



Luglio 2026

REPORT

del

COORDINAMENTO INGEGNERI E TECNICI



Per contatti: coordinamento.ingtec@gmail.com

Pubblichiamo
una sintesi del
libro:

IL LATO OSCURO DEL SOLE.



Premessa

Proponiamo la sintesi di questo testo perché rappresenta un'utile riflessione su quanto la **ricerca scientifica** nel campo delle esplorazioni spaziali sia progredita, quanti problemi siano stati risolti e quante applicazioni tecnologiche specifiche abbia prodotto la soluzione di tali problemi.

È un esempio notevole della capacità di sviluppo tecnologico e delle possibilità ulteriori di progresso che l'umanità avrebbe se solo non fosse invischiata in guerre economiche, politiche e militari che frenano tale sviluppo distruggendo risorse, capacità ed esseri umani.

Nello specifico la domanda che molti potrebbero porre è: "A cosa serve studiare il Sole?"

Intanto, come tutte le stelle ha una vita limitata, la sua attività non è regolare, ma varia periodicamente con delle scale astronomiche che non sono ancora astate misurate.

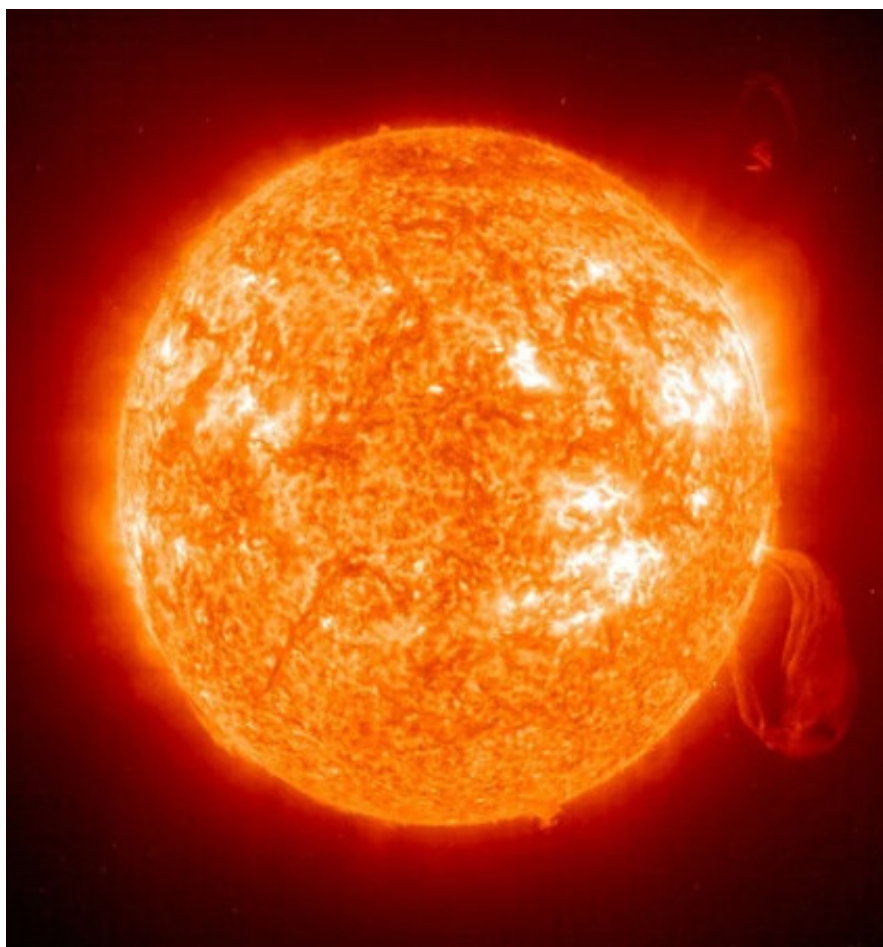
Dunque, lo studio del Sole è un aspetto della **conoscenza scientifica** del nostro universo.

Sappiamo inoltre che la Terra ha vissuto in passato **grandi variazioni climatiche** che potrebbero essere correlate alle variazioni dell'attività solare; quindi, **capire il Sole vuol dire capire anche la Terra**, quanto i suoi mutamenti climatici siano dovuti ad attività umane e quanto ad attività naturali.

Poi ci sono motivi specifici legati alle attività umane sul pianeta e alla salute dell'uomo.

Ad esempio, i fenomeni legati al vento solare e alla sua interazione con il pianeta.

La magnetosfera terrestre ci protegge dal vento solare, ma molto meno ai poli, questo potrebbe provocare un rapido aumento del flusso di particelle verso l'alta atmosfera causando disturbi alle telecomunicazioni o anche alla rete di distribuzione elettrica; il bombardamento di tali particelle è dannoso per la salute umana e per i voli intercontinentali (specie quelli sulle rotte polari).



Come è fatto il Sole

Il Sole è una immane fornace di **1,5 milioni di Km** di diametro, con **temperature** che sulla superficie superano i **5 mila K°**, e all'interno **milioni di K°**, **pressioni** spaventose che schiacciano gli atomi di idrogeno vincendo le forze nucleari e producendo la **fusione termonucleare** che trasforma l'idrogeno in elio emettendo energia sotto forma di luce e calore.

La sua attività è ancora in gran parte sconosciuta: la natura del ciclo solare, il numero di macchie solari, l'intensità del suo campo magnetico e la frequenza delle tempeste solari.

Attualmente sono in volo due missioni con l'obiettivo di una osservazione ravvicinata: la *Parker Solar Probe* della NASA e il *Solar Orbiter* dell'ESA.

Dal punto di vista della fisica il **Sole è una sfera di gas ionizzato**, cioè, fatto di atomi che hanno perso i loro elettroni, per cui sono elettricamente carichi.

Questo particolare stadio della materia si chiama *plasma*.

L'energia emessa dalla trasformazione dell'idrogeno in elio inizialmente è composta da neutrini (particelle subnucleari di massa pressoché nulla che non interagiscono con la materia), e raggi gamma (una radiazione elettromagnetica ad altissima energia).

Questa energia controbilancia la pressione dovuta alla forza di gravità.

Per il Sole si tende ad usare il **modello a strati**.

Il **nucleo** centrale si estende per un quarto del raggio e contiene la metà della massa totale, con temperatura stimata in **15 milioni di K°**, lo strato superiore al nucleo detto *zona radiativa* che arriva fino a **0,7 raggi solari** (0,5 milioni di Km da centro): qui pressione e temperatura calano, non ci sono processi di fusione, ma l'energia prodotta dal nucleo irraggia calore sotto forma di **raggi gamma**, interagisce con gli strati superiori trasformandosi in uno spettro di frequenze più ampio che va dal visibile all'infrarosso; la *zona convettiva* che arriva fino sotto la superficie: qui c'è il fenomeno termodinamico della **convezione** (come l'acqua che bolle in una pentola), che trasporta il calore verso le zone più esterne che sono più fredde per poi ricadere all'interno.

Sopra la zona convettiva c'è la *fotosfera*, cioè la superficie del Sole spessa solo 3-400 km ad una temperatura di **5-6 mila K°**, sopra la superficie si estende poi la *cromosfera* per qualche migliaio di km ad una temperatura di **10 mila K°**.

Infine, c'è la *corona solare*, l'ultima parte visibile del Sole, la sua temperatura supera **1 milione di K°**.

Nel **1955** il fisico americano **Leverett Davies** coniò il termine *eliosfera* per descrivere lo spazio intorno al Sole, avendo notato la connessione tra l'intensità variabile dei **raggi cosmici** (un flusso continuo di particelle ad altissima energia che investe costantemente la Terra) e il **ciclo periodico di 11 anni** nel numero e nella frequenza delle apparizioni delle **macchie solari** sulla superficie del Sole.



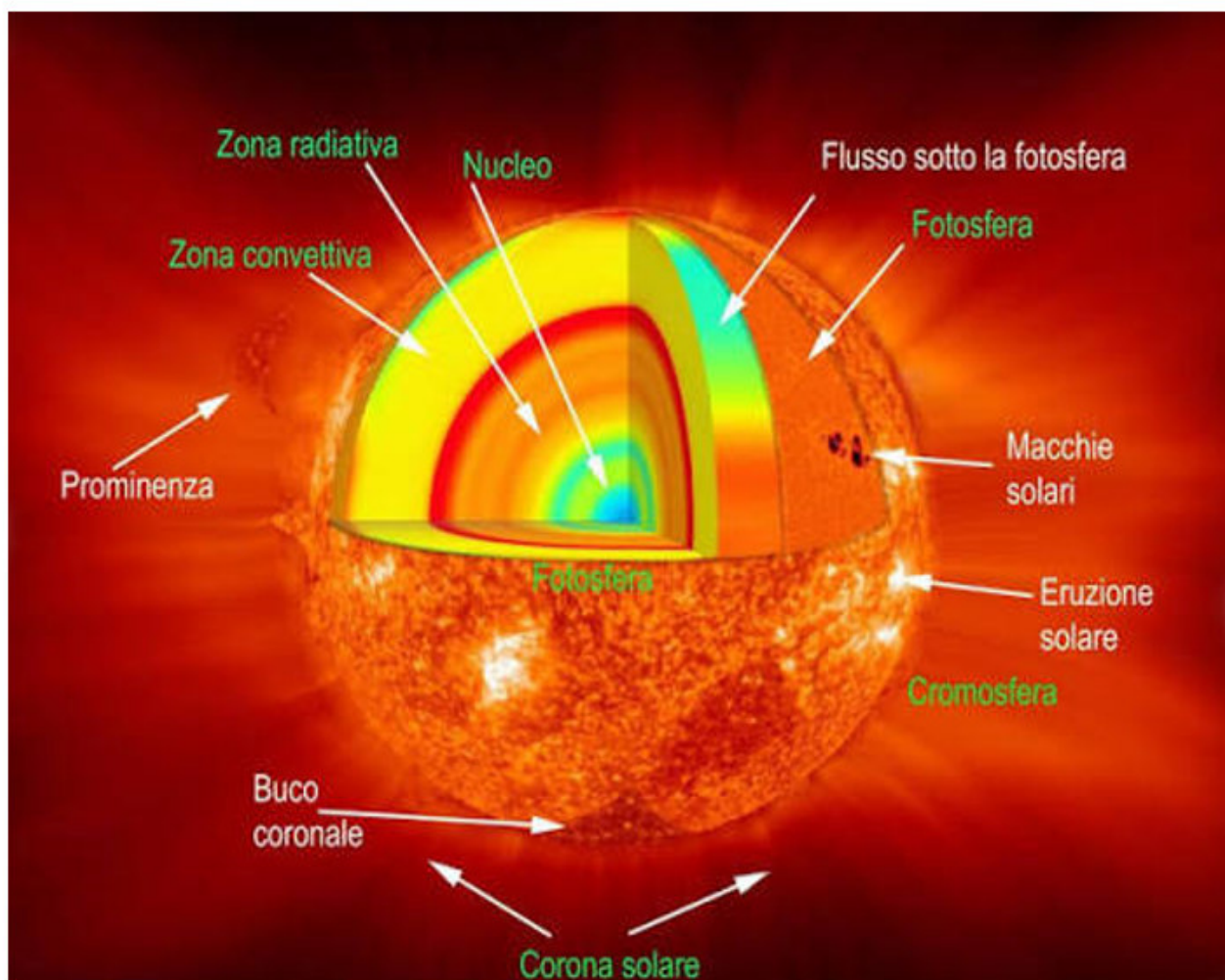
L'ipotesi che il flusso di particelle cariche provenisse dall'attività solare venne formulata dall'astronomo statunitense **Eugene Parker** nel **1958** e confermata sperimentalmente nei primi anni '60; il flusso prese il nome di *vento solare*.

L'*eliosfera* esisteva ed arrivava a lambire il nostro pianeta: oggi grazie alle sonde spaziali sappiamo che l'*eliosfera* si estende ben oltre l'orbita terrestre.

Il vento solare ha origine nella **corona solare** e si estende nello spazio ad una **velocità tra i 250 e i 1000 Km/s**, ha una densità media di 7 particelle per metro cubo, ma le tempeste solari (improvvisi esplosioni di massa coronale) possono variare la densità fino a 100 particelle per m cubo.

Il vento solare trasporta con sé anche il *campo magnetico solare*, le sue variazioni sono legate alla **rotazione sinodica di 27 giorni** e al **ciclo di 11 anni**.

La *magnetosfera* terrestre è data dall'interazione del campo magnetico prodotto dal vento solare e di quello terrestre.



La struttura interna del Sole

Il Sole nell'era spaziale

Per lanciare una sonda dalla Terra verso il Sole bisogna fornire una energia iniziale che le faccia raggiungere la **velocità di fuga** di **11,2 Km/s**: uscita dall'attrazione terrestre la sonda si trova in un'orbita eliocentrica, praticamente diventa un satellite del Sole.

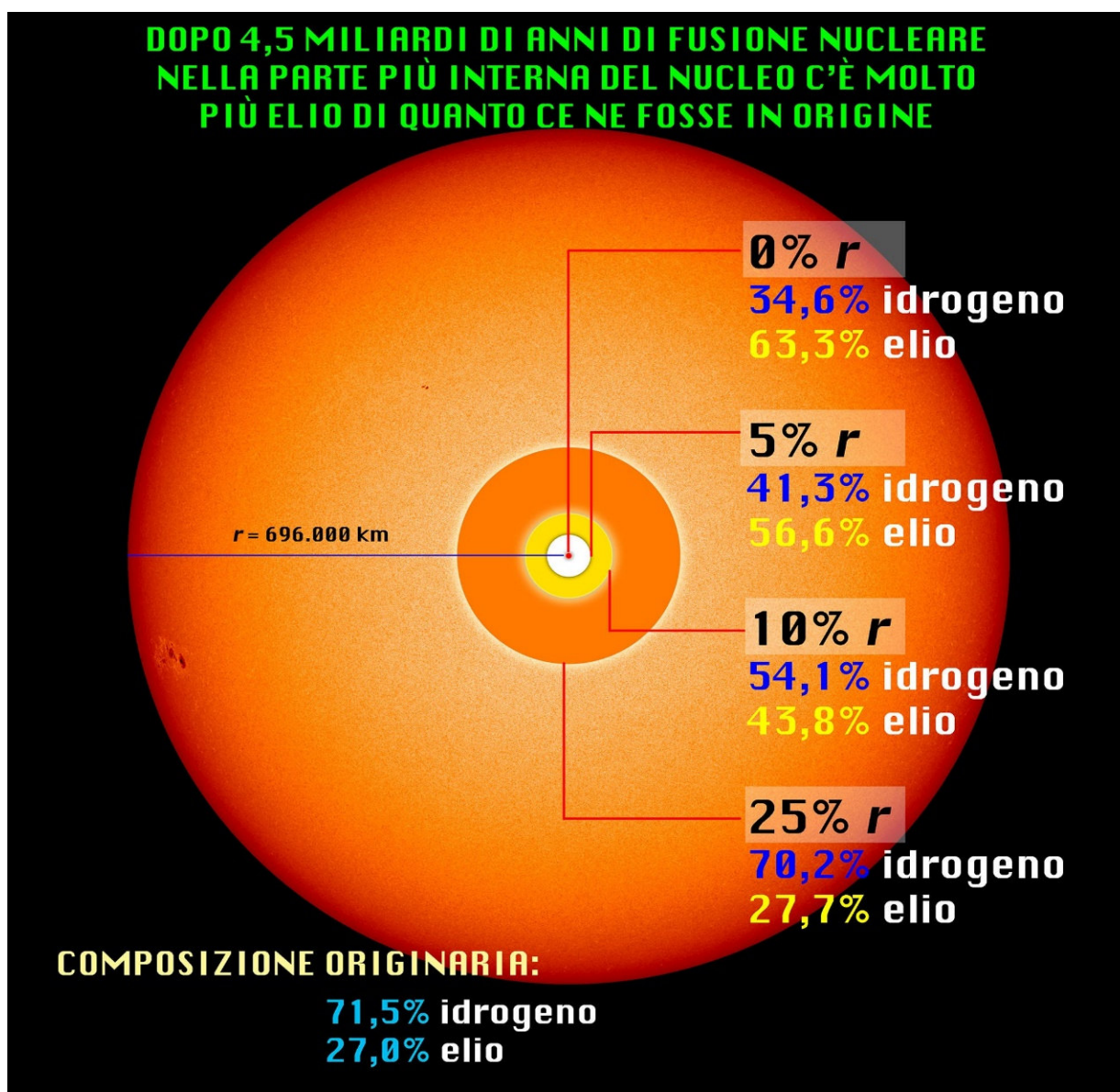
Il primo problema intuitivo è che avvicinandosi al Sole aumenta **l'intensità della radiazione solare con il quadrato della distanza**.

Surriscaldandosi la sonda ha bisogno di uno **scudo termico** separato dal resto della sonda.

Inoltre, occorre tenere i pannelli solari, fonte di alimentazione della sonda, esposti al Sole senza essere danneggiati, idem gli strumenti scientifici per le misure, mantenendoli ad una temperatura accettabile.

C'è poi il problema del vento solare, il flusso di particelle cariche ad alta energia, per cui bisogna equipaggiare la sonda con protezioni speciali.

L'altro problema importante è la **dinamica orbitale**: se vogliamo avvicinarci dobbiamo innanzitutto *frenare* la nostra velocità per poter *cadere* verso il Sole: questo perché la forza centrifuga tende a superare l'attrazione gravitazionale della nostra stella.



Di cosa è fatto il Sole



La sonda Mariner 10

L'era spaziale, iniziata con il lancio della **Sputnik** nel **1957**, vide all'inizio fallire 4 lanci su 5.

Il primo velivolo a lasciare l'orbita terrestre fu la sonda sovietica *Luna 1* che comunicò l'esistenza del vento solare.

Poi tra il **1958** e il **1960** fu la volta delle sonde *Pioneer* della NASA: il *Pioneer 5* confermò l'esistenza del campo magnetico solare arrivando ad una distanza "minima" di **100 milioni di Km**, considerando che la Terra orbita a **150 milioni di Km** dal Sole.

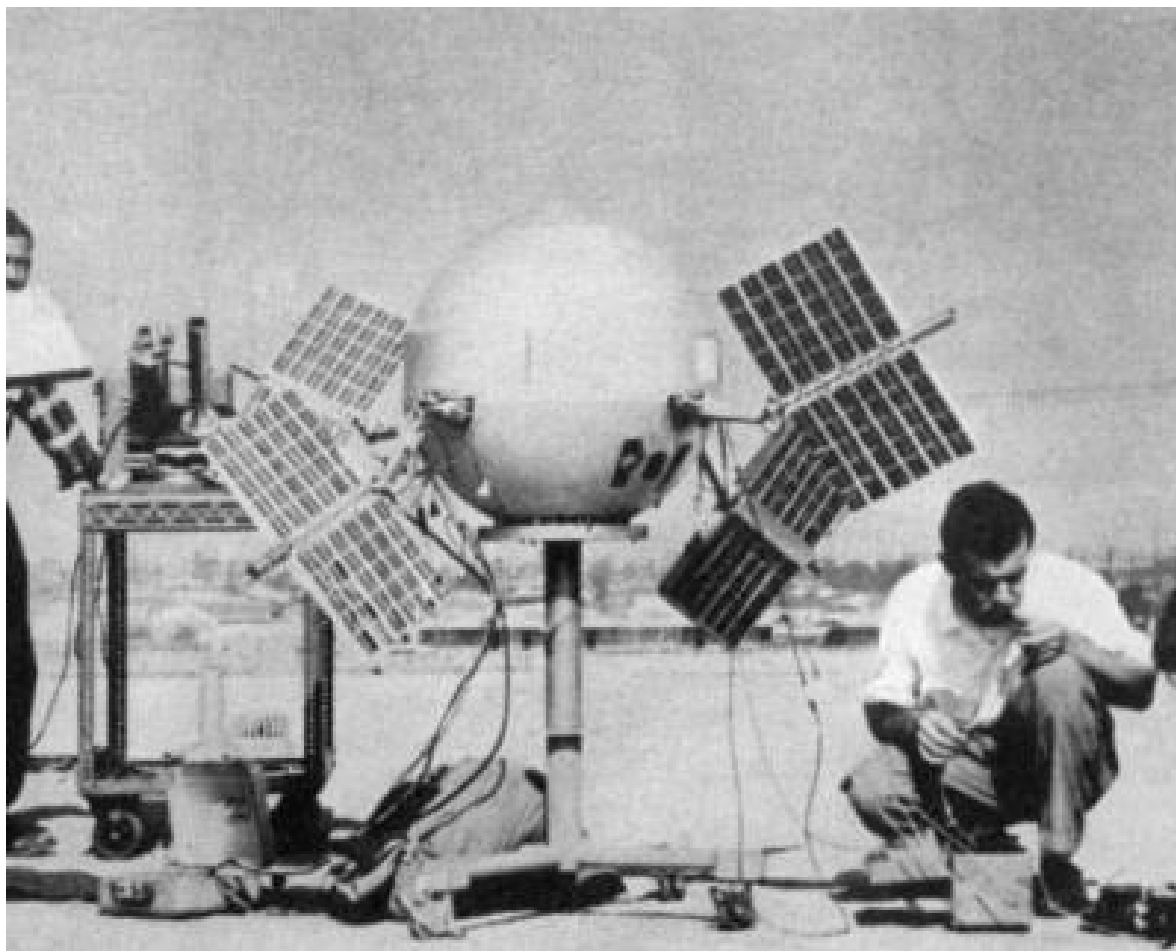
La prima missione a dare un quadro completo del vento solare fu l'americana *Mariner 2* nel **1962**.

Tra il **1974** e il **1976** due missioni congiunte tedesco-americane *Helios I* e *Helios II* raggiunsero la **distanza minima** di sole **0,29 UA** (43 milioni di Km), superando l'orbita di Mercurio.

Per tenere incollati gli specchi delle sonde che si riscaldavano fino a **200 C°**, venne inventato un adesivo speciale.

L'industria tedesca dovette sviluppare da zero tecnologie totalmente nuove in Europa.

La missione fu un successo assoluto per l'epoca visto che le sonde erano progettate per durare un anno e mezzo, *Helios I* sopravvisse fino al 1980 e *Helios II* fino al 1986, permettendo così di scoprire un intero ciclo solare.



La sonda Pioneer 5

Negli anni '70 vennero lanciate altre sonde per l'esplorazione del sistema solare, sonde che misurarono l'evoluzione spaziale del vento solare e del campo magnetico del Sole per capire fin dove arriva l'*eliosfera*.

Nel **1972** la sonda della NASA *Pioneer 10* venne inviata verso Giove misurando la *magnetosfera* e il *vento solare* e un **flusso di ioni** circa 10 mila volte maggiore di quello terrestre: inoltre fu la prima sonda che usò il pianeta gigante come effetto fionda gravitazionale per potersi lanciare ai confini del sistema solare, arrivando nell'orbita di Saturno nel 1976, in quella di Urano nel 1979 e di Nettuno nel 1983.

Infine, le due sonde *Voyager* lanciate nel **1977** misurarono i confini dell'*eliosfera*: la *Voyager 1* nel **2004** arrivò a misurare l'*eliosfera* a **94 UA**, raggiungendo poi nel **2012** l'*eliopausa* a **121 UA**, cioè **18 miliardi di Km**.

I limiti di queste sonde erano due: non avevano strumenti per la misurazione diretta della radiazione solare ed erano rimaste sul piano dell'eclittica.

Per vedere il Sole dall'alto o dal basso dell'orbita terrestre occorre lasciare l'eclittica.

L'Europa nello spazio

Il sistema solare si è formato da una nube di gas e polveri in rotazione su un piano.

Al centro della nube si è formato il Sole per **collasso gravitazionale dei gas** che hanno acceso, **5 miliardi di anni fa**, la fusione termonucleare: le polveri hanno continuato a ruotare sul piano dando vita ai pianeti che a loro volta ruotano sul piano del disco originario (eclittica).

Anche il Sole ruota su sé stesso ed è **inclinato di 7 gradi** rispetto all'eclittica per cui osservandolo dalla Terra lo vediamo sempre all'equatore.

Per osservare i poli del Sole venne messa in piedi la prima, ed unica, missione fuori dall'eclittica.

Nel **1974** la Nasa e l'Esa iniziarono a studiare una missione comune chiamata **OOE** (*Out of Ecliptic*) che divenne poi **ISPM** (*International Solar Polar Mission*): il lancio previsto nel 1983 venne rimandato perché nel 1980 la NASA, con problemi di budget abbandonò il progetto per dare vita alle missioni Space Shuttle, per cui nel 1986 l'ESA lanciò da sola la sua sonda.

Dalla NASA provenivano diversi strumenti, tra cui il *generatore termoionico a radioisotopi* (RTG), elemento fondamentale per fornire energia elettrica ai sistemi di bordo, praticamente una batteria che trasforma l'energia del decadimento radioattivo del plutonio in calore e poi in elettricità.

La sonda europea venne chiamata *Ulysses*, richiamando l'Ulisse di **Dante** collocato nell'inferno per essere andato oltre i limiti della conoscenza umana.

Alla fine, Ulisse partì il 6 ottobre 1990 a bordo dello Shuttle Discovery.

Lanciato in direzione perpendicolare all'eclittica a **11,2 Km/s** sommata alla velocità della Terra di **30 km/s** avrebbe dato alla sonda una inclinazione di **23 gradi**, troppo poco per gli scopi della missione.

Venne così lanciata verso Giove alla velocità **13,2 Km/s**, che combinandosi con i **12,6 Km/s** del gigante gassoso avrebbe messo Ulisse con l'inclinazione giusta per sorvolare i poli solari.

Il 4 novembre 1990 la sonda dispiegò il suo **braccio assiale**, un tubo di 7,5 metri su cui erano montati gli strumenti scientifici da tenere lontani dagli effetti magnetici della sonda stessa: il velivolo, che per ragioni di **stabilità giroscopica** ruotava su sé stesso di **5 giri al minuto** per mantenere l'asse diretto verso la Terra, iniziò ad oscillare pericolosamente, facendo oscillare l'asse di rotazione.

Il fenomeno era provocato dal fatto che il braccio metallico esposto alle radiazioni solari si dilatava e si contraeva provocando le **nutazioni** della sonda (la nutazione è un moto di oscillazione dell'asse di rotazione di un oggetto che si sovrappone al suo moto circolare di precessione, il nome deriva dal latino *nutare* rafforzativo di *nuĕre* e significa "un cenno del capo", letteralmente annuire).

L'unico rimedio era usare i propulsori di bordo per controbilanciare l'oscillazione.

Per fortuna la navicella era equipaggiata con in sistema **CONSCAN**, per eseguire correzioni di puntamento, non di nutazione, ma venne usato lo stesso.

Per funzionare CONSCAN aveva bisogno di un segnale radio continuo dalla Terra, ogni interruzione di segnale faceva aumentare le nutazioni: venne così approntato un piano di emergenza con le stazioni della **Deep Space Network** della NASA.

Con i dati della nutazione e la reazione di CONSCAN venne costruito un modello basato sul concetto di **funzione di forzatura di nutazione**, basato sui due parametri: distanza della sonda dal Sole e angolo tra l'asse di rotazione della sonda e la direzione del Sole.

Ovviamente allontanandosi dal Sole le nutazioni diminuiscono.

Passando per Giove la sonda subiva un pesante bombardamento di particelle cariche, per cui si decise di farla passare a meno di 6,3 raggi gioviani, cioè **45 mila Km** dalla Terra.

La sonda era stata progettata per il Sole, cioè un ambiente stabile vista la distanza.

Il numero di comandi immagazzinabili nella memoria di bordo era 40, ma ne servivano molti di più essendo una missione che prevedeva cambiamenti più repentini.

La potenza elettrica del generatore di bordo non era sufficiente per far funzionare tutti gli strumenti, alimentare allo stesso tempo i radiotrasmettitori e infine mantenere con i riscaldatori elettrici la temperatura della sonda a livelli accettabili (nello spazio la temperatura media è di circa **2,7 K°**, cioè, meno 270 C°).

La missione era basata inoltre su un continuo contatto via radio con la Terra, le cui comunicazioni impiegavano **37 minuti** per arrivare (pur viaggiando alla velocità della luce).

Ulisse ottenne la copertura continua da parte del DSN, l'infrastruttura della NASA, che avrebbe seguito la sonda 24 ore al giorno con le sue antenne da 70 e 34 metri situate in California, Australia e Spagna.

Nel febbraio 1992 Ulisse sorvolò Giove lasciando l'eclittica con una inclinazione di 80 gradi.

Fu anche l'occasione per studiare la *magnetosfera* del gigante gassoso.

Tre delle quattro lune di Giove, **Io**, **Europa**, **Ganimede** scoperte insieme alla quarta **Callisto** da **Galilei** erano completamente immerse nella *magnetosfera* di Giove.

Io aveva una attività vulcanica intensa che emetteva di continuo particelle cariche che, intrappolate dal campo magnetico gioviano, producevano una struttura di plasma ad anello intorno al pianeta.

L'orbita su cui viaggiava Ulisse usando la spinta di Giove aveva un periodo di 6,2 anni, durante i quali avrebbe raggiunto la distanza massima dal Sole (**810 m di Km**, o 5,4 UA) e la minima (**200 m di Km**, circa 1,3 UA)

Si considerava un passaggio solare il periodo in cui la sonda volava sopra i 70 gradi di latitudine per il polo nord e meno 70 per il polo sud.

Dalle osservazioni terrestri sappiamo che il **plasma solare ruota a diverse velocità a seconda della latitudine**, per cui i processi indotti dalla rotazione saranno diversi ai poli o all'equatore.

Ulisse sorvolò il polo sud nel 1994 rimanendovi per **132 giorni**, arrivando alla **distanza minima di 1,9 UA**.

In questo periodo il Sole completò 5 rotazioni, nel periodo di minima attività solare nel ciclo di 11 anni, un fenomeno conosciuto tramite i cosiddetti *buchi coronali*.

Sono vaste regioni della corona, dove il campo magnetico si "apre" verso l'esterno. Poiché qui il plasma caldo può fuoriuscire liberamente, queste zone appaiono più scure e meno dense, diminuendo così la sorgente del vento solare ad alta velocità.

Nella direzione di questi buchi ci si aspettava quindi un aumento della velocità del vento solare, mentre venne misurato un vento a bassa velocità, che successivamente incrementò fino ad arrivare a **750 Km/s**.

La sonda era immersa in un vento solare ad altissima velocità proveniente dal buco coronale del polo sud: tra l'altro gli strumenti trovarono abbondanza di elementi chimici in particolare ossigeno.

Un altro fenomeno nuovo osservato da Ulisse è il comportamento delle **emissioni di massa coronale**, bolle di gas incandescente che si espandono allontanandosi da Sole.

Quelle equatoriali, già note, viaggiavano più veloci del vento solare formando un'onda d'urto al suo interno, mentre quelle polari hanno un'onda d'urto sferica in tutte le direzioni.

Anche le misure del campo magnetico polare, molto inteso, riservarono delle sorprese.

Nel 1995 venne sorvolato il polo Nord, registrando una attività magnetica inferiore.

Dato il suo successo la missione Ulisse venne estesa nel 2000 fino al 2008: fu un record di longevità.

Il Sole e la Terra

La Terra è costantemente inondata dal vento solare, particelle elettricamente cariche e potenzialmente pericolose per la vita sul nostro pianeta, che vengono schermate dalla *magnetosfera* terrestre, cioè dal campo magnetico generato dal nucleo della Terra, che si estende per migliaia di Km rendendo possibile la vita.

La radiazione proveniente dal Sole è uno dei principali problemi da affrontare nei viaggi umani nello spazio.

Il campo magnetico terrestre ha una simmetria cilindrica non sferica, per cui le linee di forza fuoriescono da un polo ed entrano nell'altro, con un effetto simile a quello aerodinamico di un corpo che si muove in un fluido.

Per studiare questo fenomeno di particelle cariche provenienti dal Sole, l'ESA, la NASA e l'ISAS (l'istituto giapponese di scienze spaziali) crearono negli anni '80 il programma **ISTP**, *Iniziativa Internazionale di fisica solare-terrestre*, che prevedeva una sonda permanente nel **punto di Lagrange 1** (punto di equilibrio sulla direttrice Sole-Terra dove la gravità terrestre equivale a quella solare).

La missione *Cluster* consisteva di 4 satelliti da lanciare in orbita ellittica intorno alla Terra per misurare le strutture della *magnetosfera* in 3 dimensioni: il lancio era previsto per il 1995.

Per avere un'idea delle difficoltà tecniche che sorgono in questo tipo di missioni e i problemi che ingegneri e tecnici devono affrontare, basti citare la missione *Eureca* del 1992, dove improvvisamente le celle solari preposte per la ricarica delle batterie non funzionavano più.

Gli esperti dell'industria che le aveva costruite diedero questa spiegazione: il punto di raccordo delle connessioni di una stringa di celle era coperto da una protezione di plastica che si era incrinata a causa delle deformazioni meccaniche causate dalla grande escursione termica cui i pannelli solari erano sottoposti, le connessioni sarebbero state esposte all'ossigeno atomico presente negli strati superiori dell'atmosfera, e l'ossigeno avrebbe corroso la connessione elettrica.

La soluzione proposta per evitare la perdita di corrente fu di adattare il consumo di elettricità dei sistemi di bordo al periodo di ricarica, ossia fare ricaricare le batterie durante l'esposizione dei pannelli solari che avveniva ogni 40 minuti: ad esempio chiudendo uno dei due radiatori per il raffreddamento, la temperatura del veicolo aumentava permettendo di tenere spenti i riscaldatori elettrici.

Insomma, era un continuo adattarsi alla graduale perdita di potenza elettrica.

La missione Cluster

L'idea della missione *Cluster* era quella di mandare 4 satelliti in orbita molto eccentrica attorno alla Terra in modo da poter attraversare la *magnetosfera* in tutte le zone più interessanti, cioè, sia nella parte frontale che nella coda.

Con i **4 satelliti disposti a tetraedro** si potevano fare misure simultanee tridimensionali.

I satelliti erano semplici, di forma cilindrica, **alti 1,5 m** con un **diametro di circa 2 m** e una frequenza di rotazione di **15 giri al minuto**.

Per modificare l'orientamento dell'asse di rotazione si inviavano manualmente comandi da terra, mentre l'elettronica di bordo si occupava di azionare il propulsore assiale per brevi impulsi nel punto della rotazione.

Le oscillazioni spurie venivano ammortizzate da sistemi chiamati *ammortizzatori passivi di nutazione*: tubi ricurvi pieni di liquido viscoso, che assorbiva l'energia delle oscillazioni trasformandola in calore.

Il sistema della telemetria era ancora a formato fisso, ossia tutti i dati trasmessi avevano una loro posizione fissa, i cosiddetti *frame*, indipendentemente dal fatto che ci fosse bisogno di trasmetterli o meno.

Nella missione *Eureca* c'era invece il sistema dei pacchetti: ogni sistema di bordo che voleva mandare informazioni creava un *pacchetto* di dati che veniva inserito nel flusso di telemetria appena ci fosse stato posto libero.

Per ovviare alla rigidità della telemetria la missione *Cluster* montava i *modi TDA* che costringevano a cambiare il comando da terra a seconda delle necessità di osservazione: un sistema di telemetria decisamente primitivo.

Dopo tutti i controlli e le simulazioni degli strumenti di bordo, compresa la *Mission Timeline*, il sistema di bordo di registrazione ed esecuzione a tempo dei telecomandi, venne fatto il lancio di prova del razzo **Ariane 5**: dopo 37 secondi il razzo si inclinò ed esplose.

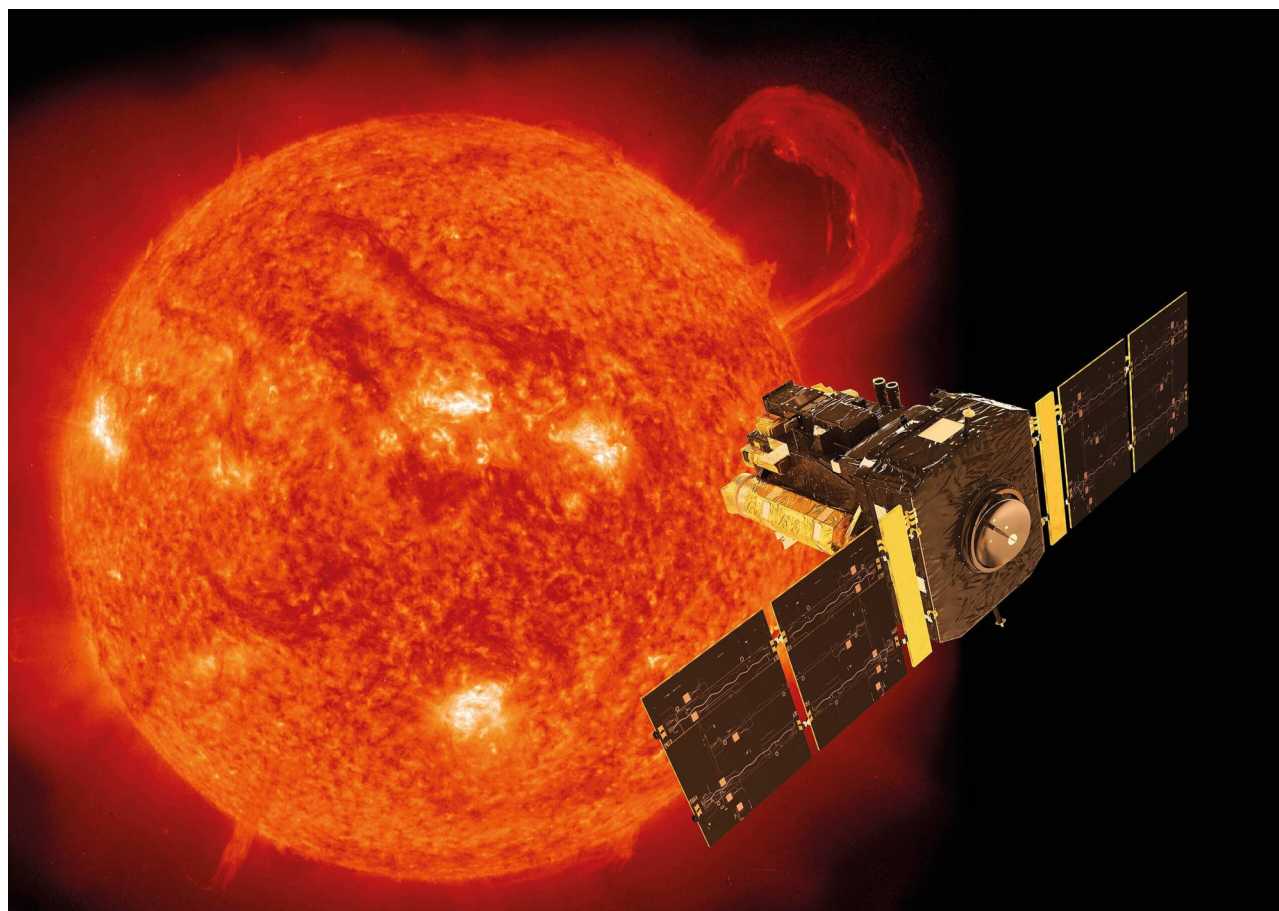
Il guasto era dovuto ad una funzione del software di bordo ereditata da **Ariane 4**, una funzione che non era stata rimossa e che usava una variabile che era la velocità orizzontale del razzo: il software andò in saturazione e il sistema di riferimento inerziale non era protetto dalla eventuale saturazione di questa variabile, per cui il sistema interpretò come corretto il valore saturato, tale correzione improvvisa degli ugelli dei motori causò una variazione dell'angolo di inclinazione del razzo di 20 gradi, provocandone la distruzione.

La missione Soho

Anche la missione *Soho* ebbe i suoi problemi tecnici.

Dopo il lancio regolare nel 1995, nel giugno del 1998 venne perso il contatto radio con la sonda.

La causa primaria era stata una configurazione sbagliata di un parametro del sistema dei controllori di assetto durante l'operazione di *scarico delle ruote di reazione*: è questa una procedura che elimina il momento angolare accumulato dalle ruote che controllano l'assetto del satellite.



Missione Soho

Questo aveva fatto scattare il primo EPR, cioè la reazione automatica del sistema di bordo.

Il velivolo si era trovato senza giroscopi per cui era entrato in una rotazione sempre più veloce su sé stesso che i propulsori di bordo non riuscivano a fermare.

Soho non poteva tenere l'antenna delle comunicazioni puntata verso la Terra, né i pannelli solari orientati verso il Sole, da cui la perdita di contatto radio e di capacità di riscaldamento termico con i riscaldatori elettrici.

Il velivolo si accendeva solo per poco tempo, quello in cui i pannelli solari erano esposti al Sole.

Nel frattempo, la temperatura era scesa al punto di congelare l'**idrazina**, il propellente per i propulsori necessari alla stabilizzazione del satellite.

Venne quindi centellinata tutta l'energia elettrica disponibile a bordo verso i riscaldatori elettrici per poter liquefare l'idrazina.

Infine, il satellite venne stabilizzato, ma si erano guastati 2 dei 3 giroscopi di bordo: senza giroscopi l'assetto poteva essere controllato con i sensori solari e i propulsori, ma in questo modo si consumava troppa idrazina.

Da ultimo, venne spedito sul satellite un software che faceva funzionare le modalità di controllo senza giroscopi.

Il vantaggio di avere *Soho* nel punto Lagrange 1 era di tenere gli strumenti scientifici costantemente puntati sul Sole e l'antenna fissa verso Terra per trasmettere i dati.

Vennero così misurati il plasma, le parcelle e i campi elettrici e magnetici, le tempeste solari, e scoperti fenomeni sconosciuti come le *onde della fotosfera* correlate alle emissioni di massa coronale.

Verso il Sole: Venus Express

La missione *Venus Express* era nata dall'idea di fare un passo ulteriore verso il riutilizzo del lavoro di sviluppo fatto precedentemente per la missione *Rosetta*: i costi erano ovviamente ridotti e il lancio era previsto per il 2005.

Si trattava di costruire una sonda gemella di *Mars Express*, limitandone le modifiche per l'adattamento all'ambiente venusiano.

Venere orbita attorno al Sole ad una distanza media che è la metà di quella di Marte.

La differenza è che andando verso Marte ci si allontana dal Sole, mentre verso Venere ci si avvicina fino ad una distanza di **110 milioni di Km**, con un flusso di radiazioni e di calore che è 4 volte superiore a quello di *Mars Express*.

La missione prevedeva la permanenza per anni in orbita venusiana ed era la prima volta che l'ESA inviava un veicolo spaziale su orbite solari interne a quella terrestre (o meglio l'unico caso era stato quello della sonda *Giotto* verso la cometa di *Halley* nel 1986, ma era un veicolo stabilizzato per rotazione, di 15 giri al minuto, per attenuare i problemi termici), mentre *Venus Express* sarebbe stato un **veicolo stabilizzato sui tre assi**, in cui la direzione di illuminazione solare sarebbe stata fissa e questo comportava tutta una serie di complessi cambiamenti tecnici.

Le modifiche al velivolo si concentrarono sul sistema termico, che necessitava di radiatori più grandi ed efficienti (rispetto a *Mars Express*) per aumentare la capacità di dissipare calore e di una copertura isolante dell'intera sonda altamente riflettente, composta da **23 strati diversi di isolante**.

Inoltre, avvicinarsi a Venere comportava la conoscenza delle condizioni del pianeta: Venere ha dimensioni simili alla Terra, una atmosfera molto densa coperta da uno spesso strato di nubi che impediscono la visione della superficie.

Il pianeta ruota lentamente in **243 giorni terrestri**, in modo **retrogrado** rispetto agli altri pianeti, con un periodo di rivoluzione intorno al Sole di **227 giorni**, per cui combinando rotazione e rivoluzione il giorno di Venere dura **116 giorni terrestri**.

L'atmosfera è composta per il **96%** di **anidride carbonica**, ed ha una **pressione** 100 volte maggiore quella terrestre (**92 bar**), pari alla pressione dell'oceano ad 1 km di profondità, la **temperatura** alla superficie è di **470 C°**.

Il lancio di *Venus Express* era previsto con un razzo Soyuz dalla base di **Baikonur** in Kazakhstan.

Il lancio venne momentaneamente ritardato (con eventuale perdita della finestra di lancio di 18 mesi), a causa di alcuni detriti trovati sulla copertura termica dell'ultimo stadio del Soyuz (il Fregat) scoperti durante il tragitto verso la rampa di lancio.

Con l'aiuto dei tecnici russi, notoriamente esperti e pragmatici, i controlli sarebbero stati veloci.

Così fu, ma a meno di 6 ore dal lancio ci fu una improvvisa interruzione di corrente, la sonda passò all'alimentazione a batterie mentre tutti i sistemi di controllo si spensero.

Ristabilita l'alimentazione, si dovettero ripetere tutte le operazioni di configurazione della sonda.

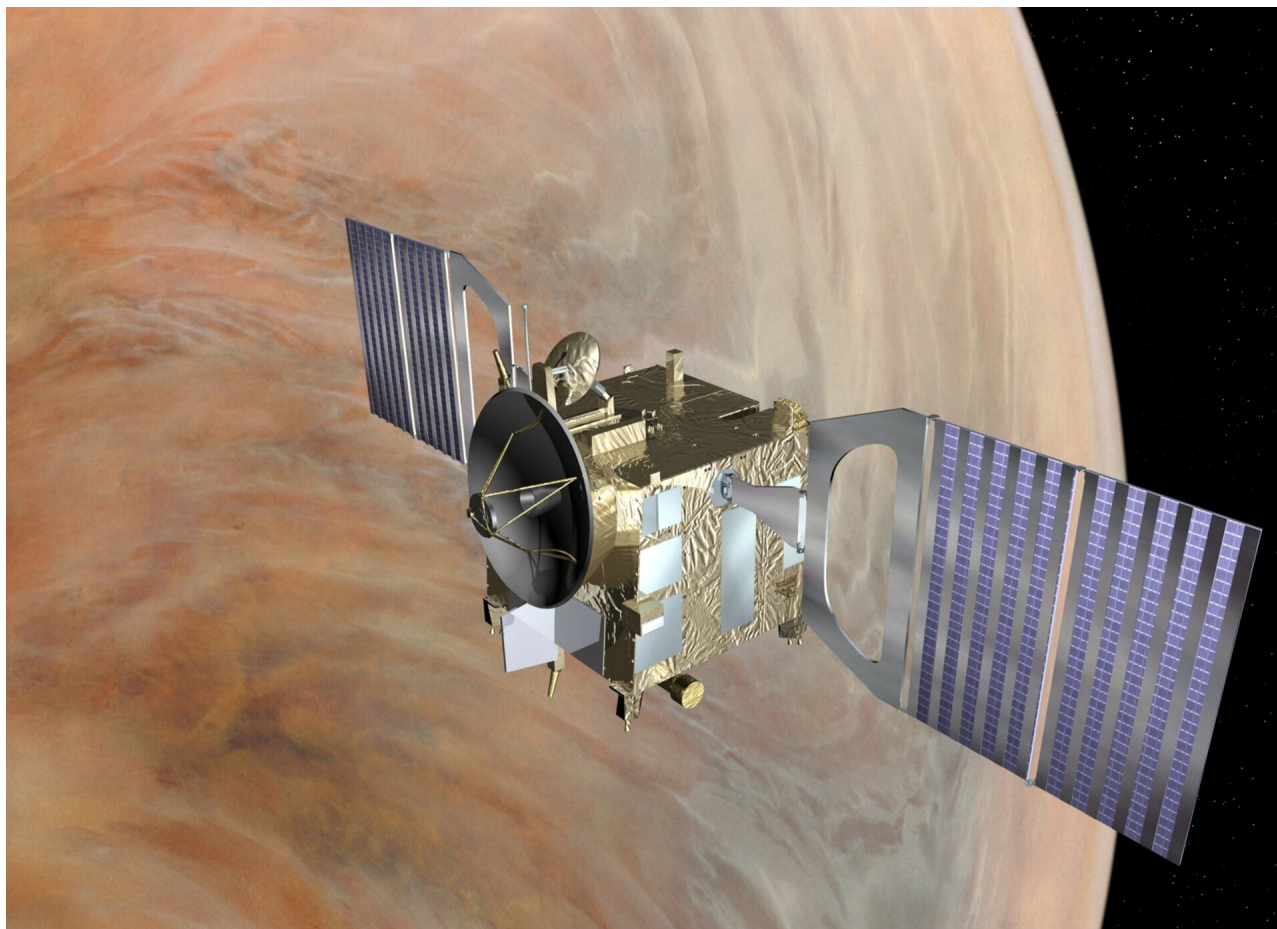
Il lancio alla fine avvenne come previsto.

Arrivata in prossimità del pianeta si poneva il problema dell'entrata in orbita, un'operazione sempre delicata piena di insidie: il segnale radio per le comunicazioni impiegava quasi 7 minuti per arrivare e altrettanti per tornare.

Quando una sonda arriva nei pressi di un pianeta, la traiettoria passa dietro il pianeta rispetto alla Terra, questa condizione si chiama in gergo **occultazione**, e provoca la perdita del segnale radio proprio durante il periodo critico di frenata.

All'annuncio del segnale di ritorno dopo l'occultazione nella sala di controllo a terra ci fu un'ovazione con conseguenti abbracci e strette di mano, *Venus Express* era stata inserita in un'orbita molto eccentrica con un periodo di 9 giorni, vennero poi eseguite diverse manovre di aggiustamento con i propulsori per aggiustare l'altezza del *pericentro* (distanza minima) e abbassare l'*apocentro* (distanza massima), prima di raggiungere l'orbita voluta.

Nei primi mesi in orbita intorno a Venere il Sole provocò due inconvenienti: l'esposizione prolungata al Sole (durante le manovre iniziali) della fotocamera VMC ne aveva danneggiato in maniera permanente le microlenti causandone l'ingiallimento con conseguenti immagini alterate: fu un errore di sottovalutazione in sede di progettazione dello strumento.



Missione Venus Express

Il problema principale sarebbe sorto durante i periodi di quadratura, cioè quando Sole e Terra formavano un angolo di 90° rispetto alla sonda: venne sviluppato una sorta di trucco per inclinare la sonda durante la quadratura, in modo che il Sole non si avvicinasse entro un cono di 10° dell'asse di puntamento della VMC.

Modificando artificialmente le posizioni della Terra e del Sole si “ingannava” il software della sonda deputato al controllo del puntamento automatico.

A metà ottobre del 2006 ci fu la prima congiunzione con il Sole: di solito quando una sonda vola nel sistema solare rimane su un'orbita eliocentrica sul piano dell'eclittica, per questo prima o poi la sonda si troverà allineata con la Terra e il Sole.

In questo periodo è difficile mantenere le comunicazioni tra sonda e Terra perché il Sole si mette in mezzo.

Quando una sonda si trova ad una distanza angolare dal Sole minore di 5° le comunicazioni iniziano a venire meno.

La congiunzione con il Sole può essere *superiore* se il Sole sta tra sonda e Terra, e *inferiore* quando la sonda sta tra Terra e Sole.

Inoltre, la radiazione solare aveva illuminato per lunghi periodi l'antenna ad alto guadagno, la cui forma a paraboloide aveva concentrato la radiazione verso il punto focale, dove si trovano i coni di trasmissione e ricezione dei segnali radio.

Il calore generato nel punto focale aveva deformato la struttura a cono della banda S, creando una perdita di potenza radio quando questa banda veniva usata.

La missione BepiColombo verso Mercurio

Con la missione venusiana abbiamo imparato quanto forte potesse essere la strapotenza della radiazione solare alla distanza dell'orbita di Venere.

Ma l'ESA stava progettando una missione verso **Mercurio** che orbita ad una distanza dal Sole tra **46 e 70 milioni di Km**, ha un periodo di rivoluzione di **circa 88 giorni** e la sua rotazione avviene in **circa 59 giorni**, esattamente 2/3 del periodo di rivoluzione, e questo è dovuto alle forze di marea del Sole esercitate sulla sua orbita eccentrica.

Il giorno su Mercurio dura **176 giorni terrestri**.

Mercurio è in po' più grande della Luna, non ha atmosfera, la temperatura alla superficie è di **430 C°** al perielio, di notte scende a **-180C°**.

Il suo campo magnetico è debole.

La missione verso Mercurio era un balzo spaventoso verso il Sole, la distanza si riduceva della metà e quindi la radiazione solare quadruplicava.

È il pianeta più vicino al Sole, la sua orbita è molto eccentrica e la percorre in soli 3 mesi.

La missione **BepiColombo** (in onore del fisico, matematico e ingegnere Giuseppe Colombo, 1920-1984) fu progettata all'inizio degli anni 2000 e lanciata nell'ottobre 2018: unico precedente il *Mariner 10* della NASA.

La missione consiste di due sonde, una europea in orbita bassa, tra 400 e 1500 Km dal pianeta e una giapponese inserita all'interno.

Le due sonde viaggiano spinte da un terzo modulo, un sistema di propulsione basato su 4 motori a ioni, la cosiddetta *propulsione solare-elettrica*, una nuova tecnologia che garantisce un rapporto tra spinta e propellente molto più elevato rispetto alla propulsione chimica tradizionale.

È basata su un principio semplice: un gas nobile (Xeno nel caso di **BepiColombo**) viene ionizzato e poi accelerato con un forte campo elettrico, una volta uscito dal velivolo il gas ionizzato viene neutralizzato restituendogli gli elettroni sottratti: la spinta è molto debole (pari al peso di 3 monete da 1 euro), ma la sua efficienza in termini di consumo molto elevata, **10 volte la propulsione chimica**.

In fase di progettazione la massa della sonda venne sottostimata.

Crescevano soprattutto le dimensioni del grande radiatore che doveva dissipare il calore enorme che si accumulava nella sonda per via della estrema vicinanza al Sole e della radiazione riflessa da Mercurio.

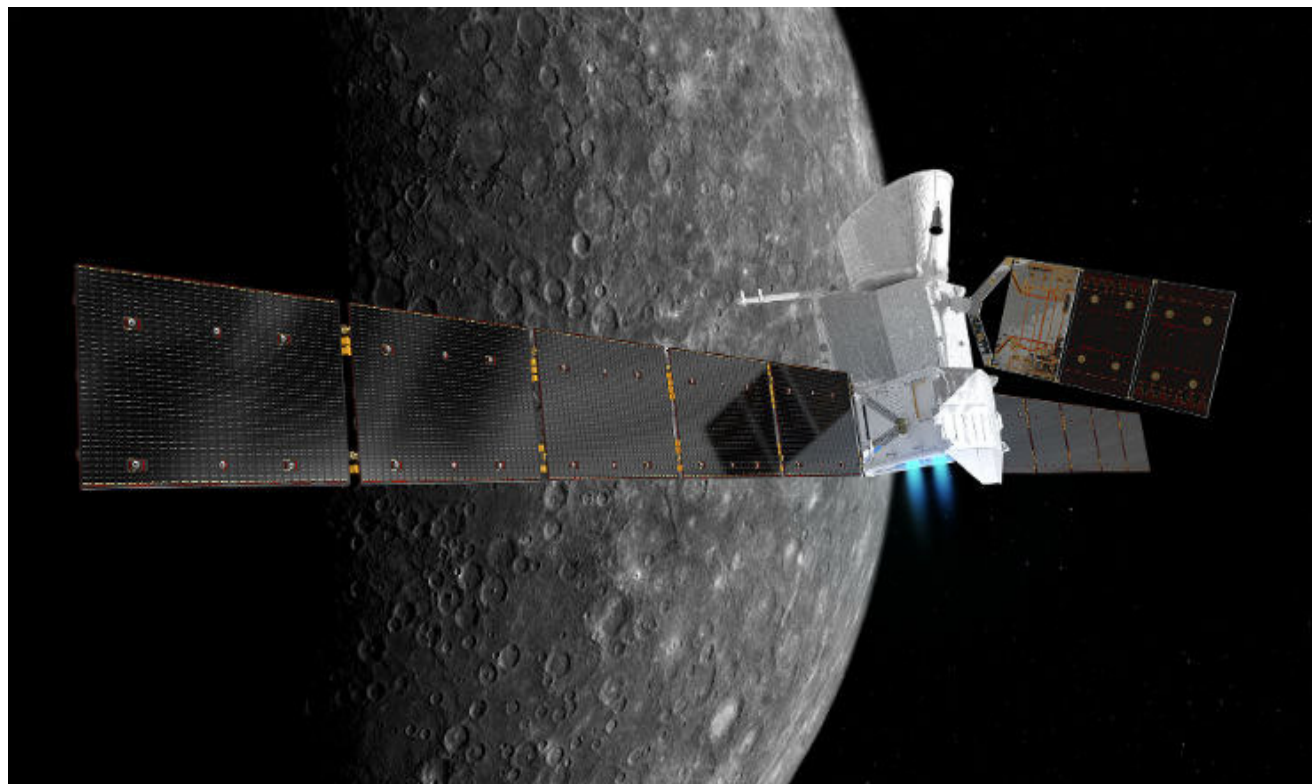
L'ESA dovette accettare di passare ad un razzo più potente, dal Soyuz all'Arianne 5, con evidente aumento di costi.

Le difficoltà tecnologiche furono subito evidenti: i **pannelli solari** dovevano sopportare **temperature di centinaia di gradi**, lo stesso valeva per l'antenna ad alto guadagno per le comunicazioni con la Terra.

Poi c'era il nuovo motore T6 a propulsione solare-elettrica che doveva essere sottoposto a test di lunga durata.

Infine, persino l'isolamento termico era diventato un problema.

Per resistere alle forti temperature era composto di tre strati separati da piccole intercapedini, con materiali innovativi fatti per resistere a 450 C°.



Missione BepiColombo verso Mercurio

Inoltre, essendo l'orbita di Mercurio molto eccentrica il **flusso termico** del Sole era molto variabile: da $6,3 \text{ kW/m}^2$ all'afelio a $14,5 \text{ kW/m}^2$ al perielio.

La missione è ancora in viaggio verso Mercurio e dal punto di vista delle operazioni di volo resta una delle più difficili, **un solo piccolo errore di pochi gradi è sufficiente per compromettere tutto.**

Navigando nell'eliosfera

La missione **Cluster** lanciata nel 2000 iniziò ad avere dei problemi nel 2005 legati al **degrado delle batterie** che erano **all'argento-cadmio**, una tecnologia derivata da quelle di nickel-cadmio che si usavano all'inizio dell'era spaziale.

Nel 2006 analizzando i guasti improvvisi delle batterie di *Cluster 1* e *Cluster 3* si vide che il satellite aveva subito un cambiamento di velocità.

Le batterie invecchiando producevano gas durante la carica facendo aumentare la pressione interna del contenitore della batteria fino a che il contenitore di incrinava; il gas sfuggiva verso lo spazio esterno procurando al satellite, per reazione, una vera e propria spinta rivelata misurando un piccolo cambiamento della velocità orbitale.

La batteria andava isolata e non più usata, riducendo la capacità del satellite di immagazzinare energia elettrica.

Il team di **Cluster** aveva definito delle modalità di operazione durante le eclissi per risparmiare energia elettrica: si andava dalla configurazione a consumo ridotto di potenza elettrica fino a quella estrema di *solo decodificatore*: il satellite veniva quasi completamente spento prima dell'eclissi, lasciando accesi solo il ricevitore, il computer di bordo e il decodificatore, che serviva per riconoscere i comandi che dopo l'eclissi venivano inviati da terra alla cieca per riaccendere e riconfigurare il veicolo.

Il vantaggio dei **Cluster** stava nel fatto che erano stabilizzati per rotazione; quindi, non necessitavano di un controllo di assetto attivo.

Immediatamente dopo l'eclissi andavano riconfigurati nel loro stato normale per minimizzare la perdita di tempo per le misure scientifiche.

Il team aveva anche inventato ingegnosi sistemi per evitare di sottoporre il satellite a troppi stress.

Una buona parte dell'energia elettrica veniva immagazzinata in batterie di riserva durante l'eclissi, per alimentare vari riscaldatori elettrici avevano il compito di mantenere stabile la temperatura del satellite e della strumentazione.

In assenza di flusso di calore e radiazione proveniente dal Sole, il veicolo spaziale si raffreddava rapidamente facendo precipitare la temperatura di diverse decine di gradi. Nell'orbita al di fuori dell'eclissi i pannelli solari immagazzinavano energia in eccesso che veniva irraggiata nello spazio attraverso apposite resistenze elettriche che si scaldavano con la corrente in eccesso: così il team ebbe l'idea di usare, nella fase illuminata di ogni orbita, l'energia elettrica in eccesso per azionare i riscaldatori dei serbatoi di propellente.

Questi avevano, grazie al liquido propellente, una discreta capacità termica, cioè immagazzinavano energia termica aumentando lentamente la temperatura.

Al momento dell'eclissi i riscaldatori venivano spenti, il calore accumulato nei serbatoi si diffondeva per conduzione e irraggiamento nel resto del veicolo rallentando il raffreddamento dovuto all'assenza di luce solare.

Ovviamente questo graduale scemare e riapparire dell'alimentazione elettrica poteva danneggiare le delicate apparecchiature di bordo che non erano state testate in queste condizioni: l'incognita era se il decodificatore di comandi non si fosse riacceso correttamente non si poteva più comandare il satellite da terra.

La fine del viaggio di Ulysses

La missione **Ulysses** si avvicinava al termine completando il terzo sorvolo del polo nord del Sole nel marzo 2008.

La sopravvivenza della sonda, che il team dell'ESA puntava ad allungare, dipendeva anche dall'energia elettrica che alimentava i sistemi elettronici di bordo: i computer, gli strumenti scientifici, il rice-trasmittitore radio, i propulsori che controllavano l'assetto, i riscaldatori elettrici e soprattutto il propellente, l'**idrazina liquida**.

Il generatore termoelettrico a radioisotopi, che pure aveva avuto una vita più che tripla rispetto alla missione originale, aveva perso potenza da 285 W iniziali (1990) agli attuali 200 W: per questo il velivolo era equipaggiato con un riscaldatore aggiuntivo da **25 W**, chiamato CCH (*Cold Case Heater*).

Erano state adottate misure speciali per mantenere la temperatura della sonda a livelli accettabili: quando si accendeva il riscaldatore aggiuntivo da 25 W, alcuni strumenti scientifici venivano completamente spenti.

Il problema principale era mantenere i condotti di idrazina sopra la **temperatura di congelamento** che era di **1,4 C°**.

La lotta contro il gelo nello spazio

Per risolvere questo problema l'idea fu di spegnere l'amplificatore del segnale radio ad alta frequenza trasmesso dalla sonda ed usare l'energia elettrica risparmiata (circa 60 W) per accendere il riscaldatore aggiuntivo, il CCH.

Questo avrebbe mantenuto in media la temperatura per evitare il congelamento dell'idrazina per almeno un anno, a quella data la distanza dal Sole sarebbe stata tale da abbassare ulteriormente la temperatura per cui il trucco dell'alternanza amplificatore-riscaldatore non sarebbe bastato.

La lista dei tentativi proposti era breve e indicativa del livello di disperazione:

- spegnimento del trasmettitore in banda S (corta) fuori dai contatti con le stazioni di Terra al fine di usare la potenza elettrica per i riscaldatori;
- muovere avanti e indietro il registratore a nastro sperando che l'attrito meccanico dissipasse un po' di calore nel veicolo spaziale;
- manovre di assetto per esporre il **radiatore del TWTA** (amplificatore del segnale radio ad alta frequenza) alla luce del Sole,
- azionare frequentemente i propulsori con brevi impulsi per smuovere l'idrazina nei condotti e ritardarne il più possibile il congelamento.

Il team aveva identificato varie possibili cause, ma la più probabile rimaneva un guasto definitivo all'elettronica dell'alimentazione del TWTA.

Se non si fosse recuperata la **banda X** le conseguenze sulla missione sarebbero state catastrofiche.

Ad agosto 2008, ben oltre ogni rosea previsione, la sonda era ancora funzionante e l'idrazina non si era congelata: i tecnici fecero due tentativi di riaccendere il TWTA ma senza successo.

L'idrazina, contro ogni modello e previsione del comportamento termico, non si congelava nonostante la crescente distanza dal Sole.

Nei primi mesi del 2009 l'idrazina era ancora allo stato liquido, ma in esaurimento: tuttavia la ridotta distanza dal Sole permetteva ora di scaricare dati del registratore di bordo durante i periodi di contatto con la Terra.

Il 30 giugno 2009 venne deciso lo spegnimento di Ulisse che aveva raggiunto ormai tutti i suoi obiettivi: la missione aveva avuto un incredibile successo, unica al mondo, aveva studiato il Sole e l'eliosfera da una prospettiva nuova, mai vista prima dall'umanità e che tutt'oggi rimane unica nella storia delle esplorazioni spaziali.

I satelliti Cluster

Mentre Ulisse smetteva di funzionare i **4 satelliti Cluster** inviavano una mole enorme di dati sulla struttura tridimensionale della magnetosfera terrestre e sui cambiamenti continui spesso inattesi di tale struttura in risposta alle sollecitazioni del vento solare, alle diverse posizioni della Terra rispetto al Sole e ai processi dinamici al suo interno.

Tutto questo mentre ormai le batterie di bordo si stavano guastando una dopo l'altra.

Nel marzo 2009 si verificò un altro evento di rottura dell'involucro di una batteria di *Cluster 1*, solo che questa volta, oltre alla solita **fuoriuscita di gas** che modificava la velocità del satellite, ci fu anche una **fuoriuscita di liquido** che andò a danneggiare in modo permanente un connettore dell'unità elettronica che raccoglieva le misure di telemetria del satellite da inviare poi a Terra.

Il team adattò la configurazione del satellite e le procedure di Terra alla nuova situazione di guasto continuando le normali operazioni.



I satelliti Cluster

Cluster 1 riceveva ed eseguiva alcuni tipi di comandi, quelli relativi all'elettronica di base (in particolare il segnale di *ranging* che permette di calcolare la distanza del satellite), ma non quelli di alto livello detti *comandi a blocchi* per cui il problema era nel computer principale.

La squadra iniziò a sospettare che un certo registro nel computer di bordo (che indicava lo stato di *undervoltage*, cioè la mancanza di potenza elettrica) si fosse bloccato diventando la causa delle continue ripartenze del computer: vennero eseguiti dei test inediti e altamente rischiosi che non erano nel manuale del satellite.

Il computer ripartì inviando la telemetria nel tripudio generale del team.

Lo spegnimento e la riaccensione lenti del computer in concomitanza con le eclissi, avevano lasciato il registro di *undervoltage* bloccato in uno stato che impediva l'uso dei *comandi a blocchi* essenziali per la maggior parte delle funzioni di bordo.

Fu un'impresa straordinaria.

Dopo questa esperienza nel 2014 i manager dell'ESA proposero di smettere di usare le batterie per l'eclissi successiva e da allora i satelliti *Cluster* volano senza usare le batterie di bordo.

Fare operazioni di volo è un vero lavoro di ingegneria di sistema, dove si deve capire il funzionamento dei complessi sistemi dei veicoli e, nel caso di anomalie, **adottare soluzioni creative impensabili per il progettista originale.**

Il team dell'ESOC rispondeva alle sfide con soluzioni innovative che non solo risolvevano i problemi, ma aumentavano l'efficienza della missione.

Una missione di straordinario valore scientifico, che ha dimostrato **l'incredibile capacità e flessibilità dell'ingegno umano**, e anche quanto una missione spaziale sia dura a morire.

La fine di Venus Express

La missione *Venus Express* nel 2014 era in orbita da 8 anni, 6 in più del programmato, e stava per esaurire il propellente: una sua caratteristica era che la sua orbita tendeva ad abbassare il *pericentro* (la distanza più vicina al pianeta) di continuo per cui ogni tre mesi circa bisognava usare i propulsori per riportare il satellite a distanza di sicurezza dall'atmosfera venusiana.

In questo modo il *pericentro* oscillava tra i **250 km** e i **400 Km** di altitudine dalla superficie.

Le altre missioni, come ad esempio *Mars Express* restano su un'orbita molto stabile, mentre nel caso di **Venus Express** le manovre orbitali consumavano parecchio propellente che si sarebbe potuto esaurire proprio in una di queste manovre.

In assenza di gravità è difficile calcolare quanto propellente resta nel serbatoio perché il liquido non resta sul fondo, ma si muove in tutto il volume disponibile.

Si decise così di anticipare l'esaurimento del carburante organizzando la fine della missione, tentando di atterrare su Venere e raccogliere così dati utili.

L'idea era quella di usare la tecnica di *aerobraking*, cioè l'utilizzo dell'atmosfera per perdere energia in maniera controllata e modificare così l'altezza e il periodo dell'orbita senza consumare carburante.

Con questa tecnica ogni volta che si passa per il *pericentro* la sonda perde energia a causa dell'attrito con l'atmosfera del pianeta: in questo modo l'*apocentro* si abbassa, il periodo si accorcia, arrivando dopo diversi passaggi all'orbita bassa voluta.

La difficoltà di questa tecnica è nel controllo di precisione dell'altezza del *pericentro*, se si passa troppo in alto nell'atmosfera l'effetto di attrito scompare.

Lo svantaggio principale è che dura molto tempo, per cui bisogna controllare il *pericentro* in modo che la sonda incontri l'atmosfera a bassa densità per avere attrito di frenamento, ma nello stesso tempo evitare il surriscaldamento.

Per questo servono molti passaggi orbitali.

La squadra dell'ESOC propose di abbandonare la sonda nella sua discesa lenta nell'atmosfera di Venere prima che esaurisse il carburante a novembre, questo avrebbe consentito di seguire la sonda fino all'ultimo momento della sua distruzione sul suolo del pianeta.

Il direttore dell'ESA invece volle continuare la missione, la sonda smise di inviare un debole segnale nella banda X il 15 dicembre prima che atterrasse su Venere, così commentò il direttore:

“Era stata una lotta fino all'ultimo flebile segnale, senza lieto fine, ma l'abbiamo combattuta anche se sapevamo fin dall'inizio che sarebbe finita così.

Fu un momento di grande emozione per tutti.

*Ancora una volta mi rendevo conto che il nostro lavoro richiede, esperienza, professionalità, competenze ingegneristiche uniche, persino genialità, ma i risultati straordinari del team dell'ESOC sono possibili solo grazie alla **profonda passione** che muove ciascuno di noi”.*

Il Sole da vicino

Con la missione *Venus Express* dell'ESA abbiamo mandato per la prima volta una sonda vicino al Sole a soli **110 m di Km** che poi è il raggio dell'orbita di Venere.

Poi con la missione **BepiColombo** nell'ottobre 2018 siamo andati alla volta di **Mercurio** che orbita intorno al Sole ad una **distanza media che è 1/3** di quella della Terra.

All'inizio del 2020 veniva lanciata la prima sonda per lo studio ravvicinato del Sole, la *Solar Orbiter* sarebbe passata all'interno dell'orbita di Mercurio alla distanza di poche decine di milioni di Km.

Venne lanciata una collaborazione con la NASA: gli americani mettevano il razzo lanciatore (un Atlas V411), e gli europei fornivano la sonda.

La NASA avrebbe garantito la cooperazione con la loro missione solare *Parker Solar Probe* il cui scopo era effettuare lanci veloci e vicinissimi al Sole in modo da poter misurare il plasma e il campo magnetico della nostra stella.

La missione **BepiColombo** presentava difficoltà aggiuntive in ragione del fatto che era costretta ad esporre diversi lati sia al Sole che alla radiazione riflessa da Mercurio anch'essa spaventosamente potente soprattutto nell'infrarosso.

La sfida di Solar Orbiter

L'elemento chiave di *Solar Orbiter* è lo **scudo termico**: una specie di muro a vari strati dietro la quale è montato il resto del velivolo spaziale.

Lo scudo termico va puntato costantemente verso il Sole per garantire che i delicati strumenti e sistemi elettronici restino schermati ad una temperatura adatta al loro funzionamento.

Lo scudo deve essere costruito per dissipare l'enorme energia che riceve dal Sole, specialmente quando passa al perielio **scendendo fino a soli 42 milioni di Km** dalla stella. Inoltre, è stato calcolato che lo scudo raggiungerà temperature oltre i **500 gradi** e dovrà dissipare oltre il 90% del calore ricevuto.

Sono state inserite nello scudo alcune "finestre" per consentire agli strumenti di poter "vedere" il Sole ed essere protetti.

I pannelli solari dello scudo non sono orientati perpendicolarmente alla stella, ma restano molto inclinati in modo da ricevere la luce e il calore solare solo di striscio.



Parker Solar Orbiter

Il sistema di puntamento è estremamente delicato: un minimo errore di puntamento, di pochi gradi, può esporre alla luce solare diretta parti sensibili della sonda (come il braccio esteso che porta alcuni strumenti scientifici).

L'intera missione può essere messa in pericolo da piccoli errori di calcolo.

Ciò che rende speciale la missione è la **forma della sua orbita**: questa ha un periodo di circa 5,5 mesi con un perielio più o meno all'altezza dell'orbita di Mercurio.

Le fasi di manovra vicino al *perielio* e quella alle massime longitudini solari, sono le più difficili, quando la sonda deve puntare regioni specifiche del Sole.

Il futuro

Nonostante i progressi fatti dalle missioni spaziali lo studio del Sole è appena cominciato.

Siamo in grado di osservare e misurare i fenomeni ad esso legati sulla sua superficie, nella corona, il vento solare e la sua interazione con i campi magnetici dei pianeti.

Ma **non abbiamo ancora capito cosa regoli questi fenomeni**: osserviamo i cicli solari, quelli di 11 anni in cui varia la **frequenza delle macchie** e quello di 22 anni in cui **si inverte la polarità del campo magnetico**, ma non sappiamo cosa determina questi cicli.

A cosa serve saperne di più sul Sole?

Intanto, come tutte le stelle ha una vita limitata, la sua attività non è regolare, ma varia periodicamente con delle scale astronomiche che non sono ancora state misurate.

Sappiamo inoltre che la Terra ha vissuto in passato **grandi variazioni climatiche** che potrebbero essere correlate alle variazioni dell'attività solare; quindi, **capire il Sole vuol dire capire anche la Terra**.

Poi ci sono i fenomeni legati al vento solare e alla sua interazione con il nostro pianeta.

La magnetosfera terrestre ci protegge dal vento solare, ma molto meno ai poli, questo potrebbe provocare un rapido aumento del flusso di particelle verso l'alta atmosfera causando disturbi alle telecomunicazioni o anche alla rete di distribuzione elettrica; il bombardamento di tali particelle è dannoso per la salute umana, per i voli intercontinentali (specie quelli sulle rotte polari).

L'ESA sta studiando una missione chiamata *Vigil* che consiste in un satellite di monitoraggio delle tempeste solari; tale satellite verrebbe piazzato in uno dei **punti di equilibrio di Lagrange**, mai usato prima detto **L5**.

Tale punto si trova su un vertice del triangolo equilatero costituito dalla Terra e dal Sole: attualmente i sistemi di allerta delle tempeste solari sono posti nel punto **L1** a **15 milioni di Km dalla Terra**, ma danno un preavviso di sole 2 ore, mentre dal punto **L5** il preavviso sarebbe di alcuni giorni.

Sono molte le missioni in programma per lo studio del Sole: estremamente innovativa e interessante sarà quella tra l'**ESA** e la **Cina** partita alla fine del 2024, che userà un satellite posto in orbita molto eccentrica che misurerà non solo i plasmi e il campo magnetico solare, ma scatterà anche foto in ultravioletto e raggi X per visualizzare le interazioni tra vento solare e magnetosfera.

Inoltre, la Cina ha recentemente annunciato di voler inviare due sonde ai confini dell'eliosfera.

L'era spaziale ha aperto un nuovo libro della conoscenza del Sole, del quale abbiamo appena visto la copertina e sbirciato qualche pagina.

