

COMPLEMENTARITÀ DELLE RADIOONDE E DELLE ONDE LUMINOSE

Come abbiamo detto fin dall'inizio di questo capitolo, l'unica differenza fra onde luminose e onde radio consiste nella lunghezza d'onda: le seconde sono da 10 000 a 40 milioni di volte più lunghe. Tale diversità ha tre importanti conseguenze.

La prima è un notevole vantaggio per la radioastronomia. La materia interstellare, gas e polveri, diffondono la luce ma sono quasi del tutto trasparenti alle radioonde. Così, mentre i telescopi ottici sono avvolti da una fitta nebbia ogni volta che tentano di guardare nelle direzioni più densamente popolate di polveri e stelle, i telescopi radio forano questa medesima nebbia con facilità.

La seconda conseguenza offre pure un notevole vantaggio. Le onde radio non sono assorbite dalle nuvole, né le radioonde solari vengono diffuse dalle particelle atmosferiche. Le osservazioni si possono svolgere di giorno e di notte, col bello e col cattivo tempo, con uno straordinario aumento nella quantità delle informazioni ottenibili. Per esempio, all'Osservatorio di Arcetri, si calcola che otticamente il Sole è osservabile per meno di 1000 ore all'anno delle 4450 in cui si trova sopra l'orizzonte. Invece col radiotelescopio il Sole può essere seguito da mattina a sera anche attraverso le nubi.

La terza conseguenza presenta invece un grave svantaggio: il potere risolutivo dei radiotelescopi è di solito molto inferiore a quello dei telescopi ottici, e come abbiamo detto, occorrono complessi e costosi sistemi interferometrici per raggiungerlo e in qualche caso superarlo.

Si dice che la radioastronomia ha aperto nuovi orizzonti rivelandoci un nuovo universo. Non è vero però che l'astronomia ottica sia ormai superata. In realtà astronomia ottica, radioastronomia e astronomia spaziale si integrano a vicenda. Insieme hanno permesso di estendere le nostre conoscenze sull'universo, che naturalmente non è né un universo ottico, né un universo radio, o ultravioletto, X o gamma o infrarosso, ma ne ha tutti gli aspetti.

3

Il Sole

Il volto del Sole non manca di espressione, ma ci dice molto poco di ciò che ha nel suo cuore.

A. J. DEUTSCH

LE DUE FACCE DEL SOLE

Gli astronomi hanno fatto più presto a capire quel che non si vede del Sole di ciò che si vede. In realtà, quasi un secolo fa il principale problema solare era il meccanismo della sua produzione di energia. Si trattava di spiegare come mai il Sole non si era esaurito in tanti miliardi di anni, almeno 4 a giudicare dalla probabile età della Terra. Finalmente si giunse alla difficile soluzione con la scoperta delle reazioni nucleari che ci dettero un'indicazione della struttura generale del Sole e quindi anche del suo comportamento. Con ciò tuttavia si deve aggiungere che avevamo compreso un solo aspetto, sia pure essenziale: quello che si potrebbe chiamare l'aspetto 'calmo' del Sole, perché era appunto un tale calmo, durevole irradiare che aveva permesso lo sviluppo e il mantenimento della vita sulla Terra.

Però rimanevano altri problemi, meno generali, ma sempre di un interesse straordinario, concernenti quasi un opposto carattere del Sole: la sua variabilità. Esso, infatti, non è quel corpo incorruttibile di perfezione e armonia che si credeva prima di Galileo, quando era difficile anche concettualmente ammettere una vita e un'evoluzione solari, e che il Sole avesse delle macchie.

Dopo la scoperta del cannocchiale sono venuti altri strumenti visuali e fotografici, poi i radiotelescopi e infine i telescopi su satelliti per l'osservazione delle radiazioni ultraviolette e X. La visione umana si è letteralmente dilatata e approfondita. Noi siamo tanto consapevoli del carattere

variabile del Sole che oggi questa variabilità è diventata quasi un'esperienza comune, come sa l'utente radio o televisivo quando a volte riceve trasmissioni disturbate, o addirittura non le riceve affatto, a causa di macchie che hanno interferito da 150 milioni di chilometri di distanza. Questo è il volto misterioso del Sole, o, forse meglio, la sua atmosfera solare è come un grande laboratorio.

Ebbene, questo è il volto misterioso del Sole come un grande laboratorio mascherato. Infatti l'atmosfera solare è come un grande laboratorio mascherato. Infatti l'atmosfera solare è come un grande laboratorio mascherato. Infatti l'atmosfera solare è come un grande laboratorio mascherato.

UN VIAGGIO
DALL'INTERNO DEL SOLE ALLA FOTOSFERA

DALL'INTERNO

Un inviato speciale al centro del Sole vi troverebbe un'agitazione di particelle in moto a circa 700 000 km/ora, da paragonare, per averne un'idea, con quelle dell'aria calma che respiriamo e che si muovono a 1500 km/ora. Ma la principale differenza la vedrebbe nelle condizioni degli atomi, perché mentre quelli che ci circondano conducono per la maggior parte un'esistenza tranquilla con nucleo ed elettroni riuniti come in una famiglia patriarcale, al centro del Sole quasi tutti i nuclei sono rimasti 'spogliati' a causa degli urti subiti. Infatti, nonostante la grandissima velocità, una pressione un miliardo di volte quella dell'aria li tiene tanto serrati da raggiungere densità dieci volte quella del piombo. Il risultato è una confusione di nuclei ed elettroni liberi, i quali per la minor massa sono anche più sfrenatamente veloci. Però va sottolineato che è una velocità non porta nuclei ed elettroni in alcun posto, proprio come pazzi in un cortile.

Ora, come sappiamo, velocità vuol dire temperatura che, in questo caso, equivarrebbe a qualcosa come 15 milioni di gradi, e perciò tale da innescare le reazioni termonucleari con sprigionamento di energia, specialmente di raggi gamma. Così abbiamo nuclei, elettroni e fotoni e neutrini. Nella trasformazione di quattro nuclei di idrogeno in un nucleo di elio spariscono 7/1000 delle masse in gioco, che si ritrovano appunto sotto forma di energia radiante. In queste reazioni nucleari si producono anche particelle senza carica e di massa tanto piccola da essere per ora sfuggita a ogni tentativo di misura: i neutrini. Grazie a queste loro proprietà i neutrini passano indisturbati o quasi attraverso la materia e raggiungono la Terra, dove apposite apparecchiature disposte sotto a montagne o in profonde miniere, che intercettano tutte le altre particelle, permettono di contarli. Ebbene, i neutrini provenienti dal Sole sono circa

II. SOLE

10 volte meno di quello che la teoria faceva prevedere. Questa discordanza fra teoria e osservazione costituisce uno dei maggiori problemi irrisolti della moderna astrofisica.

Le reazioni che avvengono nell'interno del Sole sono controllate e non esplosive come nella bomba a idrogeno. Infatti, la grande quantità di materia in una stella è in equilibrio in ogni punto, senza afflosciarsi né espandersi. Ciò significa che se le forze gravitazionali spingono il materiale verso il centro, la pressione esercitata dal gas e dalla radiazione lo solleva. Questa è davvero una delle più belle invenzioni della natura.

Risalendo verso l'esterno, col diminuire del calore, il nostro inviato noterebbe la solita corsa disordinata e, diciamo così, localizzata delle particelle e degli atomi, ma via via sempre meno frenetica. Invece i fotoni, che rispetto alle particelle compiono balzi più lunghi, hanno avuto maggiori possibilità, sia pure attraverso innumerevoli assorbimenti e riemissioni in ogni direzione da parte degli atomi, di filtrare verso strati più alti, riscaldandoli e perdendo in questo processo parte della loro energia. I relativamente pochi fotoni gamma di altissima energia generati nel centro del Sole sono perciò trasformati in più numerosi fotoni di minore energia. Così, a una certa distanza dal centro, il viaggiatore troverà una regione dove predomineranno i raggi X; poi più in alto ancora, una regione di più abbondanti raggi ultravioletti, finché alla superficie del Sole, la maggioranza dei fotoni sarà di luce visibile. Però con un suo contatore egli avrà potuto notare che quanta energia è stata generata al centro tanta ne sfugge complessivamente da tutta la superficie.

L'accento ai fotoni che attraversano gli strati solari voleva mettere in risalto che, all'interno del Sole, l'energia fluisce specialmente per radiazione. Quando in un ambiente la temperatura non è costante in ogni punto, si assiste a un trasporto di calore dalle parti più calde a quelle più fredde. Questo trasporto può avvenire in tre modi: conduzione, come nei metalli, convezione come in una pentola d'acqua bollente, e radiazione. Quest'ultimo modo avviene sempre in tutti i corpi non completamente opachi, siano solidi, liquidi o gassosi. Mentre conduzione e convezione si verificano per contatto e per moto di materia, ma non nel vuoto, la radiazione si propaga sia attraverso la materia che nel vuoto. Infatti nel Sole vi è una gran quantità di materia, ma pochissima fra il Sole e la Terra.

Sebbene nelle stelle il calore venga trasportato prevalentemente per radiazione, in certe zone si verificano particolari condizioni per cui parte del calore viene trasportato anche per convezione. È incerto dove cominci la zona convettiva nel Sole; oggi si ritiene probabile che abbia inizio a un cinquecento mila chilometri dal centro, per terminare poco sotto la superficie.

Attraversando tale zona il nostro inviato sarà avvolto da un turbinio di

masse gassose che salgono e scendono, e non soltanto dal solito moto a caso di atomi che non vanno in nessun posto. Ma c'è dell'altro, perché se caso di atomi che non vanno in nessun posto. Ma c'è dell'altro, perché se fino a questo punto egli aveva dimostrato d'averne una pelle a prova di reazioni nucleari, ora dovrà collaudare anche il funzionamento del suo sistema uditivo. Infatti le bolle di gas fanno rumore. Inoltre queste onde sonore si rinforzano man mano che salgono verso strati più tenui, diventando supersoniche e trasformandosi in potentissime onde d'urto. Considerata nella struttura generale la zona turbolenta di transizione funziona perciò come una sorgente di onde sonore propagantesi dovunque nell'atmosfera del Sole, trasportando energia.

Ma ormai egli sarebbe giunto al termine del suo viaggio all'interno del Sole, perché a 695 000 km dal centro, d'improvviso gli si aprirebbe il mondo esterno, mentre prima era come in una nuvola luminosa e quasi opaca. In realtà una regione di gas è ancora sopra di lui, però trasparente e fresca in confronto all'interno: circa 6000 K. È la fotosfera, chiamata così perché è da questa superficie che ci arriva quasi tutta la radiazione luminosa del Sole. Ai suoi piedi gli sembrerebbe di avere un mare di nuvole 'a pecorelle' assai simili a quelle dell'atmosfera terrestre, ma con dimensioni dell'ordine di 1000 km di diametro e dalla vita molto breve, circa 2 o 3 minuti: perciò in continuo cambiamento. È il ribollire della zona convettiva che, vista dalla Terra coi cannocchiali e in ottime condizioni atmosferiche, sembra una superficie cosparsa di grani di riso, come appunto parve a Padre A. Secchi, quando osservò per la prima volta il fenomeno. Più precisamente, i granuli o nubi non sono altro che la sommità delle correnti ascensionali, mentre le separazioni scure fra loro sarebbero i gas freddi in discesa.

È a questo punto che al nostro viaggiatore potrebbe capitare di vedersi aprire sotto i piedi una voragine, prodotta come dallo smagliarsi di quelle zone scure fra i granuli, e ingrandire formando quel che dalla Terra sembra un poro. Questo non resta isolato, ma altri ne nascono nelle vicinanze, fino a formare raggruppamenti e in ultimo una macchia.

LA FOTOSFERA

La maggior parte dei fotoni emessi dal Sole, proviene dagli strati più superficiali, forse soltanto dai primi 3 o 400 chilometri. Mentre la temperatura della fascia più esterna è intorno ai 4600 K e anche meno, quella dello strato più fondo, immediatamente al di sopra dei granuli, si aggira sui 6000 K o più. Quando abbiamo detto che il nostro viaggiatore sbucava improvvisamente al mondo esterno in una regione di trasparenza, il fatto da sottolineare era proprio quel repentino passaggio. Infatti l'aspetto straordinario della fotosfera solare è la sua opacità, paragonata a quella

IL SOLE

dell'atmosfera terrestre. Mentre quest'ultima al livello del mare ha una pressione di poco più di 1 kg per cm², ed è altamente trasparente alla luce visibile, uno strato di gas nella bassa fotosfera è quasi completamente opaco, pur avendo una pressione dieci volte minore.

La spiegazione si è avuta nel 1939 per merito di R. Wildt. In fondo, l'opacità di un gas non è una cosa tanto straordinaria. La nostra stessa atmosfera non è completamente opaca alla radiazione ultravioletta? Questa opacità è dovuta al velo d'ozono che filtra i raggi solari in arrivo. Nel caso della fotosfera, non si tratta di ozono, ma di idrogeno negativo (un atomo di idrogeno con un elettrone in soprannumero), che assorbe gran parte della radiazione proveniente dall'interno del Sole.

È proprio a causa di questa opacità che il Sole ci appare con un bordo così ben definito da sembrare un corpo solido. D'altra parte, una spia della relativa trasparenza di questa pellicola superficiale è l'oscuramento al bordo rivelatosi da una qualsiasi fotografia del disco solare, dove la parte centrale appare più brillante di quella periferica: e ciò perché al centro del disco la nostra visuale è in direzione perpendicolare alla superficie del Sole e quindi penetra più a fondo in zone più calde, al bordo penetra obliquamente raggiungendo solo strati più esterni e più freddi.

MACCHIE E CICLO UNDECENNALE

Il segno più evidente dell'attività solare sono le macchie. In realtà il Sole è sempre in attività e cambiamento, come nella zona convettiva che con la sua granulazione sembra quasi il pavimento della fotosfera. Ma in questa specie di vita si notano periodi di calma relativa, di scarsi mutamenti, e periodi di grande attività con spettacolari fenomeni che si svolgono nei suoi strati più esterni. Ecco perché noi possiamo parlare di Sole calmo e di Sole perturbato.

Le macchie solari (fig. 3.1) si osservano da più di trecento anni, a cominciare dalla scoperta di Galileo. Si sa che esse si trovano solo in due fasce comprese fra 5° e 40° di latitudine, sopra e sotto l'equatore solare, e che seguono un ciclo undecennale. Cioè ogni undici anni la superficie solare è cosparsa di grandi e numerose macchie, mentre cinque o sei anni dopo, sono piccole e poche, e talvolta non se ne vede nemmeno una. Si parla così di massimo e minimo di attività solare. Molti fenomeni connessi alla loro comparsa si verificano nelle parti più esterne del Sole, nella cromosfera e nella corona che ne costituiscono l'atmosfera.

Ma come nasce una macchia? Poche ore avanti il suo affiorare, in una regione cromosferica apparentemente tranquilla si nota la subitanea apparizione di elementi brillanti detti flocculi, e poi a livelli un po' più bassi, chiazze luminose, o facole, paragonabili a nubi più o meno grandi di gas.

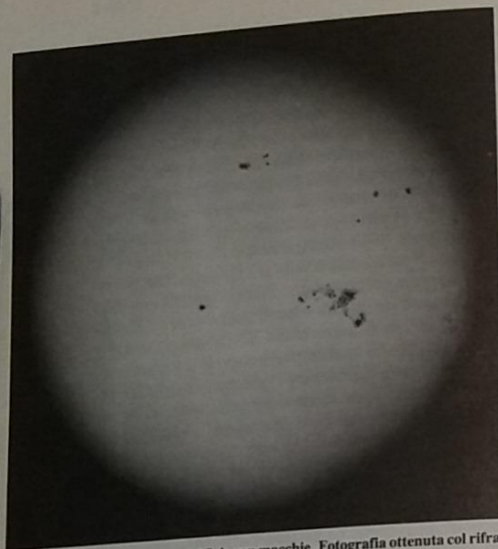


Fig. 3.1 Foto del Sole con macchie. Fotografia ottenuta col rifrattore Reinfelder dell'Osservatorio astronomico di Trieste.

Sono appunto le più grandi che spesso annunciano un prossimo apparire di macchie. La granulazione fotosferica circostante sembra aprirsi, formando pori, che, unendosi, danno luogo alla macchia. Al loro massimo sviluppo, le macchie coprono aree aventi 50 000 km e più di diametro, sprofondando nella fotosfera anche per 10 000 km, e appaiono scure perché la loro temperatura è più bassa di 1500 o 2000 K rispetto a quella della fotosfera.

Lo spettroscopio ci dice che le macchie sono vortici di materia da cui fluiscono verso l'esterno atomi metallici, mentre viceversa dalla soprastante cromosfera scendono correnti di calcio e idrogeno. Inoltre si è trovato che le macchie sono caratterizzate anche da intensi campi magnetici che hanno un'evoluzione parallela a quella delle macchie medesime, con una profonda influenza su tutta l'atmosfera solare fino alla corona.

La vita media di un gruppo di macchie è di una o due rotazioni solari, e cioè da uno a due mesi circa.

IL SOLE

L'ATMOSFERA SOLARE

Il Sole si vede come un disco dal bordo perfettamente delineato. Ma durante le eclissi, o per mezzo di particolari strumenti si può scorgere uno strato fiammeggiante, innalzantesi un 20 000 km sopra la fotosfera. È la parte più bassa dell'atmosfera del Sole, che per il suo colore rossastro, dovuto alla sua radiazione più intensa, quella della riga H α dell'idrogeno, fu chiamata cromosfera, o sfera colorata. Le spicole, piccole lingue gassose che si rinnovano di continuo, le danno l'aspetto dinamico di una prateria infocata e agitata dal vento.

Ancora più in alto si estende l'alta atmosfera del Sole, conosciuta come corona solare. Le osservazioni radio hanno mostrato che essa si estende fino a 14 milioni di chilometri dal Sole, ma si sospetta che le sue estreme propaggini, straordinariamente rarefatte, arrivino ad avvolgere la Terra. Anzi, secondo alcuni, esse potrebbero causare quel debole splendore visibile in certe notti limpide e senza luna, conosciuto come luce zodiacale.

Prima del 1930 la corona solare si poteva osservare soltanto nelle rare occasioni delle eclissi totali, che durano appena pochi minuti. Allora la Luna, coprendo completamente il disco solare, impedisce che la luce di questo, diffusa dalle particelle della nostra atmosfera, nasconda il debole splendore della corona. Ma dopo l'invenzione del coronografo da parte di B. Lyot, è possibile osservare almeno le parti più interne della corona anche fuori eclisse, con un enorme progresso nelle nostre conoscenze. Con i satelliti, poi, la corona è osservabile anche in piena luce solare, e questo perché viene a mancare la diffusione da parte dell'atmosfera terrestre.

Mentre al minimo di attività la corona è limitata alle zone equatoriali, con solo brevi pennacchi ai poli, all'avvicinarsi del massimo incomincia a passare attraverso fasi intermedie fino ad aprirsi tutto intorno, come, per usare le parole di P. J. C. Jansen, i petali di una dalia.

Cromosfera e corona sono attraversate da getti di gas irraggianti, come le spicole cromosferiche, specialmente nella luce rossa dell'idrogeno. Sono le protuberanze, la cui fantastica bellezza è difficile a descriversi. I film che ne seguono lo sviluppo ci fanno vedere getti, archi, fontane. Alcune sprizzano su dalla cromosfera, e sfidano le leggi della gravità innalzandosi a velocità di 100, 200 e qualche volta anche 900 km/s, mentre altre, specie quelle a forma d'arco, sembrano materializzarsi improvvisamente su in alto nella corona, e poi ricadere.

Quando si vede uno di questi film, appaiono naturali le teorie che suggeriscono che lo sviluppo e i moti delle protuberanze sono regolati da campi elettrici e magnetici, e non semplicemente dalla gravitazione.

Alcune protuberanze sono quiescenti, mantenendosi quasi inalterate per più di due rotazioni solari, altre invece, le eruttive, cambiano rapidamente di forma e dimensioni e si innalzano ad altezze maggiori delle quiescenti, raggiungendo a volte anche 1 milione di chilometri (circa un raggio solare e mezzo) sopra la fotosfera.

Nella cromosfera si notano spesso isolati aumenti dell'intensità luminosa, che durano qualche decina di minuti. Sono state chiamate eruzioni cromosferiche o brillamenti, dove sia la temperatura, che la densità dell'idrogeno cromosferico aumentano in modo rapido. Un brillamento si manifesta quasi sempre in vicinanza dell'area occupata da un gruppo di macchie, ed è accompagnato sempre da espulsione di particelle che hanno un effetto disturbante sull'atmosfera terrestre, e spesso dall'apparizione di protuberanze eruttive.

Protuberanze e brillamenti, facole e macchie, seguono tutti un ciclo più o meno undecennale, sebbene si notino sfasamenti fra il massimo di attività dei vari fenomeni.

Lo studio spettrografico della cromosfera e della corona ha rivelato qualcosa che a tutta prima pareva incredibile: mentre la temperatura alla superficie del Sole è inferiore ai 6000 K, essa riprende a salire nella cromosfera, raggiungendo 10 000, 20 000, 100 000 K e ancora su su fino al milione di gradi della corona.

Lo spettro della corona mostra uno sfondo continuo solcato da righe scure e larghe e poco profonde e da una trentina di righe brillanti. Lo spettro continuo con le righe scure è una debole replica dello spettro solare, diffuso dalle particelle coronali. Invece le righe spettrali in emissione non erano mai state osservate in laboratorio e neppure negli spettri di alcun corpo celeste; dapprima furono attribuite a un ipotetico elemento, il "coronio", sconosciuto sulla Terra. Ma nel 1941 B. Edlen trovò che atomi di comuni elementi, ferro, calcio, nichel e cromo, erano responsabili di quelle righe quando dal loro nucleo erano strappati 9, 10 o più elettroni. Ma le energie necessarie per strappare tanti elettroni dovevano essere così alte da dovere ammettere per la temperatura coronale valori dell'ordine del milione di gradi. Le due più intense righe coronali sono la riga rossa, a 6374 Å, e la riga verde, a 5303 Å, dovute rispettivamente al ferro nove volte e tredici volte ionizzato. A volte si osserva anche una riga nel giallo, probabilmente dovuta al calcio quattordici volte ionizzato. Per questa occorrono temperature di 4 milioni di gradi; essa non compare che in certi focolai al di sopra delle regioni perturbate del Sole.

Una volta accettato il fatto straordinario delle alte temperature cromosferiche e coronali, gli astronomi si sono chiesti quale potesse esserne la ragione. Diverse teorie sono state proposte. Quella che oggi sembra la più probabile ricorre alle onde d'urto a cui abbiamo accennato a proposito

IL SOLE

dello strato convettivo posto a qualche centinaio di chilometri sotto la superficie solare. I granuli, o meglio le correnti ascensionali originatesi nello strato convettivo, danno luogo a getti di gas nella cromosfera e questi trasformando la loro energia cinetica in calore riscalderebbero sia la cromosfera che la corona. Molti lati del problema sono ancora oscuri: si capisce che campi elettrici e magnetici devono esercitare un ruolo predominante, ma il quadro manca ancora di molti particolari.

IL RADIOSOLE

Il Sole è l'unica stella di cui possiamo studiare la superficie nei particolari. Se fosse alla distanza della stella più vicina, Alfa Centauri, a circa quattro anni luce, ci apparirebbe altrettanto brillante, ma come quella non sarebbe che un puntolino luminoso di colore bianco giallastro. Se ne potrebbe determinare la struttura fisica generale dall'analisi del suo spettro, però non si saprebbe nulla delle macchie, facole, cromosfera, protuberanze e corona solare. I fenomeni che avvengono in questi strati più esterni del Sole, sono presenti quasi certamente anche nelle altre stelle, e se noi possiamo sospettarne l'esistenza e andarne a cercare qualche traccia, soprattutto nel dominio ultravioletto e X, è unicamente grazie allo studio del nostro Sole che ci serve da stella campione: una specie di stella cavia per la conoscenza delle sue simili.

Anche nel dominio radio il Sole è l'unica stella normale da cui riceviamo radioonde. Oggi si conosce un certo numero di stelle che sono anche deboli radiosorgenti, però si tratta sempre di oggetti in fasi eccezionali e transitorie della loro evoluzione, come le stelle novae, oppure di stelle binarie quasi a contatto fra loro. Esse, per effetto della reciproca azione gravitazionale, espellono massa che in parte va a finire sul compagno, in parte può formare un esteso involucro di gas ionizzato, che è responsabile della radioemissione. È comunque molto probabile che anche le altre stelle normali siano radioemittenti, ma sono troppo lontane per essere udibili. Come non udiremmo le radioemissioni solari se fossero prodotte alla loro distanza. Il Sole è quindi una radiosorgente piuttosto debole in linea assoluta. Però, al solito, a causa della sua prossimità, è sempre una delle più intense del nostro cielo. Alla lunghezza d'onda di circa 10 cm è mille volte più intenso della più intensa radiosorgente, posta nella costellazione di Cassiopeia, mentre a 4 m Sole e radiosorgente sono circa uguali.

Se ricevessimo la radiazione soltanto da aree di Via Lattea tanto piccole come quelle coperte dal Sole o da una radiosorgente, la radiazione dello sfondo galattico risulterebbe più debole del Sole o della radiosorgente. Però, siccome le prime antenne abbracciavano aree di parecchi gradi, il coro delle deboli voci dello sfondo galattico risultava tale da soffocare

quella del Sole. Si capisce perché Jansky, che usava onde decametriche con uno strumento avente un potere risolutivo di una quarantina di gradi, scoprisse le radioonde galattiche e non il Sole. In luce visibile il Sole predomina in modo assoluto: esso è 10 miliardi di volte più luminoso della stella più brillante, Sirio.

Fu soltanto nel 1942 che Southworth scoprì la radiazione emessa dal Sole. Però, come abbiamo detto nel primo capitolo, si trattava della radiazione del Sole calmo. Quando è perturbato, la radiazione che emette raggiunge punte anche 100 000 volte più alte delle emissioni normali. Allora sulla Terra le radiocomunicazioni subiscono evanescenze, si verificano tempeste magnetiche e aurore boreali. Che tali effetti fossero la conseguenza di eruzioni solari o di grosse macchie era già noto da molto tempo, ma non si sapeva che vi fossero collegate anche potenti emissioni di radioonde. Queste furono scoperte, sempre nel 1942, dai radar inglesi.

I primi radioastronomi solari si trovarono un po' nelle condizioni degli astronomi ottici quando studiano le altre stelle: a causa del basso potere risolutivo degli strumenti potevano registrare solo la radiazione emessa complessivamente da tutto il disco solare. La prima constatazione che fecero fu che, mentre la radiazione visibile si mantiene meravigliosamente costante da centinaia di milioni di anni, permettendo il regolare sviluppo della vita sulla Terra, la radiazione emessa nel dominio radio è soggetta a brusche e larghe variazioni, e il grado di variabilità è in stretto rapporto con la lunghezza d'onda.

Mentre alle onde centimetriche la radiazione è ancora quasi costante, essa varia dolcemente alle onde decimetriche, e in modo brusco e violento a quelle metriche. Ma come abbiamo già notato un'altra volta (vedi pag. 49), per quanto la forza di queste emissioni corrisponda a temperature fantastiche, l'emissione nel dominio radio è sempre del tutto trascurabile rispetto all'emissione nel visibile. Infatti mentre il Sole emette complessivamente $3,7 \cdot 10^{26}$ watt, anche le più potenti tempeste radio corrispondono a 10^{14} watt, 4000 miliardi di volte meno.

LE COMPONENTI DELLA RADIAZIONE SOLARE

Supponiamo di poter ruotare la sintonia di un immaginario apparecchio capace di ricevere tutte le radioonde solari, dalle millimetriche alle decametriche. A cominciare dalle brevi lunghezze d'onda udremo un debole rumore di intensità costante, ma arrivati alle onde decimetriche si potranno sentire sibili della durata di qualche secondo. Giriamo ancora la sintonia: alle onde metriche e decametriche udremo il solito rumore costante solo se il Sole è in un periodo di calma eccezionale. Di regola fischi, soffi, sibili irregolari in intensità e durata lo nascondono quasi del tutto.

IL SOLE

Il differente comportamento del Sole alle varie lunghezze d'onda ha fatto concludere che la radiazione solare è formata di varie componenti che hanno origine in parti diverse del Sole, sono associate con perturbazioni visibili di natura diversa e dominano a lunghezze d'onda diverse. Malgrado lo scarso potere risolutivo dei primi strumenti, questi risultati furono in gran parte raggiunti grazie alla continua sorveglianza di quello che avveniva contemporaneamente sul Sole ottico.

Ecco quali sono le componenti che contribuiscono all'emissione solare.

1) Radiazione di fondo: è costante nel tempo quasi come quella ottica. Il suo spettro si estende dalle onde centimetriche alle decametriche, e indica temperature varianti fra 10 000 e 1 milione di gradi, a seconda della lunghezza d'onda. Essa proviene da tutto il disco solare.

2) Radiazione rinforzata: la sua intensità dipende dal numero di macchie presenti sul disco, e varia lentamente nel tempo, raggiungendo di nuovo circa gli stessi valori a distanza di 27 giorni circa. Dato che questo è il periodo di rotazione solare, è chiaro che l'intensità della radiazione è proprio associata al ricomparire dei gruppi di macchie, dopo un'intera rotazione. Il suo spettro si estende da 3 a 60 cm e corrisponde a temperature fra 100 000 e 1 milione di gradi.

3) Radiotempeste solari: durano ore e anche giorni e si verificano in coincidenza dell'apparire di grandi macchie. L'intensità varia in modo brusco fra lunghezze d'onda di 1 e 15 metri e l'energia emessa corrisponde a temperature fra 100 milioni e 10 miliardi di gradi.

4) Esplosioni di intensità di tipo I: sempre in coincidenza con l'apparire di grandi macchie, e nell'intervallo di lunghezze d'onda interessante le radiotempeste, si hanno subitanei aumenti di intensità di 1 o 2 s.

5) Esplosioni di intensità di tipo II: in coincidenza con i brillamenti cromosferici, si manifestano degli aumenti di intensità della durata di qualche minuto. La perturbazione si osserva prima alle onde centimetriche, e poi via via a onde sempre più lunghe, fino a interessare le onde di 15 m. Per spiegare la forza di tali emissioni sarebbe necessario ammettere temperature fra 10 miliardi e 10 000 miliardi di gradi.

6) Esplosioni di intensità di tipo III: fra 50 cm e 15 m si osservano dei bruschi aumenti di intensità simili ai precedenti, ma di durata molto più breve, appena pochi secondi. Queste punte isolate di intensità non sono sempre associate a fenomeni visibili.

Le esplosioni di tipo II e III sono spesso seguite da aumenti di intensità osservabili simultaneamente su una larga banda di frequenze; quelle che seguono le esplosioni di tipo II durano anche parecchie ore e sono chiamate esplosioni di tipo IV; quelle invece che seguono le esplosioni di tipo III durano circa un minuto e sono chiamate esplosioni di tipo V. Il gruppo di eventi tipo II e IV si verifica molto più raramente del gruppo III-V.

Nel 1954 capitò un periodo di grande calma per il Sole: per mesi interi non si vide nemmeno una macchia. Finalmente le condizioni erano favorevoli per misurare la radiazione di fondo, che alle onde metriche era di solito sempre più o meno mascherata dalle emissioni provenienti dalle zone perturbate. Così, con le osservazioni di quell'anno, si completò una lunga serie di ricerche che permise di giungere ai risultati che ora diremo. A lunghezze d'onda fra qualche millimetro e 2 cm l'emissione corrisponde a temperature fra 7000 e 12 000 K. Via via che la lunghezza d'onda cresce, l'emissione indica temperature sempre maggiori, finché, per lunghezze d'onda superiori a 1,5 m, si trova una temperatura di 1 milione di gradi. Inoltre, l'emissione in periodi di minimo di macchie è un po' inferiore a quella nei periodi di massimo, cosicché anche la componente costante in realtà non è tanto costante come l'emissione di luce visibile, ma cambia, sia pure di poco, in un periodo di 11 anni.

... il significato di questa temperatura variante fra i 6000 K nel

La risposta è che le radiazioni centimetriche, quelle metriche e quelle visibili non provengono dalle stesse parti del Sole. Sappiamo che la corona ha una temperatura di 1 milione di gradi come testimonia la presenza nel suo spettro di righe di atomi più volte ionizzati. Allora è chiaro che anche le emissioni radio indicanti un milione di gradi provengono dalla corona. Il meccanismo che le genera è quello delle transizioni libero-libero. Infatti la corona è un gas altamente ionizzato, composto come il Sole per l'85% d'atomi di idrogeno, il 15% d'elio e da percentuali minime degli altri elementi. Nel suo insieme possiamo immaginarcela composta quasi esclusivamente di un miscuglio di protoni ed elettroni liberi.

Gli elettroni nella loro velocissima corsa passano più o meno vicino ai protoni che ne piegano più o meno le traiettorie. La velocità diminuisce in proporzione, e la maggiore o minore perdita di energia cinetica dà origine all'emissione di radiazioni di frequenza maggiore o minore. Poiché nella corona la densità è molto bassa, gli elettroni passano di rado vicino ai protoni. Perciò le loro traiettorie sono poco piegate e quindi predominano le emissioni alle frequenze più basse. Via via che sprofondiamo giù nella corona e infine nella bassa cromosfera, la densità aumenta, i passaggi degli elettroni vicino ai protoni diventano più serrati, e cresce l'emissione a frequenze più alte. Per tal motivo, le emissioni centimetriche provengono in prevalenza dalla cromosfera, e la temperatura di 12 000 K concorda con quanto l'astronomia ottica indicava per la bassa cromosfera.

Non tutte le radiazioni emesse nella corona e nella cromosfera possono propagarsi attraverso di esse e giungere alla Terra. In dipendenza del

In generale il numero di elettroni liberi per cm^3 decresce regolarmente con l'altezza, così come decresce la densità della materia. Però a 6000 km sopra la fotosfera si riscontra una anomalia. Se partiamo dalla fotosfera e andiamo su nella cromosfera, la densità degli elettroni diminuisce dapprima in modo regolare, ma a 6000 km c'è un brusco aumento. Questo avviene perché, a tale altezza, la temperatura salta da circa 10 000 a circa 300 000 K, provocando un rapido aumento di ionizzazione degli atomi e di conseguenza un aumento di elettroni liberi. Poi la densità di questi ricomincia a scendere regolarmente. Questa fascia a 6000 km di altezza, in cui la densità degli elettroni è circa 10 volte maggiore che nelle zone immediatamente più alte e più basse, si comporta come uno specchio per tutte le lunghezze d'onda maggiori di 21 cm che vengono emesse sotto i 6000 km, e cioè nella bassa cromosfera, rimandandole indietro e impedendoci quindi di osservarle. Allo stesso modo si comporta con le onde più lunghe di 21 cm emesse negli strati più alti: queste saranno riflesse indietro verso l'esterno e potranno giungere a noi.

Man mano che si sale su nell'alta cromosfera e nella corona si incontra, a causa del variare della densità, fasce riflettenti onde sempre più lunghe. Per esempio, a 21 000 km di altezza, là dove si pone il limite fra la cromosfera e la corona, la lunghezza d'onda di 1,8 m si può propagare liberamente verso l'alto, ma non scendere sotto i 21 000 km. Una fascia a 550 000 km sopra la fotosfera rimanda verso l'esterno le onde più lunghe di 14 m emesse nelle regioni ancora più esterne. Perciò se osserviamo il Sole in una radiazione di lunghezza d'onda superiore a 14 m, dato che esse possono provenire soltanto dalle zone più alte di 550 000 km, vedremo quello che avviene solo in quelle zone e non nelle più basse. Se l'osserviamo a 10 m, vedremo ciò che avviene in tutte le zone più alte di 400 000 km. Se l'osserviamo a 1 m, vedremo cosa avviene in tutte le zone superiori a 7000 km. Se si osserva a 3 cm si dovrebbe avere l'effetto complessivo delle radioonde emesse da tutta la cromosfera e la corona. Ma siccome abbiamo detto che la corona emette di più alle onde lunghe e in modo trascurabile alle brevi, ecco che l'emissione di 3 cm è in prevalenza dovuta agli strati più bassi.

Si ha così un modo di studiare l'atmosfera del Sole in profondità, sbucciandolo quasi come una cipolla. Riprendiamo il nostro immaginario ricevitore sintonizzabile sulle onde solari fra 20 m e 4 mm. Sintonizzandolo sui 19 m, riceveremo soltanto il fruscio di strati posti a una distanza dal Sole uguale o maggiore del suo raggio. Girare la manopola verso le onde più corte equivarrà a immergersi più giù, sempre più giù in strati meno

caldi e più densi fino alla fotosfera.

Abbiamo parlato di radioemissioni dalla corona e dalla cromosfera. E la fotosfera? Ecco qui un'importante differenza fra Sole ottico e Sole radio. In luce visibile la stragrande maggioranza della radiazione viene emessa dalla fotosfera. Alle onde radio, succede il contrario: in questo dominio, la fotosfera emette pochissimo. Solo alle onde di qualche millimetro è misurabile l'emissione degli strati al confine fra fotosfera e cromosfera, indicante una temperatura di 7000 K. Cromosfera e corona, trasparenti e deboli radiatori di luce visibile, sono al contrario forti radioemittenti, grazie al loro stato di gas altamente ionizzato.

In conclusione, mentre il Sole ci appare come un disco dal bordo ben definito, con un diametro angolare di poco più di mezzo grado e una luminosità decrescente dal centro al bordo, osservatori con occhi sensibili alle onde radio lo vedrebbero di dimensioni maggiori: di poco superiore al disco visibile alle onde centimetriche, più che doppio alle onde decametriche, dove la corona solare sarebbe visibile come una larga macchia brillante dai contorni irregolari e sfumati. In altre parole, mentre in luce visibile la superficie emittente è la fotosfera, in onde centimetriche è la bassa cromosfera, in onde decimetriche l'alta cromosfera, e alle onde metriche e decametriche è la corona. La radioastronomia si è quindi rivelata un potente mezzo di studio degli strati più esterni del Sole, tanto difficilmente investigabili coi soli mezzi ottici.

ESTENSIONE DELLA CORONA E DISTRIBUZIONE DELLO SPLENDORE SUL DISCO SOLARE

Una conferma che la radiazione centimetrica proviene essenzialmente dagli strati più bassi, mentre la metrica proviene da quelli coronali, la si può avere dalle eclissi, che ci danno anche un'indicazione più precisa dell'enorme estensione della corona.

Le eclissi del Sole offrono la possibilità di fare quello che il limitato potere risolutivo dei primi strumenti non consentiva: studiare l'emissione proveniente da parti ristrette del disco solare. La misura della radiazione solare via via che la Luna copre parti sempre maggiori del disco permette di ricavare il contributo particolare di ogni zona e di determinare l'estensione della superficie emittente.

Queste, e le più precise misure compiute in seguito con gli interferometri a gran potere risolutivo, hanno pure messo in evidenza che fra 3 e 21 cm il Sole è un disco di splendore uniforme, eccetto all'estremo bordo dove si nota un anello brillante, quasi l'opposto dell'oscuramento al bordo ottico. Alle maggiori lunghezze d'onda l'estensione della corona risultò superiore a quanto ci si aspettava. Ma che fosse ancora più estesa di

quanto avevano indicato le eclissi di Sole, fu dimostrato dalle ricerche svolte a Cambridge da K. E. Machin e F. G. Smith nel 1952 e nel 1954, a 8 m di lunghezza d'onda.

A metà giugno, il Sole, nel suo annuale cammino lungo l'eclittica, viene sempre a trovarsi appena un po' più a nord di una potente radiosorgente, la Nebulosa del Granchio. Sebbene il disco solare non arrivi a coprirla, la corona le passa davanti. C'era perciò da aspettarsi che i gas ionizzati della corona deviassero via da noi le radioonde emesse dalla Nebulosa, la quale sarebbe apparsa molto indebolita o addirittura inosservabile. Queste previsioni furono verificate e le radioemissioni della Nebulosa cessarono completamente per due giorni. Ma il fatto più sorprendente fu che avevano incominciato a indebolirsi già cinque giorni prima, e impiegarono altrettanto tempo per tornare alla loro intensità normale. Così l'eclisse durò complessivamente circa 12 giorni, dimostrando che il diametro della corona è almeno 20 volte quello del Sole visibile. Ciò significa che all'enorme distanza di 14 milioni di km dal bordo solare la corona è ancora abbastanza densa da deviare in modo apprezzabile le onde delle radiosorgenti nascoste dietro di essa.

LA RADIAZIONE RINFORZATA E LE OSCILLAZIONI RAPIDE

L'area complessiva occupata dalle macchie varia più o meno regolarmente con un periodo di circa un mese, simile a quello di 27 giorni impiegati dal Sole a compiere un'intera rotazione intorno al suo asse. Ogni volta che

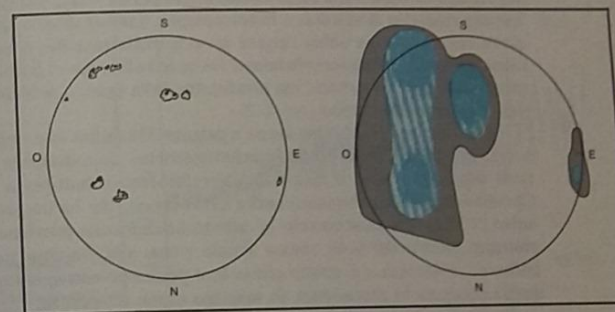


Fig. 3.2 Corrispondenza fra gruppi di macchie sulla fotosfera e radiazione rinforzata alla lunghezza d'onda di 21 cm, proveniente dalla cromosfera e dalla corona.

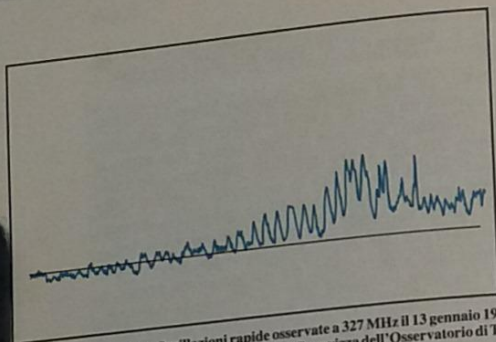


Fig. 3.3 Oscillazioni rapide osservate a 327 MHz il 13 gennaio 1968 con una semplice antenna a forma di diedro, alla succursale di Basovizza dell'Osservatorio di Trieste. Questa è stata una delle primissime osservazioni del fenomeno.

L'area coperta dalle macchie raggiunge il massimo, si osserva che la radio-emissione costante del Sole è rafforzata, per poi tornare al valore normale quando l'area coperta dalle macchie diventa molto piccola. Per esempio, a 10 cm la temperatura del disco solare oscilla fra il valore 'calmo' di 80 000 K e quello perturbato di 100 o 150 000 K, e a 50 cm va dal valore 'calmo' di 600 000 K a quello perturbato di circa 900 000 K.

A lunghezze d'onda uguali o più corte di 3 cm non si nota nessuna variazione nell'emissione di fondo del Sole, mentre a lunghezze d'onda superiori a 60 cm c'è una correlazione molto più incerta e mal definita fra numero massimo di macchie e rafforzamento. Sembra di qui che la radiazione rafforzata non abbia origine proprio nelle macchie o nelle zone immediatamente superiori altrimenti anche le radioonde di pochi millimetri ne sarebbero disturbate, ma soprattutto nella bassa e nell'alta cromosfera e nella bassa corona (FIG. 3.2)

Che non siano le macchie stesse a originare la radiazione rafforzata lo hanno provato le osservazioni interferometriche. Soprattutto le osservazioni degli australiani a mezzo dell'interferometro multiplo a croce di Christiansen (soprannominato anche Chris-cross), che ha un potere risolutivo di 3', hanno mostrato che la radiazione rafforzata proviene da zone piuttosto piccole del Sole, spesso situate vicino alle macchie, ma spesso anche no. Piuttosto si è notato che la loro posizione corrisponde anche a quella occupata in precedenza da macchie ormai scomparse.

Le osservazioni ottiche indicano che sopra le macchie solari si formano nella corona delle zone più calde e più dense, le condensazioni o macchie

calde coronali, in cui potrebbe forse originarsi la radiazione rafforzata. Difatti queste zone si mantengono anche quando la macchia è scomparsa. La presenza della riga gialla del calcio 14 volte ionizzato, che si trova nello spettro delle macchie calde e soltanto lì, indica che le temperature in tali zone raggiungono dai 4 ai 10 milioni di gradi.

Siccome la radiazione rafforzata è in parte polarizzata, bisogna pensare che il campo magnetico delle macchie solari si prolunghi fino nelle macchie calde della corona. Comunque, l'agitazione termica degli elettroni in presenza di un campo magnetico può render conto delle emissioni osservate.

Fluttuazioni e oscillazioni quasi periodiche dell'emissione solare sono state osservate sia nel dominio ottico che in quello radio. Nel dominio

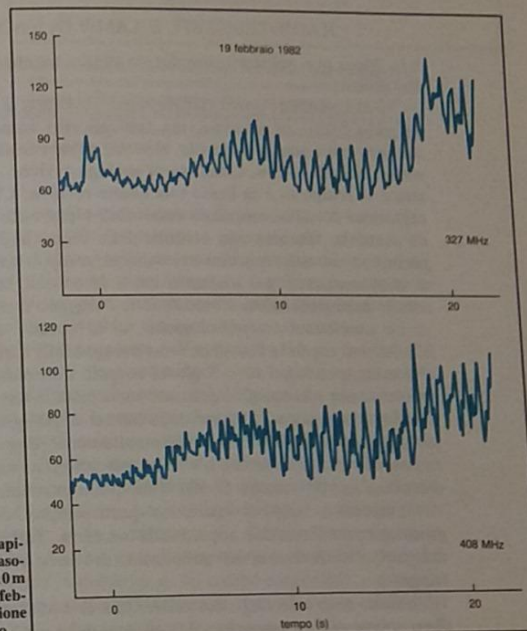


Fig. 3.4 Oscillazioni rapide osservate sempre a Basovizza col paraboloide da 10 m a 327 e a 408 MHz il 19 febbraio 1982. Ogni oscillazione dura circa mezzo secondo.

ottico le righe di emissione formatesi negli strati fotosferici perturbati e nella bassa cromosfera hanno una periodicità che varia dai 300 secondi (fotosfera) ai 150 secondi (cromosfera). Nel dominio radio che interessa l'alta cromosfera e la corona si osservano oscillazioni di 0,5-50 secondi di periodo a lunghezze d'onda decimetriche, di 0,5-5 secondi a lunghezze d'onda metriche. Queste furono osservate per la prima volta con una semplice antenna a forma di diedro dell'Osservatorio di Trieste da Alberto Abrami, grazie alla capacità del sistema di ricezione di avere una risposta temporale molto rapida (FIGG. 3.3 e 3.4). Nell'alta corona, a lunghezze d'onda decametriche, i periodi risalgono di nuovo a 120-300 secondi come nella fotosfera. Le variazioni di intensità rispetto alla media sono molto piccole, di circa 1/1000, e perciò il fenomeno è poco evidente, ma molto importante per la comprensione della struttura dell'atmosfera solare.

RADIOTEMPESTE E LAMPI DI RADIAZIONE

Ma finora non abbiamo considerato che un aspetto relativamente calmo del Sole.

In luce visibile l'attività solare si manifesta alla superficie della fotosfera sotto forma di macchie, ma tutti gli altri fenomeni, protuberanze, eruzioni cromosferiche, facole, macchie calde coronali, si sviluppano nei suoi strati più esterni. Qualcosa di analogo avviene nel dominio radio: in alto è la tempesta e in basso una quiete relativa. Che infatti tempeste e esplosioni di radiazione siano osservabili soprattutto alle lunghezze d'onde metriche, mentre alle centimetriche regna la calma, indica che le perturbazioni radio nascono e si sviluppano soprattutto negli strati più alti di quell'oceano di gas ionizzato che è la corona, mentre via via che si scende nelle profondità cromosferiche l'uragano si placa.

Le condizioni 'meteorologiche' della corona solare fra 60 000 e 200 000 km sopra la fotosfera sono paragonabili a quelle di un agosto in alta montagna: ogni 10 o 5 giorni scoppia una radiotempesta che dura parecchie ore e anche giorni, e che, come tutte le tempeste che si rispettano, è accompagnata da lampi della durata di pochi secondi. Però questi lampi si succedono l'un l'altro ininterrottamente, e se i nostri occhi fossero radiosensibili alle onde fra 1 e 15 m, sarebbero abbagliati da aumenti di splendore di 100 e anche 10 000 volte quello normale.

Tempeste e lampi si verificano quasi sempre tutte le volte che un grosso gruppo di macchie appare sulla fotosfera. Tuttavia se l'area coperta dal gruppo è inferiore ai 400 milionesimi del disco, non si scatena nessuna tempesta.

È stato osservato dagli australiani che la radiotempesta si sposta sul disco solare più rapidamente del gruppo di macchie. Dato che i livelli

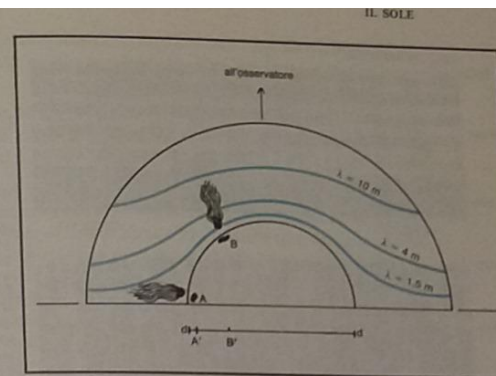


Fig. 3.5 Le linee in colore indicano i livelli al disotto dei quali una radiazione di lunghezza d'onda maggiore di quella indicata nel disegno, non può propagarsi. Quando la macchia è al bordo (posizione A) la perturbazione sovrastante è tutta al disotto del livello a cui la propagazione di onde metriche diventa possibile. Quando in conseguenza della rotazione solare la macchia si è spostata in B, la vedremo proiettata sul disco d nella posizione B'. La perturbazione ha superato il livello critico e possiamo ricevere le onde metriche che emette.

atmosferici più alti ruotano più rapidamente della fotosfera, ciò indica che le radiotempeste, pure essendo strettamente associate alle macchie, si verificano al di sopra di esse, nella corona. Un'altra prova è che le radiotempeste scoppiano due o tre giorni dopo che il gruppo di macchie si è affacciato al lembo est del Sole, e cessano due o tre giorni prima che questo scompaia al lembo ovest. La spiegazione sta nel cammino che le radioonde sono obbligate a percorrere nell'atmosfera solare. Esse non si possono propagare al di sotto di un certo livello, come abbiamo già visto; ma questo livello si trova più sollevato vicino al bordo che al centro del disco. Perciò la radiotempesta ci raggiungerà soltanto quando, per effetto della rotazione solare, viene a trovarsi abbastanza distante dal lembo da salire al di sopra di tale livello, come si vede dalla FIG. 3.5.

L'altezza a cui si verificano le radiotempeste è probabile sia fra 60 000 e 200 000 km sopra la fotosfera. La loro radiazione è quasi del tutto polarizzata circolarmente, ossia la direzione del campo elettrico ruota in modo uniforme intorno alla direzione di propagazione dell'onda. Siccome la polarizzazione richiede la presenza di un campo magnetico, e il campo magnetico delle macchie è tanto più intenso quanto più estesa è l'area del gruppo, si può supporre che le radiotempeste possano scoppiare solo

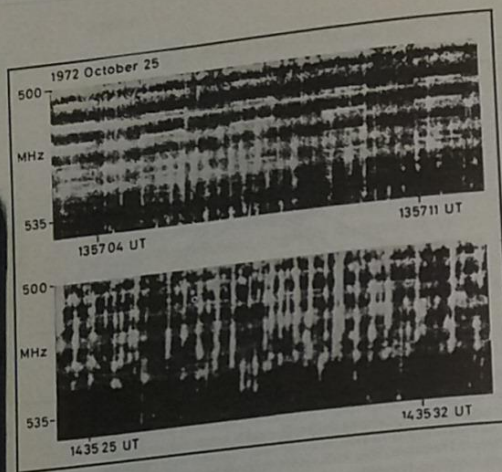


Fig. 3.6 'Spettro dinamico' di una serie di esplosioni di tipo I. Lo spettro dinamico è ottenuto fotografando lo schermo di un oscillografo a raggi catodici. Il fascio dell'oscillografo è più o meno intenso a seconda dell'intensità del segnale delle varie frequenze e a vari istanti. In ascisse è riportato il tempo e in ordinate la frequenza (da A. Krüger, *Introduction to solar radioastronomy and radiophysics*, Reidel Publ. Comp. Dordrecht, 1979).

quando il campo magnetico delle macchie è così forte da innalzarsi almeno fino a 60 000 km sopra la fotosfera.

I 'lampi' o esplosioni che accompagnano le radiotempeste sono state chiamate esplosioni di tipo I per distinguerle dai vari altri tipi di cui parleremo fra breve. Esse sono caratterizzate dalle seguenti proprietà: durano da 0,1 a 2 secondi e la durata cresce al crescere della lunghezza d'onda e cioè con l'altezza sulla fotosfera. L'emissione è ristretta a un intervallo dello spettro elettromagnetico compreso fra 2 e 10 MHz decrescente con l'altezza. Le dimensioni angolari della zona emittente sono comprese fra poco meno di 1' e 5' e crescono con l'altezza. L'energia emessa supera di 1000 o 10 000 volte quella emessa dal sole calmo.

Le esplosioni di tipo I poi, talvolta si verificano isolatamente e con una distribuzione casuale nel tempo, mentre altre volte capitano addensate insieme a formare 'catene' di decine o addirittura centinaia di esplosioni (FIG. 3.6). Particolari strumenti, in grado di registrare simultaneamente le emissioni a varie frequenze e di seguirne le variazioni nel tempo (radiospettrografi a spazzolamento di frequenza e radiospettrografi multicanali) hanno mostrato che queste catene di esplosioni cominciano a una data frequenza e poi si spostano nel tempo a frequenze maggiori o minori. Poiché ricordiamo ancora una volta che l'emissione a una data frequenza è caratteristica di una data altezza nella corona solare, si può interpretare

IL SOLE

questo spostamento in frequenza con un moto della perturbazione dall'alto in basso o dal basso in alto a velocità di circa 800 km/s.

ESPLOSIONI PROPAGANTISI ATTRAVERSO LA CROMOSFERA E LA CORONA NON COLLEGATE ALLE TEMPESTE DI RUMORE

Gli improvvisi aumenti di intensità che si osservano fra 1 cm e 15 m, molto spesso in corrispondenza di eruzioni cromosferiche, differiscono dai lampi delle radiotempeste in qualcosa indicante una loro diversa origine, perché mentre i primi sono costituiti da emissioni di radiazione quasi completamente polarizzata i secondi non lo sono o lo sono solo parzialmente. Perciò è probabile che il meccanismo di emissione non sia legato ai campi magnetici delle macchie. Ci deve essere qualche altra causa, che è stata suggerita dall'osservazione di un caratteristico fenomeno.

S'è detto che l'esplosione è osservata praticamente su tutto lo spettro radio, da 1 cm a 15 m. Tuttavia essa non avviene allo stesso istante a tutte le frequenze: prima si verifica alle brevi lunghezze d'onda e poi, con un certo ritardo, alle lunghezze d'onda maggiori. Tenuto conto che le onde corte sono caratteristiche degli strati più bassi, mentre quelle più lunghe possono propagarsi soltanto negli strati più alti, questo sfasamento nel tempo indica che l'esplosione sale nell'atmosfera a una velocità crescente da 500 a 3000 km/s. Questo tipo di esplosioni, indicato anche come esplosioni di tipo II (FIG. 3.7) o a lento spostamento in frequenza, sono generalmente associate a intensi ed estesi brillamenti, e sono perciò fenomeni piuttosto rari. Associate alle esplosioni di tipo II sono quelle di tipo IV definite come 'un evento di lunga durata e spettro continuo, e susse-

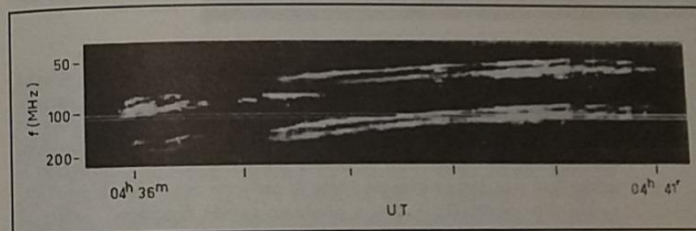


Fig. 3.7 Spettro dinamico di una esplosione di tipo II: in questo esempio si osserva l'emissione a una data frequenza e a frequenza esattamente doppia (armonica). In 5 minuti il fenomeno si sposta da 100 a 50 MHz. In ascisse il tempo, in ordinate la frequenza (da A. Krüger, *op. cit.*).

IL SOLE

se ne osservano altre ancora più rapide, nel senso che il diffondersi della perturbazione attraverso la corona avviene all'enorme velocità di 50 000 km/s, e la durata complessiva della perturbazione è di pochi secondi invece che di qualche minuto come nel caso precedente.

Simili velocità si riscontrano nei raggi cosmici. Siccome è stato osservato che in genere un'eruzione cromosferica è accompagnata a distanza di un'ora o due, da un aumento dei raggi cosmici in arrivo sulla Terra, si ritiene che il Sole stesso emetta alcune di queste particelle di grande energia. Perciò potrebbe darsi che traversando la corona siano all'origine delle improvvise esplosioni di breve durata. Tuttavia a tale ipotesi si oppone il fatto che, a differenza delle esplosioni lente, le rapide non sono strettamente associate alla comparsa di eruzioni cromosferiche, e soltanto per il cinquanta per cento si trova una coincidenza.

Queste esplosioni sono chiamate di tipo III o anche a 'rapido sposta-

Fig. 3.9 Spettro dinamico di esplosioni del tipo a U. In ascisse il tempo, in ordinate la frequenza. Intervallo di frequenza 93-186 MHz (da A. Krüger, *Introduction to solar radioastronomy and radiophysics*, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1979).

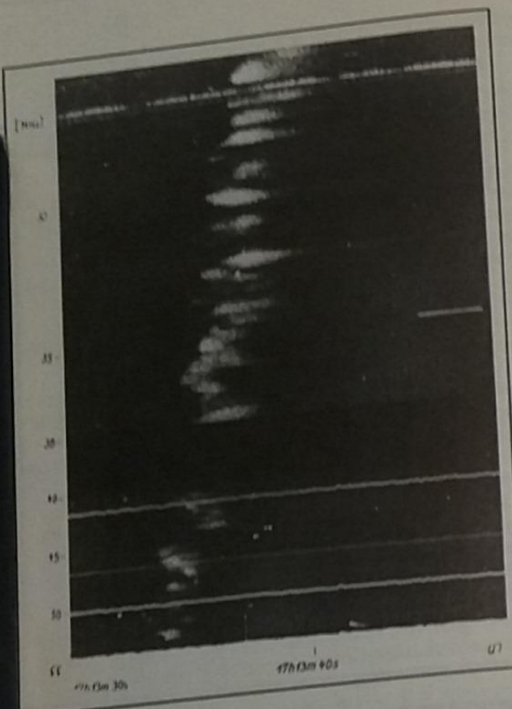
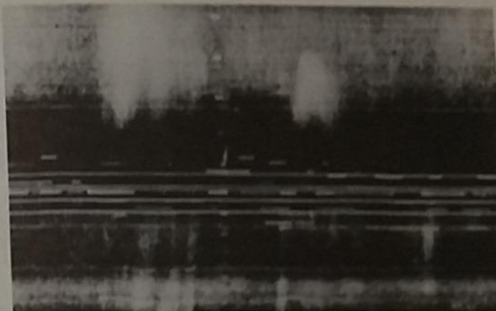


Fig. 3.8 Spettro dinamico di uno scoppio di tipo III. In meno di 4 secondi il fenomeno si sposta da 55 a meno di 25 MHz (da A. Krüger, *Introduction to solar radioastronomy and radiophysics*, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1979).

guente un brillamento'; anch'esse sono abbastanza rare. Simili velocità sono in media quasi uguali a quelle dei corpuscoli espulsi dal Sole durante le eruzioni cromosferiche e che arrivando nell'atmosfera terrestre dopo un viaggio di un giorno provocano le aurore boreali e le tempeste magnetiche. È possibile che sciame di queste particelle scagliati attraverso la cromosfera e la corona causino anche le suddette esplosioni di intensità. Un'altra possibilità è che, a produrre questo fenomeno, invece di particelle siano onde d'urto acustiche partite dallo strato convettivo e propagantis nell'atmosfera solare.

Ma oltre a queste esplosioni che chiameremo 'lente' per modo di dire,

mento in frequenza'. In uno spettro dinamico, cioè in un diagramma come quelli mostrati nelle figg. 3.8 e 3.9, che danno la frequenza in funzione del tempo, l'esplosione è indicata da una striscia inclinata. Talvolta il segno dello spostamento si inverte, e cioè la perturbazione dapprima sale verso le regioni più esterne della corona e poi ridiscende; la traccia che si ottiene nello spettro dinamico ha ora l'aspetto di una U rovesciata e perciò si parla delle esplosioni a U come di un sottotipo delle esplosioni di tipo III. Come le esplosioni di tipo II sono seguite da quelle di tipo IV così quelle di tipo III sono seguite da quelle di tipo V, caratterizzate da una emissione diffusa su una larga banda spettrale, di durata compresa fra mezzo e 3

A differenza delle esplosioni di tipo II e IV, quelle di tipo III e V sono abbastanza frequenti e spesso associate a brillamenti ottici, esplosioni a microonde e ad aumenti di intensità nel dominio dei raggi X duri.

Ma cos'è il plasma? Di solito si parla di tre stati della materia, solido, liquido e gassoso. Con questi tre l'esperienza ci mette continuamente a contatto. Da parecchi anni però anche giornali e riviste non specializzate hanno cominciato a parlare di un "quarto stato" della materia: il plasma. Esso è un gas ionizzato, ma nel suo insieme elettricamente neutro

Esso è un gas ionizzato, ma nel suo insieme elettricamente neutro.

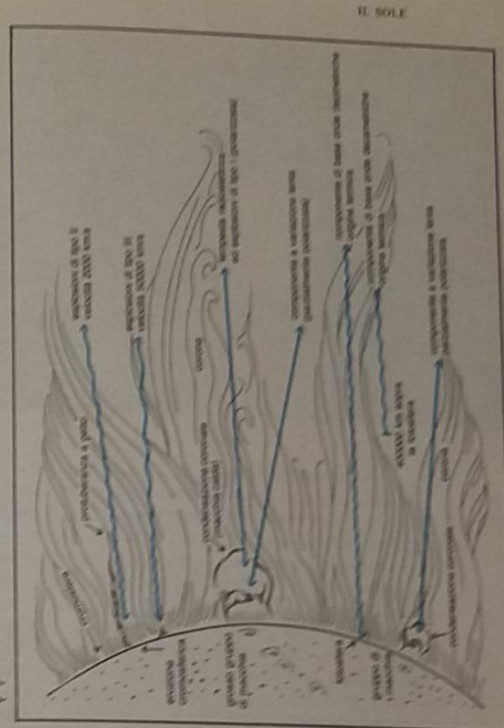


Fig. 3.10 Fotoflora, cromoflora e corone ed emulsioni da parte dei vari strati.

perché contiene un ugual numero di particelle positive e negative. In presenza però di campi elettrici e magnetici le due specie di particelle si comportano in modo indipendente e diverso le une dalle altre.

È soltanto da poche decine di anni che nei laboratori di fisica si è trovato il modo di studiare il plasma a temperature dell'ordine del milione di gradi e più, imprigionandolo nelle "bottiglie magnetiche". In questo mezzo si spera di realizzare le reazioni nucleari, e molte future applicazioni per l'industria dipendono dallo sviluppo di questa nuova tecnica.

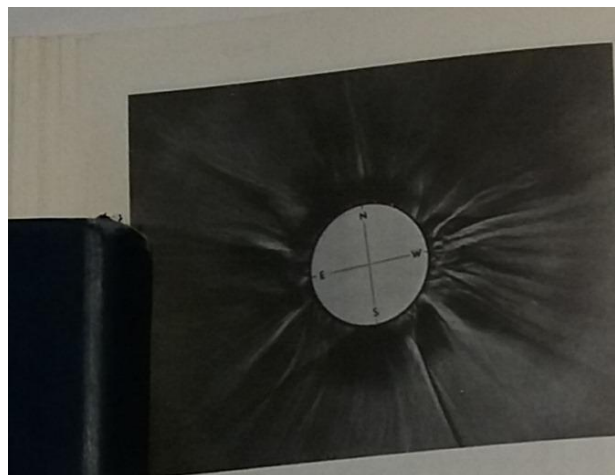


Fig. 3.11 Fotografia della corona solare ottenuta durante l'eclisse del 16 febbraio 1980 a Yellapur (India). Le strutture coronali sono rese più visibili con un trucco fotografico: cioè una copia positiva e una negativa aventilo stesso contrasto sono state sovrapposte e un po' ruotate l'una rispetto all'altra (Da *Solar Physics*, maggio 1982, pag. 2).

Ora l'atmosfera solare è proprio un plasma: il gas è completamente ionizzato e composto quasi esclusivamente di elettroni e protoni. Inoltre questo plasma contiene un campo magnetico, il campo magnetico dipolare del Sole. Anche se non abbiamo mezzi per misurarlo direttamente, perché l'intensità è troppo piccola (è stimata da uno a pochi gauss) la presenza del campo è indicata in modo inequivocabile dalla struttura dei filamenti coronali (Fig. 3.11).

Quando un campo magnetico è immerso in un plasma succede che le linee di forza del campo sono in tensione, come degli elastici, sotto l'azione della pressione esercitata dal plasma. Ora se una corda elastica è pizzicata in un punto, lungo la corda si propaga un moto ondulatorio. Così pure se il plasma si sposta rispetto a una linea di forza, oppure se l'intensità del campo cambia, un'onda magnetoidrodinamica si muove lungo le linee di forza. Queste onde si chiamano onde di Alfvén, dal nome del fisico che le ha scoperte, e hanno una velocità, detta velocità di Alfvén, $V_a = (1,7 \times 10^6 B/\sqrt{n})$ km/s, dove B è il valore del campo in gauss, ed n il numero di elettroni per cm³. Se la velocità del plasma nel campo magnetico è superiore a quella delle onde di Alfvén, si sviluppa un urto magnetoidrodinamico e sul fronte d'urto si crea un accumulo d'energia. Questi urti provocano il trasporto di energia da un punto all'altro del campo magnetico. In un certo senso la velocità di Alfvén in un plasma è analoga alla velocità del suono in un mezzo più denso. Un corpo che si muove a

IL SOLE

velocità supersonica produce un'onda d'urto con un fronte di alta pressione. Così un plasma che si muove in un campo magnetico a velocità maggiore della velocità di Alfvén produce un urto magnetoidrodinamico. Però mentre nel caso dell'onda d'urto sono le molecole del mezzo a interagire entrando in collisione, nel plasma la densità è tanto bassa che le collisioni sono trascurabili. Sono invece le onde a interagire; e poiché, via via che si sale nella corona, la densità diminuisce e la velocità aumenta, le onde successive viaggiano più rapidamente delle precedenti, così che si ha un accavallamento e una combinazione di onde. Queste 'onde d'urto senza collisione' possono spiegare il trasporto d'energia dalle regioni più basse a quelle più alte dell'atmosfera solare.

Se facciamo un po' di conti, vediamo che le velocità indicate dallo spostamento in frequenza delle esplosioni di tipo I e II sono comprese fra 500 e qualche migliaio di km/s, mentre la velocità di Alfvén per un campo di 1 gauss e densità di elettroni fra 10 miliardi e 100 milioni di particelle per centimetro cubo, varia fra 17 e 170 km/s e quindi nella corona ci sono le condizioni perché questo meccanismo di trasporto dell'energia possa funzionare.

Quando la velocità termica degli elettroni del plasma è più alta di quella di propagazione delle onde plasma, si può avere sia emissione di radiazione Cerenkov (detta così dal nome del suo scopritore) come pure assorbimento, da parte degli elettroni del plasma, di onde prodotte esternamente. La presenza di deboli campi magnetici e di correnti elettriche in moto a velocità superiori a quella termica degli elettroni, possono pure produrre emissioni di radiazione Cerenkov intensa. Sciami di particelle cariche e in moto a 50.000 km/s costituirebbero appunto correnti a velocità circa 10 volte maggiori di quella di agitazione termica degli elettroni coronali.

Sebbene i meccanismi per spiegare le radioemissioni del Sole perturbato non manchino, non è facile capire quali di essi siano effettivamente dominanti durante i vari tipi di fenomeni.

Le tempeste di rumore e le esplosioni di tipo I sono certamente dovute a emissioni di origine non termica, dato che il gas dovrebbe avere temperature comprese fra uno e 100 miliardi di gradi per spiegarne l'intensità. Sono stati proposti vari meccanismi; per esempio radiazione sincrotrone da elettroni ruotanti nel campo magnetico in orbite quasi circolari, radiazioni Cerenkov, e onde magnetoidrodinamiche e processi di radiazione del plasma. Ma nessuno spiega soddisfacentemente tutte le particolarità osservate.

L'agente eccitante le esplosioni di tipo III è molto probabilmente costituito da un fascio di elettroni in moto nella corona a velocità paragonabili a quelle della luce, prodotti nel corso di un brillamento. Essi

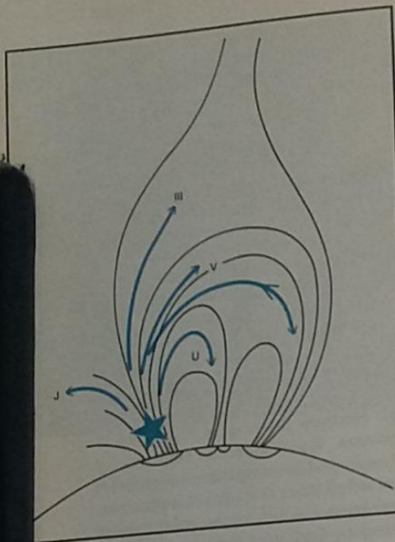


Fig. 3.12 Rappresentazione schematica dei cammini coronali dei vari tipi di esplosioni rapide e delle corrispondenti strutture del campo magnetico.

eccitano il plasma locale alla sua frequenza critica (che è proporzionale alla radice della densità elettronica); parte delle onde di plasma si trasformano in onde elettromagnetiche che si propagano attraverso lo spazio interplanetario raggiungendo l'osservatore (Fig. 3.12). Anche le esplosioni di tipo V hanno probabilmente la stessa origine, ma vengono piegate e intrappolate lungo ampi archi magnetici che spiegherebbero le maggiori dimensioni generalmente osservate per questo tipo di emissioni.

Le esplosioni di tipo II sono sempre associate a forti brillamenti e quindi anche a tutti quei fenomeni che li accompagnano e che sono le protuberanze eruttive, le esplosioni di tipo IV e l'improvviso inizio di una tempesta geomagnetica. Alle condizioni di densità e temperatura coronali (circa 100 milioni o meno elettroni per cm^3 e un milione di gradi), la velocità del suono è di circa 120 km/s, la velocità di Alfvén di un 200 km/s o poco più, mentre la velocità di agitazione termica degli elettroni è di circa 5000 km/s. Poiché la velocità di spostamento delle esplosioni di tipo II nella corona è compresa fra 500 e 3000 km/s si possono sviluppare sia onde d'urto che onde magnetoidrodinamiche, come pure radiazione Ce-

renkov. Sono le prime che eccitano il plasma e provocano le seconde, le quali a loro volta si trasformano in parte in onde elettromagnetiche.

Le esplosioni di tipo IV, suddivise a loro volta in stazionarie e in moto, si accompagnano ai tipi II e sono probabilmente spiegabili come dovute a radiazione sincrotrone.

La struttura fina delle emissioni solari, di cui sono un esempio le oscillazioni con periodi di pochi secondi o di pochi minuti, a seconda della lunghezza d'onda, da un lato richiedono spiegazioni fisiche molto particolari e accurate, ma dall'altro, offrono l'opportunità di un controllo dell'interpretazione stessa, perché solo quella giusta può riprodurre tutti i particolari. Sono state proposte due spiegazioni principali: una che si basa sulla variazione periodica (modulazione) dei parametri che caratterizzano il plasma, e cioè densità elettronica, temperatura elettronica e campo magnetico, che di conseguenza modulerebbero anche l'emissione del plasma stesso; l'altra basata sull'espulsione di fasci di particelle che ecciterebbero il plasma in modo simile a quello che si verifica per le esplosioni di tipo III.

In conclusione oggi le osservazioni sono sempre più numerose e accurate; la risoluzione temporale, spaziale e spettrale è sempre più alta e quindi i vincoli a cui deve sottostare una teoria per essere accettabile diventano sempre più ristretti. E difatti non esiste ancora una teoria capace di spiegare in un unico quadro unitario tutti i complessi fenomeni che caratterizzano l'attività solare.