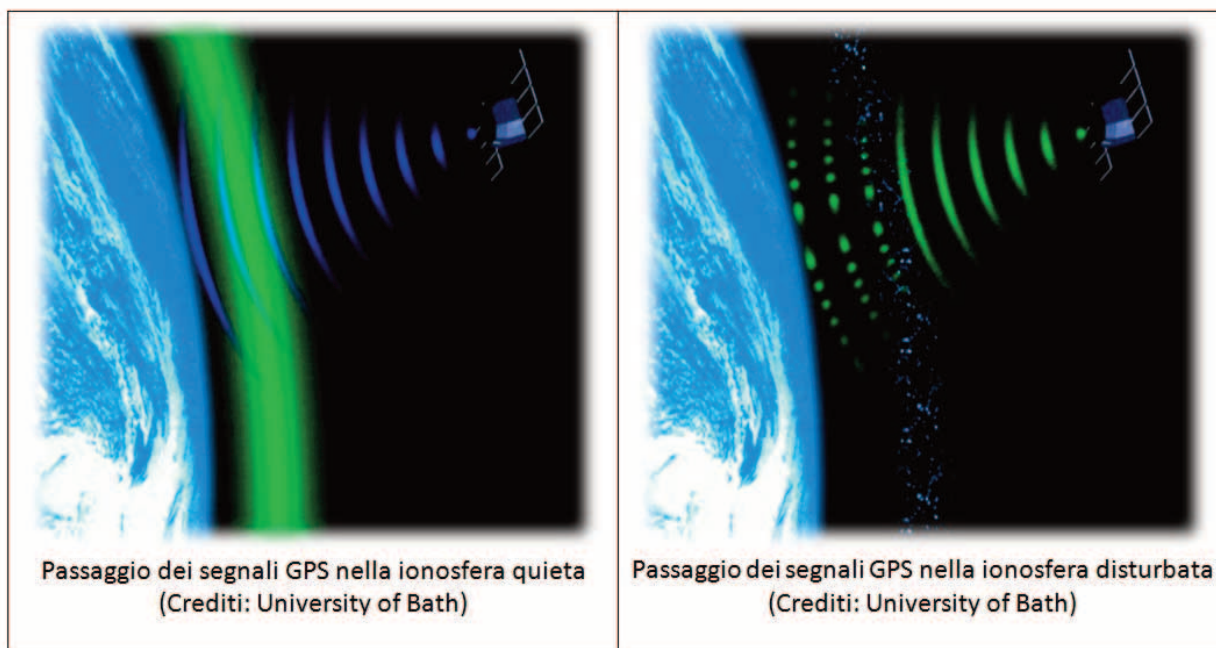


Figura 2 Passaggio dei segnali GPS attraverso una ionosfera quieta e una disturbata. Nel secondo caso il segnale esibisce il fenomeno della scintillazione ionosferica. (Crediti: Università di Bath).

Figure 2 Transmission of GPS signals through a quiet and disturbed ionosphere. In the latter case, the signal exhibits the phenomenon of ionospheric scintillation. (Credits: University of Bath).

Una distribuzione non omogenea degli elettroni liberi, con regioni della ionosfera che contengono zone ad alta e bassa densità elettronica, è proprio quella “**irregolarità**” ionosferica che provoca le fluttuazioni sul segnale GNSS ricevuto a terra che causano un’incertezza sul posizionamento o, in casi estremi, l’**impossibilità di fornire un posizionamento attendibile**. Tutto ciò avviene a causa delle intense perturbazioni solari che alterano le condizioni ionosferiche dallo stato di quiete a quello di disturbo. In questi casi, quindi, il navigatore GPS non funziona! Anzi, ad essere precisi, è proprio la ionosfera che ci mette lo zampino! Così, il dato registrato dai

ricevitori GNSS (da quanti ne sono investiti e dalla loro distribuzione nel globo) è un materiale prezioso per i ricercatori proprio per capire, a posteriori e in tempo reale, il fenomeno.

Nella famiglia dei GNSS ci sono altre costellazioni di satelliti atte al posizionamento e alla navigazione, come ad esempio il sistema russo **GLONASS**, il cinese **BeiDou**, o quello europeo **Galileo**! Chiaramente, tutti questi sistemi soffrono del fatto che il segnale satellitare attraversa la ionosfera.

Eruzione solare in corso: rischiamo un blackout?

Roberta Tozzi, Iginò Coco, Paola De Michelis e Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Nel passato alcune eruzioni solari hanno avuto effetti tangibili a terra danneggiando sistemi di distribuzione dell'energia elettrica, impianti militari, satelliti, sistemi di navigazione, condotte idriche. In che modo questo può avvenire?

Il **Sole** è una stella viva e, di tanto in tanto, si esibisce in manifestazioni piuttosto evidenti della sua attività, alcune delle quali possono produrre fenomeni visibili anche a terra. Tra questi, i più noti sono certamente le **aurore**, che si osservano alle alte latitudini. Ci sono però altri fenomeni, meno noti ma non per questo meno importanti, come le **correnti geomagneticamente indotte**, o brevemente **GIC** (dall'inglese *Geomagnetically Induced Current*). Queste correnti elettriche possono, in rari casi, danneggiare alcuni elementi degli impianti di distribuzione dell'energia elettrica dando luogo a lunghi ed estesi **blackout**.

Come hanno origine le GIC?

Il Sole emette continuamente un flusso di particelle cariche, il **vento solare**. Il vento solare deforma il **campo magnetico** posseduto dalla Terra confinandolo in una cavità detta **magnetosfera**. Talvolta, sul Sole può avvenire una **eruzione solare**: enormi quantità di particelle sono espulse nello spazio circostante ad altissima velocità. Il materiale espulso dal Sole viaggia nello spazio interplanetario e, arrivando in prossimità della Terra, interagisce col campo magnetico terrestre.

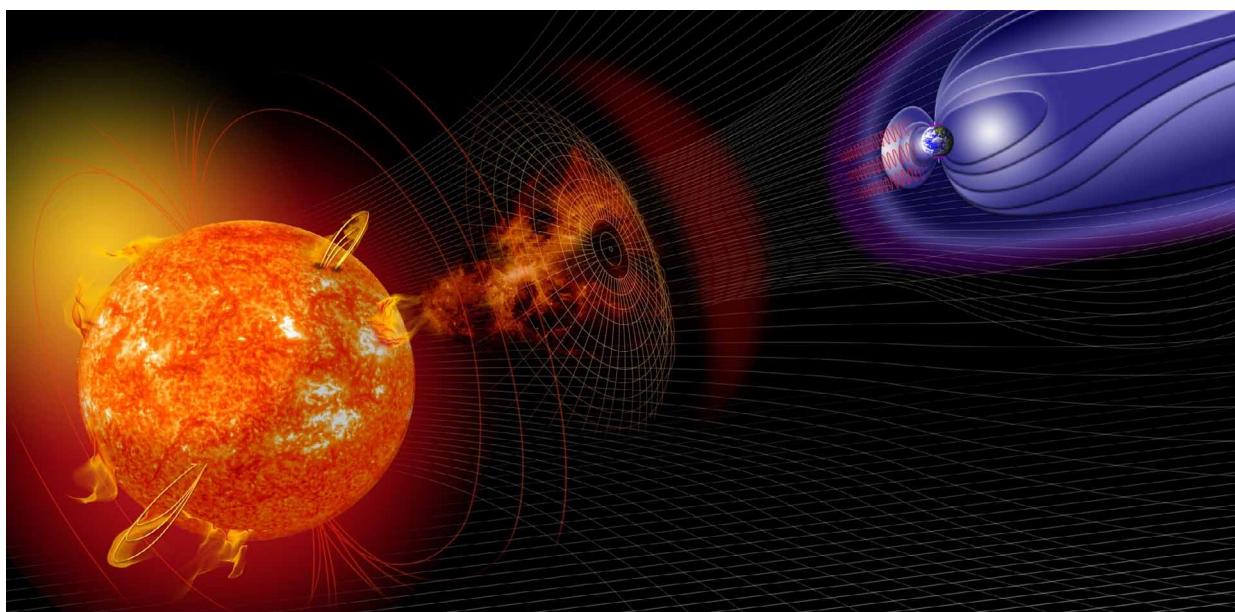


Figura 1 Una espulsione di massa coronale dal Sole si dirige verso la Terra e interagisce con il campo magnetico terrestre, l'area in viola rappresenta la magnetosfera. (Crediti: NASA).

Figure 1 A coronal mass ejection moves towards the Earth and interacts with the Earth's magnetic field, the purple area represents the magnetosphere. (Credits: NASA).

Questa interazione consiste sia in una sorta di compressione della magnetosfera, sia nell'ingresso di una porzione delle particelle cariche emesse dal Sole all'interno della magnetosfera, dove rimangono intrappolate. Tali particelle, muovendosi, danno luogo a **correnti elettriche** che generano intense e rapide variazioni del campo magnetico terrestre (note come **tempeste e sotto-tempeste geomagnetiche**).

A loro volta, le **variazioni di campo magnetico inducono** nella **crosta terrestre**, che è conduttiva, delle **correnti elettriche**: le **GIC**, appunto. Infatti, ogni qualvolta un corpo conduttore si trovi immerso in un campo magnetico che varia nel tempo o che si trovi in moto in uno spazio in cui sia presente un campo magnetico, si generano delle correnti elettriche indotte.

In che modo le GIC possono causare dei blackout?

I **trasformatori** del sistema di distribuzione dell'energia elettrica sono collegati a terra; ciò che accade è che le GIC, fluendo dentro i trasformatori, possono determinarne il **surriscaldamento** fino alla rottura e dunque alla interruzione della distribuzione della corrente elettrica.



Figura 2 Trasformatori della rete di distribuzione elettrica del Sud Africa, danneggiati a seguito della tempesta magnetica dell'ottobre 2003. (Crediti: Eskom, Makhosi, T., G. Coetzee).

Figure 2 Transformers of the electrical distribution network in South Africa, damaged during the geomagnetic storm of October 2003. (Credits: Eskom, Makhosi, T., G. Coetzee).

Che impatto possono avere le GIC?

L'intensità delle GIC è legata all'intensità della tempesta geomagnetica che le ha prodotte. **Tempeste geomagnetiche estreme** possono addirittura provocare dei **blackout** su aree estese. Il caso più eclatante è stato sicuramente il blackout avvenuto nella regione canadese del Quebec nel 1989, quando **milioni di persone rimasero al buio** per giorni in seguito a una forte tempesta geomagnetica che causò la rottura di alcuni trasformatori nevralgici per il funzionamento dell'intera rete.

Fortunatamente, la ricorrenza di "super-tempeste" non è molto alta, parliamo di una ogni diverse decine di anni; dunque, la **probabilità** che si verifichino **danni estesi e permanenti** ai sistemi di distribuzione dell'energia elettrica è **abbastanza bassa**. Inoltre, sebbene nel mondo nessuna regione possa considerarsi esente dal rischio di danni dovuti alle GIC, i paesi più a rischio sono certamente quelli situati a latitudini superiori a circa 55° [Tozzi et al., 2019a].

Oltre al sistema di distribuzione dell'energia elettrica, altre strutture vulnerabili sono le linee ferroviarie e le tubazioni metalliche interrate quali gli oleodotti e i gasdotti e in generale tutte le strutture metalliche lunghe e posizionate in prossimità del terreno.

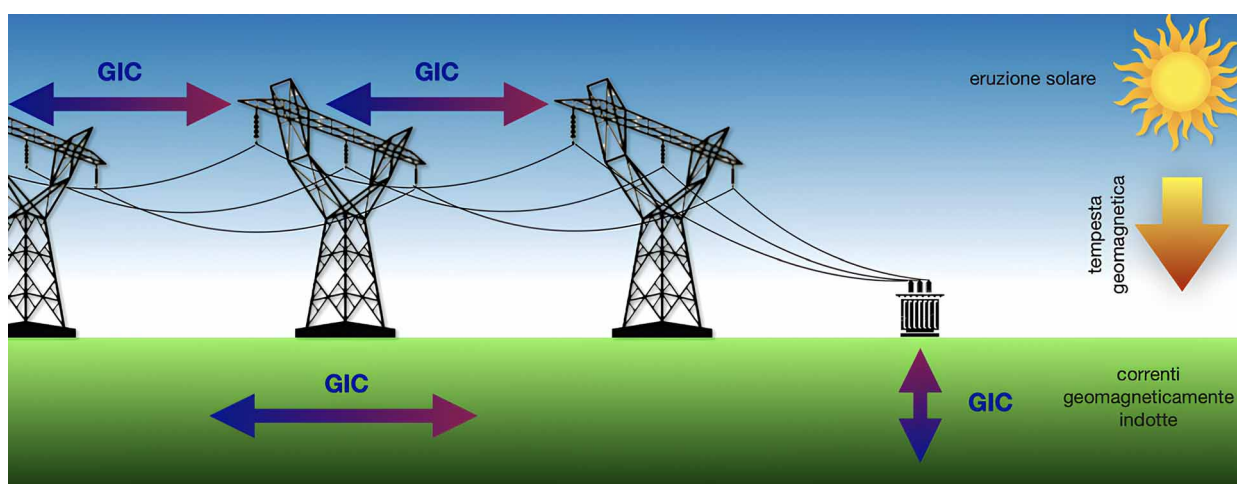


Figura 3 Le correnti geomagneticamente indotte. (Crediti: R. Tozzi).
Figure 3 Geomagnetically induced currents. (Credits: R. Tozzi).

Come proteggersi?

Il primo passo è acquisire **consapevolezza del rischio**. Per proteggersi dagli effetti delle GIC sulle reti elettriche si procede su due strade parallele. Da un lato c'è la ricerca scientifica che dedica moltissimi sforzi allo sviluppo di metodi per la **previsione** dell'instaurarsi di GIC potenzialmente dannose. Dall'altro c'è sicuramente una buona **manutenzione** degli apparati della rete di distribuzione elettrica e l'utilizzo di alcuni dispositivi in grado di limitare il flusso di correnti "parassite" in ingresso ai trasformatori.

In che modo l'INGV si occupa delle GIC?

Allo scopo di acquisire consapevolezza del rischio, di recente è stata fatta una stima preliminare del rischio di possibili danneggiamenti/malfunzionamenti a cui la rete elettrica nazionale

potrebbe andare incontro, in seguito all'instaurarsi delle GIC. Analizzando circa 20 anni di dati degli osservatori magnetici gestiti dall'INGV è stato calcolato un indice di rischio di GIC [Tozzi et al., 2019b]. Ne è emerso che, nell'intervallo di tempo considerato, solo una tempesta geomagnetica, quella del 29 ottobre 2003, ha prodotto un livello di rischio considerato "moderato", che equivale a una probabilità del 35 - 65 % che si verifichino danni o malfunzionamenti sulla rete. Alle nostre latitudini, ci si aspetta che solo gli **eventi estremi**, cioè tempeste magnetiche d'intensità straordinaria, possano provocare GIC potenzialmente dannose ma la probabilità che eventi di tale intensità si verifichino, come già detto, è estremamente bassa. Lo studio effettuato, comunque, è da considerarsi preliminare poiché numerosi ulteriori fattori vanno valutati più in dettaglio quali, per esempio:

1. gli effetti della conducibilità elettrica del suolo, soprattutto nelle regioni costiere, dove la presenza del mare può intensificare il rischio di GIC;
2. le caratteristiche tecniche specifiche della rete italiana, il suo stato di usura e le protezioni già operanti nelle cabine di snodo;
3. lo storico dei guasti occorsi alla rete in funzione dell'attività magnetica, necessario per poter meglio calibrare l'indice di rischio.

Questo studio è stato reso possibile dalla disponibilità di un esteso e continuo database di misure magnetiche eseguite presso gli osservatori di L'Aquila e Castello Tesino (TN), evidenziando dunque l'importanza del mantenimento delle preziose infrastrutture che sono gli **osservatori geomagnetici**.

Bibliografia

- Tozzi R., Coco I., De Michelis P., Giannattasio F., (2019a). *Latitudinal dependence of geomagnetically induced currents during geomagnetic storms*. Annals of Geophysics, 62, 1-19. <https://doi.org/10.4401/ag-7788>
- Tozzi R., De Michelis P., Coco I., Giannattasio F., (2019b). *A Preliminary risk assessment of geomagnetically induced currents over the Italian territory*. Space Weather, 17, 46-58. <https://doi.org/10.1029/2018SW002065>

La magnetotellurica: una alleata contro le tempeste solari. Il progetto MARGE in azione

Paola De Michelis e Giovanna Lucia Piangiamore

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Le correnti geomagneticamente indotte, conseguenza delle tempeste solari, possono minacciare le nostre sofisticate infrastrutture tecnologiche. La magnetotellurica può aiutarci a proteggerci da tali pericoli, consentendo una prevenzione più efficace. Su questo tipo di studi si sviluppa il progetto MARGE, finanziato dall'INGV, che punta a mettere in sicurezza il futuro delle nostre infrastrutture.

Negli ultimi anni è stata posta maggiore attenzione su un nuovo potenziale pericolo per le nostre infrastrutture tecnologiche: le **correnti geomagneticamente indotte** (GIC). Esse possono provocare danni significativi alle reti di trasmissione di energia elettrica, ai sistemi ferroviari e agli impianti per la produzione di gas e petrolio. Tuttavia, nella nostra lotta contro questa minaccia, abbiamo un alleato inaspettato: la magnetotellurica. La magnetotellurica è una tecnica di misura che ci permette di indagare la natura delle pericolose correnti geomagneticamente indotte, aprendo la strada alla prevenzione e alla protezione delle nostre infrastrutture tecnologiche.

L'origine di tutto: il Sole

Le **correnti geomagneticamente indotte** sono un fenomeno naturale che si verifica quando la Terra è investita da flussi intensi di protoni ed elettroni provenienti dal Sole. In tali circostanze, le correnti elettriche nello spazio intorno al nostro pianeta si intensificano, causando improvvisi cambiamenti nel campo magnetico terrestre (**tempeste magnetiche**) che inducono campi geoelettrici nel sottosuolo. Questi campi geoelettrici, a loro volta, generano correnti elettriche appena sotto la superficie terrestre in grado di propagarsi lungo vie preferenziali che sono, in genere, strutture metalliche sottili ed estese in lunghezza, come tubature sotterranee, linee ferroviarie e linee elettriche. **In condizioni estreme, queste correnti possono rappresentare una minaccia per le nostre infrastrutture**, in particolare per il sistema di trasmissione dell'energia elettrica (Figura 1).

Ci sono stati nel passato vari episodi di questo tipo, come il caso della tempesta del 1989, in cui una tempesta magnetica causò il crollo dell'intera rete elettrica della regione del Québec, in Canada, evidenziando la pericolosità delle correnti geomagneticamente indotte. Anche la tempesta magnetica di Halloween del 2003 causò problemi alle reti elettriche svedesi. Inoltre, analisi di scenari estremi, come l'evento di Carrington del 1859, suggeriscono che una super-tempesta magnetica potrebbe causare un'interruzione diffusa e prolungata dell'energia elettrica in molti paesi, con notevoli costi economici (Figura 2).

Dove si osservano le correnti magneticamente indotte?

A causa della particolare **configurazione del campo magnetico terrestre**, le aree più suscettibili alla generazione delle correnti geomagneticamente indotte si trovano ad **alta latitudine**, vicino ai poli. Studi passati hanno dimostrato che tempeste geomagnetiche molto intense hanno



Figura 1 Un'introduzione visiva delle relazioni fondamentali tra l'attività del Sole, causa di variazioni geoelettriche e geomagnetiche, le infrastrutture potenzialmente a rischio sulla Terra, e gli strumenti magnetotellurici utilizzati per misurare la conducibilità del sottosuolo. (Crediti: P. De Michelis).

Figure 1 A visual introduction to the fundamental relationships between solar activity, which causes geoelectric and geomagnetic variations, the potentially at-risk infrastructures on Earth, and the magnetotelluric instruments used to measure subsurface conductivity. (Credits: P. De Michelis).



Figura 2 Immagine dell'Italia catturata dagli astronauti a bordo della Stazione Spaziale Internazionale, che evidenzia la densità della popolazione e l'industrializzazione. Un'interruzione diffusa e prolungata dell'energia elettrica potrebbe avere un impatto significativo. (Crediti: ESA/NASA).

Figure 2 Image of Italy captured by astronauts aboard the International Space Station, highlighting population density and industrialization. A widespread and prolonged power outage could have a significant impact. (Credits: ESA/NASA).

causato danni considerevoli in queste aree. **Ma i paesi a latitudini più basse, come l'Italia, possono non essere immuni a questo fenomeno.** Anche il nostro territorio, infatti, potrebbe essere interessato da tali fenomeni e pertanto sono attualmente in corso studi approfonditi per valutare questa eventualità da parte di diversi team di ricerca, tra cui anche dell'INGV.

Al di là delle caratteristiche fisiche del fenomeno, anche le **caratteristiche delle infrastrutture** coinvolte giocano un ruolo critico: il tipo di protezione presente nei nodi della rete, lo stato di manutenzione e l'invecchiamento degli elementi della rete rappresentano fattori importanti. La ricerca può contribuire significativamente nell'individuare le aree in cui i campi geoelettrici raggiungono intensità maggiori, identificando così le aree con maggiore rischio per la presenza di intense correnti geomagneticamente indotte.

Come valutare i punti critici?

In teoria, sarebbe possibile creare una rete di stazioni fisse per monitorare il campo geoelettrico, che è il collegamento tra il Sole e il sistema di correnti indotte, in una specifica regione. Analizzando i dati raccolti da queste stazioni, potremmo stimare i rischi geoelettrici. Tuttavia, la complessità geologica locale richiederebbe una densa rete di stazioni, il cui costo di installazione e manutenzione sarebbe però proibitivo. Un approccio più pragmatico per valutare questi campi geoelettrici consiste nella realizzazione di **modelli matematici** che ci permettano di comprendere come si sviluppano i campi geoelettrici indotti durante una tempesta magnetica. A questo scopo, diventa fondamentale determinare le **caratteristiche del sottosuolo** per capire quali siano le zone più o meno a rischio.

Per svolgere adeguatamente questo compito ci viene in aiuto il **metodo magnetotellurico**.

Cos'è il metodo magnetotellurico?

Per decenni, la geofisica ha focalizzato la sua attenzione sull'indagine delle **onde** che attraversano il nostro pianeta, cercando di svelarne i segreti. L'analisi della propagazione sia delle onde sismiche che di quelle elettromagnetiche ha contribuito a una migliore comprensione della struttura interna della Terra e delle sue proprietà fisiche.

Recentemente, si è manifestato un crescente interesse nell'acquisire una conoscenza più approfondita della **struttura tridimensionale della conducibilità elettrica** del sottosuolo, ossia la sua capacità di condurre elettricità. Questa struttura è strettamente legata alle caratteristiche fisiche e chimiche delle rocce e delle formazioni geologiche presenti al di sotto della superficie terrestre. Le rocce contenenti minerali conduttori, come il ferro o il rame, mostrano una maggiore capacità di trasportare corrente rispetto a quelle contenenti minerali isolanti come il quarzo (Figura 3). Inoltre, la presenza di acqua nel terreno può aumentare significativamente la conducibilità elettrica, rendendo il sottosuolo ancora più conduttivo.

Acquisire una conoscenza dettagliata della struttura di conducibilità del sottosuolo ci permette quindi di comprendere come le correnti elettriche e **le correnti geomagneticamente indotte riescano a propagarsi** al suo interno, rappresentando così un passo cruciale per contribuire in modo significativo alla prevenzione dei danni alle infrastrutture tecnologiche.

La conducibilità elettrica varia su molteplici ordini di grandezza e quindi rappresenta un parametro utile per identificare differenti tipologie di minerali e composti presenti nel sottosuolo (Figura 3).

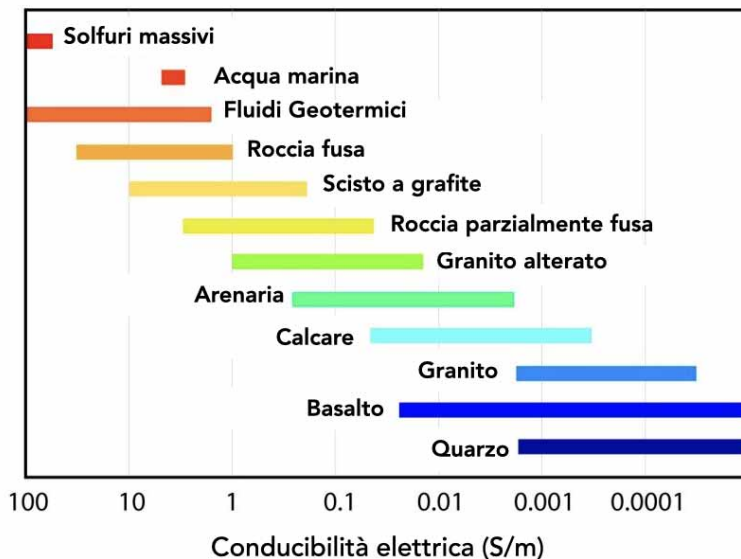


Figura 3 Valori di conducibilità elettrica per vari minerali e composti presenti nel sottosuolo (rosso per i materiali molto conduttivi, blu per quelli poco conduttivi). (Adattata da Lin et al. [2023]).

Figure 3 Values of electrical conductivity for various minerals and compounds present in the subsurface (red for highly conductive materials, blue for those with low conductivity). (Adapted from Lin et al. [2023]).

La magnetotellurica è una tecnica avanzata e non invasiva di analisi geofisica che **utilizza le proprietà delle onde elettromagnetiche per ottenere informazioni sulla conducibilità delle rocce e dei fluidi sottostanti alla superficie terrestre**. I ricercatori misurano simultaneamente i campi magnetici ed elettrici naturali presenti sulla superficie terrestre, utilizzando apposite installazioni temporanee di sensori (Figura 4). I dati raccolti vengono successivamente elaborati per determinare le proprietà elettriche del sottosuolo a diverse profondità.

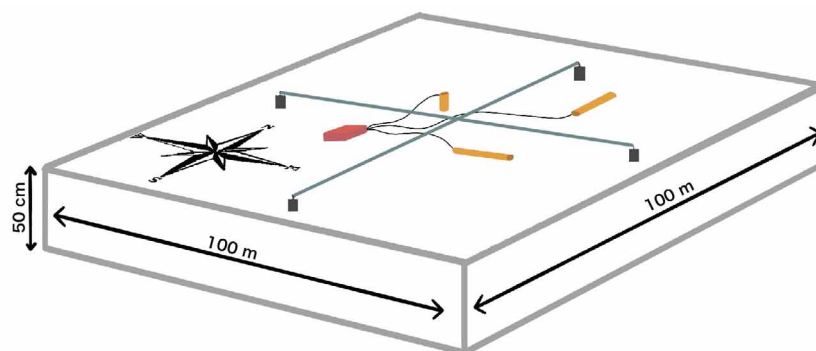


Figura 4 Schema di una stazione di misura magnetotellurica. Il campo elettrico ambientale viene misurato da due stese di cavi elettrici disposti a croce con coppie di elettrodi alle loro estremità. Il campo magnetico viene misurato da tre magnetometri (elementi arancioni) opportunamente orientati. (Credits: E. Consolini).

Figure 4 Diagram of a magnetotelluric measurement station. The ambient electric field is measured by two sets of crossed electric cables with pairs of electrodes at their ends. The magnetic field is measured by three magnetometers (orange elements) properly oriented. (Credits: E. Consolini)

In particolare, **la misura dell'ampiezza del campo elettromagnetico a diverse frequenze** consente di ricavare la conducibilità in funzione della profondità. Questa tecnica è molto utilizzata nell'esplorazione mineraria e petrolifera e in studi di geotermia e geologia strutturale.

In che modo ci aiuta la magnetotellurica ?

La magnetotellurica ci consente di studiare le interazioni tra il campo magnetico terrestre e le correnti elettriche che si sviluppano nello spazio circumterrestre. Utilizzando misurazioni del

campo magnetico terrestre da osservatori permanenti e modelli tridimensionali di conducibilità del terreno, possiamo ricostruire i campi geoelettrici, che sono indirettamente collegati alle correnti geomagneticamente indotte. Infatti, la combinazione dei dati magnetici e dei profili di conducibilità ci fornisce informazioni sulle variazioni dei campi geoelettrici in una determinata regione dovute alle variazioni del campo magnetico. Questo ci offre un'indicazione di dove potrebbero svilupparsi variazioni intense dei campi geoelettrici e, di conseguenza, correnti indotte più intense.

Comprendere dove si verificano queste variazioni dei campi geoelettrici è di vitale importanza per la gestione del rischio geofisico e la salvaguardia delle infrastrutture critiche.

Il progetto MARGE dell'INGV

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha recentemente avviato il progetto **MARGE** ("MAppa di Rischio GEoelettromagnetico per l'Italia centrale") che mira a creare una mappa di rischio geoelettrico per l'Italia centrale utilizzando la tecnica del sondaggio magnetotellurico (Figura 5). L'obiettivo è monitorare gli effetti a terra derivanti dall'attività solare e valutare, in tempo reale, il rischio potenziale per le infrastrutture interessate. All'interno del progetto **MARGE** si sta individuando una rete di siti idonei per condurre misure magnetotelluriche nell'Italia centrale. Ogni sito sarà equipaggiato con la strumentazione sopra descritta, che verrà lasciata in acquisizione sul campo per alcune settimane, in modo completamente automatico. Nell'arco dei prossimi anni, la rete di stazioni di misura verrà completata e le misure acquisite ai vari siti verranno tra loro combinate per creare la mappa della conducibilità elettrica.

Questo progetto rappresenta un importante passo avanti nell'innovazione nel settore accademico e privato, offrendo importanti benefici per la sicurezza e la protezione del territorio e delle sue infrastrutture, nonché per la comprensione della geologia e della sismicità dell'area italiana.

Per rimanere aggiornato sui progressi di questo entusiasmante progetto e per saperne di più su come puoi contribuire, ad esempio mettendo a disposizione terreni idonei, ti invitiamo a visitare il sito <https://progetti.ingv.it/it/marge>.



Figura 5 Logo progetto MARGE. (Crediti: Lab. Grafica e immagini, INGV).
Figure 5 Logo of MARGE project of INGV. (Credits: Lab. Grafica e immagini, INGV).

Bibliografia

Lin W., Yang B., Han B., Hu X. (2023). A Review of Subsurface Electrical Conductivity Anomalies in Magnetotelluric Imaging. *Sensors*, 23, 1803. <https://doi.org/10.3390/s23041803>

L'intelligenza artificiale al servizio della Meteorologia Spaziale

Lucilla Alfonsi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

La NASA e altre agenzie spaziali stanno realizzando nuovi modelli di previsione nell'ambito della **Meteorologia Spaziale** (Space Weather in inglese). Analogamente a quello che succede per le previsioni meteorologiche, quelle in ambito spaziale **prevedono le condizioni nello spazio dettate dall'attività solare**. In particolare, **il sistema annunciato dalla NASA sarebbe in grado di prevedere l'impatto delle tempeste solari sulla Terra con 30 minuti di anticipo** [1]. Lo scalpore della notizia risiede nel fatto che **il sistema si basa sull'Intelligenza artificiale**, che prevederebbe con anticipo situazioni potenzialmente critiche per il nostro pianeta.

Quali rischi corriamo?

Alcuni quotidiani come il Daily Mail hanno rilanciato l'annuncio della NASA, immaginando scenari catastrofici che solo in parte si riferiscono a pericoli reali. Le tempeste solari, infatti, possono innescare dei **disturbi sul campo geomagnetico e sull'atmosfera superiore**, in particolare ionosfera e termosfera (sopra i 50 km dalla superficie terrestre), che a loro volta provocano effetti di disturbo sulla propagazione delle onde radio e generano sistemi di correnti indotte. **Questi fenomeni mettono a rischio diverse tecnologie dalle quali la società moderna ormai dipende diffusamente** (Figura 1).

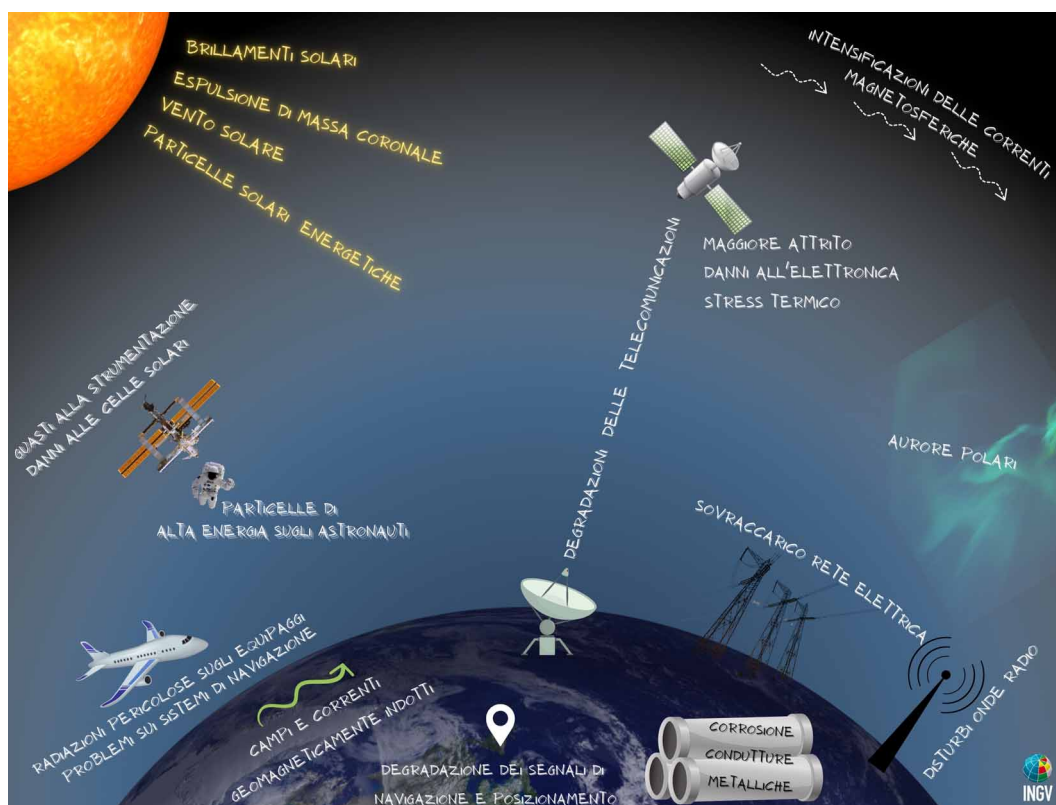


Figura 1 Effetti causati dalla Meteorologia Spaziale. (Crediti: L. Cafarella).

Figure 1 Effects caused by Space Weather. (Credits: L. Cafarella).

In caso in cui si scateni una tempesta geomagnetica i rischi più comuni che si potrebbero riscontrare sono **blackout dei generatori elettrici** dovuti alle correnti geomagnetiche indotte

(GIC), **interruzioni e disservizi dei sistemi di telecomunicazione in alta frequenza (HF) e disservizi nei sistemi di navigazione e posizionamento satellitare** (quali ad esempio GPS, Galileo, GLONASS e BeiDou).

Meno frequenti, ma con impatti economici devastanti, sono gli eventi che creano malfunzionamenti o, addirittura, **perdita di controllo dei satelliti**, come l'incidente avvenuto a febbraio del 2022 che ha causato la perdita di 38 satelliti della costellazione Starlink con conseguente ammanco di decine di milioni di dollari. In quel caso l'incidente è stato provocato da una tempesta geomagnetica di modesta intensità, a dimostrazione del fatto che la nostra società, sempre più dipendente dalla tecnologia è, quindi, sempre più esposta ai rischi indotti da condizioni avverse della Meteorologia Spaziale.

L'Intelligenza artificiale è tra noi

L'**Intelligenza Artificiale** (AI Artificial Intelligence, dal termine inglese) permette di dotare macchine e software di caratteristiche tipiche degli esseri umani come la percezione dello spazio e del tempo o la capacità di prendere decisioni sulla base delle informazioni disponibili. Recentemente si parla diffusamente di AI, anche grazie a serie tv e film di successo, ma l'Intelligenza Artificiale **nasce nell'ormai lontano 1956** con l'avvento dei computer. L'AI viene già utilizzata in diversi campi e, contrariamente ad una certa narrazione (non esperta), in tante applicazioni rappresenta una formidabile risorsa di ricerca e sviluppo.

Uno di questi ambiti è la Meteorologia Spaziale, la disciplina che si prefigge di monitorare, prevedere e mitigare le condizioni del Sole, del vento solare, della magnetosfera, della ionosfera e della termosfera. Sono questi i fattori che possono influenzare il rendimento e l'affidabilità dei sistemi tecnologici, e che possono mettere in pericolo la vita o la salute dell'uomo.

In questo contesto l'AI utilizza dati raccolti da strumentazione posta a terra e/o a bordo di satelliti per sviluppare dei software in grado di prevedere gli effetti di disturbo sulla Terra e sullo spazio che la circonda e permettere di attivare l'allerta affinché gli utenti delle tecnologie più vulnerabili possano essere avvisati in tempo dei rischi imminenti.

L'Intelligenza Artificiale e il contributo INGV

Il modello della NASA si **aggiunge** agli strumenti di previsione ed allerta di eventi di Space Weather già sviluppati dalla comunità scientifica in tutto il mondo. Questi strumenti, anche se non nuovi, stanno vivendo oggi la loro epoca d'oro.

In questo contesto l'**INGV** occupa un posto di primo piano con la progettazione, la realizzazione e lo sviluppo di modelli predittivi dell'**impatto sulla ionosfera delle tempeste solari**.

Un recente lavoro, guidato dall'INGV, ad esempio, introduce un modello del contenuto di elettroni nella ionosfera (contenuto elettronico totale, Total Electron Content, TEC) basato su tecniche AI **che fornisce una previsione dell'impatto di una tempesta sul contenuto elettronico con 24 ore di anticipo** [Cesaroni et al., 2020]. Variazioni rapide ed intense del TEC rappresentano infatti una minaccia per i **sistemi di navigazione e posizionamento satellitare** ed è per questo che le competenze dell'INGV, dal geomagnetismo alla fisica dell'alta atmosfera, vengono richieste a livello internazionale per supportare i centri di previsione, allerta, monitoraggio e mitigazione della Meteorologia Spaziale. Tra questi citiamo **PECASUS**, IPS (Ionosphere Prediction Service), SWESNET (Expert Service Centres and the Space Weather Coordination Centre). Questi Centri si rivolgono soprattutto a fornitori di servizio, come l'**ICAO** (International Civil Aviation Organization) che **stabilisce protocolli standard da adottare per la sicurezza in volo**, o come decisori politici o mondo produttivo che investono su tecnologie vulnerabili allo Space Weather.

Bibliografia

Cesaroni C., Spogli L., Aragon-Angel A., Fiocca M., Dear V., et al. (2020). *Neural network based model for global Total Electron Content forecasting*. J. Space Weather Space Clim. 10, 11. <https://doi.org/10.1051/swsc/2020013>

Sitografia

[1] <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-12086935/NASA-30-minute-warning-killer-solar-storm-hits-Earth.html>

EVENTI DEL PASSATO... E DEL PRESENTE

L'aurora boreale del 1582

Lili Cafarella e Igino Coco

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Durante le notti tra il 6 e l'8 marzo del 1582 i cieli di molte località a medie e basse latitudini furono illuminate da una spettacolare quanto inconsueta aurora polare.

“Addi’ 6 di marzo del 1582, ad un’ora di notte, essendo ‘aria quasi tempestosa, fiammeggiò una vampa di fuoco sopra Casale, e parve che tutto il cielo e la stessa città ne abbruciasse; il fiume pareva pure tutto di sangue, e la vampa lasciò una striscia nell’aere, che durò sino alle otto della stessa notte”.

Da V. De Conti nella sua “Notizie storiche della città di Casale del Monferrato”

È questa una delle tante testimonianze grazie alle quali è stato possibile ricostruire le caratteristiche dell'**aurora polare** che la notte tra il **6 e 7 marzo del 1582** illuminò i cieli a medie e basse latitudini in varie parti del mondo.

Fenomeni di questo tipo a queste latitudini non sono certamente usuali. All'epoca suscitavano timore e rispetto nella popolazione, che li vedeva come eventi misteriosi di origine divina.

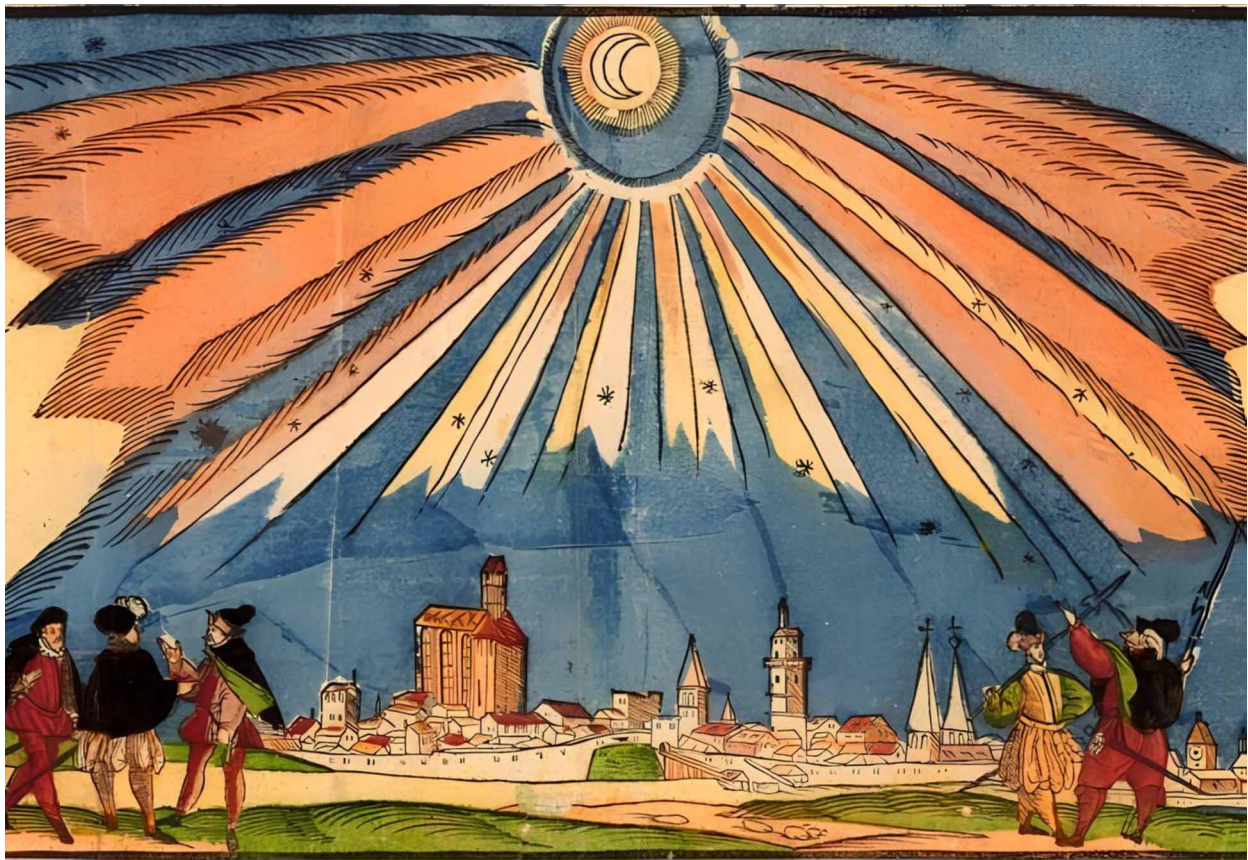


Figura 1 Disegno dell'aurora osservata il 6 marzo 1582. Xilografia su foglio singolo. (Zentralbibliothek Zürich, Department of Prints and Drawings/Archivio fotografico, segnatura: ZB Graphische Sammlung (GSB), PAS II 19/4).
Figure 1 Drawing of the aurora observed on March 6, 1582. Woodcut on a single sheet. (Zentralbibliothek Zürich, Department of Prints and Drawings/ Photo Archive, reference: ZB Graphische Sammlung (GSB), PAS II 19/4).

Oggi sappiamo che quella aurora boreale del 1582 fu l'espressione visibile di una intensa tempesta magnetica. Secondo la ricostruzione basata su questa e molte altre testimonianze, si stima che durò 3 giorni, dal 6 fino all'8 marzo del 1582.

La tempesta del 1582

La tempesta del marzo 1582 fu un evento straordinario. All'epoca non esistevano osservazioni dirette di campo magnetico terrestre. Per questo, tutto quello che oggi sappiamo di quel fenomeno si basa esclusivamente su descrizioni ed osservazioni riportate da testimoni oculari. Secondo le testimonianze disponibili le intense luci rosse avvistate durante quelle notti si presentarono in diverse località del globo terrestre, dalla Cina al Giappone, alla Germania, al Portogallo, all'Italia. In particolare, risulta che in Asia orientale il fenomeno fu osservato fino a latitudini intorno a 35° N. Per intenderci, alla latitudine di Tokyo.

In Europa le testimonianze sembra si fermino a latitudini un po' più alte: le località più a sud dove l'aurora fu osservata risultano essere Lisbona e Madrid (38° e 40° N rispettivamente).

Cosa successe quella notte?

La spiegazione potrebbe essere collegata alla variazione temporale dell'**estensione dell'ovale aurorale**, l'area a forma di anello posizionata intorno al polo geomagnetico terrestre dove è possibile vedere le aurore polari. L'ovale aurorale non ha una forma definita, ma dipende dall'attività magnetica in corso: si espande verso l'equatore durante la fase principale della tempesta, mentre si contrae durante la fase di ripresa.

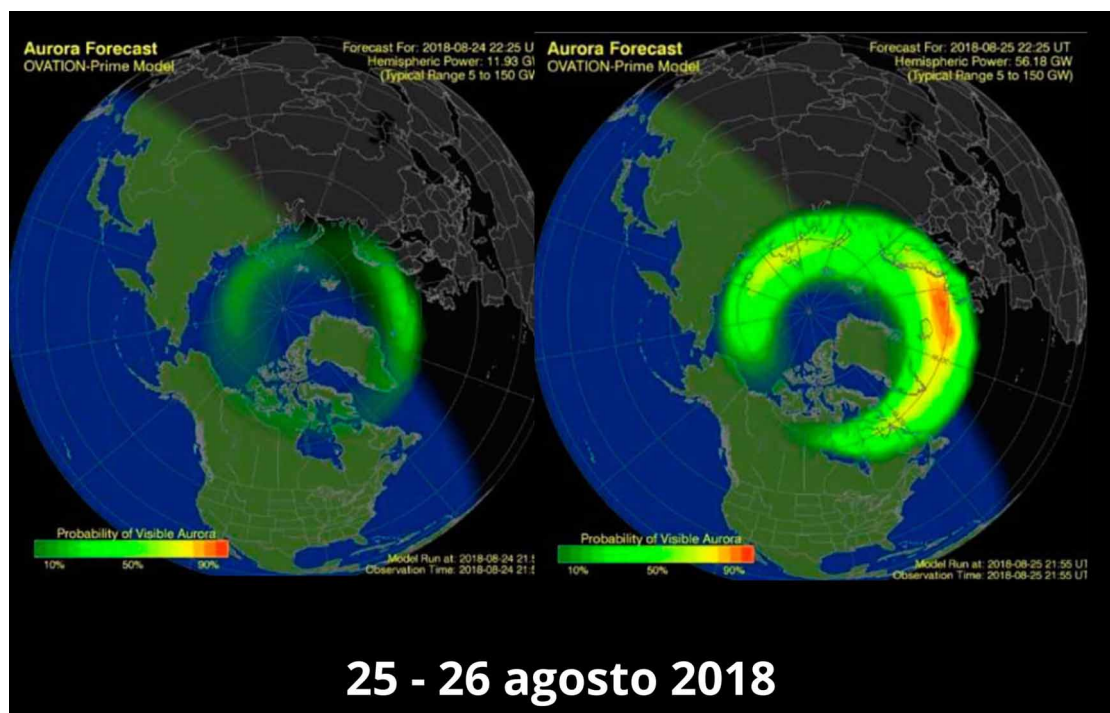


Figura 2 Posizione dell'ovale aurorale prima e durante una tempesta geomagnetica (25-26 agosto 2018).

La zona colorata è dove è più probabile assistere ad una aurora boreale. [Pierrard et al., 2021].

Figure 2 Auroral oval position before and during a geomagnetic storm (August 25-26, 2018). The colored area indicates where it is most likely to observe an aurora. [Pierrard et al., 2021].

Poiché le aurore sono visibili nel lato notturno della Terra, è possibile ricostruire, in base alle testimonianze, che la fase principale della tempesta del 1582 abbia avuto luogo quando il settore dell'Asia orientale era al buio (alta attività magnetica, estensione dell'ovale aurorale verso l'equatore) e sia terminata quando al buio era il settore europeo (attività magnetica in diminuzione e contrazione dell'ovale aurorale verso latitudini più alte).

L'osservazione dell'aurora in Italia

L'aurora fu osservata anche in Italia, a Casale Monferrato e Rimini durante l'intera notte del 6 marzo, e a Cortona per un paio d'ore nella notte del 7. Secondo i racconti dell'epoca, l'aurora si presentò *“come una fiamma di fuoco”*, di colore rosso. È evidente che si trattasse di un evento di particolare luminosità poiché si sarebbe verificato durante un periodo di luna piena.

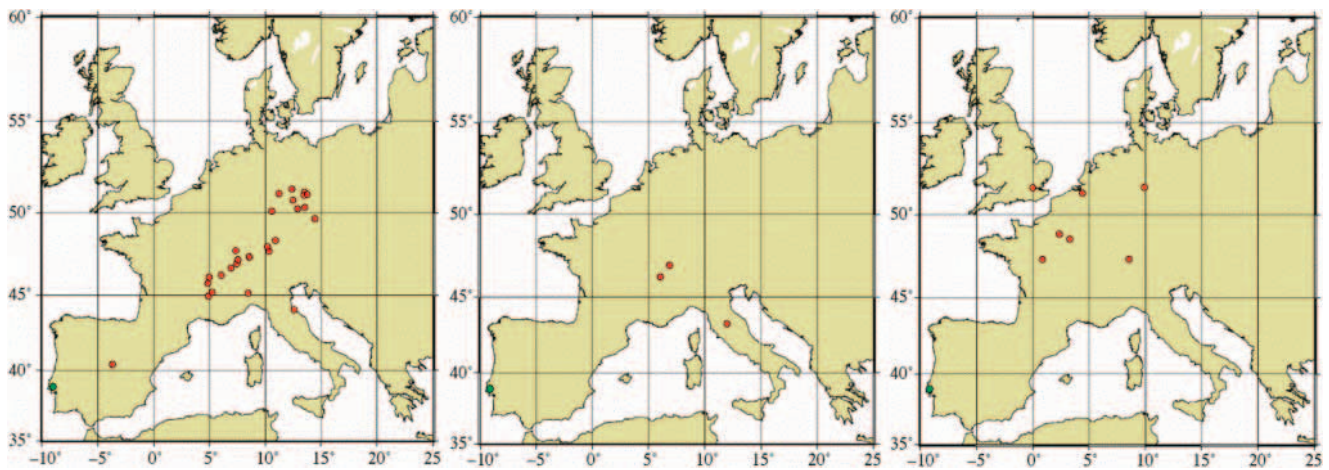


Figura 3 Località dove fu osservata l'aurora del 1582. (Da: Portuguese eyewitness accounts of the great Space Weather event of 1582).

Figure 3 Locations where the aurora of 1582 was observed. (From: Portuguese eyewitness accounts of the great Space Weather event of 1582).

Una trentina di anni più tardi, nel “Saggiatore” del 1623, Galileo parlò di:

“...vapori che ci rappresentano quella intempestiva aurora boreale, i quali, sì come tutti s'illuminano, tutti ancora luminosi ci si dimostrano...”

Il termine aurora boreale, coniato proprio da Galileo per identificare il fenomeno delle luci del Nord, compare per la prima volta in queste righe. I vocaboli da lui scelti dovevano richiamare il nome della dea greca dell'alba Aurora e quello del vento del nord, Borea. Chissà che queste note non nascano dall'osservazione da parte di Galileo della tempesta del 1582?

Un po' di scienza

Oggi sappiamo che questi fenomeni sono legati all'**attività solare**. Il Sole emette continuamente nello spazio radiazioni e particelle. Questo flusso di particelle, noto come vento solare, può raggiungere la Terra, ma viene in gran parte fermato dalla presenza del campo magnetico

terrestre, che agisce come uno scudo e respinge le particelle dotate di carica elettrica. **Una parte delle particelle riesce comunque a penetrare** lo scudo del campo magnetico terrestre precipitando nello strato più alto dell'atmosfera, la ionosfera. Qui collide con l'ossigeno e l'azoto presenti nell'atmosfera stessa che, eccitandosi, rilasciano energia sotto forma di onde luminose provocando i fenomeni noti come aurore polari. Talvolta è possibile osservare fenomeni luminosi dominati dal colore rosso legati all'attività solare ma non alla diretta precipitazione di particelle nell'atmosfera terrestre: si tratta di DAR, un fenomeno che comunque si innesca in condizioni particolari di alta attività solare.

Proprio grazie a Galileo Galilei, sappiamo che **l'attività solare attraversa dei cicli più o meno regolari, che durano circa 11 anni**, alternando massimi e minimi. In occasione di forte attività solare possono essere emesse grandi quantità di particelle (espulsioni di massa coronale, o CME). L'evento del 1582, in base alle testimonianze raccolte, risulta essere stato di notevole intensità. Tuttavia, sembra non sia confrontabile con la famosa tempesta di **Carrington del 1859, ma può invece essere paragonata a quella più recente del marzo 1989**. Per analogia con eventi più recenti e ampiamente studiati sembra che la tempesta del 1582 si sia scatenata a causa di una serie di CME piuttosto che di una singola.

Ricostruendo l'attività solare per quegli anni, gli studiosi ipotizzano che la tempesta geomagnetica del 1582 si sia verificata nella fase decrescente del ciclo solare, o comunque a ridosso del massimo che doveva essere stato raggiunto intorno al 1581.

L'importanza dello studio degli eventi storici

L'interesse per la **meteorologia e il clima spaziale** è costantemente aumentato negli ultimi decenni a causa del potenziale impatto che potrebbe avere una tempesta magnetica sul nostro pianeta in generale e sulla nostra società tecnologica in particolare.

Tempeste magnetiche di grande intensità, come alcune verificatesi nel passato, **sarebbero potenzialmente molto più catastrofiche per la società moderna**. Questo a causa del grande progresso tecnologico che abbiamo raggiunto e al numero delle infrastrutture che potrebbero essere danneggiate. È dunque importante avere una stima della frequenza con cui si verificano tempeste di elevata intensità per cercare di prevederne e contenerne gli effetti.

Studi statistici ci mostrano che eventi di una certa portata accadono **una volta al secolo**. Alcune prove storiche suggeriscono invece che eventi estremi si siano verificati anche più frequentemente. I dati che abbiamo a disposizione sono però insufficienti. L'osservazione sistematica del campo magnetico terrestre inizia infatti solo dopo la metà del XIX secolo. Anche l'osservazione delle macchie solari copre solo quattro secoli, partendo dal 1610 con le prime osservazioni di Galileo.

Non è semplice quindi definire le caratteristiche di eventi precedenti all'osservazione diretta iniziata nel XIX secolo. Il confine raggiunto dell'ovale aurorale, ricostruito in base a testimonianze storiche, può allora dare importanti indicazioni per avere un indice dell'intensità di un determinato evento solare. Essendo infatti questi fenomeni di forte impatto emotivo ne è stata registrata l'occorrenza da millenni. Inoltre, poiché un'aurora è un fenomeno globale, le osservazioni aurorali simultanee in diverse località (diverse latitudini e longitudini) possono essere utilizzate per distinguere l'aurora da altri fenomeni locali.

La raccolta di osservazioni scritte e di disegni ci consentono così di ricostruire e recuperare informazioni su tempeste magnetiche a partire addirittura dal VI secolo a.C., fornendo informazioni preziose e insostituibili.

Bibliografia

Pierrard V., Botek E., Ripoll J.F., Thaller S.A., Moldwin M.B., Ruohoniemi M., Reeves G., (2021). *Links of the Plasmapause With Other Boundary Layers of the Magnetosphere: Ionospheric Convection, Radiation Belt Boundaries, Auroral Oval*. Sec. Space Physics, 8. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.728531>

I grandi eventi solari del passato: la tempesta di Carrington del 1859

Domenico Di Mauro

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Una tempesta magnetica come quella di Carrington del 1859 può ripetersi inaspettatamente in ogni momento

Che il Sole ci illumini, ci scaldi e mantenga in vita ogni essere animato sulla Terra è cosa ben risaputa. Meno noto è il fatto che la nostra stella, quando è particolarmente attiva, possa letteralmente “**schiaffeggiare**” i pianeti che le orbitano attorno, allungando le sue energetiche braccia, fatte di particelle velocissime, e provocando violente reazioni in chi ha la sfortuna di trovarsi nel loro raggio d'azione. Così racconto a mio figlio di 9 anni **la tempesta magnetica che ha interessato l'intero pianeta sul finire dell'estate del 1859**: un evento di proporzioni straordinarie, noto successivamente come “**evento di Carrington**”, in onore dell'astronomo inglese Richard Carrington che per primo scoprì il nesso tra l'attività solare e le turbolenze geomagnetiche osservate sulla Terra.

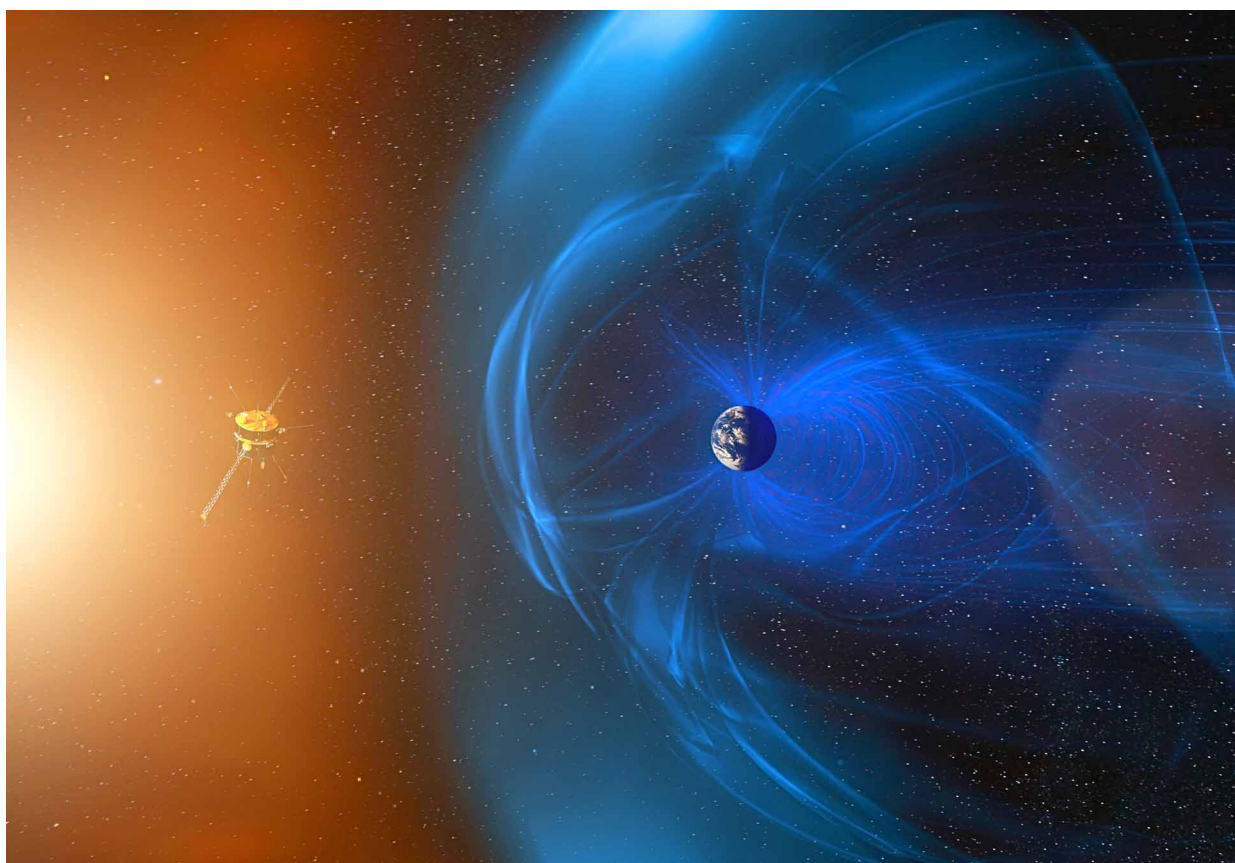


Figura 1 Raffigurazione dell'interazione tra vento solare e campo magnetico terrestre. (Crediti: NASA).

Figure 1 Depiction of the interaction between solar wind and the Earth's magnetic field. (Credits: NASA).

Sotto opportune condizioni, l'interazione tra il campo magnetico del nostro pianeta e il flusso di particelle energetiche emanate dal Sole, noto come **vento solare**, può manifestarsi alle alte latitudini in uno dei più affascinanti spettacoli naturali: **le aurore polari**.

L'evento di Carrington

L'evento di Carrington fu straordinario perché durante la notte del **1 settembre del 1859** (e nelle due o tre notti successive), le aurore furono avvistate in zone dove normalmente non si osservano, come a Roma, in Giamaica e a Cuba. I cieli notturni furono illuminati quasi a giorno da bagliori che andavano dal verde al giallo, dal rosso fino al violetto, come riportato da numerosi testimoni e documentato dai quotidiani dell'epoca, per una settimana intera. E non fu l'unico effetto visibile: le cronache raccontano che la maggior parte dei telegrafi, le prime e uniche tecnologie utilizzate nel campo delle telecomunicazioni a quel tempo, andarono letteralmente in tilt. Alcune stazioni telegrafiche riuscirono persino a funzionare senza l'uso delle batterie, facendo nascere nelle menti dei pensatori più audaci, l'idea che l'aurora fosse un fenomeno elettrico (o più precisamente, elettromagnetico).

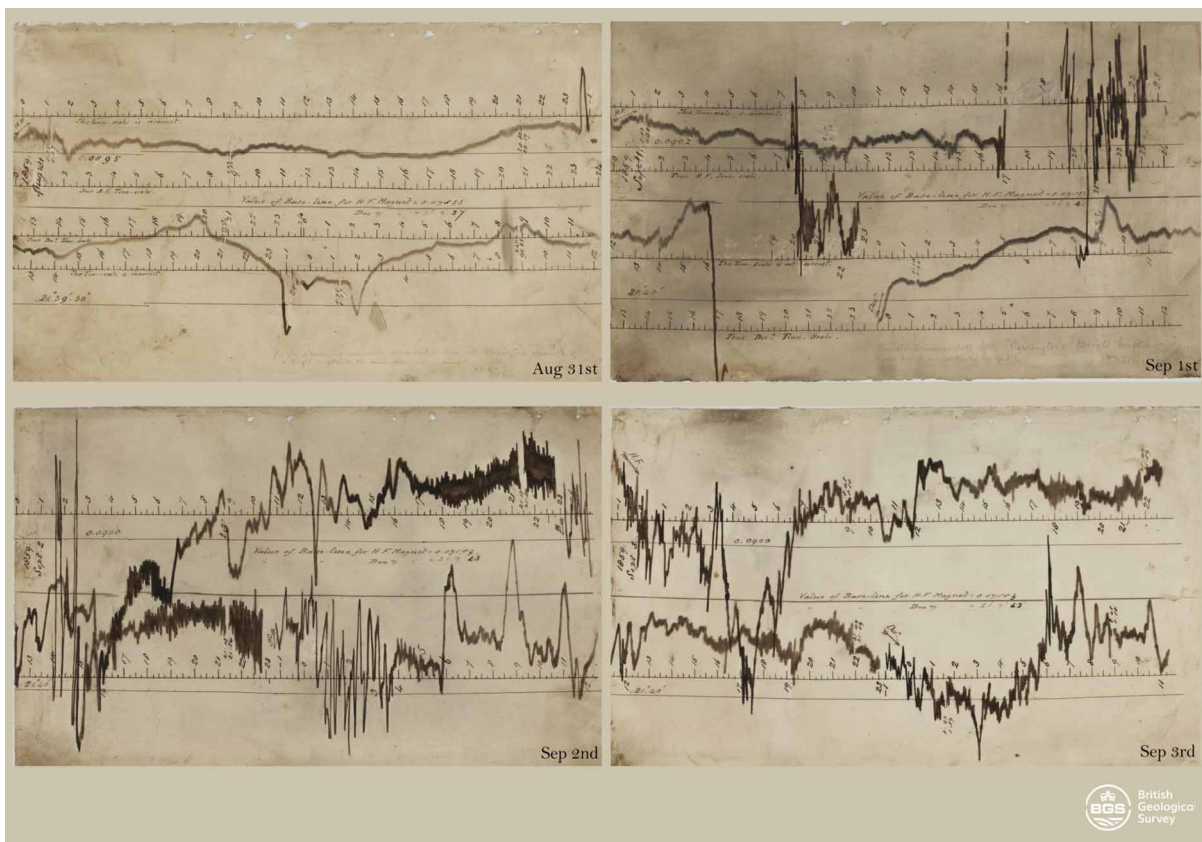


Figura 2 Tracce dell'evoluzione della tempesta magnetica registrata presso l'osservatorio di Greenwich (Londra) dal 31 agosto al 2 settembre 1859. (Copyright: BGS).

Figure 2 Plots of the evolution of the magnetic storm recorded at the Greenwich Observatory (London) from August 31 to September 2, 1859. (Copyright: BGS).

Così viene descritto l'evento sul **Giornale di Roma** e riportato su *La Civiltà Cattolica*:

“L'aurora boreale è un fenomeno così raro tra noi, che merita un ricordo speciale ogni volta che ci visita. Tale è stata quella della notte scorsa, dalle 2 ore antimeridiane alle 4, in cui il cielo è comparso adorno di un'aurora boreale che sarebbe bella anche nei paesi più settentrionali. [...] Alle ore 3 si è ravvivata di nuovo la luce, e il cielo è apparso in molti luoghi distinto de' soliti raggi luminosi, che in alto superavano in vivacità di splendore la Via Lattea, ed erano molto più lucidi in basso. La più bella comparsa di questi è stata alle 3 e 40, quando diverse colonne luminose verticali si sono formate nelle vicinanze del meridiano magnetico. Queste colonne o

raggi erano di luce gialletta, rinnovavansi successivamente in vari siti e spiccavano a meraviglia sul fondo rosso del cielo.”

Oggi monitoriamo il vento solare dallo spazio attraverso appositi satelliti e ne verifichiamo gli effetti a terra. Monitoriamo, infatti, la risposta del campo magnetico del nostro pianeta a queste sollecitazioni presso gli **osservatori geomagnetici** sparsi su tutta la superficie terrestre.

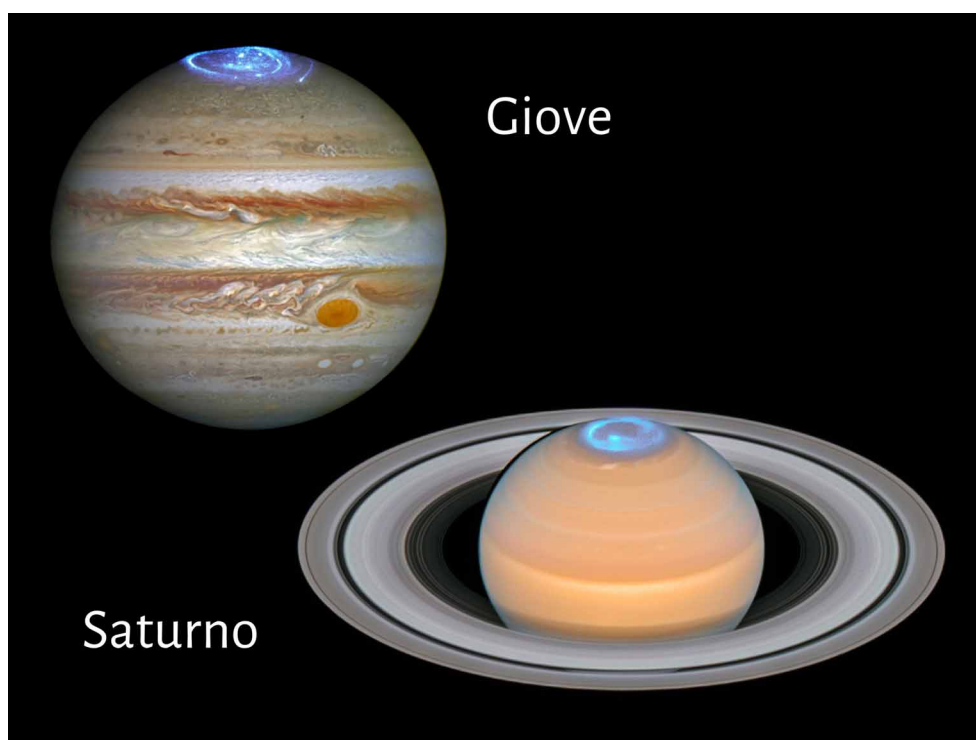
Il vento solare è un flusso continuo di particelle cariche (plasma) rilasciato dallo strato più esterno dell'atmosfera solare, **la corona**, e viaggia a una **velocità media di 250-400 km/s** (chilometri al secondo!). Formato principalmente da elettroni, protoni e particelle alfa (la parte corpuscolare della radiazione solare), il vento solare trasporta con sé il campo magnetico interplanetario di origine solare.

Quali sono, dunque, gli ingredienti affinché si “accenda” l’aurora?

È un gioco di interazione tra il campo magnetico terrestre e quello interplanetario di origine solare. Quando quest’ultimo è di polarità opposta a quello terrestre e il vento è particolarmente intenso, l’interazione può essere tale da permettere l’ingresso delle particelle cariche del vento solare negli strati più alti della nostra atmosfera, trasferendo energia alle molecole neutre di ossigeno e azoto, che reagiscono emettendo luce colorata. Le meravigliose luci delle aurore non sono una caratteristica esclusiva del nostro pianeta, ma si verificano in tutti i pianeti dotati di un campo magnetico, come ad esempio **Giove** e **Saturno**.

Figura 3 Fotografie di aurore polari su Giove (sinistra) e Saturno (destra), una prova che anche questi lontani pianeti hanno un proprio campo magnetico. (Crediti: NASA).

Figure 3 Photographs of polar auroras on Jupiter (left) and Saturn (right), evidence that these distant planets also have their own magnetic field. (Credits: NASA).



Si stima che, durante l'evento di Carrington, la **velocità delle particelle del vento solare abbia raggiunto l'impressionante valore di 2000 km/s**, un record da quando si raccolgono queste misure. Un evento straordinariamente intenso, la cui ripetizione nel futuro, sebbene rara, non può essere esclusa, se condizioni simili dovessero verificarsi nuovamente.

La “Grande Aurora” del 4 febbraio 1872

Igino Coco¹, Francesco Berrilli² e Luca Giovannelli²

¹INGV| Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione Roma 2

²Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Nella tarda serata del 4 febbraio 1872 un singolare bagliore illuminò i cieli di Roma. Si trattava nientemeno che di un'aurora boreale, estesa fino alle nostre latitudini. Un geniale gesuita, padre Angelo Secchi, direttore dell'Osservatorio del Collegio Romano, raccolse preziosi dati con tecniche e strumenti all'avanguardia per l'epoca, lasciandoci forse la prima osservazione scientifica sistematica di una tempesta geomagnetica.

Immaginate di trovarvi nel complesso del **Collegio Romano**, l'Università dei Gesuiti fondata da Ignazio di Loyola, nel pieno centro di **Roma**, a due passi dall'odierna piazza Venezia, da Montecitorio e da fontana di Trevi. Siete su una torretta che domina i tetti del centro, in una fredda sera dell'inverno del **1872**, la sera del 4 di febbraio, per essere precisi. Improvvisamente il vostro sguardo è attirato da qualcosa, uno strano bagliore variopinto, che appare in direzione Nord-Nord-Est, verso i monti Lucretili e la Sabina. Sono circa le 18:00, e il bagliore diventa un'esplosione di colori, dalle tonalità del rosso nella parte più alta, a sfumature di giallo e verde più in basso.

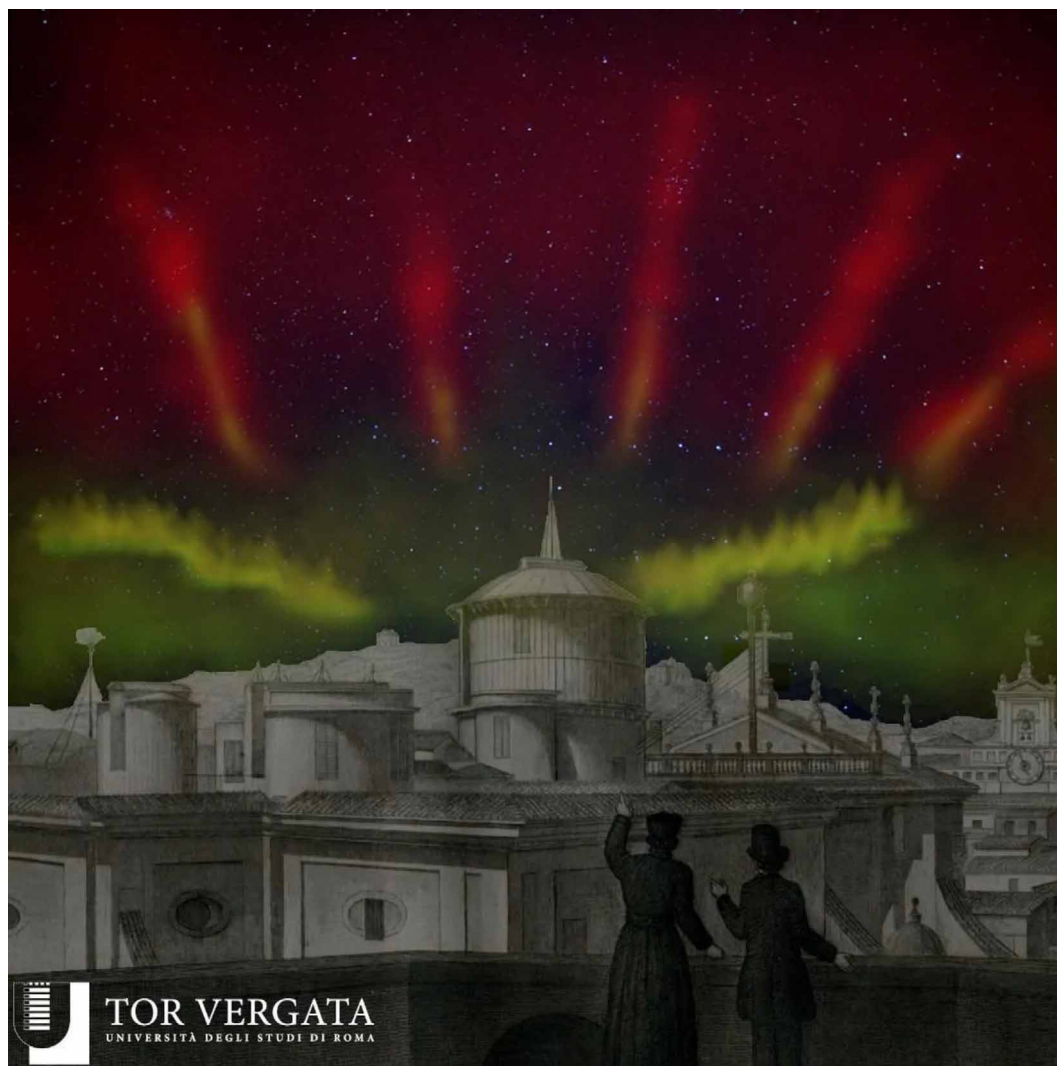


Figura 1
Ricostruzione artistica dell'aurora del 4 febbraio 1872 come potrebbe essere stata osservata dai tetti del Collegio Romano. (Crediti: L. Giovannelli, Università di Roma Tor Vergata).

Figure 1 Artistic reconstruction of the aurora on 4th february 1872 as it could have been observed from the Collegio Romano roof. (Credits: L. Giovannelli, Università di Roma Tor Vergata).

Cosa sta succedendo? Se voi foste un qualunque cittadino romano dell'epoca, a cosa pensereste? Probabilmente a qualche sorta di presagio divino. Ma voi non siete un cittadino romano qualsiasi. Siete padre Angelo Secchi, un prelado gesuita di raffinatissima cultura: matematico, astronomo, scienziato a tutto tondo. Egli ha capito perfettamente cosa sta succedendo e qui inizia una storia incredibile, per quanto poco nota e quasi dimenticata: la storia della prima osservazione scientifica sistematica e multidisciplinare di un'aurora boreale.

Aurore boreali e attività solare

Oggi sappiamo quasi tutto sulle aurore boreali, le loro cause, e i fenomeni ad esse collegati. Esse si verificano normalmente alle latitudini molto alte a causa della geometria del campo magnetico terrestre, le cui linee di forza creano delle regioni a forma di imbuto che guidano le particelle del vento solare verso i poli. In casi eccezionali, la regione in cui le particelle precipitano si estende in direzione dell'equatore, tanto che, come abbiamo anticipato, le aurore si possono vedere anche alle nostre latitudini.

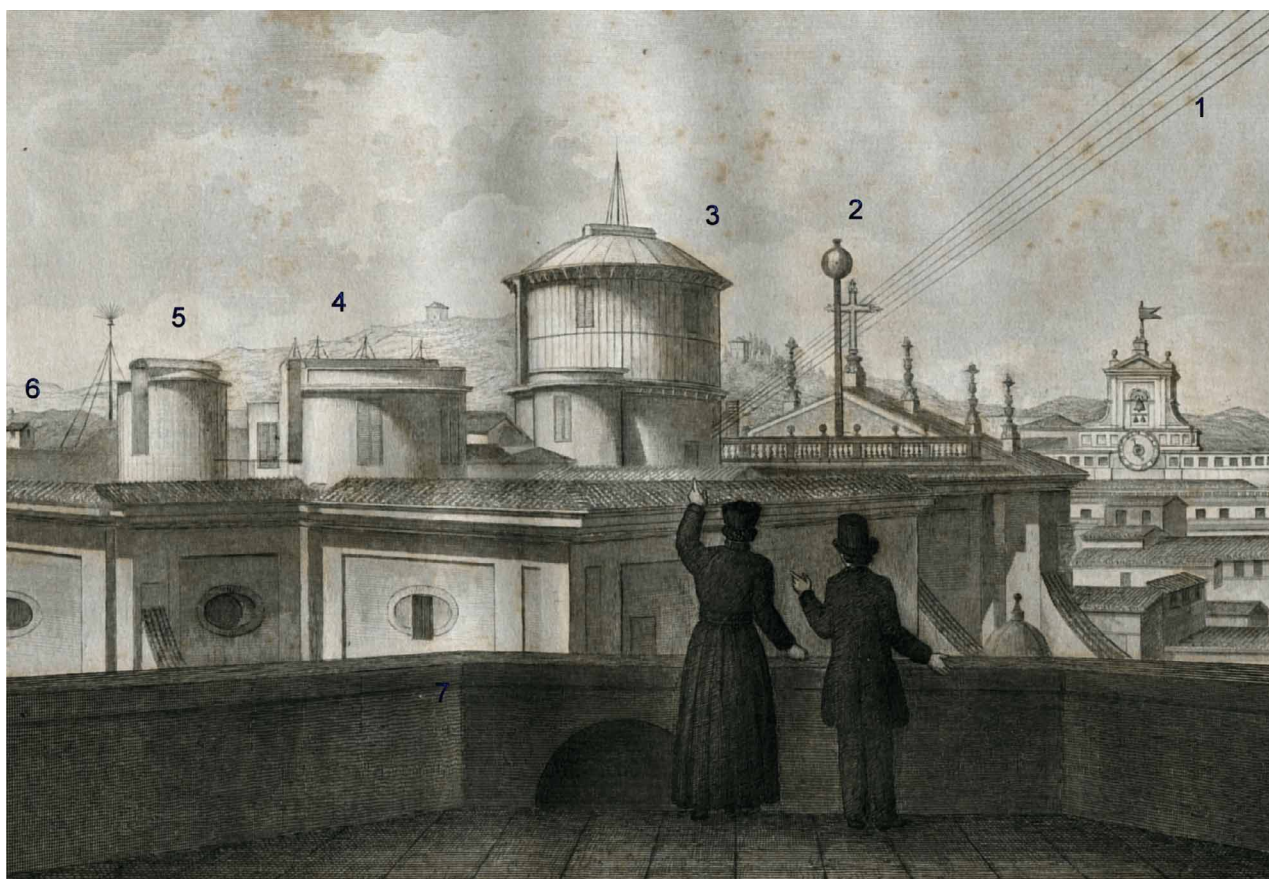


Figura 2 Illustrazione originale di collaboratori di padre Angelo Secchi che raffigura il complesso di edifici che ospitava la strumentazione dell'Osservatorio del Collegio Romano (Berrilli e Giovannelli [2022]).

Figure 2 A sketch originally drawn by collaborators of Father Angelo Secchi showing the main premises which hosted the instruments of the Collegio Romano Observatory (Berrilli and Giovannelli [2022]).

Benché vi siano ancora molti aspetti di dettaglio poco chiari, la catena di cause ed effetti è abbastanza assodata, e sappiamo che gli eventi più intensi dipendono dalla maggiore attività solare.

Se torniamo però indietro al 1872, le conoscenze di questi fenomeni erano proprio agli albori. Aveva suscitato un certo fermento un evento accaduto 13 anni prima, tra l'1 e il 2 settembre 1859, noto come “**Evento di Carrington**”, dal nome dell'astronomo inglese che lo aveva descritto in dettaglio. Richard Carrington, per primo, aveva ipotizzato una **correlazione** tra l'emersione di un gruppo particolarmente attivo di macchie solari e il verificarsi, circa un giorno dopo, di spettacolari aurore fino a basse latitudini, accompagnate da guasti e incendi improvvisi delle linee del telegrafo in tutto il mondo. Padre Angelo Secchi conosceva il lavoro di Carrington e quando si è trovato di fronte quell'inedito spettacolo, era preparato.

Angelo Secchi e l'Osservatorio del Collegio Romano

Padre Angelo Secchi nasce a Reggio Emilia il 29 giugno 1818 e qui frequenta il collegio dei Gesuiti. A 15 anni si trasferisce a Roma e intraprende il suo noviziato presso il Collegio Romano, distinguendosi subito come brillante studente, specialmente nelle materie scientifiche. Dopo aver trascorso circa due anni tra il 1848 e il 1849 tra l'Inghilterra e gli Stati Uniti, dove instaura importanti collaborazioni con scienziati anglosassoni e si appassiona alla geofisica, ritorna a Roma e dà nuovo impulso al piccolo osservatorio astronomico del Collegio Romano.

In Figura 2 si può vedere un'illustrazione contenuta nel trattato “*L'Astronomia in Roma nel Pontificato di Pio IX*”, pubblicato da padre Secchi nel 1877 e ripresa da Berrilli e Giovannelli [2022]. Essa mostra gli edifici del complesso del Collegio Romano, visti dalla terrazza della torre Calandrelli, dove Secchi e i suoi collaboratori installarono e operarono una vasta gamma di strumenti per più di tre decenni. Questi i principali:

1. Un **telescopio refrattivo di Merz**, installato sulla cupola principale (“Cielo mobile maggiore”, indicata in figura col numero 3), su una piattaforma girevole per agevolare il puntamento.
2. Un **telescopio di Cauchoix** più piccolo, utilizzato prevalentemente per osservazioni solari, dotato di un prisma che ne potesse proiettare l'immagine su un foglio di carta (installato nella cupoletta detta “Cielo mobile minore”, indicata in figura col numero 5).
3. Un osservatorio magnetico posto sopra la navata ovest della chiesa di Sant'Ignazio in Campo Marzio (punto indicato col numero 6 in figura). Esso comprendeva tre differenti strumenti per misurare la declinazione magnetica (angolo formato dalla direzione dell'ago di una bussola, quindi la direzione Nord-Sud magnetica, rispetto alla direzione del meridiano locale), la variazione del campo magnetico terrestre in direzione Est-Ovest, e la variazione verticale. Inoltre, vi erano altri tre magnetometri che determinavano le intensità assolute del campo col metodo di Gauss.
4. Un **elettrometro di Palmieri** per misurare l'elettricità dell'atmosfera.
5. Una serie di strumentazioni per **osservazioni meteorologiche**. La stazione meteorologica di Secchi era notevole perché era dotata di un meteorografo, un apparato progettato dallo stesso Secchi che registrava automaticamente su rulli di carta le misure di tutti gli strumenti meteorologici.

Sia le misure magnetiche sia quelle meteorologiche venivano effettuate 8 volte al giorno, dalle 7 di mattina alle 9 di sera.

Come si può capire, l'osservatorio di Secchi è probabilmente uno dei primi al mondo improntati su un **approccio multidisciplinare**, con osservazioni che partivano dal Sole e venivano messe in relazione con le variazioni dell'ambiente magnetico della Terra e addirittura del tempo atmosferico. All'epoca si pensava infatti che potesse esserci una relazione diretta tra l'attività solare e le variazioni del tempo meteorologico.

Come esempio della raffinatezza delle osservazioni solari fatte da Secchi e dai suoi collaboratori mostriamo in figura 3 una immagine tratta da Secchi [1873] e riportata da Berrilli e Giovannelli [2022]. Si tratta di una fotografia della corona solare durante l'eclissi del 12 dicembre 1871, confrontata con le osservazioni di protuberanze solari fatte all'Osservatorio Romano lo stesso giorno. Nel trattato Secchi osserva come le strutture non si propagano in linea retta, bensì lungo traiettorie curvilinee, simmetriche rispetto all'equatore, e ne deduce che la corona solare non può essere considerata una regione in equilibrio statico. Questa è un'intuizione corretta che dovrà aspettare un'ottantina d'anni per trovare una completa formalizzazione teorica.

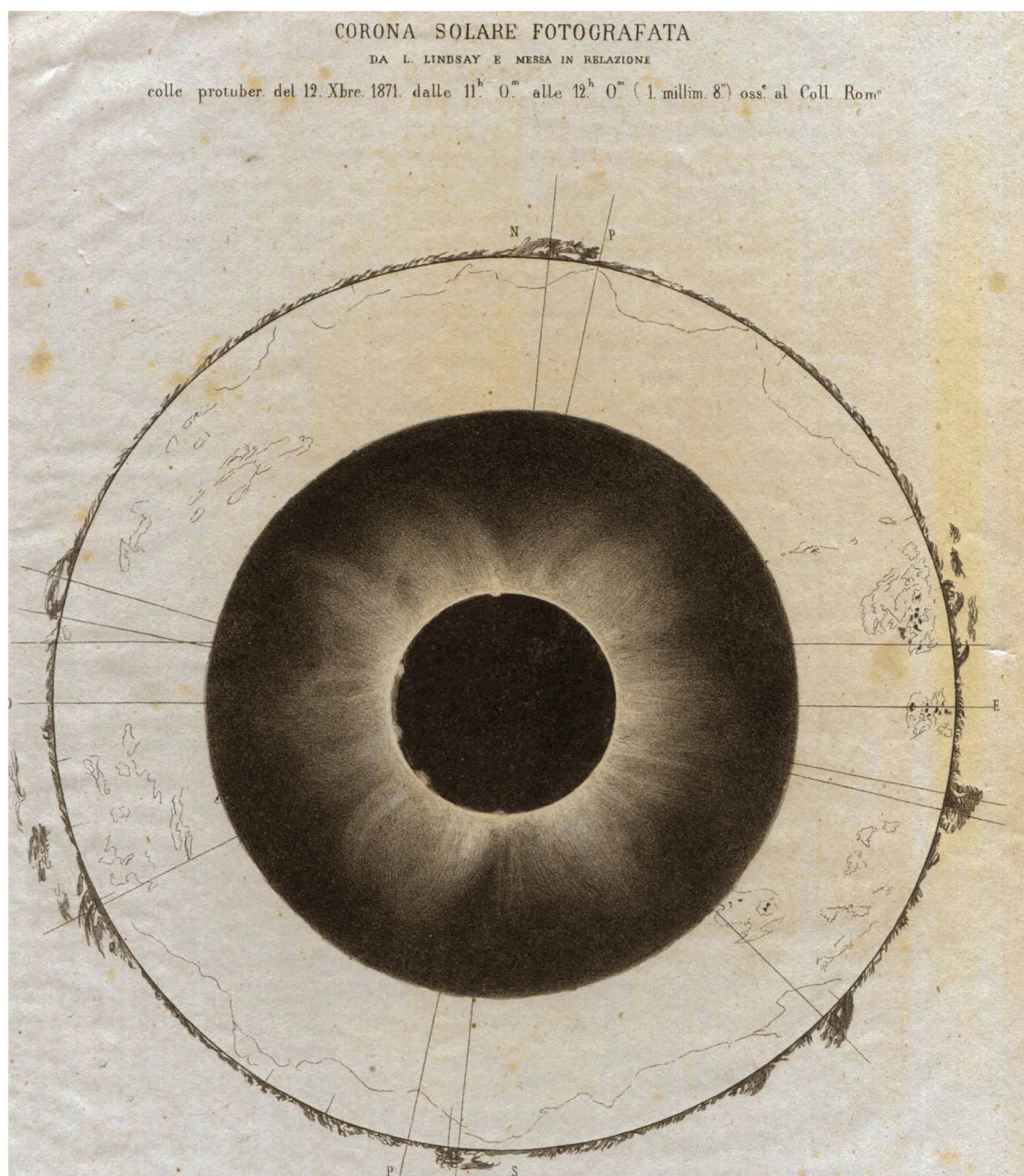


Figura 3 Fotografia della corona solare durante l'eclissi del 12 dicembre 1871 confrontata con osservazioni di protuberanze solari dal telescopio del Collegio Romano, [Secchi, 1873].

Figure 3 A photo of the solar corona during the solar eclipse of 12 December 1871 compared with observations of solar prominences from Collegio Romano telescope, [Secchi, 1873].

L'aurora del 4 febbraio 1872 nei dati e osservazioni del Collegio Romano

Il trattato di padre Secchi *"Sull'aurora elettrica del 4 febbraio 1872"* [Secchi, 1872] si apre con le seguenti parole: *"La superba aurora elettrica di cui siamo stati testimoni al 4 del presente mese, è così straordinaria, per i nostri climi, che merita di esser tramandata ai posteri colle particolarità tutte che vennero possibilmente segnalate durante la sua apparizione; e ciò è tanto più necessario in quanto che si sono manifestati varii fatti importanti per la teoria del fenomeno"*.

Alle 17:45 del 4 febbraio, un assistente di padre Secchi, mentre esegue le misure magnetiche di routine, nota che i magnetometri sono disturbati in modo inusuale. Solo il declinometro continua a misurare, pur tra ampie oscillazioni, mentre i magnetometri est-ovest e verticale vanno fuori scala. Osservando il cielo della torretta dell'osservatorio magnetico, subito vede l'aurora in direzione Nord e Nord-Est e corre a informare il direttore.

La descrizione dell'aurora che fa padre Secchi nel suo trattato sopra citato è estremamente accurata: la sua forma, la variazione della sua colorazione nello spazio e nel tempo, e persino la sua posizione rispetto alle stelle più luminose e alle costellazioni più note. Egli riporta sfumature di verde-giallo nella parte più bassa, ma riferisce che le tonalità del rosso dominano alle quote più alte. È stato anche in grado di eseguire delle osservazioni spettrali, per quanto soggette ad ampi errori, a causa della bassa luminosità dell'aurora: gli sembrò a tratti di distinguere le linee spettrali dell'azoto, cosa sicuramente possibile, se le particelle che precipitavano hanno raggiunto quote intorno ai 120 km, dove possono interagire con l'azoto atmosferico e causare l'emissione di luce rosso-bluastro.

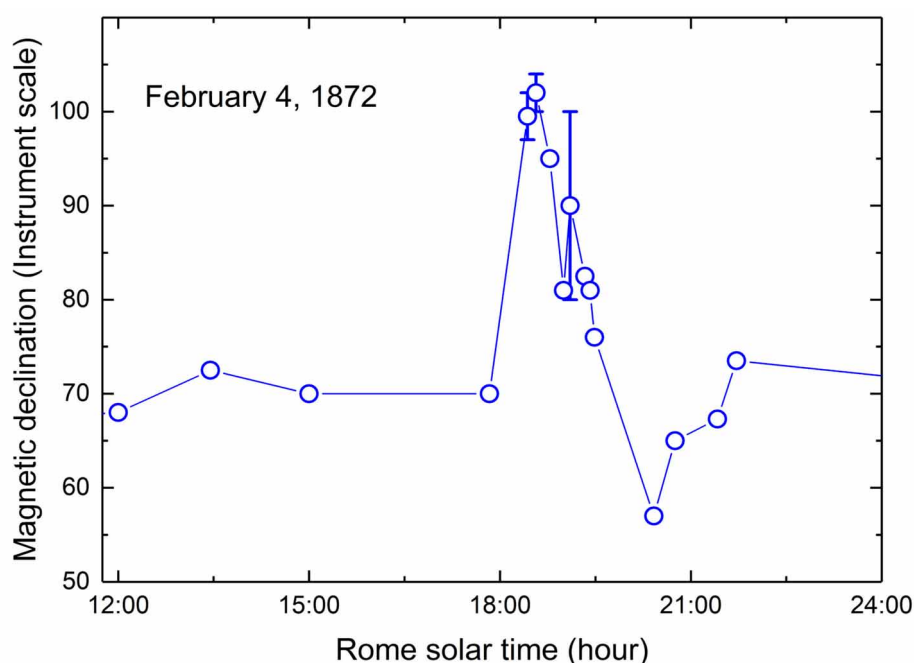
Le sue osservazioni sono pienamente in linea con quelle riportate all'epoca in varie altre parti del mondo. Addirittura, confrontando le sue osservazioni con un suo corrispondente a Sondrio, il prof. Lovisato, che parimenti vede le stesse strutture ad arco, stima la quota media dell'aurora a circa **246 km**. Queste le sue parole, che evidenziano un acume e una comprensione del fenomeno impressionanti per quei tempi: *"Stante questa contemporaneità di apparizione in siti così lontani, noi non possiamo formarci altra idea di questo fenomeno fuorché immaginando che la scarica elettrica la quale dall'atmosfera si diffondeva nel suolo investisse ogni osservatore, e che que' raggi che parevano a noi convergenti fossero solamente paralleli tra loro e alla risultante delle forze magnetiche terrestri. Idea non nuova certamente ma che ora sembra non potersi più mettere in dubbio da alcuno."*

Come abbiamo detto, gran parte delle misure dei magnetometri erano fuori scala, ma si può ricostruire il tracciato delle misure del declinometro che, ricordiamo, rappresenta la variazione dell'angolo tra il Nord magnetico e il meridiano geografico (Figura 4). La massima variazione rispetto al livello quieto, con un picco positivo seguito da una deflessione negativa meno intensa, si verifica tra le 18 e le 21. Secchi, insieme ai suoi collaboratori, riesce comunque a effettuare delle misure della componente orizzontale del campo magnetico terrestre durante il picco dell'evento e registra una massima deflessione di circa **600 nanoTesla**, più o meno in linea con altre rilevazioni che si possono trovare in letteratura per questo evento (ad esempio, a Bombay registrarono una deflessione di 830 nanoTesla). Ciò corrisponde a un'intensità circa cinque volte minore rispetto a quanto fu misurato per l'evento di Carrington, a cui abbiamo accennato più sopra.

Anche le osservazioni solari in corrispondenza dell'aurora sono state attente e meticolose, svolte in contemporanea da Secchi e da un suo ex studente a Moncalieri. Vengono fatti i conteggi del numero di macchie solari e una valutazione della loro superficie, ma anche i conteggi delle regioni più luminose (*faculae*) nonché delle protuberanze sulla corona e della loro estensione. Rispetto a un livello quieto del 31 gennaio (n. di macchie = 87), l'attività solare è cresciuta con un massimo intorno al 2 febbraio (n. di macchie = 116), per poi tornare a un livello più quieto il 5 febbraio (n. di macchie = 98).

Secchi fa quindi delle importanti considerazioni sulla relazione tra attività solare e aurore, anche queste di una modernità eccezionale. In breve, queste sono le sue intuizioni [Secchi, 1872]: Un conto è parlare di correlazione generale, in senso statistico, tra alta attività solare e risposta geomagnetica, altro conto è parlare di una relazione uno a uno tra singole eruzioni o protuberanze solari e aurore. Se la prima ipotesi può dirsi verificata, la seconda presuppone una trasmissione diretta di materia dal Sole alla Terra che inneschi sempre una qualche forma di interazione elettrica nell'atmosfera e, nemmeno all'epoca, si avevano evidenze dirette di questo. Le protuberanze osservate da noi sono solo quelle al bordo del disco solare e non possono essere "geoeffettive", come si dice oggi, perché la materia da esse emessa viene sparata in direzioni lontane da noi. Le eruzioni "frontali" non possono essere osservate direttamente ma possiamo indirettamente correlarle alla presenza di un maggior numero di macchie solari. Oggi sappiamo che il quadro che padre Secchi delineava, in base alle misure da lui prese, era essenzialmente corretto.

Figura 4 Misure di declinazione magnetica dell'Osservatorio del Collegio Romano durante la seconda parte della giornata del 4 febbraio 1872. Da Secchi [1872], con ricostruzione di Berrilli e Giovannelli [2022].
Figure 4 Magnetic declination as measured at the Collegio Romano Observatory during the second half of day 4th February 1872. Data originally published by Secchi [1872], and reconstructed by Berrilli and Giovannelli [2022].



Gli effetti dell'aurora del 1872 nelle cronache dell'epoca

L'aurora del 4 febbraio 1872 è stato uno di quegli eventi notevoli di "Meteorologia Spaziale" oggetto di numerosi studi a posteriori, data la sua intensità e il clamore che suscitò.

L'effetto più drammatico di questo evento fu la tempesta magnetica ad esso associata, che indusse correnti elettriche fino all'interno della crosta terrestre. Ciò produsse addirittura l'interruzione del servizio telegrafico tra Europa e Stati Uniti, che avveniva tramite un cavo transoceanico che venne posato nel 1866.

Altre simili interruzioni nelle trasmissioni telegrafiche vennero segnalate in varie parti del mondo, per esempio in Inghilterra, ma anche in Italia. Sempre al Collegio Romano, padre Secchi aveva fatto approntare una stazione telegrafica, sia per comunicare con altri osservatori in Europa, sia per scopi di ricerca, ovvero proprio per verificare gli effetti di perturbazioni, soprattutto atmosferiche, sulle linee elettriche del telegrafo. Egli venne informato del fatto che le trasmissioni furono fortemente disturbate proprio a partire dalle 17:45 di quel 4 febbraio.

Dalle misure che sono state raccolte ed analizzate nella letteratura scientifica, sembra che la

tempesta geomagnetica del 4 febbraio 1872 sia stata probabilmente la seconda più intensa mai registrata strumentalmente dall'uomo. Solo l'evento di Carrington del 1859 è stato più intenso e devastante.

Se un tale evento dovesse verificarsi oggi, dato l'enorme progresso tecnologico occorso nel frattempo e la mole di infrastrutture potenzialmente soggette a danni e disturbi da tempeste magnetiche e ionosferiche, le conseguenze potrebbero essere molto più drammatiche. È per questo che molti governi e istituzioni transnazionali si stanno attivando da anni per studiare e mettere in opera strategie di mitigazione e protezione.

Bibliografia

- Berrilli F. e Giovannelli L., (2022). *The Great Aurora of 4 February 1872 observed by Angelo Secchi in Rome*. J. Space Weather Space Clim., 3, 10. <https://doi.org/10.1051/swsc/2021046>
- Secchi A., (1873). *Sulla distribuzione delle protuberanze solari e loro relazione colle macchie coll'aggiunta di un riassunto de' lavori spettroscopici fatti in questi ultimi anni all' osservatorio del Collegio romano*. Tipografia delle Scienze Matematiche e Fisiche, Roma.
- Secchi A., (1872). *Sull'aurora elettrica del 4 febbraio 1872*.
<https://drive.google.com/file/d/1qAVSQcxld7Pzv4l4d24Gv7H7oU1wqHH4/view?usp=sharing>

Maggio 1921: la più grande tempesta magnetica del XX secolo

Lili Cafarella e Ingrid Hunstad

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Tra il 14 e 15 maggio 1921 una serie di eventi devastanti si verificarono in diverse località del pianeta: erano le manifestazioni della più grande tempesta magnetica del XX secolo.

Nella notte tra il **14 e il 15 maggio 1921**, una serie di eventi distruttivi colpì diverse parti del mondo, mettendo in crisi i sistemi tecnologici dell'epoca. In Europa, una centrale telegrafica svedese prese improvvisamente fuoco, mentre a Parigi i sistemi telegrafici cessarono di funzionare. In Gran Bretagna, Scozia e Irlanda si registrarono forti correnti indotte nei sistemi di comunicazione, mentre le linee telefoniche tra Copenaghen, Göteborg e Stoccolma rimasero inutilizzabili per molte ore.

Oltreoceano, la situazione non fu migliore: a New York, un incendio divampò nella stazione Brewster della Central New England Railroad, distruggendo l'intero edificio. In tutti gli Stati Uniti occidentali, si verificarono blackout nei sistemi telegrafici, con centraline in fiamme e danni estesi in città come Denver, Salt Lake City, San Francisco, Seattle e Spokane. Anche a Phoenix, in Arizona, le linee telegrafiche andarono fuori uso.

Non solo l'Europa e l'America furono colpite: effetti simili furono osservati anche nelle linee telegrafiche dell'Australia occidentale, confermando l'estensione globale dell'evento.

Il 15 maggio 1921 era destinato a passare alla storia. Ma cosa successe esattamente in quella data? Si verificò la più grande tempesta geomagnetica del XX secolo.

L'evento

Nei giorni precedenti l'evento, una vasta **macchia solare**, denominata AR1842, apparve sulla superficie del Sole. Con dimensioni imponenti di circa 151,000 km per 34,000 km, questa macchia si rivelò essere la causa di una serie di **espulsioni di massa coronale** (CME, [1]) particolarmente intense, che colpirono la Terra per tre giorni consecutivi, dal 13 al 16 maggio. Le potenti sollecitazioni mandarono fuori scala i **magnetometri** di tutto il mondo, strumenti progettati per misurare le variazioni del campo magnetico terrestre.

Grazie a ricostruzioni recenti, sappiamo che l'evento fu caratterizzato da **tre episodi principali**. Il primo si verificò nella notte del 13 maggio, quando due CME arrivarono quasi contemporaneamente, spazzando via gran parte delle particelle tra il Sole e la Terra e preparando il terreno per un terzo e più potente CME. Quest'ultimo colpì la magnetosfera terrestre con **particolare violenza** alle 22:20 UT del 14 maggio. Il terzo e ultimo CME della serie raggiunse la Terra il 16 maggio, provocando effetti simili a quelli dei giorni precedenti.

Questa sequenza di eventi generò una potente **onda d'urto** che investì il pianeta, culminando in una tempesta geomagnetica di grande intensità. L'impatto causò gravi danni alle infrastrutture elettriche in tutto il mondo, con **blackout** diffusi in diverse aree del Nord America e dell'Europa. **Aurore polari** furono osservate a latitudini insolite, come in Gran Bretagna, Messico, Texas, Samoa e Tonga. Le aurore furono così luminose che in alcune zone degli Stati Uniti, cittadini preoccupati segnalavano alle autorità bagliori che credevano fossero incendi nelle campagne.

Il ciclo solare 15

Nel 1921, la Terra si trovava nel pieno del Ciclo Solare 15, uno dei cicli solari più attivi del secolo. Questo ciclo, che si estese dal 1913 al 1923, fu caratterizzato da numerosi brillamenti solari che innescarono tempeste geomagnetiche di grande impatto, influenzando significativamente le tecnologie dell'epoca.

Il numero di macchie solari è un indicatore chiave dell'attività solare: valori più alti indicano un'attività maggiore. Durante un ciclo solare, il numero di macchie cresce gradualmente fino a raggiungere un picco, per poi diminuire lentamente fino a raggiungere il minimo. Ogni ciclo dura in media circa 11 anni.

Il Ciclo Solare 15 raggiunse il suo massimo di attività nel 1917, con un picco di 221,7 macchie solari. L'evento del 1921 si verificò quindi nella fase discendente del ciclo, ma riuscì comunque a generare una tempesta geomagnetica di proporzioni straordinarie.

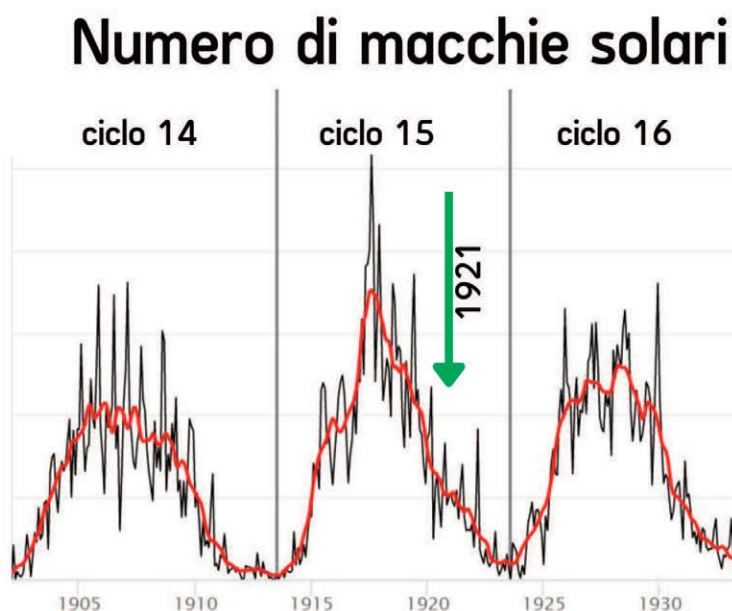


Figura 1 Numero di macchie solari per i cicli 14, 15 e 16. (Crediti: L. Cafarella).

Figure 1 Sunspot number for cycles 14, 15, and 16. (Credits: L. Cafarella).

Le tempeste del XX secolo

La tempesta magnetica del 15 maggio 1921 non è stata un caso isolato durante il ciclo solare 15. Ad esempio, nel 1917 si verificò un altro evento significativo, sebbene meno intenso, che causò l'interruzione temporanea delle comunicazioni radio in Gran Bretagna. Inoltre, nel 1922, una serie di brillamenti solari provocò gravi disturbi alle comunicazioni radio in tutto il mondo. Diversi studiosi hanno cercato di determinare l'intensità della tempesta del 1921 confrontandola con altri eventi di rilievo. In particolare, hanno considerato come termini di paragone la famosa tempesta di Carrington del 1859, ricordata come la più intensa mai registrata, e quella del marzo 1989, una delle più significative in tempi recenti. Per effettuare il confronto, i ricercatori hanno raccolto dati per calcolare l'indice "Dst" (Disturbance Storm Time Index), una misura dell'attività geomagnetica comunemente utilizzata nella Meteorologia Spaziale.

I risultati hanno indicato che la tempesta del 1921 raggiunse un valore estremo stimato di Dst pari a -907 nT (nanoTesla), un dato molto vicino a quello della tempesta di Carrington del 1859, che raggiunse -900 nT. Per confronto, la tempesta del marzo 1989 registrò un valore Dst di -589 nT. Questi risultati dimostrano che la tempesta del 1921 fu paragonabile in intensità all'evento di Carrington.

Lo studio di queste tempeste geomagnetiche è fondamentale per comprendere gli effetti che possono avere sul nostro pianeta. Sottolineano l'importanza di monitorare l'attività solare e di sviluppare strategie per mitigare i potenziali impatti negativi sulle tecnologie terrestri.

Che effetti avrebbe una tempesta della portata di quella del maggio 1921 se si verificasse oggi?

La tempesta magnetica del 15 maggio 1921 fu molto più intensa rispetto a quella del marzo 1989, che comunque provocò gravi disagi, tra cui il blackout dell'intero sistema elettrico della provincia del Québec, in Canada. Eventi di questo tipo si sono verificati più volte in passato e sottolineano quanto la nostra vita, sempre più dipendente dalla tecnologia, sia esposta a rischi significativi.

Diventa quindi fondamentale implementare infrastrutture per il monitoraggio costante dell'attività solare, così da poter prevedere eventi potenzialmente dannosi e prepararsi a prendere le necessarie contromisure. In questo contesto, l'INGV partecipa al consorzio **PECASUS** [2], patrocinato dall'Organizzazione Internazionale per l'Aviazione Civile (ICAO). L'obiettivo di PECASUS è proprio quello di sviluppare sistemi di allerta per consentire modifiche tempestive alle rotte aeree maggiormente esposte ai rischi legati all'attività solare.



Figura 2 The Northern Lights, Sydney Laurence (1921). Il pittore americano ha creato diverse opere pittoriche che raffigurano aurore, probabilmente ispirate anche dall'evento del 1921. Nell'immagine, un dipinto ad olio che rappresenta l'aurora boreale che si staglia sullo skyline di Anchorage, in Alaska.

Figure 2 The Northern Lights, Sydney Laurence (1921). The American painter created several works depicting auroras, likely inspired by the event of 1921. In the image, an oil painting represents the northern lights set against the skyline of Anchorage, Alaska.

Sitografia

[1] <https://ingvambiente.com/le-espulsioni-di-massa-coronale-cme/>

[2] <https://ingvambiente.com/2018/11/23/lingv-e-il-nuovo-centro-di-servizi-meteorologici-spaziali-pecasus/>

La catastrofe del dirigibile Italia di Umberto Nobile: perché i naufraghi non furono ascoltati?

Bruno Zolesi e Michael Pezzopane

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Una ricostruzione delle condizioni di radiopropagazione ionosferica dell'epoca dà una verosimile spiegazione della tardiva ricezione dell'SOS lanciato dai superstiti a seguito della catastrofe del Dirigibile Italia.

Il 25 maggio 1928 il **Dirigibile Italia**, dopo aver sorvolato il Polo Nord e sulla via del ritorno verso la base logistica a NyÅlesund, urtò e precipitò sulla banchisa Artica, in una zona a circa 100 km a nord-est delle isole Svalbard.

I superstiti avevano a disposizione una radio HF portatile, sbalzata anch'essa fuori dalla cabina durante l'incidente. Con questa tentarono di trasmettere ripetutamente un messaggio di soccorso. Ma l'SOS fu intercettato **solo dopo nove giorni dalla catastrofe**, il 3 giugno 1928, da un radioamatore russo vicino alla città di Arkangelesk, distante 1900 km dal luogo del disastro.



Figura 1 Foto originale d'epoca del dirigibile Italia in Artide. (Crediti: Maurizio Piazzai, Flickr).

Figure 1 Original picture of the Italia airship in the Arctic. (Credits: Maurizio Piazzai, Flickr).

Un SOS caduto nel vuoto

A seguito del naufragio, 10 uomini guadagnarono la banchisa, tra cui lo stesso ufficiale della Regia Aeronautica **Umberto Nobile**, ideatore del dirigibile e al comando della spedizione. Dopo l'impatto il dirigibile aveva ripreso il volo. Degli altri 6 uomini dell'equipaggio rimasti a bordo e del dirigibile stesso non si ebbe più notizia.

I superstiti trovarono rifugio in quella che divenne poi famosa come la *Tenda Rossa*. Da qui tentarono, senza successo, di telegrafare richieste di soccorso alla nave Città di Milano della Regia Marina, ancorata poco distante a NyÅlesund, a circa 400 km. Ma nessuno rispose alla richiesta di aiuto. Come mai nessuno rispose all'SOS?

Uno studio dell'**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia** ricostruisce le condizioni della ionosfera all'epoca del naufragio, con il preciso intento di dare una risposta a questa domanda.

Una ionosfera disturbata

La ionosfera è lo strato di atmosfera, compreso tra i 50 e i 1000 km di altezza, che condiziona significativamente la propagazione delle onde radio.

L'applicazione di moderni modelli fisico-matematici (*mapping ionosferico*) ha consentito ai ricercatori di ottenere, per quell'epoca, i valori della massima frequenza utilizzabile (MUF) per comunicare ad una determinata distanza, nonché una mappa della corrispondente **zona d'ombra**, ossia la regione all'interno della quale, per una determinata frequenza, non si può comunicare. Questi dati, insieme all'analisi delle condizioni del campo geomagnetico dell'epoca, hanno permesso di determinare che la radio frequenza di **9.4 MHz** utilizzata dai sopravvissuti **non poteva essere ricevuta nella regione delle Isole Svalbard** dove si trovava la nave appoggio Città di Milano. A tale frequenza, infatti, le condizioni dello strato riflettente della ionosfera permettevano solo comunicazioni su distanze più lunghe. La località di Arkangelesk, trovandosi in una posizione geografica più idonea rispetto al luogo del disastro, poteva quindi ricevere i radio segnali trasmessi dai naufraghi, anche se di debole intensità.

Il salvataggio dei superstiti

Anche la comunicazione per onda di terra (un'onda che non si riflette per via ionosferica ma si propaga vicino alla superficie della Terra) tra la Tenda Rossa e la nave Città di Milano non funzionò. I motivi sono legati probabilmente al precario sistema di antenna messo su dai naufraghi e alla debole potenza erogata dall'apparecchiatura stessa. Il segnale inoltre probabilmente risultava molto attenuato a causa della presenza di montagne le cui altezze superano i 1000 m.

Ci vollero ben **48 giorni** prima che tutti i superstiti venissero salvati. Nove soccorritori perirono nelle ricerche. Tra questi **Roald Amundsen** disperso nel corso delle operazioni.

Le conseguenze del disastro

L'episodio scatenò tantissime polemiche, discussioni e controversie. Le ipotesi, le critiche e gli argomenti a sostegno sono state raccontate negli anni in memoriali, articoli di giornale, processi giudiziari e film. L'impatto della tragedia fu enorme, tanto che l'accaduto mise fine all'impiego dei dirigibili nelle operazioni militari italiane.

Il contributo dei ricercatori INGV sui motivi della mancata comunicazione, si inserisce in questa cornice per fornire un tassello aggiuntivo al quadro generale.

La ricostruzione dello stato della ionosfera e delle condizioni che impedirono la comunicazione tra la Tenda Rossa e la nave appoggio Città di Milano, fa capire quello che con molta probabilità accadde in quei giorni. Dopo 90 anni, finalmente è possibile dare una giustificazione scientifica allo sconforto vissuto dai superstiti per l'impossibilità di inviare alla nave Città di Milano la loro richiesta di soccorso.

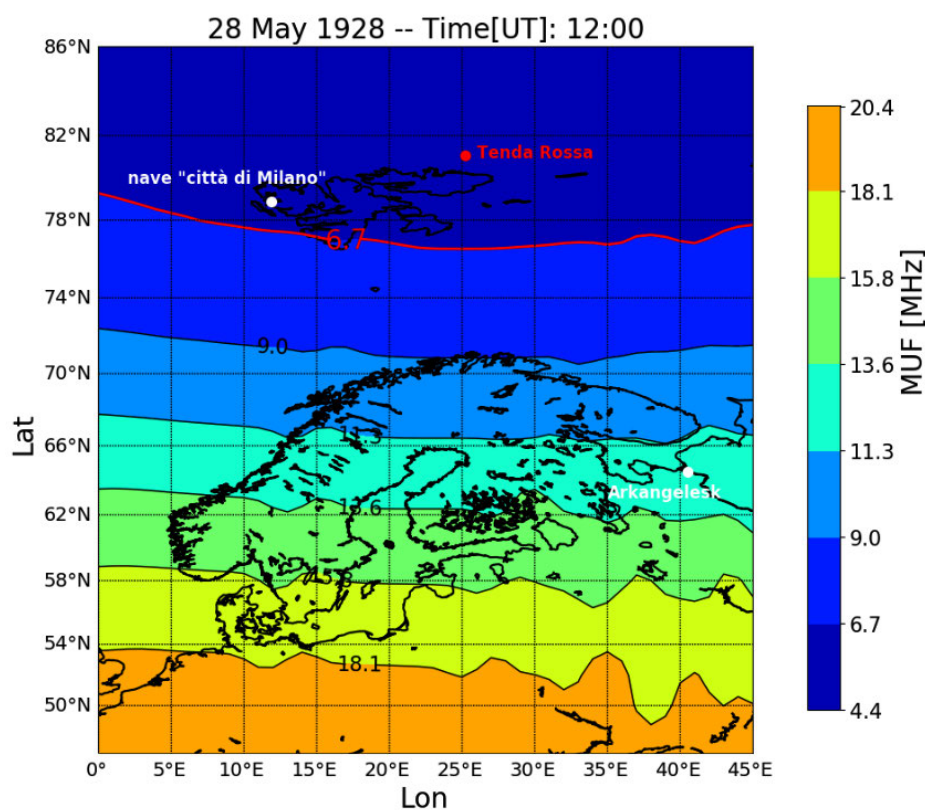


Figura 2 Isolinee della MUF e della corrispondente zona d'ombra calcolate per il 28 maggio 1928, al variare della radio frequenza trasmessa dal punto ove era situata la Tenda Rossa. La zona racchiusa dall'isolinea a 6.7 MHz (in rosso), che comprende le isole Svalbard, e quindi la nave Città di Milano, poteva essere raggiunta dalla Tenda Rossa solo con frequenze più basse di 6.7 MHz e quindi notevolmente più basse della frequenza di 9.4 MHz utilizzata dai naufraghi. Al contrario la città di Arkangelesk, che si trova ben oltre l'isolinea di 11.3 MHz, era in grado di ascoltare la richiesta di aiuto dei naufraghi. La mappa in figura si riferisce alle ore 12:00, per le altre ore del giorno la situazione è pressoché simile, e lo stesso vale anche per il mese di giugno 1928.

(Crediti M. Pezzopane e B. Zolesi).

Figure 2 Isolines of the MUF and the corresponding shadow zone calculated for 28 May 1928, as the radio frequency transmitted from the point where the Red Tent was located varied. The area enclosed by the 6.7 MHz isoline (in red), which includes the Svalbard islands, and therefore the Città di Milano ship, could be reached by the Red Tent only with frequencies lower than 6.7 MHz and therefore considerably lower than the frequency of 9.4 MHz used by the castaways. On the contrary, the city of Arkangelesk, which is located well beyond the 11.3 MHz isoline, was able to hear the shipwrecked people's call for help. The map in the figure refers to 12:00, for the other hours of the day the situation is almost similar, and the same also applies to the month of June 1928.

(Credits M. Pezzopane and B. Zolesi).

Bibliografia

- Sicolo C., (2017). *Le onde smarrite della Tenda Rossa*. Sandit SRL: Albino (Bergamo), Italy (in Italian), ISBN 978-88-6928-259-1
- Zolesi B., Pezzopane M., Bianchi C., Meloni A., Cander L.R., Tozzi R., (2020). *The shipwreck of the airship "Dirigibile Italia" in the 1928 polar venture: A retrospective analysis of the ionospheric and geomagnetic conditions*. Space Weather, 18, e2020SW002459. <https://doi.org/10.1029/2020SW002459>



Figura 3 Copertina della "Domenica del Corriere" del 23 febbraio 1964 che rievoca il naufragio del dirigibile Italia.

Figure 3 "Domenica del Corriere" cover from 23 february 1964, recalling the Italia shipwreck.

Profezie e luci nel cielo: l'aurora di Fatima nel 1938

Lili Cafarella

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Alla fine di gennaio 1938, un'impressionante aurora polare illuminò i cieli di diverse parti del mondo, un evento che fu associato da alcuni a una delle celebri profezie di Fatima. Questo fenomeno è noto come la Tempesta di Fátima, una tempesta geomagnetica scatenata da un'intensa attività solare.

La **tempesta geomagnetica** del 25-26 gennaio del 1938, nota anche come la **Tempesta di Fátima**, fu innescata da un'eccezionale attività solare che si verificò tra il 16 e il 26 gennaio, con un culmine registrato nei giorni 22, 25 e 26 gennaio.

In quell'anno, il Sole si trovava nel 17° ciclo solare, caratterizzato da un'elevata attività magnetica. Questo periodo storico particolare, segnato da tensioni globali, fece sì che l'aurora venisse interpretata come un segno premonitore degli eventi catastrofici a venire, tra cui lo scoppio della Seconda Guerra Mondiale. In particolare, molti videro in quell'aurora la realizzazione di una delle profezie rivelate ai tre pastorelli di Fatima. Suor Lúcia Santos, una delle veggenti, aveva infatti predetto che una luce misteriosa avrebbe preceduto la punizione del mondo per i suoi peccati, interpretata come l'inizio della guerra imminente:

"Quando vedrete una notte illuminata da una luce sconosciuta, sappiate che questo è il grande segno che Dio vi dà che sta per punire il mondo per i suoi crimini..."

Le prime osservazioni

Secondo quanto riportato dalla rivista *Nature* nell'aprile del 1938, il Royal Observatory di Greenwich osservò una gigantesca macchia solare già il 15 gennaio, che copriva un'area di 3,000 milionesimi dell'emisfero solare, la più grande mai registrata fino ad allora, superando anche la macchia solare che aveva provocato la tempesta geomagnetica del maggio 1921 (considerata la macchia solare più grande mai osservata fino a quel momento).

Nei giorni successivi, l'attività solare si intensificò, culminando tra il 24 e il 26 gennaio, dando origine alla tempesta geomagnetica che iniziò la sera del 16 gennaio.

Gli osservatori geomagnetici di tutto il mondo registrarono l'evento, incluso quello italiano di Castellaccio (GE), che rilevò le variazioni nella declinazione e nella componente orizzontale del campo magnetico terrestre. L'impulso magnetico fu causato dall'arrivo di particelle solari, e la massima attività magnetica si registrò proprio nella notte tra il 25 e 26 gennaio.

Gli effetti

L'aurora polare fu visibile in gran parte dell'Europa, dagli Stati del Nord fino alla Sicilia, ma anche in Nord America e nell'Atlantico. Nei Paesi Bassi, il fenomeno fu interpretato come un segno beneaugurante per la nascita della principessa Beatrice, avvenuta il 31 gennaio. In Italia, l'aurora fu ammirata anche dai membri della squadriglia dei Sorci Verdi, impegnati in una trasvolata oceanica; tra loro, Bruno Mussolini riportò difficoltà nelle comunicazioni radio a causa dell'evento.

A Large Sunspot

A BRIEF scrutiny of the sun's disk on January 15, made possible at Greenwich in a break of persistent cloud, showed that a big sunspot had appeared. The approximate time of the central meridian passage was January 18.4, the latitude of the spot being 19° N.; its area was estimated to be about 2,500 millionths of the sun's hemisphere. The spot, which resembles the giant spot of last October, will reach the sun's western limb on January 24. A magnetic storm was recorded at Abinger commencing on January 16 at 22.6^h.

Figura 1 Brano tratto dal bollettino del Royal Observatory di Greenwich.

Figure 1 Excerpt from the bulletin of the Royal Observatory of Greenwich.

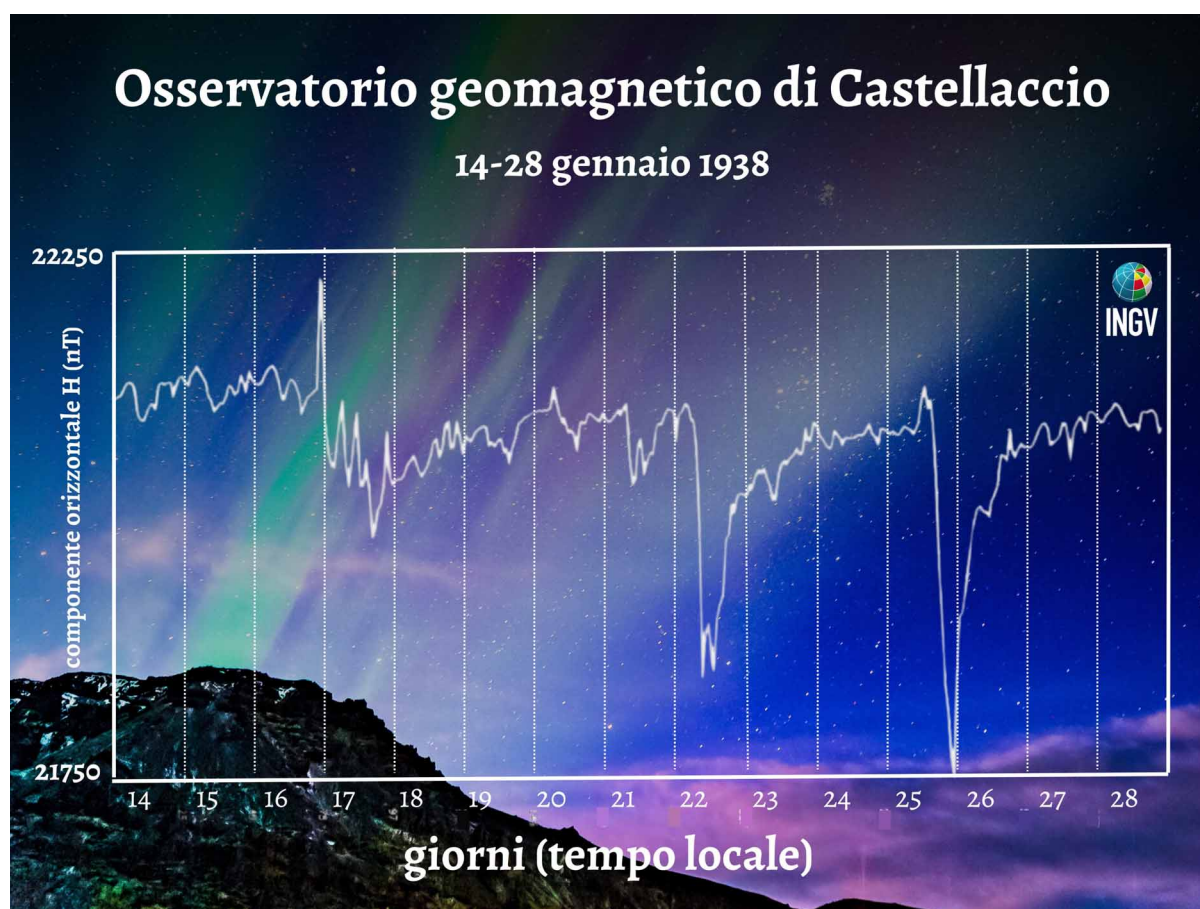


Figura 2 Andamento della componente orizzontale H dal 14 al 28 gennaio 1938 all'osservatorio di Castellaccio (GE). (Crediti: L. Cafarella).

Figure 2 Trend of the horizontal component H from 14 to 28 January 1938 at the Castellaccio observatory (GE). (Credits: L. Cafarella).

Nonostante la spettacolarità dell'aurora, i danni tecnologici per fortuna furono piuttosto limitati. Tuttavia, si verificarono alcune interruzioni nelle trasmissioni radio in Canada, notevoli interferenze nelle comunicazioni telegrafiche, telefoniche e radio, con particolare impatto sulle trasmissioni in onde corte. Gli strumenti di navigazione andarono fuori uso.

In Italia l'equipaggio della squadriglia dei **Sorci Verdi**, un vanto dell'Ala fascista dell'epoca, ha documentato i dettagli di questo fenomeno nei giornali di bordo. Durante quei giorni, infatti, i tre aerei della squadriglia erano coinvolti nella trasvolata oceanica intercontinentale Roma – Dakar – Rio de Janeiro. Bruno Mussolini, figlio del Duce, pilotando il suo aereo, segnalò le difficoltà di contattare la stazione radio di Guidonia e di effettuare i rilevamenti radiogoniometrici con il sestante.



Figura 3 Immagine creata per INGVambiente dall'intelligenza artificiale DALL-E – Bing Image Creator.

Figure 3 Image created for INGVambiente by the artificial intelligence DALL-E – Bing Image Creator.

L'aurora del 1938 suscitò grande interesse anche nei media. Giornali come *Il Corriere della Sera* e *La Stampa* riportarono l'evento con enfasi, descrivendo l'aurora come un fenomeno straordinario e luminoso:

“Un'aurora boreale sull'Italia. Segnalazioni da tutti i centri della Valle Padana e da numerose città straniere. Si tratterebbe di un'aurora polare eccezionalmente alta e luminosa che si sarebbe riverberata sino al nostro orizzonte”.

Il fascino di questa manifestazione celeste ispirò anche gli artisti dell'epoca, tra cui Luigi Russolo, esponente del Futurismo, che dipinse un'opera dedicata proprio a questo evento.



Figura 4 La notizia sui giornali dell'epoca.

Figure 4 The news in the newspapers of that time.



Figura 5 Aurora boreale, Luigi Russolo, olio su tela, 1938.

Figure 5 Northern Lights, Luigi Russolo, oil on canvas, 1938.

Un'aurora rosso sangue

Lili Cafarella, Domenico Di Mauro e Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Il 23 agosto 1939 fu osservata a latitudini inconsuete una aurora di intenso colore rosso, che portò meravigliosi giochi di colore nei cieli d'Europa, interpretati da molti come messaggio di sventura.

Il 23 agosto 1939 è passato alla storia per aver delineato il quadro che in breve avrebbe condotto al secondo conflitto mondiale.

In quella data fu siglato il **patto von Ribbentrop-Molotov**, noto anche come il **patto di non aggressione tedesco-sovietico**, firmato dai ministri degli Esteri dell'Unione Sovietica, **Vyacheslav Molotov**, e della Germania nazista, **Joachim von Ribbentrop**. Il patto conteneva un protocollo segreto che prevedeva la divisione di alcuni territori dell'Europa orientale in sfere di influenza tra la Germania nazista e l'Unione Sovietica. L'accordo di non aggressione consentì ai due paesi di evitare conflitti reciproci e garantì una certa stabilità nelle rispettive posizioni territoriali. Pochi giorni dopo, il 1° settembre 1939, grazie a questo accordo, la Germania nazista invase la Polonia, innescando l'escalation dei conflitti che avrebbero portato alla **Seconda guerra mondiale**.

Dalla storia ...

Quella storica sera Adolf Hitler si trovava a Berghof, la sua residenza situata sulle Alpi bavaresi. Questo luogo, uno dei luoghi preferiti dal Führer, fungeva sia da sua residenza privata che da ritrovo.

Proprio qui, il 23 agosto del 1939, fu avvistata una imponente ed inaspettata aurora boreale. Se ne trova testimonianza nelle *"Memorie del Terzo Reich"* del gerarca nazista Albert Speer presente in Baviera con Hitler.

Figura 1 Brano tratto da
"Memorie del Terzo
Reich".

*Figure 1 Excerpt from
Memoirs of the Third Reich.*

profonda. Adesso gli sembrava di essere tanto in alto da non dover temere più le sorprese del destino.

Quella notte ci intrattenemmo con Hitler sulla terrazza del Berghof ad ammirare un raro fenomeno celeste: per un'ora circa, un'intensa aurora boreale illuminò di luce rossa il leggendario Untersberg che ci stava di fronte, mentre la volta del cielo era una tavolozza di tutti i colori dell'arcobaleno.¹ L'ultimo atto del *Crepuscolo degli dei* non avrebbe potuto essere messo in scena in modo più efficace. Anche i nostri volti e le nostre mani erano tinti di un rosso innaturale. Lo spettacolo produsse nelle nostre menti una profonda inquietudine. Di colpo, rivolto a uno dei suoi consiglieri militari, Hitler disse: «Fa pensare a molto sangue. Questa volta non potremo fare a meno di usare la forza».²

Già da due o tre settimane l'attenzione di Hitler si era chiaramente spostata sulle questioni militari. Parlando, a volte per ore, con questo o quello dei suoi quattro consiglieri militari – il

Il colore dell'aurora era di un intenso colore rosso, portando alcuni a percepirla come un ominoso presagio.

... alla scienza

L'aurora del 23 agosto 1939 fu provocata da una grande **perturbazione del campo magnetico terrestre** durante un periodo di moderata attività solare. Questo evento era collegato ad una tempesta geomagnetica, scatenata da un brillamento solare avvenuto il 20 agosto. In particolare, da un'espulsione di massa coronale (CME) associata a tale brillamento.

Il ciclo solare (la periodica variazione dell'attività solare) in corso nel 1939 era il **ciclo solare 17**. L'elemento che caratterizza un ciclo solare è il numero delle macchie presenti sul disco del Sole. Questo numero in realtà varia molto da un anno all'altro. Il monitoraggio delle macchie è fondamentale per seguire le eruzioni di plasma solare e delle sue eventuali accelerazioni verso il sistema solare. Il ciclo di attività solare ha un periodo medio di circa 11 anni, e raggiunge i valori massimi nei periodi di massima attività della nostra stella.

Il ciclo solare 17 iniziò nel **settembre 1933** e si concluse nel **febbraio 1945**, coprendo curiosamente il periodo in cui Hitler rimase al potere. Rispetto ai cicli successivi, si caratterizzò per una attività solare lievemente inferiore e per un numero relativamente basso di macchie solari.

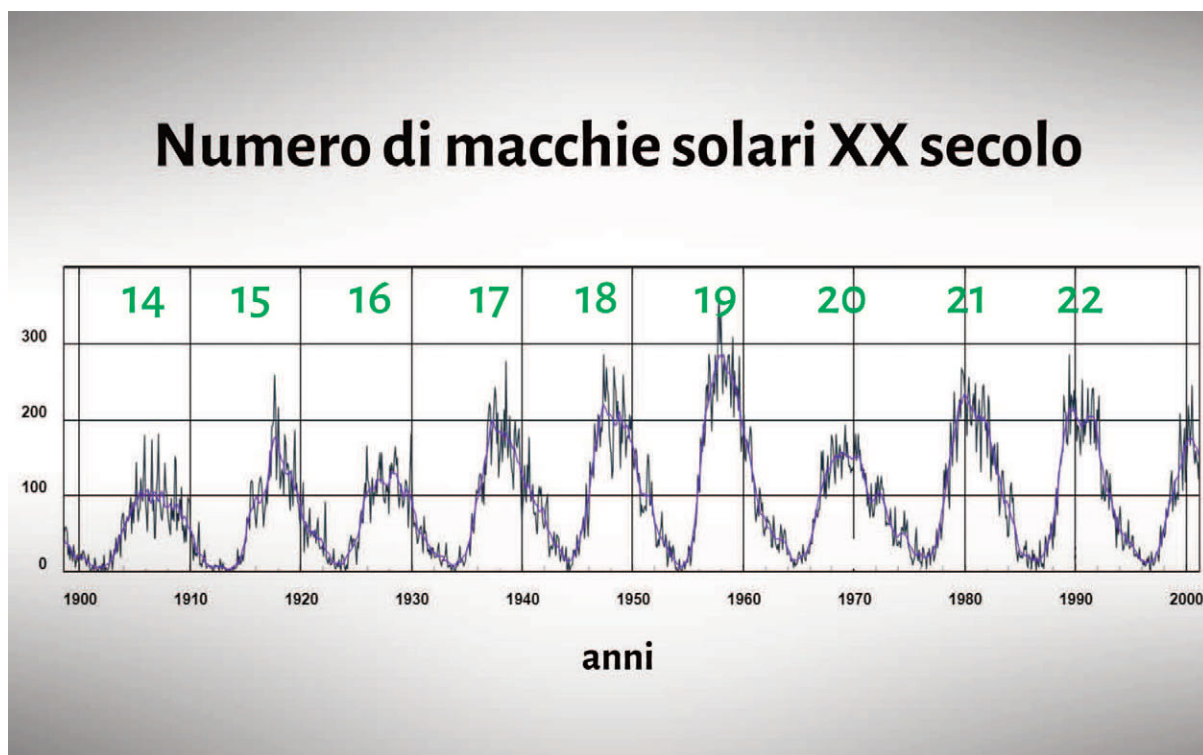


Figura 2 Numero di macchie solari per il XX secolo. (Adattato da NOAA).

Figure 2 Sunspot number during XX century. (Adapted from NOAA).

Il 1939 è sulla fase discendente del ciclo, quando l'attività solare cominciava a decrescere. Nonostante questo, il brillamento solare che causò la perturbazione fu un evento significativo, così come furono significativi la tempesta e l'aurora osservata quella notte.

La tempesta magnetica

La popolazione sperimentò direttamente gli **effetti della tempesta** in varie parti del mondo, come dimostrano numerose testimonianze dell'epoca. Furono osservati problemi nelle comunicazioni radio e nelle reti di energia elettrica, blackout radio e forti interferenze nelle comunicazioni a lunga distanza. In alcune località, le reti di distribuzione dell'energia elettrica subirono danni significativi.

Le spettacolari manifestazioni luminose, note come **aurore polari** e spesso concomitanti con le tempeste geosferiche, furono osservate straordinariamente in diverse parti d'Europa.

Oggi sappiamo che questi fenomeni luminosi possono manifestarsi in diverse colorazioni anche in base ai meccanismi di generazione. A latitudini elevate, quando il colore predominante è il rosso, il fenomeno luminoso può essere generato dall'interazione tra le particelle solari e l'ossigeno e l'azoto presenti nell'atmosfera, a quote comprese tra i 60 e i 300 km. In queste condizioni, i fenomeni aurorali possono essere osservati anche a latitudini più basse, come nel centro-nord della Germania.

Le osservazioni in Italia

L'interesse per il geomagnetismo in Europa tra la fine del XVIII e l'inizio del XIX secolo crebbe notevolmente. Le comunità scientifiche eseguivano **misure di campo magnetico** sempre più accurate, con l'obiettivo di ottenere serie di misure sempre più lunghe per analizzare le variazioni spaziali e temporali del campo stesso nel lungo termine. È ciò che ancora svolge ciascuno degli oltre 150 osservatori geomagnetici sparsi nel mondo.

In Italia nel 1932 l'**Istituto Idrografico della Marina (IIM)** aveva messo in funzione l'Osservatorio magnetico di **Castellaccio** vicino Genova, dotato di un nuovo padiglione amagnetico all'osservatorio meteorologico già esistente. L'IIM aveva allestito il nuovo osservatorio con la strumentazione proveniente da Pola, chiusa qualche anno prima. Castellaccio registrò le componenti del campo fino al 1962, anno in cui fu costretto a chiudere a causa dell'urbanizzazione crescente della regione. Le osservazioni magnetiche effettuate a Castellaccio riguardavano la **declinazione D** e la **componente orizzontale H** del campo magnetico terrestre.

La tempesta nei dati dell'osservatorio magnetico italiano

Dai dati di **H** di Castellaccio per il 1939 è evidente la perturbazione dovuta alla tempesta, evidenziati nella figura seguente all'interno del rettangolo colorato.

Quando il plasma di origine solare impatta contro il guscio che protegge la Terra (la **magnetosfera**), in alcune condizioni si innescano processi fisici particolari. Un effetto potrebbe essere l'intensificazione della corrente elettrica presente intorno la Terra. Questa corrente, nota come **corrente ad anello**, avvolge il nostro pianeta come una ciambella e si trova ad una distanza dalla superficie terrestre tra circa 10,000 e 60,000 km. È alimentata da ioni ad alta energia carichi positivamente che hanno origine sia solare che terrestre.

L'intensificazione della corrente ad anello provoca una riduzione temporanea dell'intensità del campo magnetico terrestre. Questa diminuzione è registrata presso gli osservatori geomagnetici di tutto il pianeta come innesco della tempesta.

Quella notte di fine agosto 1939, l'intensità dell'interazione tra il plasma solare e la nostra magnetosfera si tradusse in un'illuminazione rosso sangue dei cieli europei, un evento che si configurò come un inquietante presagio di un imminente conflitto. Così, mentre la natura

mostrava il suo spettacolo sublime, si preparava il terreno per una catastrofe di ben altra natura, segnalando il drammatico inizio di una delle pagine più oscure della storia umana.

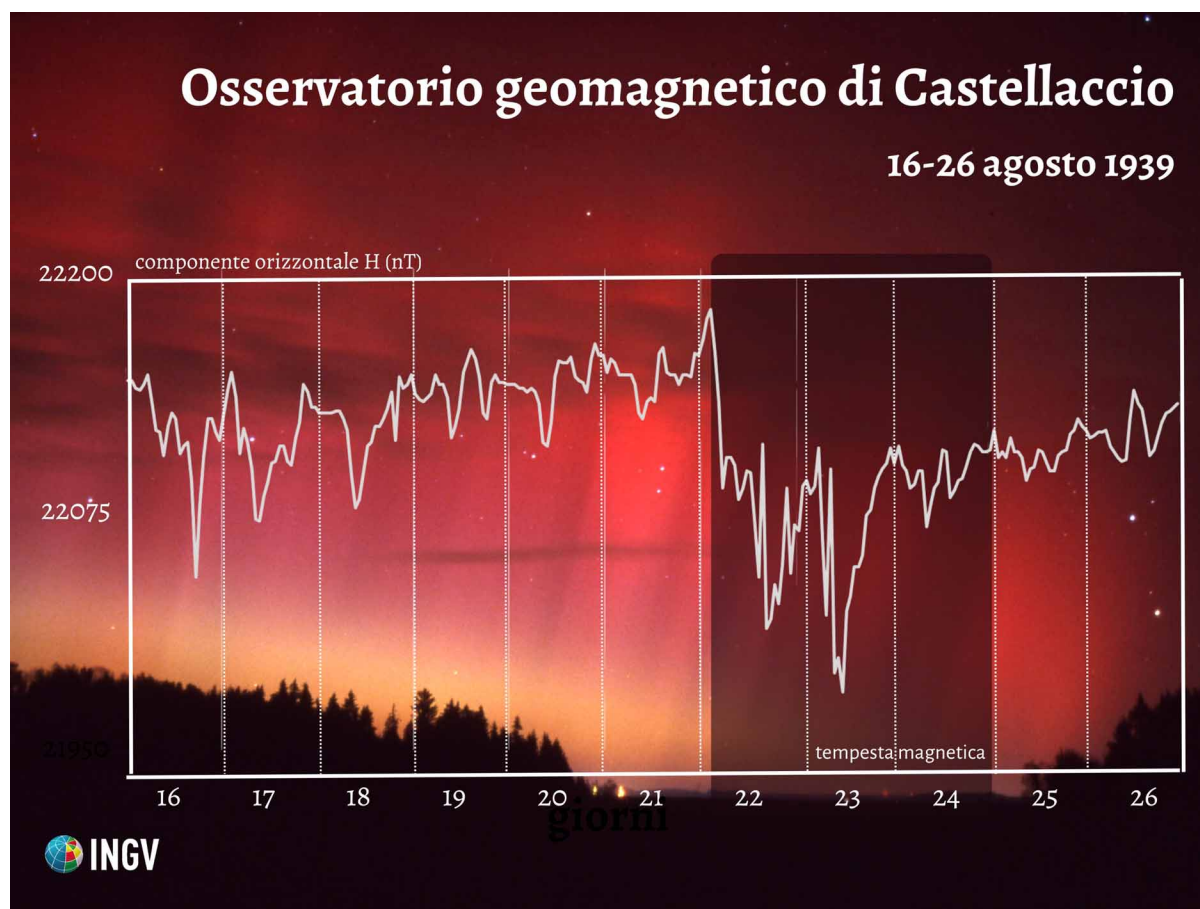


Figura 3 Registrazioni della componente orizzontale H all'osservatorio di Castellaccio. (Crediti: L. Cafarella).

Figure 3 Records of the horizontal component H at the Castellaccio observatory. (Credits: L. Cafarella).

Luci nel buio della guerra: le aurore boreali del 1941

Lili Cafarella¹ e Isabella Munda²

¹INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

²INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Palermo

Un misterioso spettacolo nel cielo buio della guerra: l'evento del 18 settembre 1941 che sorprese il mondo

All'inizio fu il buio, poi un'esplosione di luci colorate.

Era il 18 settembre 1941, e la Seconda Guerra Mondiale era nel pieno del suo svolgimento. In diverse parti del mondo si stavano verificando improvvisi blackout elettrici, lasciando intere città al buio. Allo stesso tempo, spettacolari luci colorate avevano cominciato ad illuminare il cielo notturno, spingendo molti a pensare che si trattasse di un nuovo segnale antiaereo o, forse, di una misteriosa arma nemica.

In realtà...cosa stava succedendo?

Un fenomeno celeste inaspettato

Nessuno, immerso in quel clima di incertezza e terrore, poteva immaginare che fosse un **effetto del Sole sulla Terra**. Si trattava infatti di una tempesta geomagnetica di grande intensità che stava perturbando la magnetosfera terrestre.

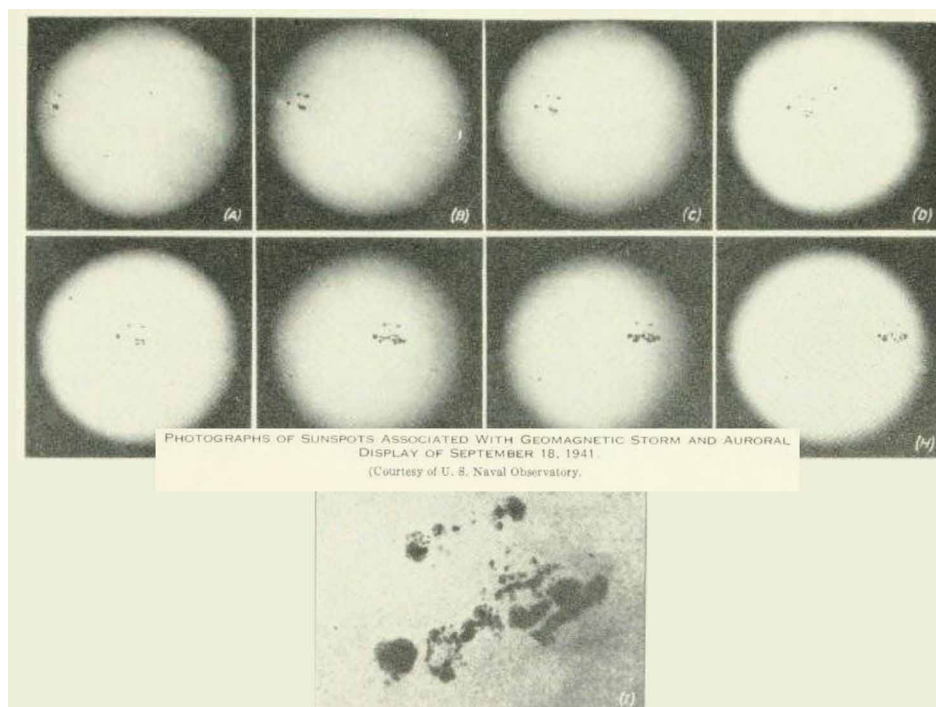
La **tempesta del 1941** fu innescata da un'attività solare straordinaria. Nonostante il ciclo solare 17 fosse già in declino dal 1937, gli astronomi avevano osservato nella settimana precedente uno dei più grandi gruppi di macchie solari degli ultimi anni, visibili addirittura a occhio nudo sul disco solare.

Figura 1 Le macchie solari osservate da U.S. Naval Observatory del settembre 1941 che causarono la tempesta del 18 e 19 settembre.

(Crediti: U.S. Naval Observatory.)

Figure 1 Sunspots observed by the U.S. Naval Observatory in September 1941 that caused the storm on September 18 and 19.

(Credits: U.S. Naval Observatory.)



Dalle enormi macchie solari, gli esperti dell'Osservatorio di Greenwich osservarono un brillamento solare alle 08:38 (UT) del 17 settembre. La radiazione ultravioletta e i raggi X emessi ionizzarono l'atmosfera terrestre, perturbando le comunicazioni radio ad alta frequenza. Poco meno di 20 ore dopo, un'espulsione di massa coronale (CME) colpì la Terra, innescando una tempesta geomagnetica alle 04:12 UT del 18 settembre. L'impatto delle particelle solari sulla magnetosfera causò una compressione improvvisa, generando un impulso magnetico registrato dagli osservatori di tutto il mondo.

Le registrazioni dell'evento in Italia

Anche in Italia furono registrati gli effetti della tempesta. L'Osservatorio Magnetico di Castellaccio, vicino Genova, nonostante le difficoltà della guerra continuava a raccogliere dati sulla declinazione magnetica (D) e sulla componente orizzontale (H) del campo magnetico terrestre. I dati registrati rivelano chiaramente l'impulso magnetico causato dall'arrivo delle particelle solari sulla magnetopausa, seguito poi da un'intensa attività magnetica nei giorni successivi.

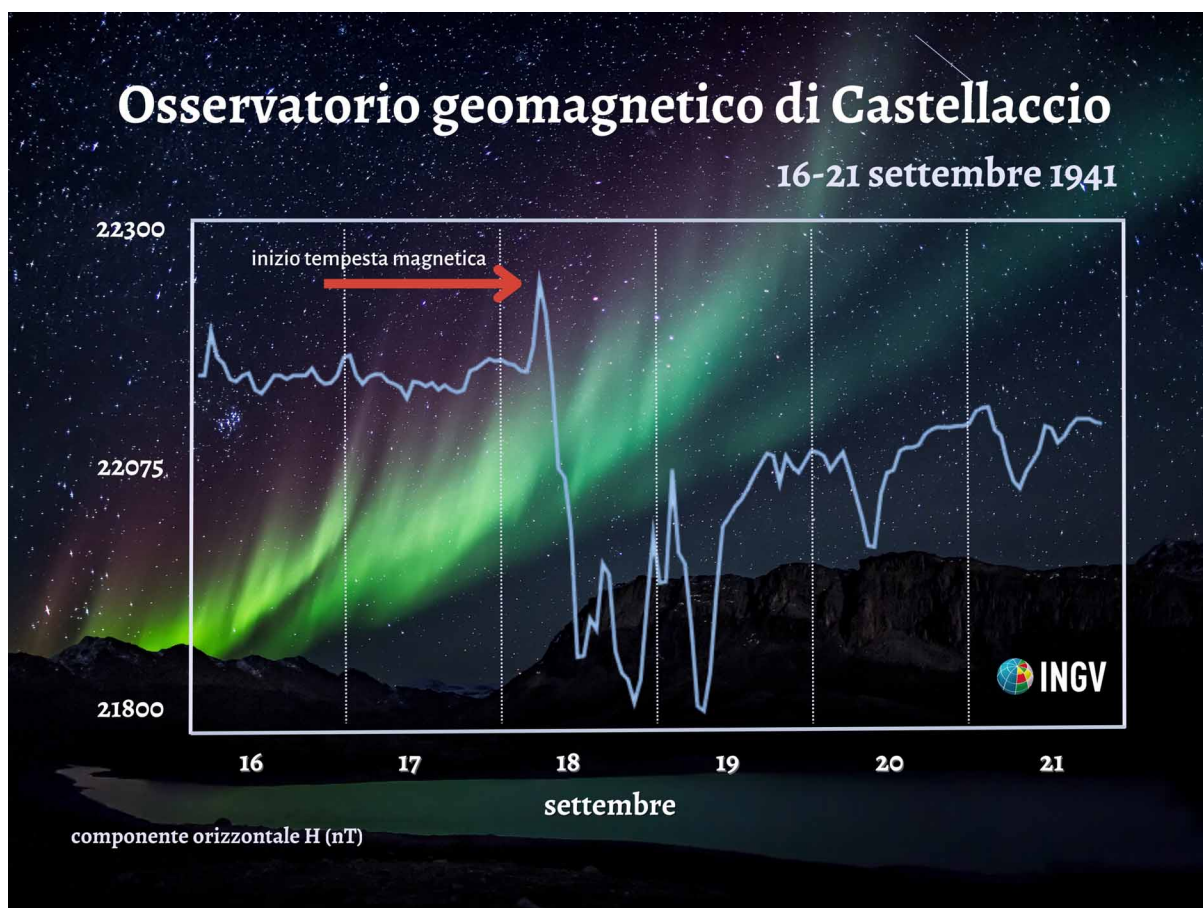


Figura 2 Componente orizzontale H del campo magnetico terrestre registrato presso l'osservatorio di Castellaccio dal 16 al 21 settembre 1941. La freccia rossa indica l'inizio dell'attività magnetica perturbata. (Crediti: L. Cafarella).

Figure 2 Horizontal component H of the Earth's magnetic field recorded at the Castellaccio Observatory from September 16 to 21, 1941. The red arrow indicates the start of disturbed magnetic activity. (Credits: L. Cafarella).

Quali furono gli effetti sulla Terra?

Furono straordinari.

I cieli notturni si illuminarono di aurore boreali spettacolari, visibili anche in regioni insolite come il New Mexico e Leningrado. Nel Nord Atlantico, numerose navi da guerra furono costrette a modificare i piani a causa della luce improvvisa, sventando molte operazioni previste sotto copertura del buio.



Figura 3 Immagine creata per INGVambiente dall'intelligenza artificiale DALL-E - Bing Image Creator.

Figure 3 Image created for INGVambiente by the artificial intelligence DALL-E - Bing Image Creator.

Possiamo immaginare la scena... La guerra imperversa, le città sono improvvisamente immerse nel buio, e le aurore boreali illuminano il cielo. Senza smartphone o notizie immediate, molte persone rimasero confuse e spaventate da ciò che stava accadendo.

Le comunicazioni radio ad alta frequenza furono gravemente disturbate, un problema critico durante un conflitto in cui le comunicazioni erano vitali per la difesa nazionale. La tempesta causò anche guasti alle reti elettriche, poiché l'attività geomagnetica può indurre campi geoelettrici nella crosta terrestre, interferendo con le infrastrutture elettriche.

L'evento ricevette una grande copertura sui quotidiani dell'epoca, con ampie discussioni sugli effetti dell'illuminazione improvvisa e sulle conseguenze per le operazioni belliche.

Considerazioni sull'evento

Anche se la tempesta geomagnetica del 18-19 settembre 1941 fu un episodio minore rispetto agli orrori della guerra, ci offre spunti di riflessione.

Oggi, più che allora, la nostra dipendenza dalla tecnologia rende eventi del genere potenzialmente devastanti. Una supertempesta geomagnetica potrebbe interrompere le comunicazioni radio, degradare i sistemi di posizionamento globale, danneggiare i satelliti, esporre piloti e passeggeri a radiazioni elevate e causare blackout estesi nelle reti elettriche. Per questo, è fondamentale investire nella ricerca, nel monitoraggio e nella previsione degli eventi legati alla Meteorologia Spaziale, in un mondo sempre più governato dalla tecnologia.

Chicago Tribune

Nazi Cities Hit As Northern Lights Illumine Raiders' Goals

BULLETIN

Berlin (Sunday), Sept. 21 (AP).—British air raiders dropped incendiary bombs on Berlin during the night, but caused only "unimportant property damage," an official announcement said today.

By the Associated Press

London, Sept. 20.—The R. A. F., in one of its biggest offensives, begun by the light of the aurora borealis and continued throughout the daylight hours, pounded bitterly defended objectives from Norway to France today.

[Military sources believed the sudden R. A. F. offensive was a desperate attempt to lure the Luftwaffe back from the Eastern Front and give the Red air fleet and the R. A. F. squadrons operating with the Russians a badly need-

Washington Post

Plays Hob Northern Light Show Visits South

Nature put on one of her most spectacular shows last night when the aurora borealis—northern lights—pierced the sky with white, yellow, green, rose and lavender rays.

It was one of the most brilliant displays of its kind, if not the most brilliant, ever seen as far south as Washington. It was visible throughout most of the United States, even to Florida, which is most unusual.

But the magnetic storm which caused the heavenly fireworks played hob with short-wave radio and telegraphic communications, and the public's reaction was reminiscent of two years ago when Orson Wells panicked the Nation with his radio play of a martian invasion of earth.

Broadcasts Interrupted

Broadcasts from foreign radio correspondents and transatlantic short-wave communications were interrupted during the height of the display, some long-distance telephone lines in the United States were put out of commission temporarily and telegraphic communications through most of this country were affected.

Teletypewriters in newspaper offices showed a disconcerting volume of garbled copy which looked

See AURORA, Page 4, Column 2.

Cosmic Brush Paints Chicago Sky with Light

For the second successive night Chicagoans saw a vast curtain of shimmering pale green light against the northern sky last evening. Upward from the banks of light streamed trallers, splashed as suddenly on the darkness as if they had been shot from a paint gun, to fade finally in the vault of night.

The aurora borealis, or northern lights, was playing one of its performances, rare to Chicago. The last time the display was visible here was several months ago, but last night's was one of the most brilliant spectacles within memory. The first show, just before dawn yesterday, was seen by only a few persons. The return engagement was hardly missed by any one.

Believe Sun Particles Are Cause.

The aurora borealis apparently is caused by stray electrified particles, thrown off by the sun, which are drawn into the earth's atmosphere by the magnetic field. The upper regions of the atmosphere become negatively charged and a considerable voltage is set up. It is the discharge of this electricity thru the rarefied air that produces the aurora.

The light given off has been split up into its individual wave lengths, which have been identified as characteristic emissions of the various gases that make up the air.

Figura 4 Ritagli di giornali dell'epoca in cui si riprende la descrizione dell'evento straordinario.

Figure 4 Clippings from contemporary newspapers that recount the extraordinary event.

La tempesta geomagnetica del luglio 1962: quando l'uomo accese aurore nei cieli del Pacifico

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Circa sessant'anni fa il test nucleare denominato "Starfish Prime" condotto dall'esercito USA originò una forte tempesta magnetica, la prima mai creata "artificialmente". La tempesta accese aurore nei cieli delle isole Hawaii e provocò la perdita accidentale dei satelliti in orbita bassa.

Il 9 luglio 1962 si verificò una delle tempeste geomagnetiche più intense mai registrate nell'era spaziale. La particolarità? Semplice: non era di origine solare.

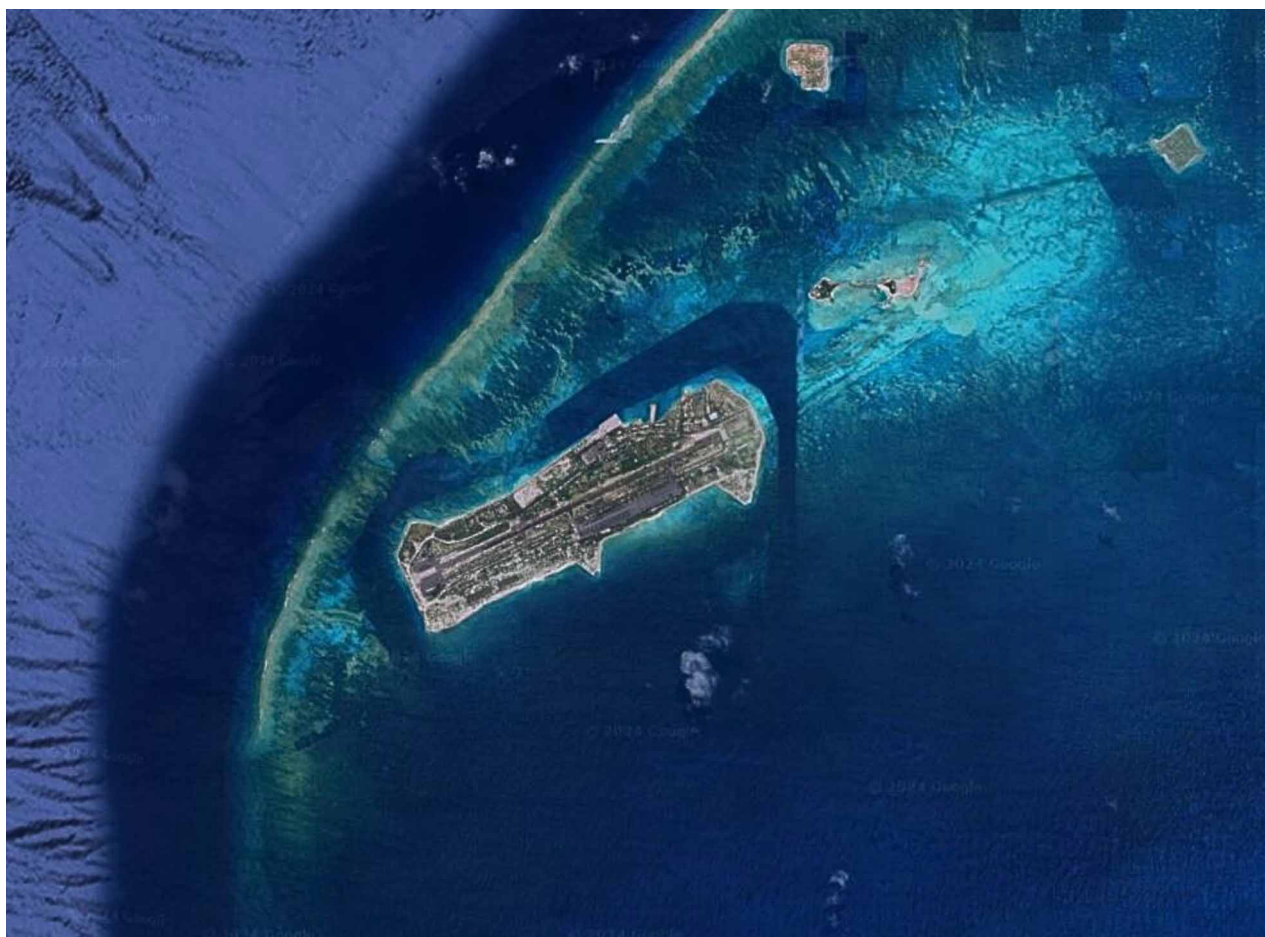


Figura 1 Immagine da satellite dell'Atollo Johnston, da Google Earth.

Figure 1 Satellite image of Johnston Atoll, from Google Earth.

L'**Atollo Johnston**, nell'Oceano Pacifico a circa 1450 km a sudovest delle **Hawaii**, è un fazzoletto di terra emersa di area inferiore a 3 km quadrati. Si trova geograficamente in Oceania, ma appartiene agli Stati Uniti d'America. Classificato come "territorio non incorporato degli Stati Uniti", è infatti amministrato dal governo americano attraverso un ente denominato "Servizio della pesca e della fauna selvatica degli Stati Uniti", che ne ha la giurisdizione dal 2003.

Quel 9 luglio del 1962 dalla base di lancio posta sull'atollo decollò un razzo con a bordo un **ordigno termonucleare ad idrogeno** denominato W49. Dopo 13 minuti e 41 secondi dal lancio, alle 9:00:09 UTC (corrispondenti alle 23:00:09 dell'8 luglio 1962 secondo l'ora di Honolulu) l'ordigno venne fatto esplodere ad un'altezza di circa 400 km per effettuare un test.

Cosa accadde dopo?

L'esplosione provocò un impulso elettromagnetico molto più intenso di quanto atteso, tanto da mandare fuori scala molti strumenti e vanificando quindi ogni sforzo di ottenere misure accurate per quantificare gli effetti dell'evento. Il **test nucleare** aveva creato una vera e propria **tempesta geomagnetica**. Dalle Hawaii alla Nuova Zelanda numerose testimonianze parlarono di magnifiche aurore mai viste prima, con strisce arcobaleno nel cielo di mezzanotte. Le comunicazioni radio si interruppero, ci furono danni alla rete elettrica delle Hawaii (circa 300 lampioni a Honolulu si spensero improvvisamente), scattarono numerosi allarmi antifurto, furono danneggiati i collegamenti a microonde delle compagnie telefoniche, rendendo impossibile chiamare da Kauai alle altre isole Hawaii.

L'enorme impulso emesso dall'esplosione aveva **ionizzato la parte alta dell'atmosfera terrestre** sopra al Pacifico. Aveva causato forti variazioni dell'intensità del campo geomagnetico, che è poi via via tornata verso il valore iniziale prima dell'evento con l'attenuarsi della ionizzazione. Tali variazioni hanno generato una vera e propria **tempesta geomagnetica artificiale** per centinaia di km intorno all'Atollo Johnston.

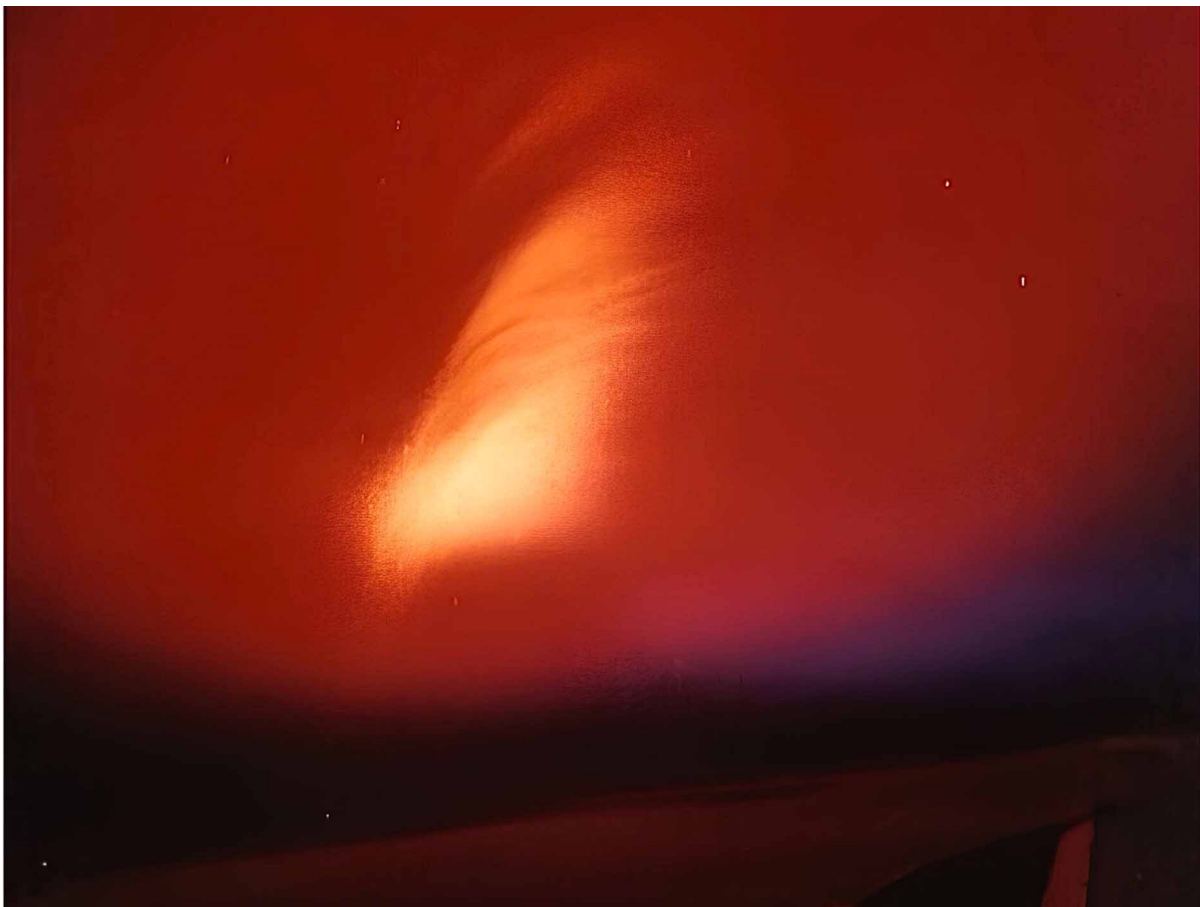


Figura 2 Foto dell'aurora generata dall'esperimento Starfish Prime nel 1962. (Crediti: US Air Force).

Figure 2 Photo of the aurora generated by the Starfish Prime experiment in 1962. (Credits: US Air Force).

L'effetto sui satelliti in volo

Ma i **danni** causati dall'esperimento nucleare non si limitarono all'interruzione delle comunicazioni radio e ai danni alle reti elettriche delle Hawaii. **Furono ben più gravi**. L'esplosione causò infatti la **perdita prematura di tutti i satelliti in orbita all'epoca**, compresa la prima missione britannica, l'*Ariel-1* [1], e il satellite americano per le comunicazioni Telstar-1 [2], che ironia della sorte fu lanciato il giorno dopo il test nucleare.

Solitamente durante le tempeste geomagnetiche di origine solare, l'energia introdotta nell'ambiente circumterrestre porta ad un riscaldamento della parte alta dell'atmosfera che si espande, aumentando l'attrito al volo dei satelliti. In questo caso ad abbattere i satelliti fu uno **sciame di elettroni ad altissima energia** generati dall'esplosione e da essa disseminati nella magnetosfera terrestre. Tali particelle hanno bersagliato i satelliti danneggiando le loro componenti elettroniche, la strumentazione di bordo ed in particolare i pannelli solari, necessari per la ricarica delle batterie che forniscono energia al satellite. Non solo, **ma questi elettroni fortemente accelerati e intrappolati nella magnetosfera terrestre ci rimasero per anni**, colpendo e danneggiando inesorabilmente tutti i satelliti in orbita a quell'epoca.

La vita nelle acque dell'Atollo Johnston

Nonostante la portata dell'evento e la radioattività dell'area in prossimità delle acque contaminate, scienziati della *National Oceanic Atmospheric Administration* [3] statunitense hanno osservato sui fondali oceanici **forme di vita resiliente**. Durante campagne oceanografiche condotte con l'uso di piccoli sommergibili, hanno osservato una incredibile foresta di **spugne silicee** nota come *Forest of The Weird* ("foresta delle stranezze"). Lo scheletro delle spugne è costituito da strutture aghiformi di silice, lo stesso materiale di cui è costituito il vetro (non a caso vengono comunemente chiamate anche *spugne di vetro*). Sono tutte rivolte nella direzione della corrente, dalla cui carezza trattengono le sostanze nutrienti di cui hanno bisogno per vivere. Nel luglio del 2022 nei pressi di una montagna sottomarina a Nord dell'atollo a 3000 metri di profondità è stata scoperta una **nuova creatura marina** dall'aspetto peculiare. È composta da un gambo di circa 2 metri ed è provvista da tentacoli lunghi circa 40 centimetri. La specie di appartenenza ancora non è del tutto certa.

Come a ribadire che **la vita resiste** nelle condizioni più estreme. Lo farà anche nonostante la devastazione provocata dall'uomo, e ancor più lo farà dopo l'uomo.

Sitografia

[1] <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1962-015A>

[2] <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1962-029A>

[3] <https://www.noaa.gov>



Figura 3 Immagine della “foresta delle stranezze” ottenuta da un sommergibile durante una campagna oceanografica. (Crediti: NOAA).

Figure 3 Image of the “Forest of the Weird” obtained from a submersible during an oceanographic campaign. (Credits: NOAA).



Figura 4 Immagine ottenuta da un sommergibile durante una campagna oceanografica del 2022 che immortalava una creatura marina recentemente scoperta. (Crediti: NOAA).

Figure 4 Image obtained from a submersible during an oceanographic campaign in 2022 capturing a recently discovered sea creature. (Credits: NOAA).

La grande tempesta del 13 marzo 1989

Domenico Di Mauro e Stefania Lepidi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Attraversando una tempesta magnetica: il caos del 13 marzo 1989 causato da un Sole imprevedibile, prima di raggiungere il picco della sua attività ciclica undecennale.

La tempesta magnetica del 13 marzo 1989 [Boteler, 2019], nota anche come l'evento di Carrington del XX secolo, è stata **la più forte tempesta geomagnetica che si sia verificata dall'inizio dell'era spaziale fino ad oggi**, procurando una serie di danni a diversi satelliti in orbita intorno alla Terra, alle reti di comunicazione radio e ai sistemi di distribuzione elettrica, con perdite economiche derivanti da blackout su vasta scala in molte parti del Canada e degli Stati Uniti.

Più precisamente, la tempesta magnetica causò il blackout totale dell'intero sistema elettrico della provincia canadese del Québec per circa dodici ore, **lasciando senza energia elettrica e al freddo oltre 6 milioni di persone**. Inoltre, i sistemi di comunicazione, sia radio che satellitari, subirono notevoli interruzioni.

La tempesta fu osservata in tutto il mondo, e in molti paesi, furono registrati fenomeni atmosferici insoliti come l'aumento dell'attività aurorale, che si estese in zone molto più prossime all'equatore rispetto a quelle solitamente interessate da queste manifestazioni. Persino dalla Florida e da Cuba furono avvistate le aurore.

Cosa è accaduto sul Sole nei giorni a cavallo del 13 marzo 1989?

Come spesso accade, anche la tempesta geomagnetica del 13 marzo 1989 è **stata innescata da due intensi brillamenti**, fra i tanti accaduti nei giorni a cavallo del 13 marzo, uno di tipo X4.5 avvenuto tre giorni prima ed un altro di tipo M7.3, verificatosi un giorno prima. Tutti localizzati in prossimità della **regione 5395 del Sole**, uno fra i **gruppi di macchie solari più attivi mai osservati**.

Effetti immediati furono le numerose **interferenze radiofoniche a onde corte**, al momento inspiegabili, tra cui il disturbo dei segnali radio di Radio Free Europe in Russia. A questi due brillamenti furono associate due **emissioni di massa coronale** (o Coronal Mass Ejection CME, per gli anglofoni), due notevoli espulsioni di materiale solare (plasma) di altissima energia, dirette verso la Terra. Un'energia pari a **quella liberata dall'esplosione contemporanea di migliaia di bombe nucleari**.

Le conseguenze a terra della tempesta magnetica

Alla velocità di diverse centinaia di km/s, questo flusso di particelle altamente energetico e magnetizzato ha investito la magnetosfera terrestre, modificando temporaneamente le sue caratteristiche. In condizioni non disturbate è uno scudo protettivo che avvolge la Terra e che limita molto l'accesso di particelle del vento solare e dei raggi cosmici. **La prima CME ha viaggiato a circa 760 km/s, impiegando 54 ore e 30 minuti per raggiungere la Terra**. Essa ha causato una tempesta geomagnetica non particolarmente intensa ma che ha prodotto un accumulo di energia nella magnetosfera. L'arrivo improvviso **della seconda CME, che avendo velocità di circa 1320 km/s ha impiegato solo 31 ore e 27 minuti per arrivare a Terra**, ha causato un rilascio repentino

di energia innescando forti correnti indotte. L'impulso iniziale fu anche registrato all'osservatorio geomagnetico dell'INGV a L'Aquila la notte del 13 marzo alle 2:27 ora locale.

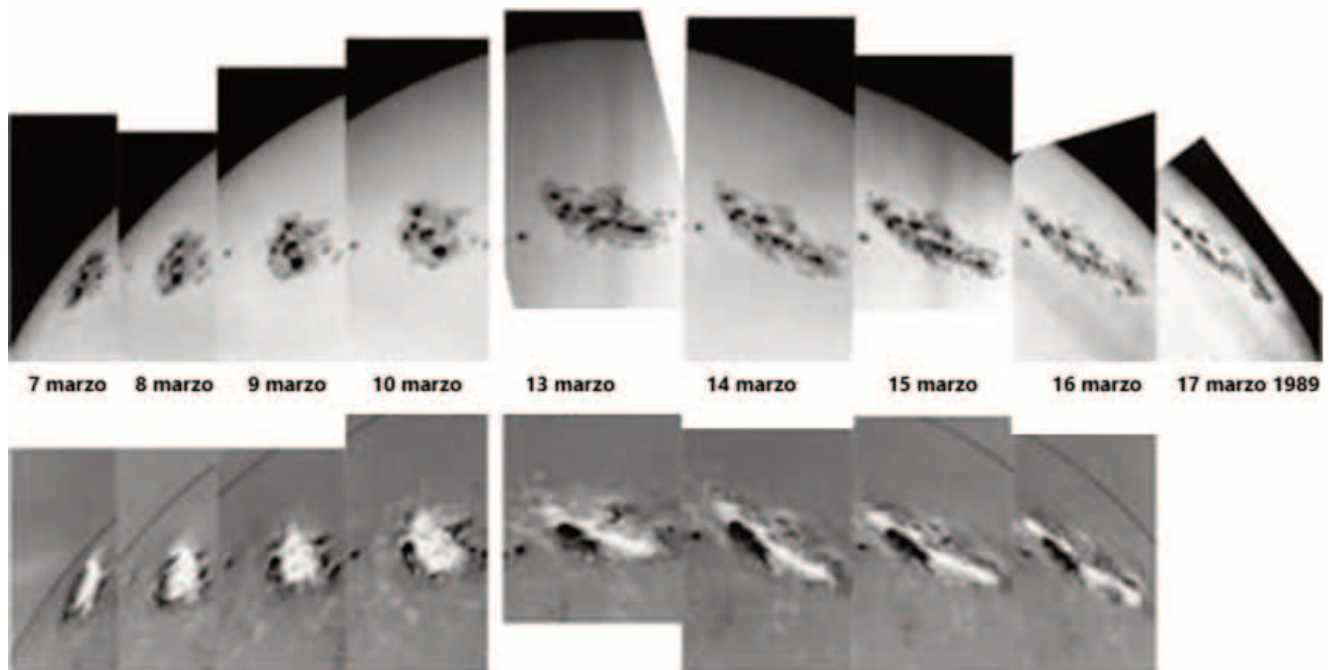


Figura 1 Regione attiva 5395 del Sole nei giorni a cavallo del 13 marzo 1989. Pannelli in alto: immagini nel visibile. Pannelli in basso: il carattere magnetico delle macchie (zone in nero, campo magnetico entrante – zone in bianco, campo magnetico uscente). (Foto dall'osservatorio Kitt Peak, USA).

Figure 1 Solar active region 5395 during the days around March 13, 1989. Top panels: images in the visible spectrum. Bottom panels: the magnetic feature of the sunspots (black areas, incoming magnetic field – white areas, outgoing magnetic field). (Photo from Kitt Peak Observatory, USA).

Le testimonianze del tempo

Seguirono i disastrosi effetti in Québec, con il blackout totale. La concomitanza dei suddetti eventi generò la più forte tempesta magnetica dall'inizio del secolo scorso ad oggi, provocando diversi problemi alla rete elettrica in tutti gli Stati Uniti e anche nel nord Europa, in particolare nel Regno Unito e in Svezia.

Ovviamente la stampa dette immediatamente ampio risalto all'accaduto, riportando diverse testimonianze. Il quotidiano nazionale *La Repubblica* titolava “**Aurora boreale sul mondo e s’incendiano i cieli**”, un approfondimento pubblicato il 16 marzo 1989.

La violenta tempesta magnetica causò aurore boreali spettacolari anche a latitudini inconsuete. In Italia, si videro di notte bagliori rossastri fino a Venezia. Alcuni, spaventati dai colorati ondeggiamenti di luce, pensarono addirittura a un attacco nucleare, dato il clima teso della Guerra Fredda e l'imminente caduta del Muro di Berlino.

Nello spazio, alcuni satelliti, come il TDRS-1 della NASA per le comunicazioni e lo Space Shuttle Discovery, investiti dalle particelle ad alta energia, andarono fuori controllo per diverse ore.

La tempesta geomagnetica del 13 marzo 1989 è ancor oggi oggetto di studio da parte della comunità scientifica internazionale. E ci ha fatto capire, ancora una volta, quanto sia importante l'esistenza del campo magnetico terrestre, **il nostro scudo protettivo**. È diventato chiaro a tutti che la magnetosfera terrestre è una regione dinamica e complessa. Richiede ulteriori studi e

ricerche per essere compresa più a fondo. Senza celare l'obiettivo ultimo, una vera sfida: prevedere e mitigare gli effetti delle tempeste geomagnetiche sulle nostre infrastrutture tecnologiche e sulla vita quotidiana.



Figura 2 Danni ai trasformatori elettrici di un impianto di distribuzione in New Jersey dovuti all'accresciuta intensità di correnti indotte dalla tempesta. (Crediti: D. Di Mauro).

Figure 2 Damage to electrical transformers at a distribution facility in New Jersey due to the increased intensity of currents induced by the storm. (Credits: D. Di Mauro).

Figura 3 Articolo del giornale "The Gazette" di Montreal, pubblicato il 14 marzo 1989.

Figure 3 Article from the newspaper "The Gazette" of Montreal, published on March 14, 1989.



Bibliografia

Boteler D.H. (2019). A 21st century view of the March 1989 magnetic storm. Space Weather, 17, 1427-1441. <https://doi.org/10.1029/2019SW002278>

Le tempeste solari di Halloween del 2003

Luca Spogli

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Nell'ottobre del 2003 si verificarono una serie di tempeste tra le più intense degli ultimi 70 anni, battezzate come *Tempeste di Halloween*.

Le tempeste magnetiche sono uno dei fenomeni più affascinanti che coinvolgono la Terra nella sua interazione con il Sole. Il Sole, con il suo complesso ciclo di attività che dura circa undici anni, influenza profondamente l'ambiente spaziale attorno al nostro pianeta. Ogni ciclo solare viene identificato con un numero progressivo, e, al momento in cui questo articolo viene redatto, ci troviamo nel ciclo solare 24, iniziato intorno al 2010, quando il Sole ha mostrato i primi segni di risveglio dopo un periodo di attività minima (Figura 1). Durante questi cicli, si osservano periodi di maggiore attività solare, caratterizzati da brillamenti e espulsioni di massa coronale, che possono provocare tempeste geomagnetiche sulla Terra, con effetti sui sistemi tecnologici e atmosferici.

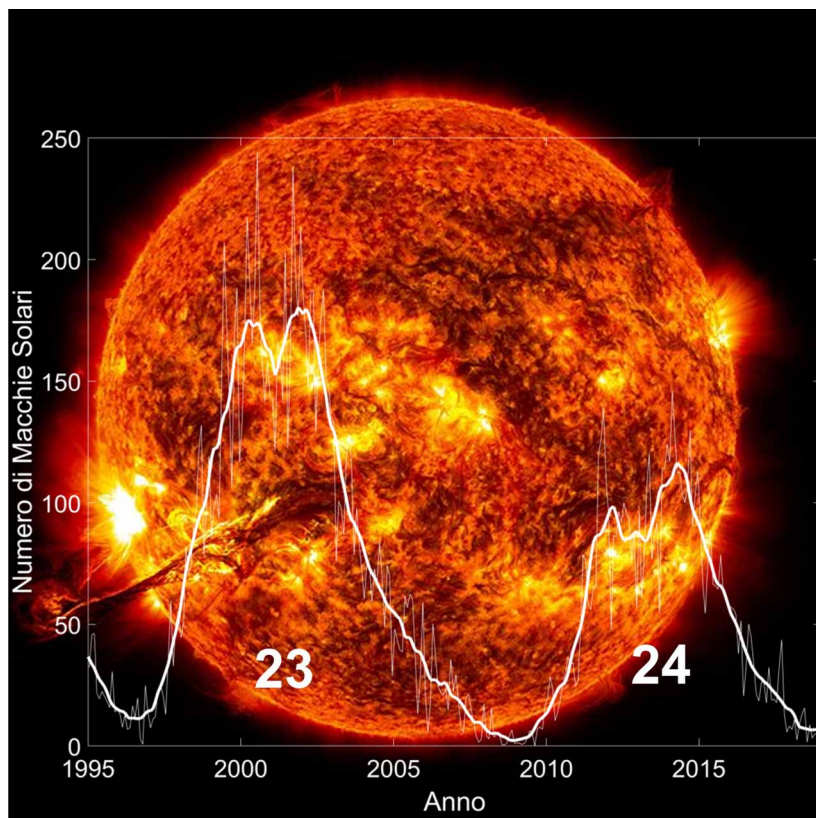


Figura 1 L'attività solare viene identificata con il numero di macchie solari: tanto maggiore è il numero di macchie, tanto il Sole è più attivo. Come è evidente dal grafico, il 2003 si trova sul fronte di discesa della curva del ciclo solare 23. (Crediti: NASA/SOHO).

Figure 1 Solar activity is identified by the Sunspot Number: the greater the number of sunspots, the more active the Sun is. As evident from the graph, 2003 is on the descending phase of solar cycle 23. (Credits: NASA/SOHO).

Cos'è una tempesta solare?

Quando il Sole è più attivo, è molto probabile che emetta eccezionali quantità di plasma ed energia, dando origine alle cosiddette *tempeste solari*. Forti esplosioni che, trasportate dal vento solare tramite i campi magnetici, possono raggiungere la Terra, disturbando la regolarità dello strato più alto dell'atmosfera, la ionosfera. Questo strato, composto da elettroni e ioni che

circonda la Terra, è fondamentale per le telecomunicazioni: consente il rimbalzo delle onde radio a grande distanza e viene attraversato dai segnali provenienti dai satelliti in orbita, inclusi quelli dei sistemi globali di navigazione satellitare **GNSS** (Global Navigation Satellite Systems), tra i quali il più noto è l'americano **GPS** (Global Positioning System).

Alcune delle tempeste solari, definite *geoefficaci*, sono così energetiche da **riuscire ad esporre alcuni dei più importanti e moderni sistemi tecnologici a danni e malfunzionamenti di diverso tipo**. Tra i sistemi più colpiti ci sono i satelliti di posizionamento e i sistemi terrestri per le **comunicazioni radio**, oltre alle **centrali elettriche** e i **satelliti** in orbita.

Sebbene rare, le grandi tempeste solari non possono essere ignorate, vista la loro capacità di influenzare profondamente una società sempre più dipendente da tecnologie vulnerabili agli "starnuti" del Sole. Il pericolo più elevato è nelle regioni ad **alta latitudine**. Qui si manifesta il fenomeno più affascinante che una tempesta solare porta con sé: le **aurore polari**. **Ma anche effetti alle latitudini nostrane potrebbero essere significativi qualora accadessero eventi estremi**. Ecco perché lo studio di questi fenomeni è cruciale. La comunità scientifica internazionale è sempre più interessata a prevedere tali eventi e, quando possibile, a mitigare i loro effetti per proteggere le nostre tecnologie.

Le tempeste di Halloween

Una serie di esplosioni solari, che hanno colpito la Terra tra il **19 ottobre e il 7 novembre del 2003**, hanno generato le cosiddette **tempeste di Halloween**. Un aumento significativo dell'attività si osservò proprio intorno al 31 ottobre, da cui deriva il nome con cui sono note ai più.

Sono tra le tempeste più studiate in epoca contemporanea. Sebbene siano seguiti altri eventi molto intensi, nessuno ne ha mai eguagliato la loro durata, intensità e pericolosità. Un altro motivo d'interesse è che si sono verificate **durante la fase discendente del ciclo solare**, un periodo in cui la probabilità che si verificano fenomeni così intensi è normalmente inferiore rispetto a quando il Sole è vicino al suo massimo di attività (con un numero di macchie solari più alto e con il Sole più attivo).

I fenomeni principali si sono verificati a partire dal 26 ottobre e sono stati generati da tre grandi gruppi di macchie solari, con la più estesa che era ben **3 volte la dimensione della Terra!** Da questi gruppi sono partite **17 esplosioni solari** chiamate "brillamenti", seguite da espulsione di materia solare ("emissioni di massa coronale"). Il più intenso di tutti è stato quello registrato dal satellite Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) alle 11:12 (ora di Greenwich) del 28 ottobre (Figura 2). Le particelle emesse hanno investito la Terra scatenando alcune **tra le tempeste magnetiche più intense degli ultimi 70 anni**.

Si sa che uno degli effetti più spettacolari di una tempesta solare sulla Terra è la comparsa delle **aurore** nelle regioni più a Nord e a Sud del pianeta. Che un'aurora sia uno spettacolo da ammirare al freddo della notte artica è conoscenza condivisa da molti. Ma cosa dire quando ci si trova ad ammirare un tale spettacolo della natura nei cieli sopra il deserto del Texas o sopra le palme della Florida? Ecco quello che è successo nei giorni delle tempeste di Halloween: le esplosioni solari sono state talmente forti da far sì che la zona dell'atmosfera solitamente esposta all'ingresso di particelle provenienti dallo spazio migrasse verso latitudini molto più basse, fino a raggiungere quelle del sud degli Stati Uniti.

La foto in Figura 3 è stata scattata in quei giorni proprio in Texas.

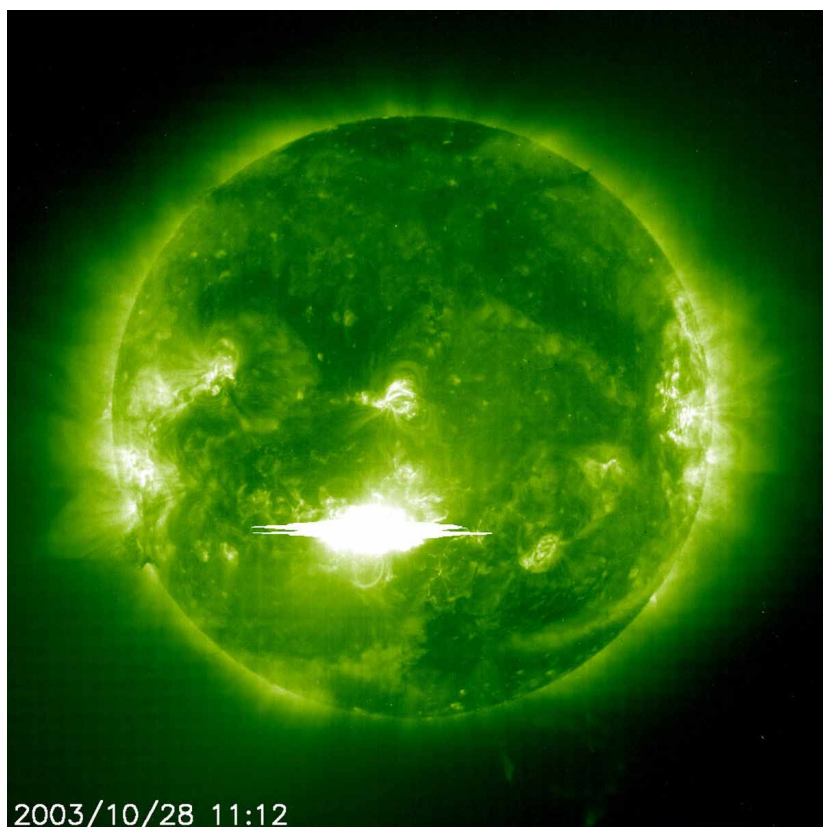


Figura 2 Il satellite Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) è una sentinella che guarda sempre al Sole. Ecco le immagini del “brillamento solare” esploso il 28 ottobre del 2003 alle 11:12, ora di Greenwich. (Crediti: NASA/SOHO).

Figure 2 The Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) satellite is a sentinel that continuously watches the Sun. Here are the images of the solar flare that erupted on 28 October 2003, at 11:12 GMT. (Credits: NASA/SOHO).

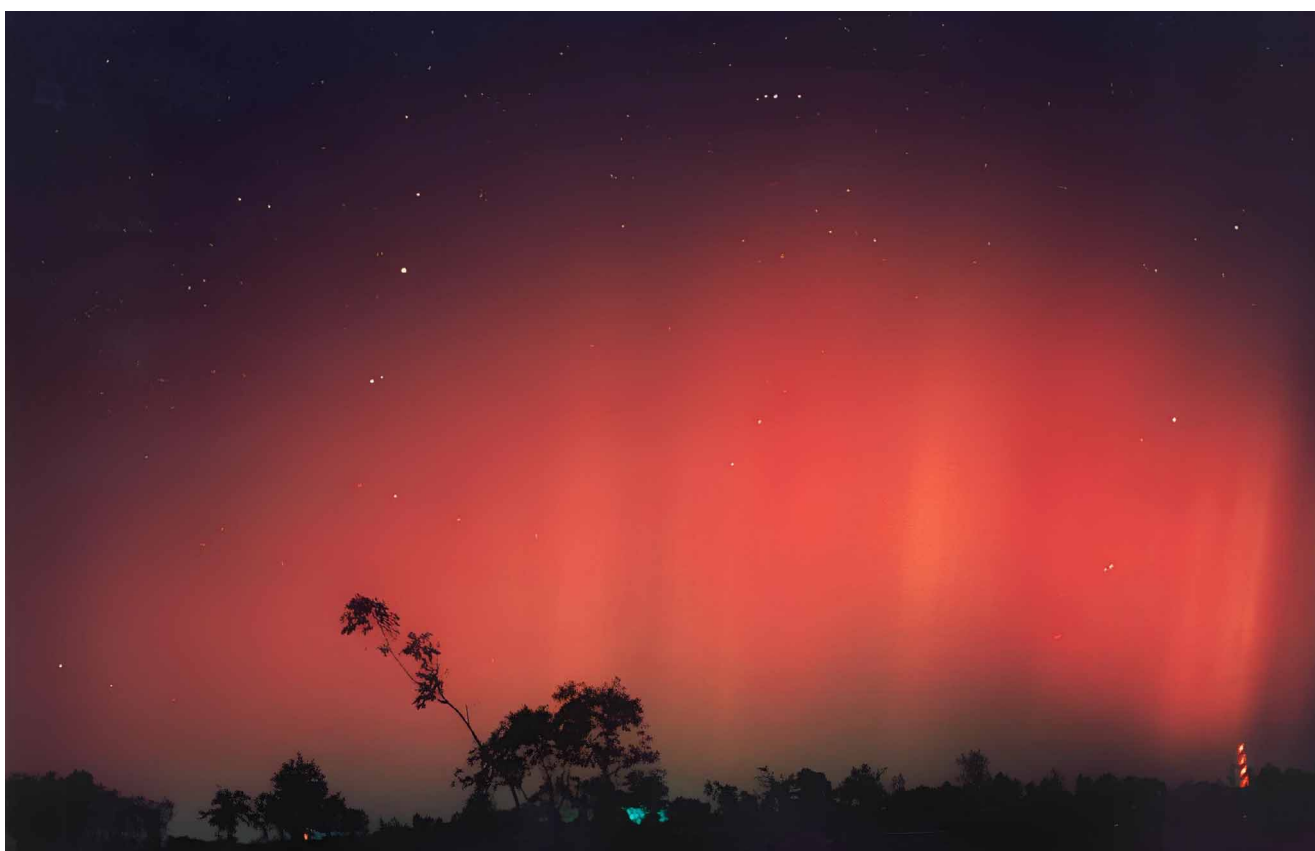


Figura 3 Foto di Christie Ponder, vicino Houston, Texas, USA.

Figure 3 Photo by Christie Ponder, near Houston, Texas, USA.

I danni principali registrati durante l'autunno caldo del 2003 a causa delle "Halloween storms" sono stati molteplici:

- gli astronauti della Stazione Spaziale Internazionale furono costretti ad entrare nel modulo di protezione da radiazioni;
- a Malmö, in Svezia, ci fu un blackout elettrico durato un'ora e mezza che ha lasciato circa 50000 cittadini senza corrente;
- in Sud Africa, 15 trasformatori della rete elettrica nazionale furono danneggiati. Valori anomali di corrente elettrica vennero registrati nelle linee del Wisconsin e dello stato di New York;
- le rotte aeree al di sopra dei 57° di latitudine vennero interdette a causa dei possibili rischi dovuti al malfunzionamento del posizionamento satellitare e dei sistemi di telecomunicazioni radio;
- la sonda di esplorazione marziana *Mars Odyssey* fu costretta ad entrare in *safe mode*, una modalità di protezione dei sensori presenti a bordo prevista proprio per limitare i possibili danni dovuti all'aumento di radiazioni.

Il monitoraggio in Artide

Da molti anni l'INGV è in prima linea a livello internazionale nello studio e nella previsione degli effetti delle tempeste solari sugli strati più alti dell'atmosfera terrestre che, quando esposta ai disturbi solari, può diventare un ostacolo alla chiara ricezione dei segnali GNSS a terra. L'INGV ha installato il suo primo ricevitore nel settembre del 2003. La strumentazione, dedicata agli studi delle condizioni ionosferiche tramite i segnali GNSS, si trova a Ny-Ålesund (78,923° N, 11.925°E), nelle isole Svalbard (Norvegia). Giusto in tempo per raccogliere dati sulle tempeste di Halloween! In Figura 4 si può vedere l'antenna dello speciale ricevitore sul tetto della base "Dirigibile Italia" a Ny-Ålesund.

Figura 4 La base "Dirigibile Italia" a Ny-Ålesund. Nel riquadro rosso l'antenna del ricevitore GNSS dell'INGV. (Foto di V. Romano e G. De Franceschi ©INGV).

Figure 4 The "Dirigibile Italia" base in Ny-Ålesund. The INGV GNSS receiver antenna is highlighted in the red box. (Photo by V. Romano and G. De Franceschi ©INGV).



Cosa ha registrato la nostra strumentazione?

Il nostro ricevitore ha registrato alcuni disturbi tra le 15:00 del 30 ottobre 2003 e le 15:00 del 31 ottobre 2003 (ora di Greenwich), come riportato in Figura 5. I disturbi sui segnali, registrati

proprio nel cuore delle tempeste di Halloween, sono risultati molto evidenti. Già disturbi di debole entità (in arancione in Figura 5) possono portare importanti malfunzionamenti nei sistemi GPS. Essenzialmente tali disturbi sono dovuti al mancato collegamento con il satellite, diminuendo così la precisione del posizionamento.

Il primo ricevitore (e la sua antenna) è ancora lì, operativo nella base “Dirigibile Italia”, gestita dal Consiglio Nazionale delle Ricerche nelle lontane isole Svalbard. Continua a registrare le variazioni di una ionosfera disturbata dal respiro del Sole, perturbando i preziosi segnali usati per il posizionamento satellitare. Per approfondimenti, ci si può riferire agli articoli divulgativi riportati in sitografia [1], [2] e bibliografia [De Franceschi et al., 2012].

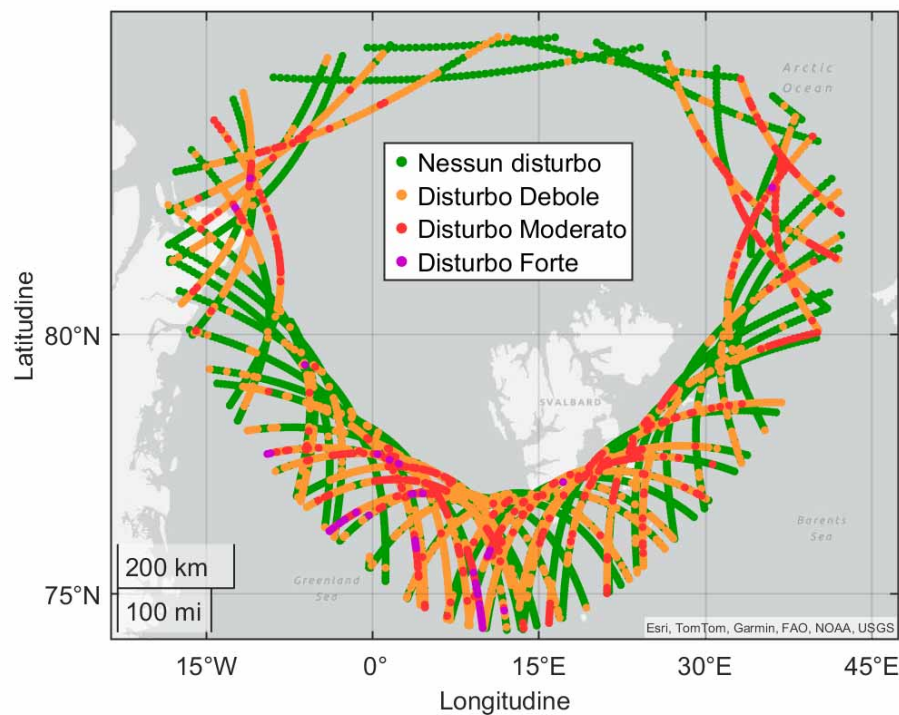


Figura 5 Mappa dei disturbi ionosferici registrati dal ricevitore GPS situato a Ny-Ålesund, Norvegia tra le 15:00 del 30 ottobre e le 15:00 del 31 ottobre 2003 (ora di Greenwich). (Crediti: INGV/eSWua).

Figure 5 Maps of the ionospheric disturbances recorded by the GPS receivers located at Ny-Ålesund, Norway, between 15:00 on 30 October and 15:00 on 31 October 2003 GMT. (Credits: INGV/eSWua).

Sitografia

- [1] Holy Zell, “Halloween Storms of 2003 Still the Scariest”,
https://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/halloween_storms.html
- [2] “Remembering the Great Halloween Solar Storm”, <https://www.ncei.noaa.gov/news/great-halloween-solar-storm-2003>

Bibliografia

De Franceschi G., Spogli L., Alfonsi L., Romano V., (2012). *La quiete durante la tempesta*. Newton, 23, 96-102.

Il Sole torna a farsi sentire: la prima intensa tempesta del nuovo ciclo

Mauro Regi, Loredana Perrone, Luca Spogli e Alfredo Del Corpo

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Lo studio di tempeste magnetiche fornisce importanti informazioni relative alla dinamica dello spazio circumterrestre e degli effetti che possono ripercuotersi sulle attività umane: l'esempio della tempesta solare del 2 novembre 2021.

Solo apparentemente e ad occhio nudo il Sole sembra lo stesso immutabile corpo celeste. Oggi sappiamo bene che in realtà la nostra stella manifesta una **ciclica attività** riscontrabile, ad esempio, dal numero di macchie solari presenti nell'atmosfera visibile del Sole (la fotosfera): maggiore è questo numero maggiore è l'attività. Questi mutamenti ciclici, che avvengono con una cadenza undecennale, hanno un impatto non trascurabile sull'ambiente circumterrestre, con conseguenze ancora non del tutto note.

Il Sole emette continuamente radiazioni e particelle nello spazio. A volte le emissioni sono particolarmente intense e trasportano un'enorme quantità di particelle cariche che viaggiano a velocità supersoniche. Questi eventi sono conosciuti come **tempeste solari**. Tipicamente assistiamo ad un aumento nel numero e nell'intensità di tempeste solari nei periodi di massimo (molte macchie solari), sebbene non siano del tutto assenti anche durante le fasi di minimo di attività (macchie solari poche o assenti). Il campo magnetico terrestre ci scherma da gran parte delle particelle emesse normalmente dal Sole. Tuttavia, proprio a causa di una tempesta solare può accadere che si abbia una riconfigurazione del campo magnetico terrestre tale da permettere alle particelle di penetrare al suo interno con facilità. Le tempeste solari inducono così perturbazioni nello spazio circumterrestre. Si parla in questo caso di **tempeste geomagnetiche**.

Gli effetti della tempesta del 3 novembre 2021 sulla Terra

Gli effetti di queste perturbazioni sull'ambiente in cui viviamo possono essere di diverso tipo: un esempio sono le splendide aurore polari che tutti conosciamo. Ma effetti delle perturbazioni di origine solare sono anche i disturbi alle comunicazioni radio e alla navigazione satellitare. In particolari condizioni fisiche il campo magnetico del nostro pianeta risponde alle sollecitazioni esterne attivando o intensificando drasticamente un sistema di correnti elettriche, esistenti anche in condizioni normali. L'accresciuta attività geomagnetica può così indurre correnti elettriche nel sottosuolo capaci di danneggiare impianti di distribuzione di corrente elettrica e persino le lunghe condutture (gasdotti o altro), ove si inducono correnti elettriche che possono corrodere le strutture stesse.

Gli effetti di una sollecitazione importante da parte del Sole sono visibili e più efficaci alle alte latitudini. Nel caso di forti tempeste magnetiche, però, gli effetti si amplificano fino a diventare rilevanti anche alle nostre latitudini.

L'impatto di una tempesta solare sulla Terra e sulla nostra tecnologia potrebbe essere non trascurabile. È quindi di fondamentale importanza lo studio di questi fenomeni per migliorare i modelli di previsione utilizzati dai servizi informativi che hanno il compito di comunicare agli

enti preposti (come l'aviazione civile) gli eventi di particolare rilevanza nell'ambito della nuova disciplina della Meteorologia Spaziale (*Space Weather*).

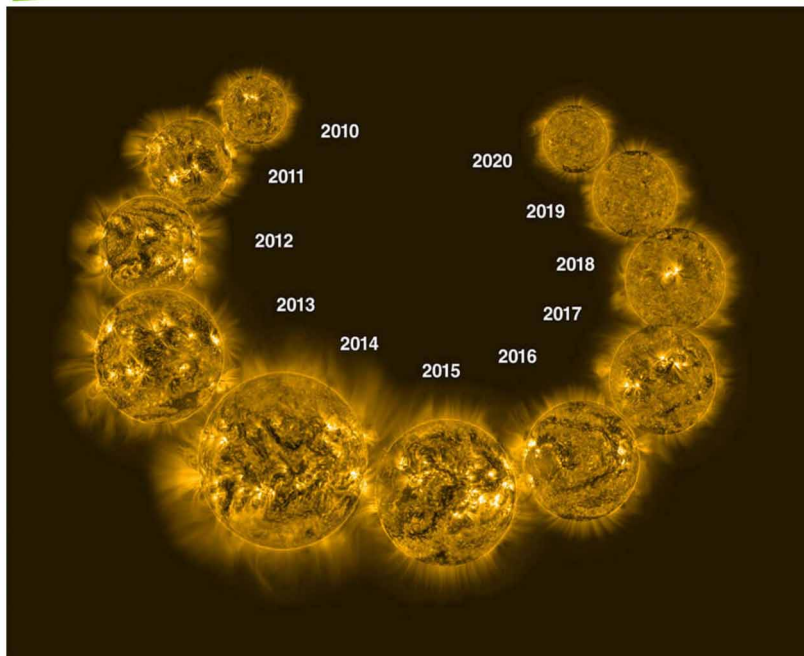
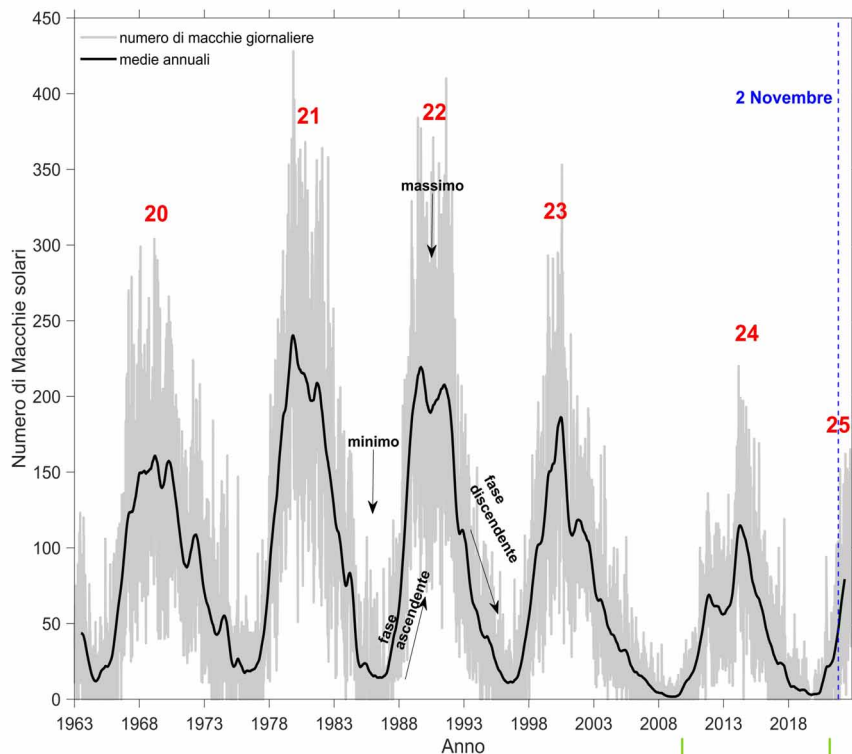


Figura 1 Cicli solari dal 20esimo all'attuale 25esimo (1963-2022): il numero di macchie solari giornaliero (curve in grigio) e quello medio su 365 giorni (curva in nero). La separazione media tra due massimi adiacenti è di circa 11 anni (in alto). Crediti dell'immagine: M. Regi, dati forniti da CDAWeb [1]. Il Sole dal 2010 al 2020 (ciclo solare 24esimo) osservato nell'estremo ultravioletto dal satellite Europeo PROBA2 (in basso): le macchie solari corrispondono alle regioni di intensità maggiore. (Crediti: D. Seaton/European Space Agency. Collage by NOAA/JPL-Caltech).

Figure 1 Solar cycles from the 20th to the current 25th (1963-2022): the daily number of sunspots (gray curves) and the average over 365 days (black curve). The average separation between two adjacent peaks is about 11 years (top). Image credits: M. Regi, data provided by CDAWeb [1]. The Sun from 2010 to 2020 (24th solar cycle) observed in extreme ultraviolet by the European satellite PROBA2 (bottom): sunspots correspond to regions of higher intensity. (Credits: D. Seaton/European Space Agency. Collage by NOAA/JPL-Caltech).

In questo quadro, l'evento verificatosi agli inizi di **novembre 2021**, durante la fase iniziale del nuovo ciclo solare, il 25-esimo da quando vengono numerati, ancora in prossimità di un periodo di minimo di attività solare, ha suscitato l'interesse di alcuni ricercatori INGV. L'evento, per intensità, è risultato piuttosto inaspettato, presentandosi dopo circa 2 anni di bassissima attività solare. L'occasione ha spinto il team a studiare nel dettaglio gli effetti da esso prodotto nello spazio circumterrestre.

I ricercatori INGV, impegnati costantemente nel monitoraggio dell'attività geomagnetica e ionosferica [6], hanno notato nei dati del 4 novembre 2021 interessanti variazioni di alcuni dei parametri caratteristici dell'alta atmosfera a seguito del brillamento solare del 2 novembre. L'impatto dell'evento è stato registrato sia dalla strumentazione su satelliti che da quelli installati a terra. Gli effetti più rilevanti osservati riguardano l'importante variazione del contenuto di plasma nella ionosfera e nella plasmasfera.

La plasmasfera è quella regione dello spazio che circonda la Terra formata da gas totalmente ionizzato. Può essere a tutti gli effetti considerata una estensione della ionosfera e con essa scambia continuamente particelle. Può estendersi fino ad oltre 6 raggi terrestri, ma le sue dimensioni cambiano notevolmente durante una tempesta geomagnetica. Nella tempesta in esame, ad esempio, la sua dimensione si è ridotta a circa 2 raggi terrestri.

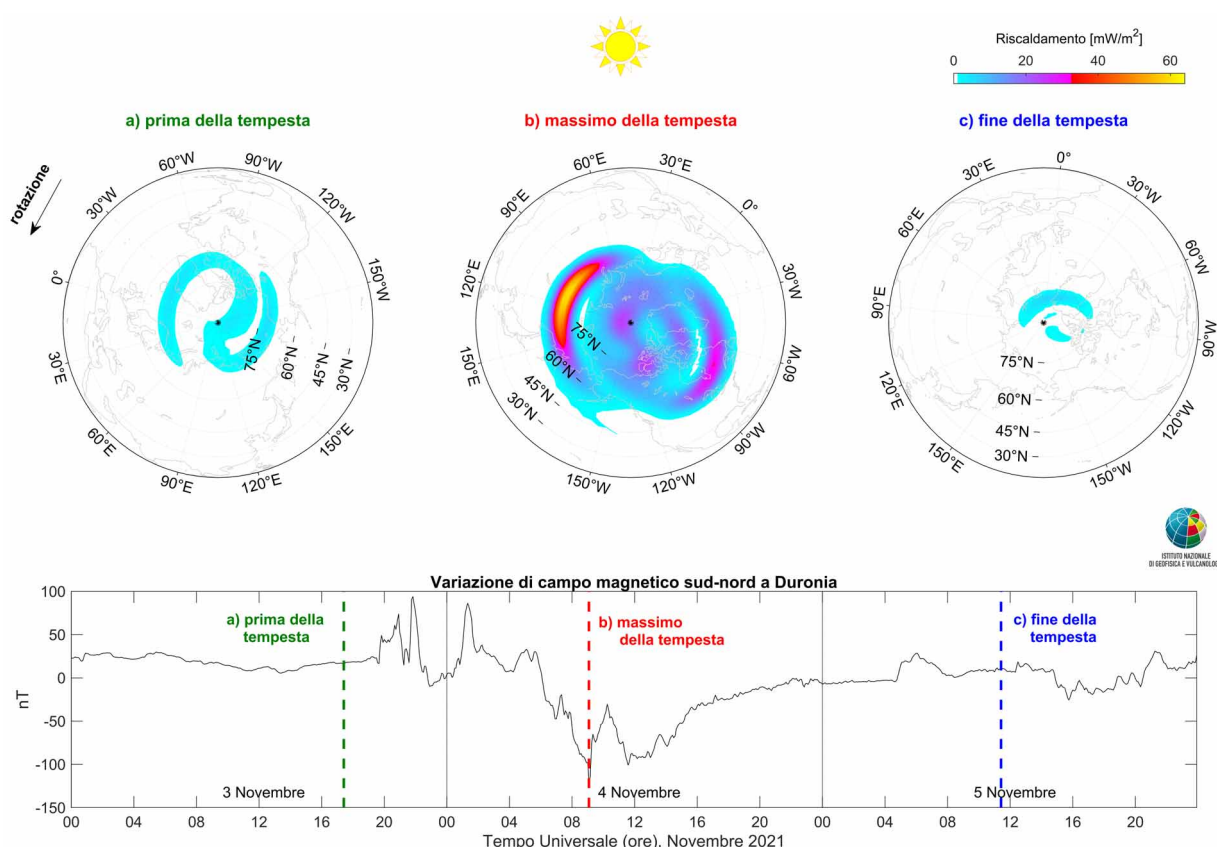


Figura 2 Riscaldamento della ionosfera nell'emisfero nord in corrispondenza di tre fasi della tempesta geomagnetica (in alto), stimato mediante modello W05 [Weimer, 2005a; 2005b]; variazione del campo magnetico registrato presso l'osservatorio di Durnia (CB) (in basso). (Crediti: M. Regi).

Figure 2 Ionospheric heating in the Northern Hemisphere during in correspondence of three phases of the geomagnetic storm (top), estimated using the W05 model [Weimer, 2005a; 2005b]; variation of the magnetic field recorded at the Durnia (CB) observatory (bottom). (Credits: M. Regi).

L'impatto della tempesta sulla ionosfera è stato osservato praticamente in tutti i punti della Terra analizzati. Nella Figura seguente è riportato il confronto tra 2 stazioni di osservazione, in Nord America e in Europa. Come è evidente nella figura in corrispondenza della medesima ora, in entrambi i casi lo strato più esterno della ionosfera ha subito uno spostamento verso l'alto. L'impatto registrato a terra è però risultato essere molto differente. Mentre in Nord America la tempesta ha portato ad una diminuzione della densità elettronica con possibili ripercussioni nelle comunicazioni radio, in Europa lo stesso effetto non è stato osservato. Il diverso

comportamento è stato spiegato dagli studiosi come dovuto alla diversa distanza delle due località (che si trovano alla stessa latitudine geografica) dalla posizione dinamica del polo magnetico anche in relazione al disturbo esterno.

È quindi chiaro a questo punto quanto importanti siano questo tipo di analisi. Il team dell'INGV che ha partecipato a questo studio è costituito da ricercatori con campi di competenza diversa ma complementare, che ha consentito di effettuare uno studio sotto diversi punti di vista dell'evento che ha aperto il nuovo ciclo solare 25.

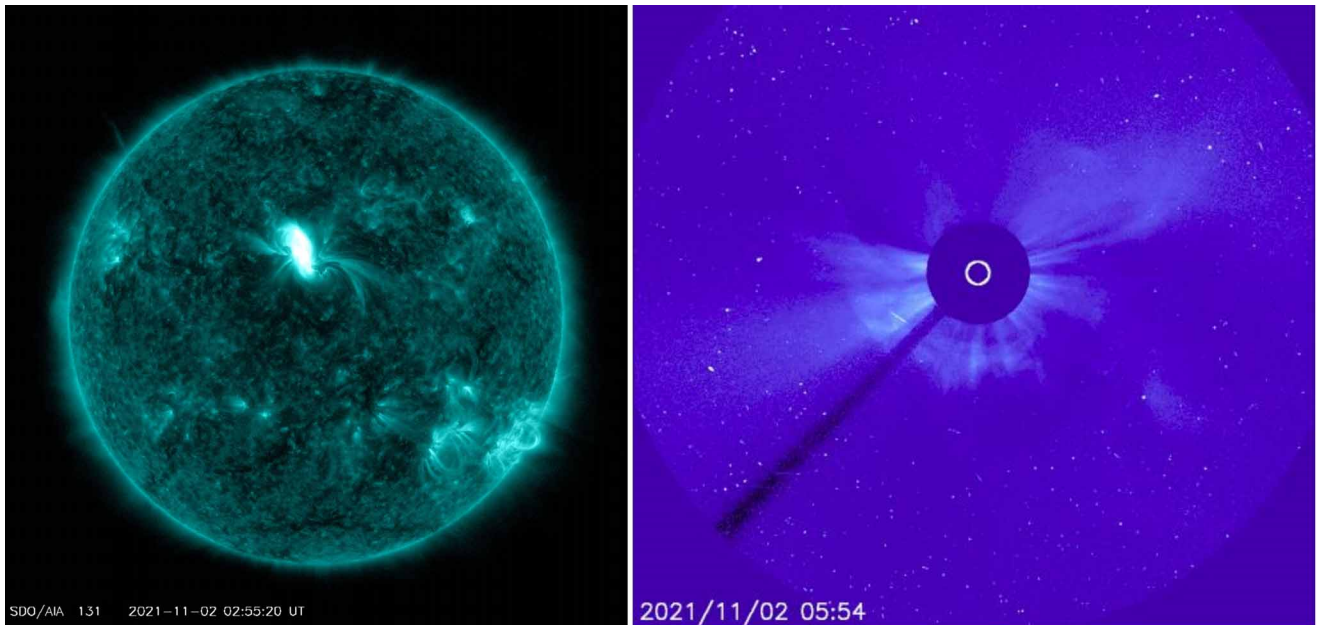


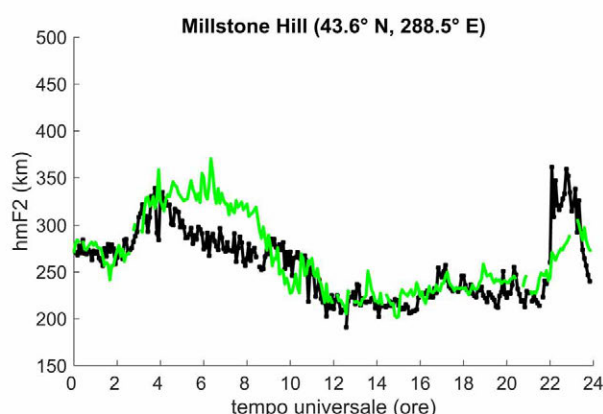
Figura 3 (A sinistra) Brillamento solare del 2 novembre 2021 al suo massimo di intensità osservato dal telescopio solare SDO. L'immagine a sinistra in falsi colori nell'UV mostra diverse regioni attive sul sole (regioni più chiare) (Animazione completa al sito [2], crediti SDO/NASA/AIA, per ulteriori dettagli visita il sito [3]). (A destra) Il gas ionizzato espulso verso lo spazio interplanetario ripreso dal satellite SOHO dopo circa 3 ore dal massimo di intensità del brillamento (Animazione completa al sito [4]. Crediti SOHO/NASA, per ulteriori dettagli visita il sito [5]).

Figure 3 (Left) Solar flare of November 2, 2021, at its peak intensity observed by the SDO solar telescope. The image on the left in false colors in the UV shows various active regions on the Sun (brighter regions) (Full animation at site [2], credits SDO/NASA/AIA, for more details visit the site [3]). (Right) The ionized gas ejected into interplanetary space captured by the SOHO satellite about 3 hours after the flare's peak intensity (Full animation at site [4].

Credits SOHO/NASA, for more details visit the site [5]).

Lo studio ha confermato che la dinamica dello spazio circumterrestre, ed in particolare dello scambio di particelle tra ionosfera e plasmasfera, assume grande rilevanza nell'ambito della Meteorologia Spaziale. I fenomeni studiati fanno parte di un complesso sistema che si innesca su larga scala a seguito di sollecitazioni solari e che può avere importanti ripercussioni sulle attività umane. Una possibile ricaduta della tempesta geomagnetica sull'atmosfera alle alte latitudini è stata successivamente studiata mediante i dati di re-analisi forniti in questo sito [7]. Per i motivi sopra discussi le tempeste geomagnetiche devono essere costantemente monitorate e studiate. Gli studi sono stati pubblicati da Regi et al. [2022, 2024].

settore Americano



settore Europeo

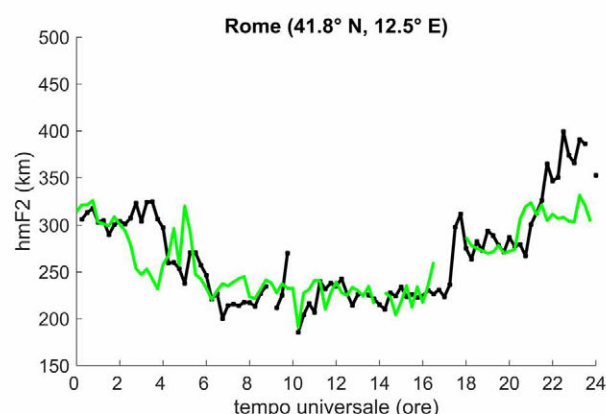


Figura 4 L'effetto della tempesta solare sulla ionosfera durante il 3 novembre 2021: sia nel settore americano che in quello europeo, si è verificata una espansione della ionosfera testimoniata dall' aumento dell'altezza dello strato più alto della ionosfera, dove la concentrazione degli elettroni è maggiore. A partire dalle ore 22 circa i valori osservati (curva nera) sono molto maggiori di quelli aspettati (curva verde). (Crediti: Regi et al. [2022]).

Figure 4 The effect of the solar storm on the ionosphere on November 3, 2021: both in the American and European sectors, an expansion of the ionosphere occurred, evidenced by the increase in the height of the uppermost layer of the ionosphere, where the electron concentration is highest. Starting at around 10:00 PM, the observed values (black curve) are much higher than the expected ones (green curve). (Credits: Regi et al. [2022]).

Bibliografia

- Weimer D.R., (2005a). *Predicting surface geomagnetic variations using ionospheric electrodynamic models*. J. Geophys. Res, 110, A12307. <https://doi.org/10.1029/2005JA011270>
- Weimer D.R., (2005b). *Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates*. J. Geophys. Res, 110, A05306. <https://doi.org/10.1029/2004JA010884>
- Regi M. et al., (2022). *Space Weather Effects Observed in the Northern Hemisphere during November 2021 Geomagnetic Storm: The Impacts on Plasmasphere, Ionosphere and Thermosphere Systems*. Remote Sens., 14, 1-22. <https://doi.org/10.3390/rs14225765>
- Regi M., Piscini A, Francia P, De Lauretis M, Redaelli G, Carnevale G., (2024). *A Potential Link between Space Weather and Atmospheric Parameters Variations: A Case Study of November 2021 Geomagnetic Storm*. Remote Sens., 16, 3318. <https://doi.org/10.3390/rs16173318>

Sitografia

- [1] <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html>
- [2] https://spaceweather.com/images2021/02nov21/mflare_teal_anim.gif
- [3] <https://sdo.gsfc.nasa.gov>
- [4] https://spaceweather.com/images2021/02nov21/halocme_anim.gif
- [5] <https://soho.nascom.nasa.gov>
- [6] <http://eswua.ingv.it/ewphp/swpage/swpage.php>
- [7] <https://www.ecmwf.int/>

Sotto i raggi del Sole: il brillamento solare del 31 dicembre 2023

Riccardo Vagni, Giorgiana De Franceschi e Claudio Cesaroni

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Il 31 dicembre il Sole ha emesso il brillamento solare più intenso del ciclo solare 25. La rete di monitoraggio INGV ne ha registrato gli effetti sulla ionosfera terrestre.

Il **31 dicembre 2023**, alle 16:55 EST (Eastern Standard Time, 21:55 UTC), il Sole ha rilasciato una potente eruzione solare. Infatti, poche ore dopo essere emersa nella parte orientale del disco solare, la grande macchia solare AR3536 ha prodotto un importante **brillamento** registrato da SDO, l'osservatorio solare della NASA, come un chiaro lampo luminoso (Figura 1).

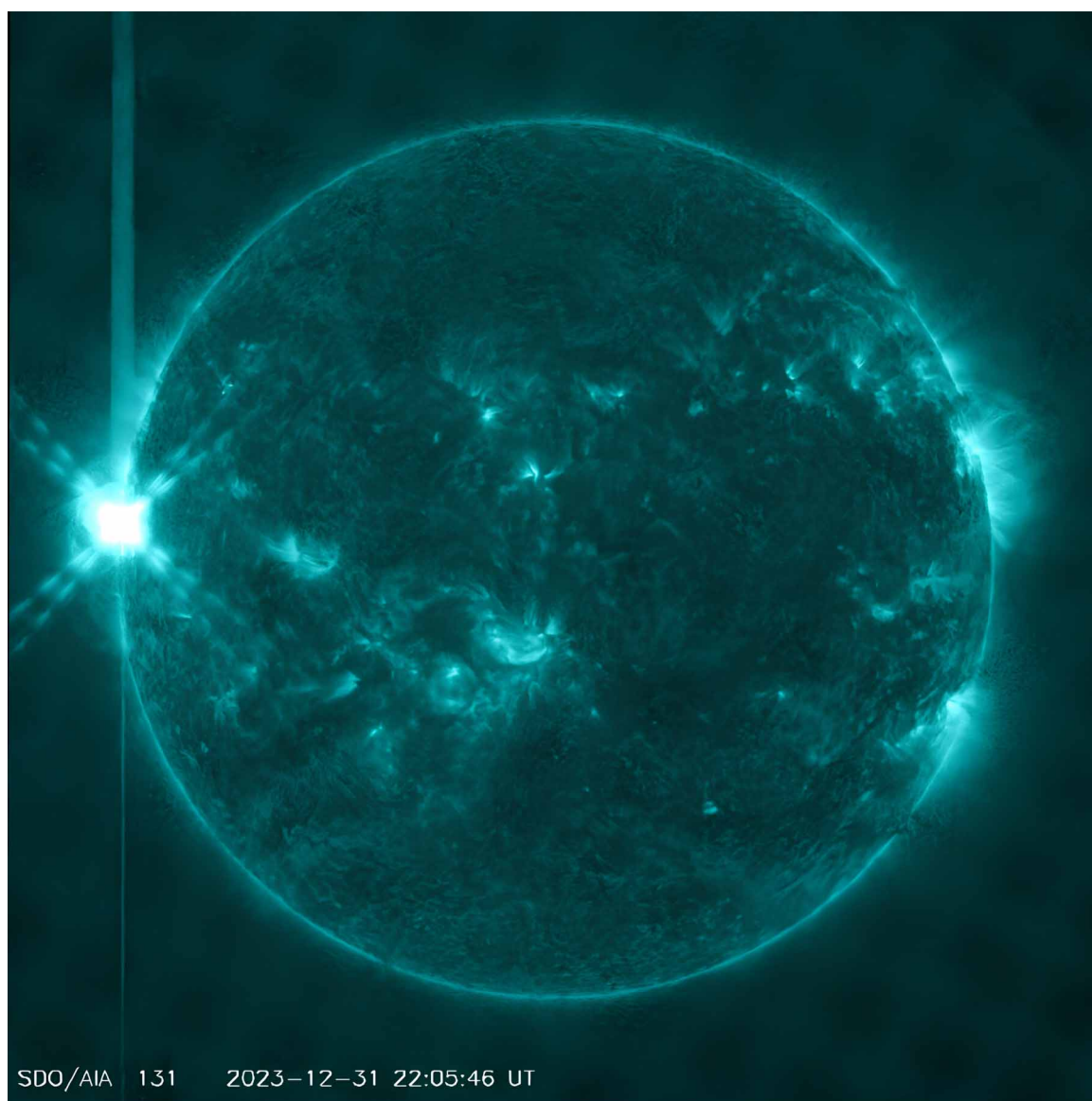


Figura 1 Il brillamento solare del 31 dicembre 2023 appare come un punto luminoso sulla sinistra del disco solare. (Crediti: NOAA SWPC).

Figure 1 The solar flare of December 31, 2023, appears as a bright spot on the left side of the solar disk. (Credits: NOAA SWPC).

Questo brillamento è stato classificato come **X5.0** ed è **il brillamento più forte del Ciclo Solare 25** osservato fino a questo momento. In particolare, è **l'eruzione più potente che il Sole abbia prodotto dai tempi delle grandi tempeste del settembre 2017**.

Cosa è un brillamento solare?

I **brillamenti solari** sono intense emissioni di radiazione in tutto lo spettro delle onde elettromagnetiche, dalle onde radio ai raggi X e gamma e possono avere una durata che va da minuti a ore. Si verificano quando l'energia immagazzinata dal campo magnetico associato a una **macchia solare** viene improvvisamente rilasciata. Un brillamento può avere **conseguenze** di vario genere **sul nostro pianeta**.

Le conseguenze più immediate si osservano già **alcuni minuti dopo il brillamento**, quando la radiazione emessa, che viaggia alla velocità della luce, raggiunge gli strati più alti della nostra atmosfera (ionosfera). Sono soprattutto i **raggi X** a causare gli effetti più evidenti: aumentano la ionizzazione (produzione di elettroni liberi), causando **l'assorbimento delle onde radio** che attraversano l'alta atmosfera.

I brillamenti solari sono classificati in **cinque classi di potenza a seconda della loro luminosità nei raggi X**.

In ordine crescente di potenza sono A, B, C, M e X, ogni classe è dieci volte più potente di quella precedente (la scala è logaritmica).

Che effetti hanno i brillamenti sul nostro pianeta?

I brillamenti di minore intensità, classificati come A, B e C sono piuttosto frequenti e hanno un basso impatto sulla Terra. I brillamenti di classe M di medio-grande entità, sono in grado di provocare blackout radio nell'emisfero terrestre rivolto verso il Sole e soprattutto nelle zone vicine al mezzogiorno locale.

Infine, i brillamenti di **classe X**, i più intensi, si verificano poche volte l'anno soprattutto durante il periodo di massima attività di ogni ciclo solare.

Quando si tratta di brillamenti di classe X, i loro effetti possono provocare **problemi di trasmissione globale e blackout a livello mondiale, colpire i satelliti ed esporre i passeggeri degli aerei che volano vicino ai poli a dosi minime di radiazioni**. Nell'utilizzo di segnali radio ad alta frequenza (HF), in particolare per la gestione delle emergenze, si può sperimentare un degrado temporaneo o addirittura una completa perdita del segnale.

Il monitoraggio della ionosfera

L'impatto di un evento solare può generare irregolarità di densità elettronica nella ionosfera (scintillazioni) che possono causare diffrazione e rifrazione dei segnali radio che la attraversano. Possono presentarsi così seri problemi per i segnali satellitari, compromettendo, per esempio, la qualità delle soluzioni fornite dai sistemi di navigazione GNSS (Global Navigation Satellite Systems) come il GPS o l'europeo e più moderno sistema Galileo.

Per monitorare questi effetti e più in generale lo stato della ionosfera, si può studiare proprio il disturbo registrato dai ricevitori GNSS per risalire alla causa che lo ha generato. Il dato registrato dai ricevitori è quindi materiale prezioso per i ricercatori proprio per capire, a posteriori e in tempo reale, l'effetto del brillamento sul nostro pianeta.

Le aree polari

Il monitoraggio della ionosfera è particolarmente importante nelle **zone polari** perché, a causa della morfologia del campo magnetico terrestre, queste sono le zone direttamente **connesse al flusso di particelle che viene costantemente emesso dal Sole** e chiamato vento solare. La ionosfera delle zone polari, infatti, viene ionizzata per effetto diretto del vento solare soprattutto in condizioni di tempesta solare e geomagnetica. La disponibilità dei dati ionosferici ad alta latitudine, quindi, permette di comprendere al meglio quei fenomeni che danno origine ai disturbi più o meno importanti.

Con il crescente **sfruttamento delle rotte polari**, sia per il traffico marittimo che aereo, è diventato **indispensabile monitorare e modellare la ionosfera polare** al fine di **mitigare i rischi connessi alle perturbazioni indotte nella ionosfera di alta latitudine dai disturbi solari e geomagnetici** e all'impatto che queste hanno sui sistemi tecnologici utilizzati per il posizionamento, la navigazione e la comunicazione a lunga distanza.

La rete di monitoraggio INGV

L'INGV ha realizzato una rete di ricevitori in grado di fornire **in tempo reale** informazioni sulle condizioni ionosferiche. La rete di monitoraggio è in continuo aggiornamento. Attualmente l'osservazione in aree polari comprende strumenti installati in Artide (Isole Svalbard e Groenlandia) e in Antartide (base italo -francese Concordia, stazione italiana MZS e stazione sudafricana SANAE IV). La rete comprende anche punti di osservazione a medie e basse latitudini come l'isola di Lampedusa (Italia), in Sud America, nel Sud Est asiatico e in Africa.

Nella Figura 2 sono riportati i punti del network gestiti dall'INGV anche in collaborazione con altri Enti di ricerca e Università. Oltre alla rete GNSS (in verde) sono riportati anche i punti dove sono installati i radar HF (ionosonde), utilizzati per il sondaggio verticale della ionosfera. Una lista completa delle stazioni è disponibile sul sito eSWua [1] sotto la voce "network".

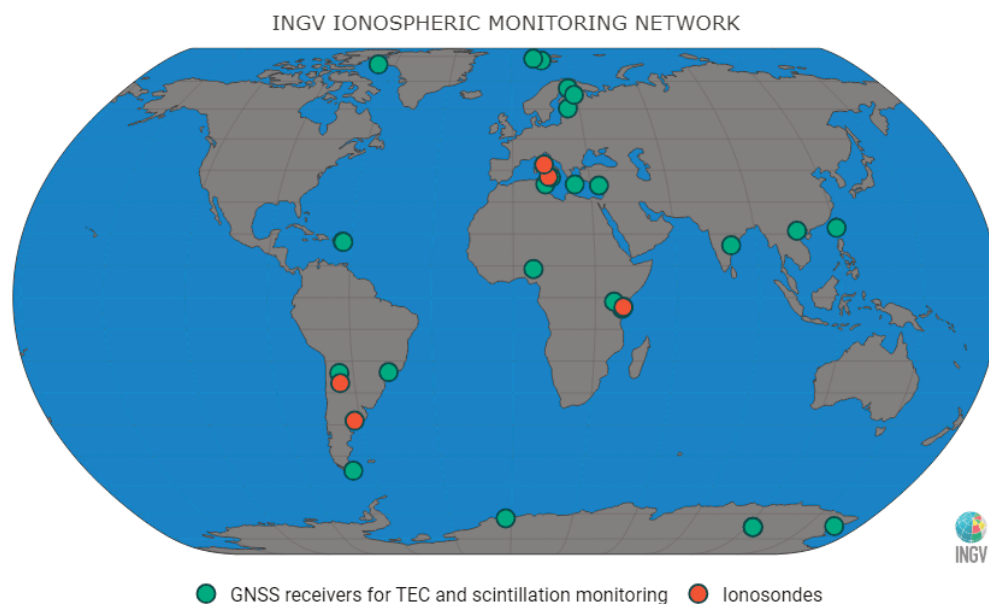


Figura 2 Punti osservativi della rete per il monitoraggio ionosferico. I dati registrati dalla rete sono fruibili in tempo reale sul portale dedicato eSWua.

Figure 2 Observational points of the network for ionospheric monitoring. The data recorded by the network are available in real time on the dedicated portal eSWua.

Come è stato registrato il brillamento solare del 31 dicembre?

I nostri sistemi per il monitoraggio della ionosfera hanno messo in chiara evidenza l'impatto del brillamento di classe X sulla ionosfera terrestre.

Tra i vari punti di osservazione, quelli in Antartide hanno registrato l'evento in modo particolarmente evidente. Il network di strumenti attualmente operanti in Antartide è composto da ricevitori GNSS installati presso la stazione italiana "Mario Zucchelli", la stazione italo-francese "Concordia" e la stazione sudafricana "SANA E IV" (Figura 3).

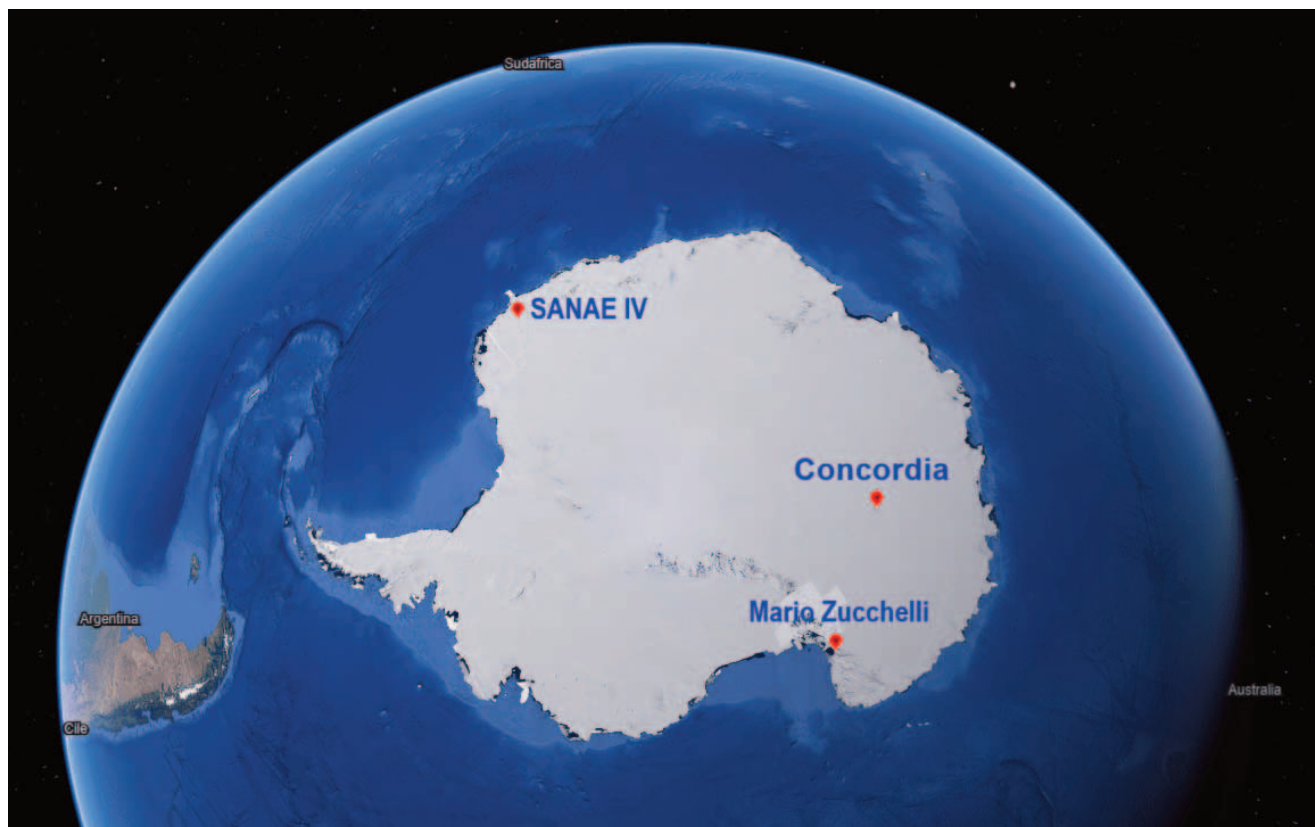


Figura 3 Il network di strumenti attualmente operanti in Antartide è composto da ricevitori GNSS installati presso la stazione italiana "Mario Zucchelli", la stazione italo-francese "Concordia" e la stazione sudafricana "SANA E IV".

Figure 3 The network of instruments currently operating in Antarctica including GNSS receivers installed at the Italian station "Mario Zucchelli", the Italian-French station "Concordia", and the South African station "SANA E IV."

Nella Figura 4 sono riportati i dati (indice di scintillazione di fase) registrati dal ricevitore GNSS installato presso la stazione Mario Zucchelli. Come è evidente, alle ore 21:55 UTC del 31 dicembre, è presente un picco che indica che effettivamente a quell'ora qualcosa ha perturbato la parte alta dell'atmosfera terrestre. In particolare, questo picco indica la presenza di irregolarità nella distribuzione degli elettroni liberi nell'alta atmosfera che genera effetti di rifrazione del segnale GNSS che attraversa quella particolare regione dell'atmosfera prima di essere registrato a terra.

31 dicembre 2023 - 1 gennaio 2024

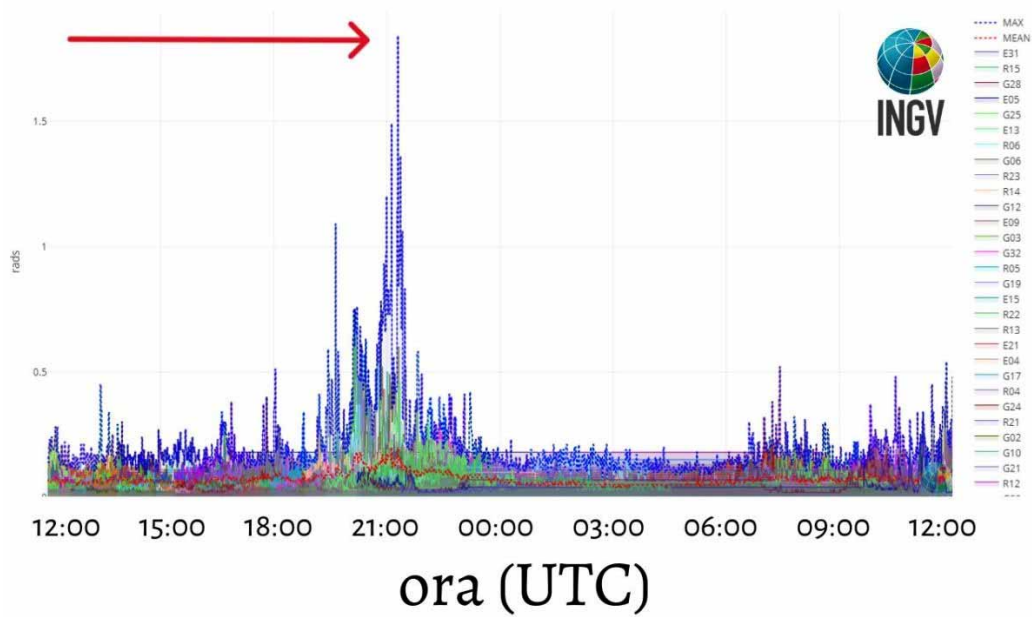


Figura 4 Dati registrati presso la stazione Mario Zucchelli dal 31 dicembre 2023 al 1 gennaio 2024. Alle ore 21:55 UTC del 31 dicembre, è presente un disturbo indicato dalla freccia rossa.

Figure 4 Data recorded at Mario Zucchelli station from 31st December, 2023 to 1st January, 2024. The 31st December at 21:55 UTC a clear disturbance is evident, as highlighted by a red arrow.

Sitografia

[1] <http://eswua.ingv.it/>

10 maggio 2024: la più forte tempesta magnetica degli ultimi vent'anni

Igino Coco e Roberta Tozzi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

La notte tra il 10 e l'11 maggio 2024 sembrava una notte come tante altre. All'improvviso, il cielo si è illuminato di colori straordinari. Non è una scena tratta da un film di fantascienza, ma la realtà di quella notte, quando una intensa tempesta magnetica ha regalato ai più fortunati uno spettacolo mozzafiato.

Spettatori in tutto il mondo

In quella notte molto particolare, bagliori diffusi con tonalità di rosso e violetto sono stati avvistati in vari punti del nostro Paese. Dalle Alpi alle coste adriatiche, passando per le colline toscane e persino nelle pianure del nord. Un evento che ha reso speciale la serata di molti di noi non avvezzi ad assistere a spettacoli di questo tipo, più familiari a chi vive nei paesi alle alte latitudini.

Al fenomeno luminoso hanno assistito milioni di persone, e non solo in Italia.

Un gruppo di fisici spaziali statunitensi, *Space Weather Watch* [1], ha riportato su una mappa i luoghi da cui sono arrivate segnalazioni di avvistamenti di questo evento.

La bassa latitudine degli avvistamenti e la loro intensità fa collocare questa tempesta tra quelle che hanno avuto le più grandi manifestazioni luminose addirittura degli ultimi 500 anni!

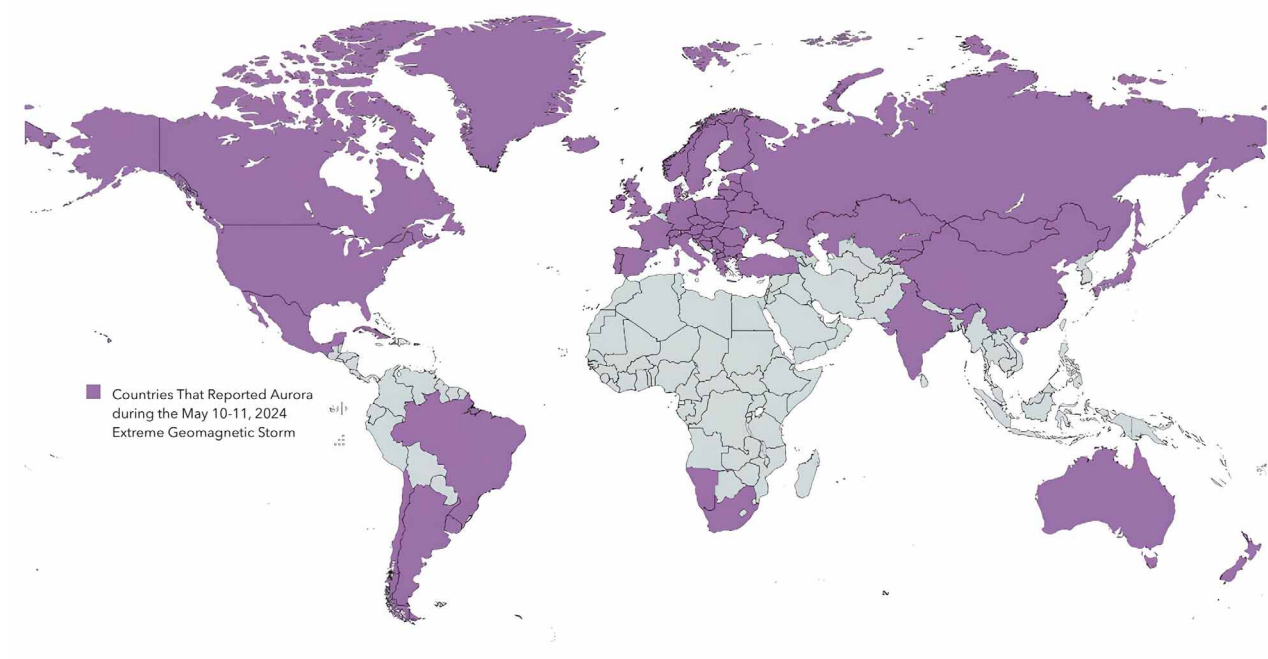


Figura 1 Mappa degli avvistamenti di "aurore" nella notte tra il 10 e l'11 maggio 2024. Pubblicata su X da @spacewxwatch (pagina di "Space Weather Watch").

Figure 1 Map of the "aurora" sightings during the night of May 10-11, 2024. Published on X by @spacewxwatch (Space Weather Watch page).

Il fenomeno ha colorato il cielo notturno con avvistamenti in tutta Europa fino all'estremo sud di Cipro, in Portogallo e in Spagna. Segnalazioni sono giunte anche dall'Algeria, e dalle Isole Canarie. Nel Nord America riprese e fotografie dello spettacolo luminoso sono arrivate dalla Florida, dal Messico, dalle Bahamas e da Porto Rico, fino alle Hawaii.

Ma anche dall'emisfero australe sono arrivate molte segnalazioni dalla Nuova Zelanda, dal Cile, Argentina, Sud Africa, Uruguay, Namibia e Australia, per non parlare del continente antartico, popolato, in questo periodo, solo dai ricercatori che vi trascorrono i sei mesi invernali di buio permanente.

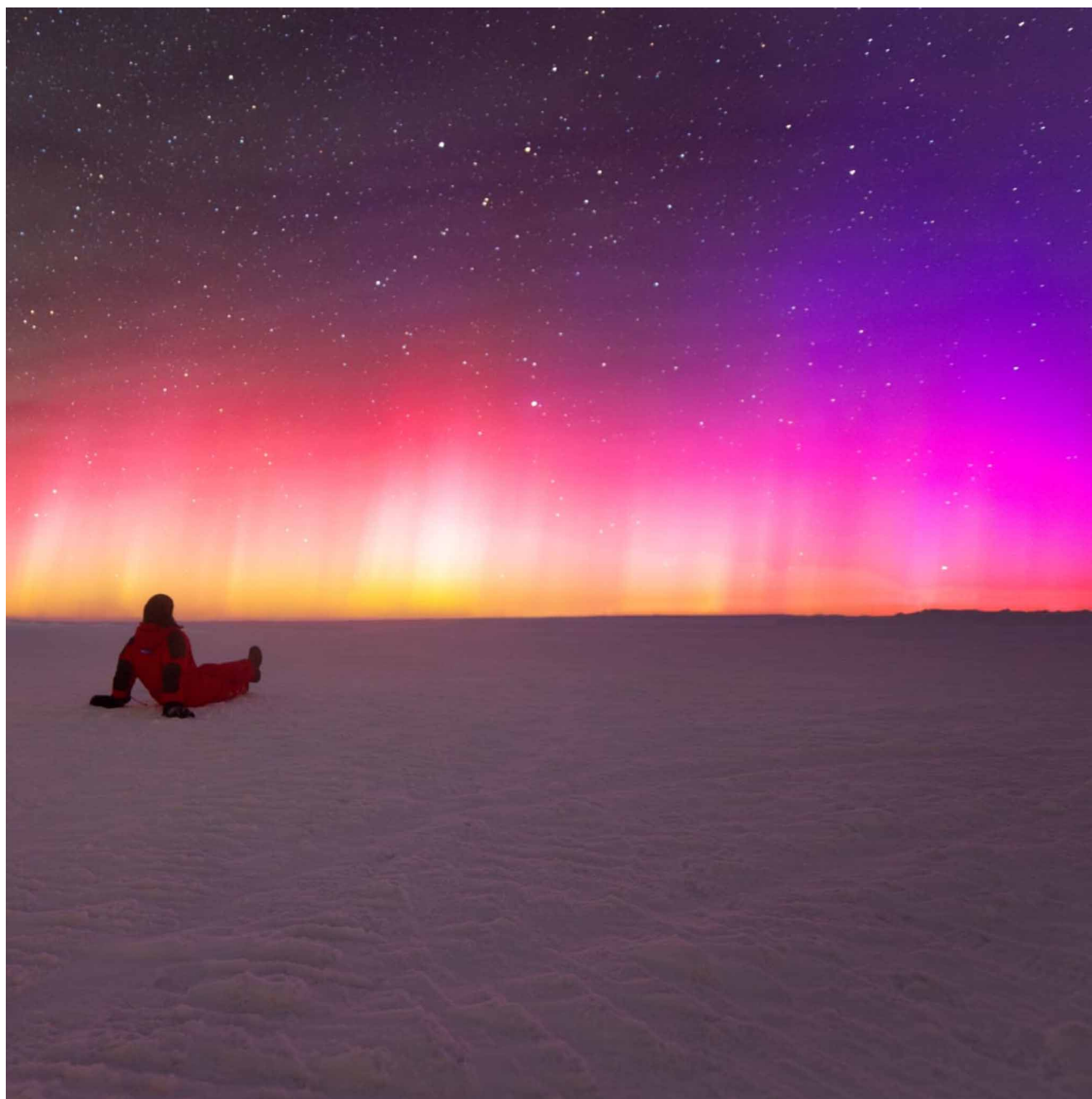


Figura 2 Fotografia scattata l'11 maggio 2024 alle ore 23:00 (orario della stazione Concordia, Antartide, corrispondente alle ore 17:00 italiane). (Crediti: Marco Buttu © PNRA & IPEV).

Figure 2 Photograph taken on May 11, 2024, at 11:00 PM (Concordia Station time, Antarctica, corresponding to 5:00 PM Italian time). (Credits: Marco Buttu © PNRA & IPEV).

Cosa è successo?

Tutto è cominciato quando, nella giornata dell'8 maggio, un flusso di particelle elettricamente cariche (espulsione di massa coronale, nota con l'acronimo CME) è partito dal Sole in direzione della Terra. Questa gran massa di particelle ha interagito con il campo magnetico terrestre, innescando una forte **tempesta geomagnetica**, fenomeno che registriamo a terra come variazioni notevoli dell'intensità del campo magnetico che ci circonda.

La tempesta del 10 maggio è stata **la seconda più intensa del XXI secolo**, e sicuramente una delle dieci tempeste più intense da quando registriamo questi fenomeni, ovvero da metà del XIX secolo. È stata talmente sorprendente che la comunità scientifica internazionale ha già trovato un appellativo per identificarla: "The Mother's day storm", **la tempesta della Festa della Mamma**, che nel 2024 ricorre il 12 maggio.

Aurora sì, aurora no?

Oltre alla tempesta geomagnetica, la perturbazione proveniente dal Sole ha provocato i fenomeni luminosi di cui abbiamo parlato all'inizio. Sulla maggior parte dei media si è genericamente parlato di "aurore", ma siamo sicuri che tutti quanti abbiamo assistito a una vera e propria aurora polare?

La risposta è: molto probabilmente no

Le aurore propriamente dette sono causate dalla precipitazione nell'alta atmosfera di particelle cariche provenienti dalle CME le quali, guidate dalla particolare geometria del campo magnetico terrestre, si concentrano in regioni concentriche rispetto ai poli magnetici, dette "**ovali aurorali**". Nella figura seguente possiamo vedere come si è allargata l'area dove è più probabile osservare un'aurora (ovale aurorale, area rossa) nell'emisfero Nord durante la tempesta del 10 maggio. Poiché il polo Nord magnetico si trova nel Nord del Canada, questa area si espande preferenzialmente verso l'America, mentre in Europa non va oltre le propaggini più meridionali della Scandinavia.

Dato che l'aurora è prodotta dall'eccitazione degli atomi di azoto e ossigeno atmosferici a quote che vanno dai 60 ai 300 km circa, i fenomeni di aurora prodotti alle quote più alte possono essere stati visti da un po' più lontano rispetto ai limiti dell'ovale aurorale, per esempio dal centro-Nord della Germania. Difficilmente però le aurore possono essere state viste dal nostro paese.

Cosa abbiamo visto allora?

Tutto farebbe pensare a un fenomeno che prende il nome di SAR (dall'inglese Stable Auroral Red arc). L'origine è sempre la perturbazione solare, ma non si tratta di particelle che precipitano dall'esterno. Una porzione delle particelle della CME viene intrappolata dal campo magnetico terrestre in una regione che circonda la Terra nella fascia equatoriale e a media latitudine, ad alcune migliaia di chilometri dalla superficie. Qui si produce una corrente elettrica, detta "corrente ad anello", che riesce a riscaldare soprattutto gli atomi di ossigeno che si trovano alle quote più alte dell'atmosfera, tra 300 e 400 km di quota. È proprio l'eccitazione dei livelli atomici dell'ossigeno a produrre il bagliore rossastro diffuso che abbiamo osservato alle nostre latitudini.

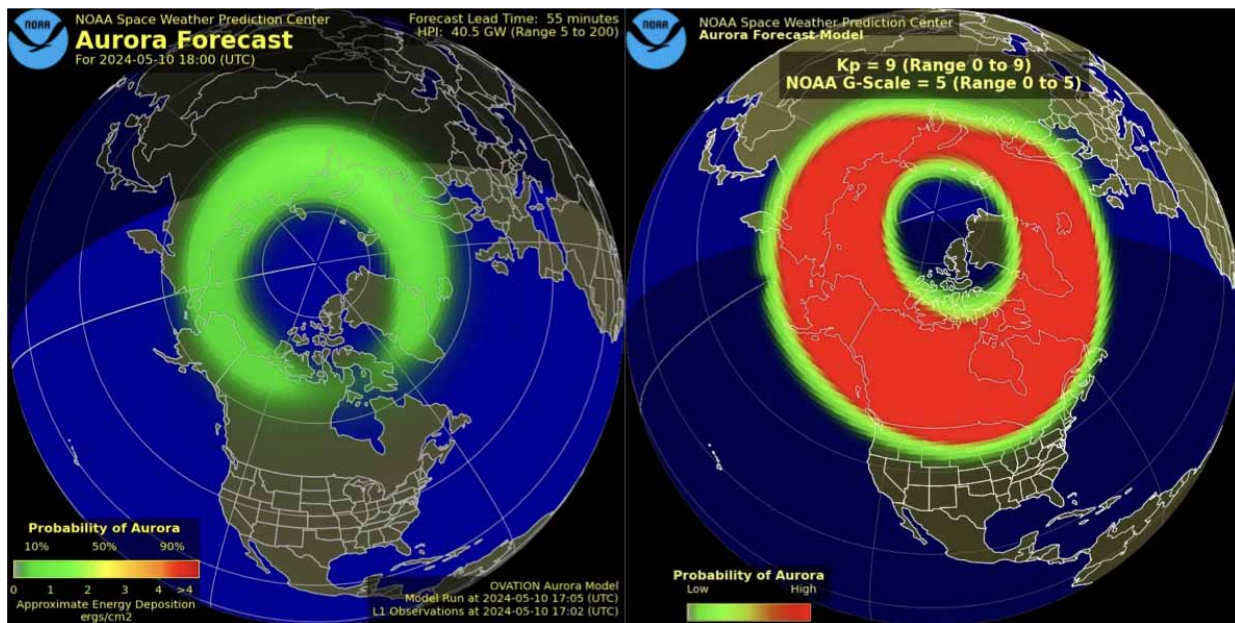


Figura 3 Confronto dell'estensione dell'ovale aurorale prima della tempesta del 10 maggio (a sinistra), e durante (a destra), come ricostruito dal modello OVATION del NOAA [2].

Figure 3 Comparison of the auroral oval's extension before the May 10 storm (left) and during the storm (right), as reconstructed by NOAA's OVATION model [2].

Cosa ha registrato l'INGV?

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia esegue il monitoraggio continuo delle condizioni del campo magnetico terrestre e della ionosfera su tutta la penisola italiana.

In particolare, gli osservatori ionosferici controllano con continuità lo strato di atmosfera compreso tra i 60 e 1000 km di quota, dove la radiazione solare provoca la ionizzazione di una parte dell'ossigeno e dell'azoto. Lo stato della ionosfera è importante per la stabilità delle comunicazioni radio in banda HF e dei servizi GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Nel campo del geomagnetismo l'INGV gestisce tre osservatori magnetici dislocati a nord, al centro e al sud Italia, per la registrazione continua delle variazioni del campo magnetico terrestre. In occasione della tempesta del 10 maggio naturalmente la rete osservativa INGV ha registrato forti perturbazioni.

Ad esempio, l'immagine riportata sotto mostra le variazioni osservate presso l'**osservatorio geomagnetico di Castello Tesino (TN)**, il più a Nord di quelli presenti sul territorio italiano: la traccia blu rappresenta la misura dell'osservatorio, mentre la traccia rossa rappresenta un indice, chiamato Dst, che ricostruisce delle medie su un'ora delle variazioni del campo geomagnetico nella regione equatoriale.

La tempesta inizia con un brusco aumento del campo magnetico intorno alle 19 ora italiana del 10 maggio: è il momento in cui la CME arriva nei pressi della Terra e sbatte contro lo scudo costituito dal campo geomagnetico. Man mano che le particelle della CME vanno a popolare la corrente ad anello, per effetto di induzione il campo magnetico diminuisce (fase principale della tempesta). Quando la perturbazione solare passa oltre il nostro pianeta, piano piano il campo risale fino a tornare ai suoi valori di quiete dopo alcuni giorni (fase di recupero della tempesta).

Durante la tempesta le misure ci hanno mostrato che il disturbo è stato così intenso da far sparire la ionosfera. La densità di elettroni liberi era talmente bassa che di fatto quella regione era quasi indistinguibile dall'atmosfera neutra che si trova più sotto.



Figura 4 Aurora boreale a Seattle (WA, USA) la notte del 10 maggio 2024. (Foto di E. Pica, INGV).

Figure 4 Northern lights in Seattle (WA, USA) on the night of May 10, 2024. (Photo by E. Pica, INGV).

Fortunatamente, nel caso della tempesta del 10 maggio, la scomparsa della ionosfera è durata solo per poche ore. Ha avuto come conseguenza quella di impedire la propagazione delle onde radio su lunghe distanze.

I nostri osservatori hanno registrato tutto questo. Nell'immagine seguente sono poste a confronto due mappe che descrivono in due momenti diversi il contenuto totale di elettroni nella ionosfera sull'Italia. La mappa a sinistra fotografa la situazione subito prima della tempesta (10 maggio 2024, a mezzogiorno) mentre a destra la mappa descrive la situazione nel momento della sua massima intensità (11 maggio 2024, a mezzogiorno). La scala di colori va dal rosso (molti elettroni liberi presenti nella ionosfera) al blu (pochi elettroni).

Abbiamo corso dei pericoli?

In occasione di tempeste geomagnetiche di intensità pari o superiori a quella del giorno della Festa della Mamma, alcune delle nostre infrastrutture (ad esempio GPS, radio HF, rete elettrica) corrono il rischio di subire malfunzionamenti o anche danni permanenti come il collasso del sistema di trasmissione della corrente elettrica.



Figura 5 Torre della Pelosa, Stintino, Sardegna. (Foto di F. Perra).

Figure 5 Torre della Pelosa, Stintino, Sardinia. (Photo by F. Perra).

Le segnalazioni più frequenti hanno riguardato principalmente l'avvistamento di fenomeni luminosi osservati nei cieli in varie parti del mondo.

Sono state segnalate alcune irregolarità nella rete elettrica ma non sono stati riportati impatti significativi sulla popolazione. Un altro tipo di malfunzionamento segnalato è stato il blackout radio e il degrado della precisione del posizionamento fornito dal GPS.

Gli impatti più forti sono stati quelli registrati dai satelliti. Il satellite meteorologico stazionario GOES-16 ha subito alcune interruzioni del servizio, la più lunga durata circa 2 ore. Anche la flotta di satelliti Starlink in orbita bassa ha subito una degradazione del servizio a causa dell'intensità della tempesta, ma è rimasta comunque operativa.

Osservatorio magnetico di Castello Tesino (TN)

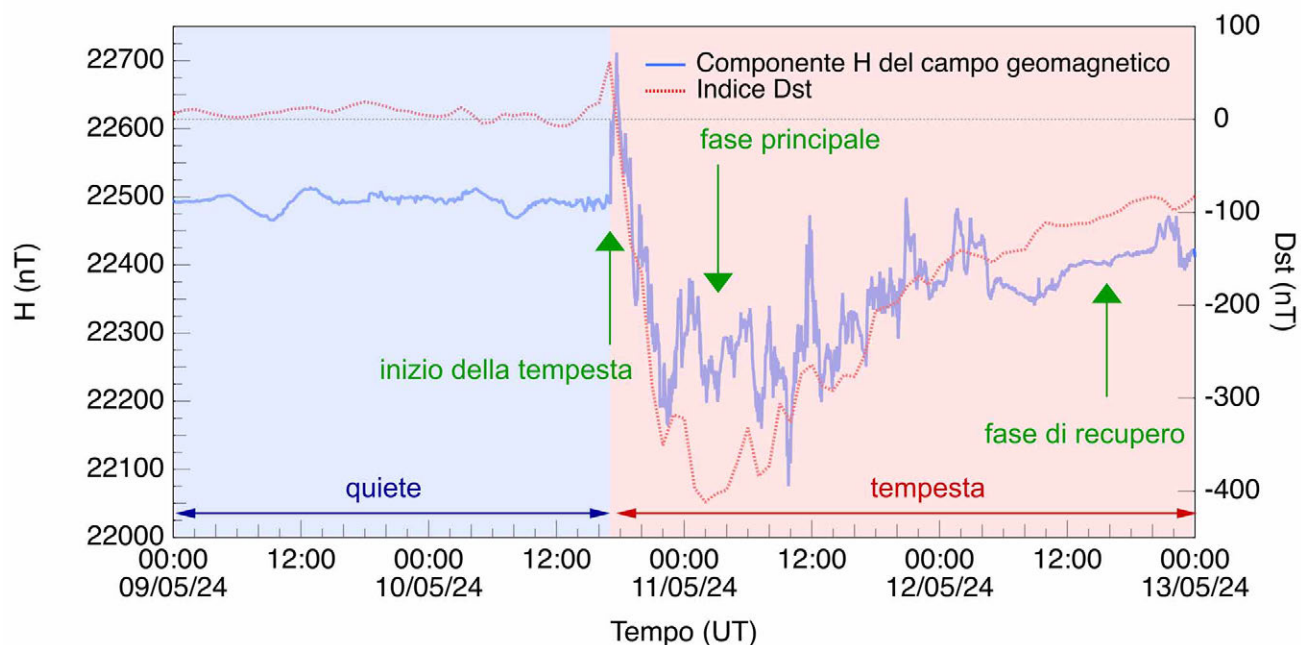


Figura 6 Tracciato del campo magnetico terrestre misurato dall'osservatorio geomagnetico di Castello Tesino (TN) durante la tempesta del 10 maggio (linea blu), confrontato con l'indice geomagnetico Dst (linea rossa). (Crediti: R. Tozzi).

Figure 6 Track of the Earth's magnetic field measured by the geomagnetic observatory of Castello Tesino (TN) during the storm of May 10 (blue line), compared with the geomagnetic index Dst (red line). (Credits: R. Tozzi).

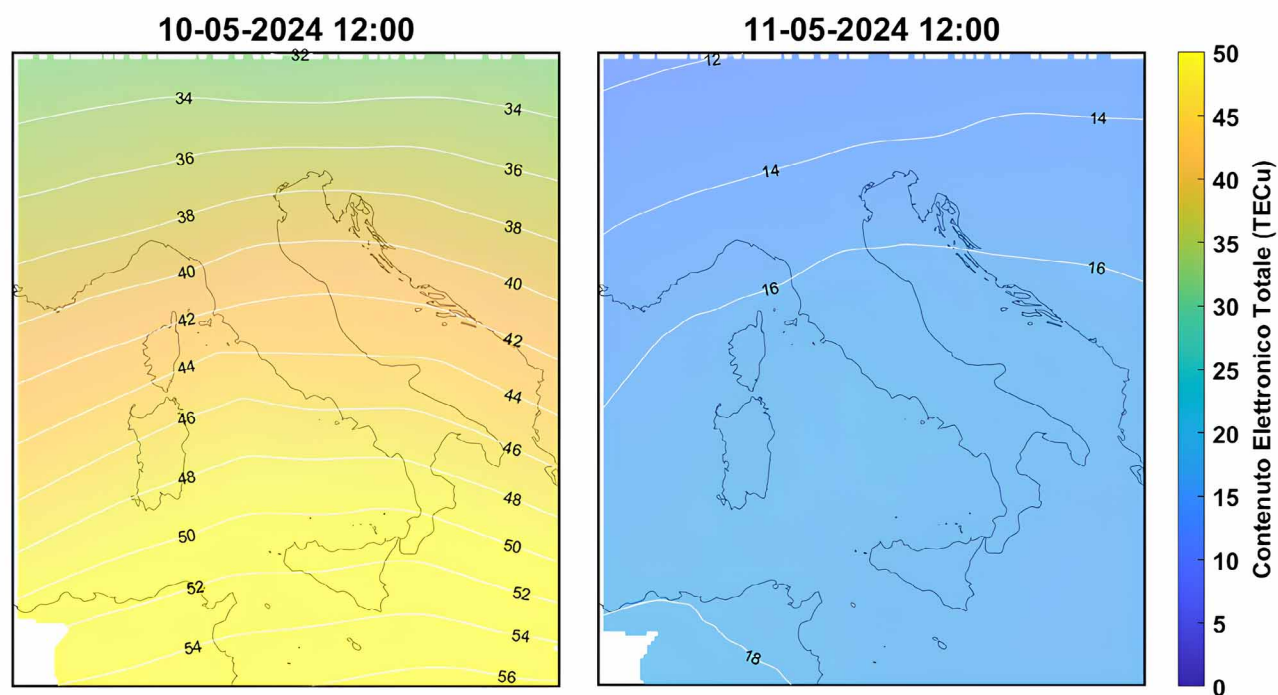


Figura 7 Mappe del contenuto elettronico totale nella ionosfera sopra l'Italia prima e durante la tempesta della Festa della Mamma. I dati sono ottenuti dalla rete di ricevitori GNSS INGV-RING [4]. (Crediti: C. Cesaroni).

Figure 7 Maps of the total electron content in the ionosphere above Italy before and during the Mother's Day storm. The data are obtained from the INGV-RING GNSS receiver network [4]. (Credits: C. Cesaroni).

La tempesta quindi, pur essendo molto intensa, non ha creato gravi danni. Ma tempeste forti nel passato che hanno creato danni ce ne sono state e ancora ce ne saranno. Abbiamo la necessità di prevedere questi eventi poiché la nostra tecnologia, dalla quale oggi dipendiamo enormemente, è fragile e vulnerabile di fronte a questi eventi.

Il nostro Paese, come tanti altri nel mondo, sta prendendo atto dell'importanza dello studio di questi fenomeni. Istituzioni, università ed enti di ricerca, INGV compreso, sono sempre più coinvolti in progetti nazionali e internazionali che vanno incontro a queste esigenze. Un primo passo verso la ricerca di soluzioni ai problemi che questi potenti eventi naturali, qui brevemente descritti, possono comportare.

Sitografia

[1] <https://x.com/spacewxwatch>

[2] <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>

[3] <http://sirius.bu.edu/intro/>

[4] <http://ring.gm.ingv.it>

L'ITALIA NELLO SPAZIO

San Marco 1: l'Italia nello spazio

Fabio Giannattasio e Iginio Coco

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Il 16 Dicembre viene celebrata in Italia la *Giornata Nazionale dello Spazio*, istituita dal Governo italiano nel 2021 in commemorazione del primo lancio satellitare effettuato dal nostro Paese nel 1964. È il giorno in cui anche l'Italia si è affacciata nel cosmo. Ripercorriamo le tappe fondamentali che hanno portato a questo successo nazionale.

Quando si parla di **spazio**, esplorazione spaziale e lancio di satelliti il pensiero comune è volto alla NASA, all'ex Unione Sovietica, alle agenzie spaziali di grandi paesi e comunità di paesi che hanno messo in campo ingenti sforzi scientifici, tecnologici e risorse economiche per conquistare lo spazio. **Non tutti sanno che in realtà il nostro Paese è stato tra i primi al mondo a superare la barriera dell'atmosfera terrestre e accedere allo spazio!** Il quinto in ordine cronologico, dopo Unione Sovietica, Stati Uniti, Gran Bretagna e Canada. Ma il terzo paese, alle spalle delle due superpotenze URSS e USA, ad effettuare in maniera del tutto autogestita progettazione, realizzazione, lancio e controllo della missione.

L'Italia, quel piccolo Paese al centro del Mediterraneo, quasi invisibile sulle carte geografiche al cospetto di altre superpotenze, è uscita distrutta dalla Seconda Guerra Mondiale, ma è artefice di un poderoso boom economico tra la fine degli anni '50 e i primi anni '60, che porta con sé una grande lungimiranza nella politica, nell'imprenditoria e nella ricerca. L'Italia si affaccia così sull'Universo, mostrando a tutto il mondo che quel piccolo Paese è in grado di sviluppare competenze tali da progettare, realizzare, gestire ed effettuare il lancio di un satellite artificiale nello spazio. È la storia della missione San Marco 1, una storia tutta italiana.

Contesto storico

Siamo nel 1964, in piena Guerra Fredda. Russi e americani si sfidano su tutti i fronti, in primis quello militare e tecnologico, utilizzando i loro sterminati armamenti nucleari come reciproco deterrente. Proprio in quell'anno Johnson e Chruščëv (presidenti di Stati Uniti e Unione Sovietica) concordano il taglio degli armamenti nucleari. La Guerra Fredda, come è risaputo, dà un forte impulso anche alla ricerca spaziale e alla cosiddetta "corsa allo spazio" delle due superpotenze, che si sfidano a primeggiare anche in questo ambito.

Dopo gli iniziali successi dell'Unione Sovietica, che per prima riesce a mandare un satellite in orbita (lo Sputnik, nel 1957) e poi un uomo nello spazio (l'impresa di Yuri Gagarin nel 1961), gli Stati Uniti guadagnano terreno e, a partire dalla metà degli anni 60, iniziano ad assumere un ruolo sempre più dominante. Proprio nel 1964 viene lanciato il primo veicolo spaziale senza equipaggio, il Gemini 1, il primo della serie di missioni che forniranno il know-how per portare l'uomo sulla Luna. La sonda Mariner 3 viene lanciata verso Marte, ma la missione fallirà. Viene lanciata poco dopo Mariner 4 che invece atterrerà su Marte inviando 21 foto.

La situazione in Italia

L'Italia nel 1964 beneficia ancora degli effetti del boom economico della fine degli anni '50, ed è legata a filo doppio con gli Stati Uniti, sia politicamente che culturalmente. Nell'ambito

scientifico e tecnologico i rapporti tra le due nazioni sono saldissimi e molto proficui, nati in virtù della fuga in USA di numerosi scienziati italiani di prim'ordine durante il secondo conflitto mondiale (come Enrico Fermi ed Emilio Segré) e dei contatti che questi ultimi hanno mantenuto in patria con personaggi di spicco del mondo della ricerca, primo fra tutti Edoardo Amaldi.

I governi di quegli anni sono propensi a investire molto nella ricerca, come vedremo, e ciò è ovviamente fondamentale per la nascita del programma spaziale italiano; ma, cosa ancora più importante, lo sviluppo della ricerca spaziale italiana prosegue in un solco di continuità di competenze e strutture che parte più da lontano.

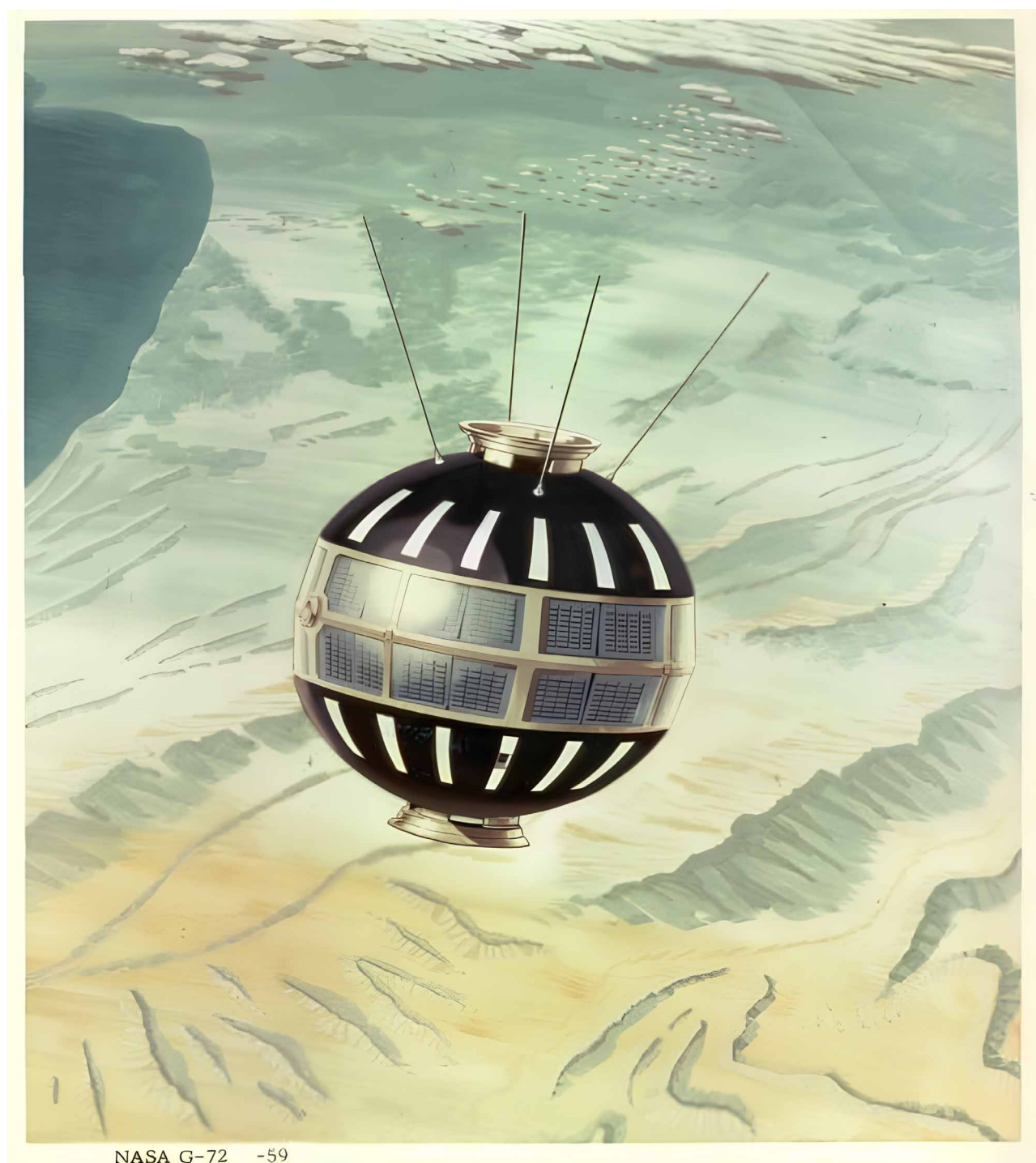


Figura 1 Cartolina commemorativa della NASA del satellite San Marco 1. (Crediti: Graziani [2011]).

Figure 1 NASA commemorative postcard of San Marco 1 satellite. (Credits: Graziani [2011]).

Il gruppo dei “Guidoniani”: dall’Aeronautica all’Astronautica

La storia della missione San Marco 1 è indissolubilmente intrecciata con quella del suo ideatore e principale artefice: **Luigi Broglio** (Mestre, 11 novembre 1911 – Roma, 14 gennaio 2001), considerato a buon diritto il pioniere delle attività spaziali in Italia. Il genio di Broglio è figlio di un’epoca iniziata nei primi anni del ‘900, in cui in Italia si formano piuttosto rapidamente le competenze ingegneristiche sulla dinamica del volo e sull’aeronautica.

Luigi Broglio può essere sicuramente considerato un gigante, ma la sua esperienza poggia sulle spalle di un altro gigante: il suo maestro **Gaetano Arturo Crocco**, il vero pioniere del volo italiano. Nel 1926, su forte impulso proprio di Crocco, viene fondata la Scuola di Ingegneria Aeronautica (oggi Scuola di Ingegneria Aerospaziale) a Roma, in San Pietro in Vincoli (un ex convento). Nel 1935, il gruppo si sposta nella neonata **Guidonia**, la “Città dell’aria”, così chiamata in onore del Tenente Generale Alessandro Guidoni, capo del corpo del Genio Aeronautico e altro padre nobile dell’aviazione italiana. Da qui la denominazione di “Guidoniani”, del gruppo da lui guidato.

Dal 1935 al 1943 si delinea un’**epoca d’oro** di ricerca aeronautica e ricerca aerospaziale in embrione, nei numerosi impianti e laboratori di Guidonia. Citiamo, per esempio, il record di quota raggiunta da un bimotore a elica, effettuato dal Ten. Col. Mario Pezzi il 22 ottobre 1938. Pezzi raggiunge l’impressionante quota di 17,083 metri, e i mezzi tecnici messi in opera, dalla realizzazione della tenuta stagna dell’aereo, alla tuta costruita per Pezzi, alla preparazione fisica studiata per il pilota, costituiscono una versione pionieristica dell’approccio multidisciplinare adottato a partire dagli anni ‘50 nella ricerca astronautica.



Figura 2 A sinistra, il biplano Caproni utilizzato dal Ten. Col. Pezzi per il suo record di quota del 1938. A destra, il Ten. Col. Pezzi che indossa lo speciale equipaggiamento studiato per il record di quota. (Crediti: Graziani [2011]).

Figure 2 On the left: the Caproni biplane used by Lt. Col. Pezzi, when he made his altitude record in 1938. On the right: Lt. Col. Pezzi wearing the special equipment studied for his altitude record. (Credits: Graziani [2011]).

A partire dal 1943, i turbolenti avvenimenti degli ultimi anni della Seconda guerra mondiale portano il gruppo a sfaldarsi, e soltanto una decina di anni dopo, sempre sotto la spinta del quasi ottuagenario Crocco, il programma dei Guidoniani riprende nuovo slancio.

Dagli anni '50 all'avvio dell'era spaziale italiana

A metà degli anni '50 Luigi Broglio raccoglie l'eredità del suo maestro, e diviene direttore della Scuola di Ingegneria Aeronautica, oltre che Generale Ispettore del Genio Aeronautico, rinsaldando così le relazioni tra mondo accademico e mondo militare. Insieme a Edoardo Amaldi intesse una rete di amicizia e reciproca stima con personaggi molto influenti nella scena spaziale americana quali gli italiani Luigi Crocco (figlio di Gaetano) e Antonio Ferri, l'ungherese Theodore Von Karman (tutti e tre emigrati in America) e il direttore scientifico della NASA Hugh Dryden. Nel 1956 viene creato il **Centro Ricerche Aerospaziali (CRA)** dell'Università di Roma, a cui partecipa l'Aeronautica Militare. Nell'ambito delle attività del CRA viene condotta una campagna di lancio di razzi americani da una base militare in Sardegna per studiare l'alta atmosfera. I successi di questa campagna di lanci in collaborazione con la NASA permettono di consolidare la partnership tra Italia e Stati Uniti. Contestualmente nel 1959 viene creata la **Commissione per la Ricerca Spaziale (CRS)**, sempre su iniziativa di Amaldi e Broglio, che raccoglie il fior fiore delle competenze italiane in campo fisico, aeronautico e ingegneristico.

È il 1961. Il Governo italiano presieduto da Amintore Fanfani ratifica il primo piano triennale delle attività spaziali, con un primo finanziamento (a cui ne seguiranno altri) di 4.5 miliardi di lire (l'equivalente in potere d'acquisto di circa 50 milioni di euro attuali). Punta di diamante il **Programma San Marco**, che ha l'obiettivo dichiarato di mandare in orbita un satellite artificiale completamente progettato, prodotto e lanciato in autonomia dal nostro Paese. Alla guida, Luigi Broglio, presidente del CRS, coadiuvato da un team di menti brillanti tra i quali spiccano i nomi di **Carlo Buongiorno**, che sarà primo direttore generale dell'Agenzia Spaziale Italiana e capo delegazione italiano dell'Agenzia Spaziale Europea (che contribuirà a istituire), **Franco Flario**, **Michele Dicran Sirinian**. Il progetto viene presentato alla comunità internazionale, precisamente alla *Commissione sulla Ricerca Spaziale (Committee on Space Research, COSPAR)* che in quell'occasione è ospitato dalla città di Firenze. Lì Luigi Broglio ha la possibilità di dialogare con il personale della NASA, che da subito manifesta l'interesse ad appoggiare il piano italiano.

Il Programma San Marco

L'origine del nome "San Marco" è incerta, alcuni sostengono Broglio lo abbia scelto in onore del Santo patrono dei naviganti, altri in onore delle sue origini venete, altri ancora perché si trattava del nome della piattaforma oceanica dalla quale sarebbe dovuto avvenire il lancio della missione. Il progetto prende il via, e a metà del 1961 circola già l'idea di avvalersi di una piattaforma petrolifera dell'ENI al largo di Malindi, in Kenya, come base di lancio. La posizione della località, prossima all'equatore, è infatti favorevole per sfruttare la più rapida rotazione terrestre come una fionda risparmiando carburante, motivo per cui i lanci vengono effettuati quasi sempre a basse latitudini.

Il progetto San Marco prevede fondamentalmente tre fasi:

1. la realizzazione di satelliti italiani di interesse comune ai partner Italia e Stati Uniti e una serie di lanci suborbitali per affinare la familiarità con l'uso di razzi Scout;
2. la formazione di tecnici italiani sulle procedure di lancio e controllo da parte del personale NASA, nonché la messa a punto degli strumenti a bordo del satellite e analisi dei dati acquisiti;
3. la costituzione di una piattaforma di lancio, la prima al mondo oceanica equatoriale.

Tuttavia, la piattaforma sarà pronta soltanto nel 1967, quindi non sarà utilizzata per il lancio del San Marco 1, che invece si avvarrà di un razzo Scout lanciato dalla base di Wallops Island, in Virginia.



Figura 3 Il professor Luigi Broglio in una foto di repertorio dagli archivi RAI.

Figure 3 Professor Luigi Broglio. Picture from RAI archives.

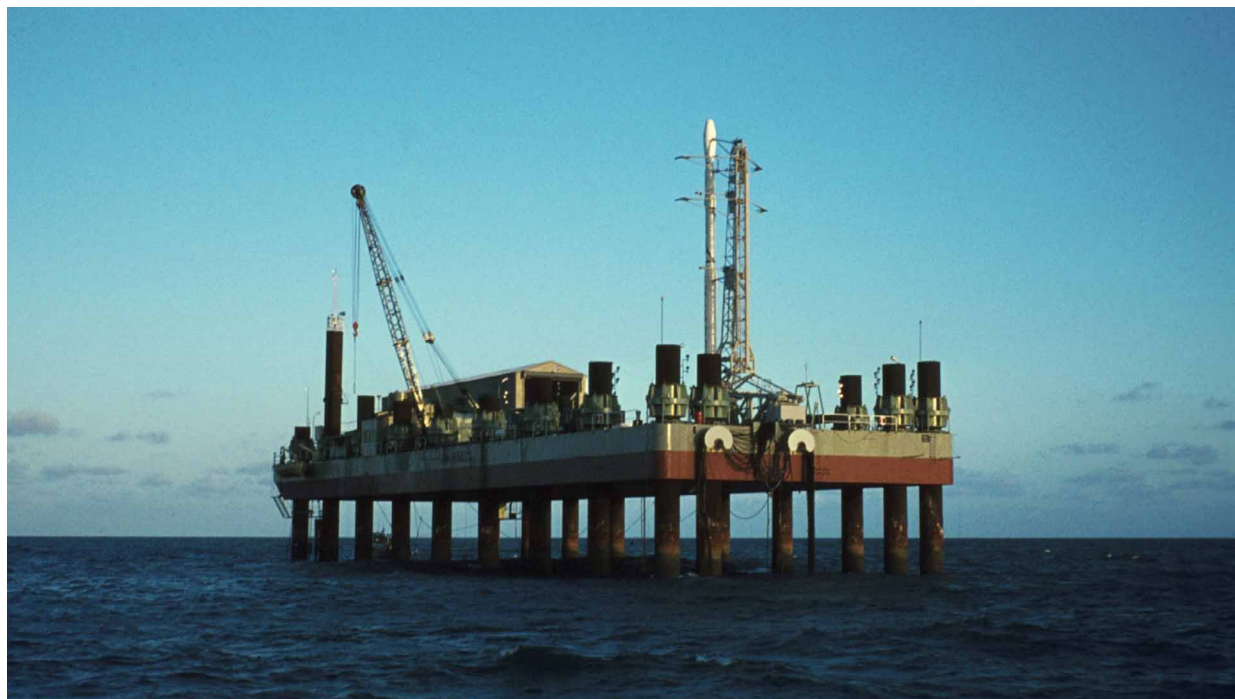


Figura 4 La piattaforma San Marco, al largo di Malindi, in Kenya. (Crediti: NASA - Goddard Space Flight Center).

Figure 4 The San Marco platform in Malindi, Kenya. (Credits: NASA - Goddard Space Flight Center).

L'accordo operativo tra Italia e Stati Uniti prevede che l'Italia fornisca i dati scientifici acquisiti dal satellite, mentre la NASA fornirà supporto logistico e formerà il team italiano alle operazioni di lancio. Il progetto scientifico selezionato prevede lo studio della densità della parte alta dell'atmosfera, la *ionosfera*, e la comprensione di quale sia la sollecitazione su un satellite che la

attraversi. Per far questo, utilizza principalmente una bilancia inerziale denominata “bilancia Broglio”, uno strumento all'avanguardia per l'epoca progettato e realizzato dallo stesso Luigi Broglio. Il tutto in una sfera di circa 115 kg e un diametro di 60 cm da piazzare in orbita equatoriale ellittica con quota di volo media di 550 km circa, un apogeo a circa 850 km e un perigeo a circa 200 km di altezza, e un periodo orbitale di circa 90 minuti.



Figura 5 Alcune fasi dell'assemblaggio del San Marco 1 sul razzo lanciatore Scout. (Crediti: NASA).

Figure 5 The assembling phase of San Marco 1 in the Scout rocket (Credits: NASA).

Il 21 Aprile 1963 dalla base di Wallops Island viene lanciato un prototipo del satellite in volo suborbitale. Il primo lancio fallisce, ma serve per analizzare possibili problemi e mitigarli successivamente. Ed infatti il secondo e i successivi lanci suborbitali di test vanno a buon fine, permettendo di testare con successo la strumentazione di bordo.

Il **15 Dicembre 1964**, alle 20:24 UTC, dall'area di lancio 3 della base di Wallops Island viene lanciato il satellite **San Marco 1**. Il lancio ha successo. I risultati scientifici permettono di esplorare una zona poco conosciuta dell'alta atmosfera, ma soprattutto consentono all'Italia di conquistare la sua finestra nello spazio. Inizia così l'avventura italiana nel cosmo, un'avventura costellata di successi, che ancora oggi rendono il nostro Paese una delle eccellenze assolute riconosciute a livello mondiale.



Figura 6 Lancio del satellite San Marco 1. (Crediti: NASA).

Figure 6 San Marco 1 launch. (Credits: NASA).

Bibliografia

Graziani F. (2011). *Dall'Aeronautica all'Astronautica. Appunti per la storia della scuola di Ingegneria Aerospaziale*. PDF scaricabile da: <https://www.gaussteam.com/about-us/history/>

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale

Francesca DI STEFANO
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Impaginazione

Barbara ANGIONI
Patrizia PANTANI
Massimiliano CASCONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

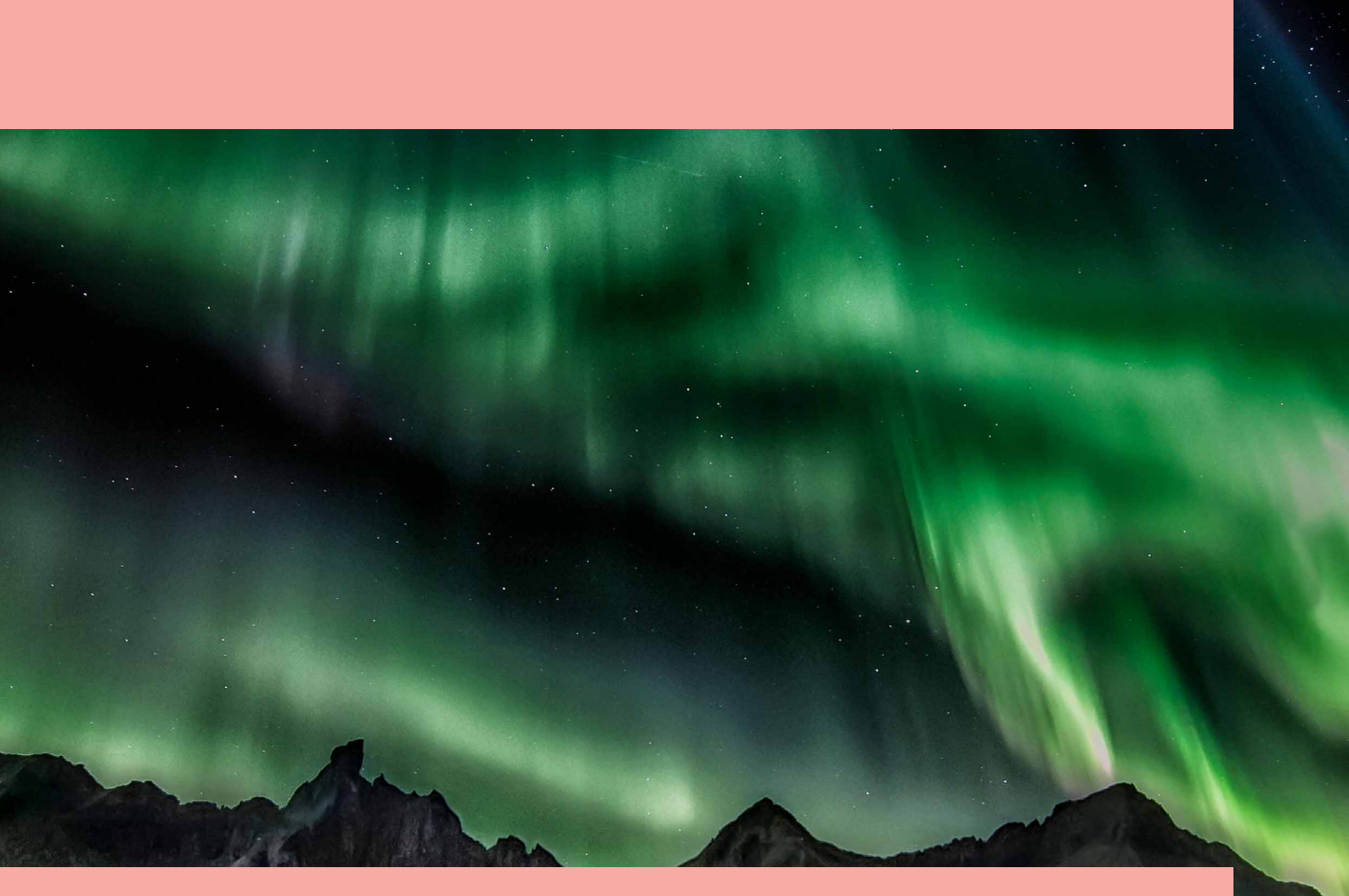
©2024

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA