

PAOLO MAFFEI

AL DI LÀ DELLA LUNA

MONDADORI

Paolo Maffei



AL DI LÀ DELLA LUNA



Biblioteca della EST
EDIZIONI SCIENTIFICHE E TECNICHE
MONDADORI

Biblioteca
della EST

Paolo Maffei

**AL DI LÀ
DELLA LUNA**



Biblioteca della EST
EDIZIONI SCIENTIFICHE E TECNICHE
MONDADORI



Biblioteca
della EST

Direttore editoriale
EDGARDO MACORINI

Redattore
ROSSANA ROSSI
con la collaborazione di
TULLIO CHERSI

Copertina
ENRICO GENOVESI

Impaginazione
BRUNO PAGLIA

ISSN 0303-2752

In copertina:
Nebulosa del Granchio
(foto California Inst. of Technology, Carnegie Inst.)

Prima edizione: febbraio 1973
Seconda edizione: giugno 1973
Terza edizione: marzo 1974
Quarta edizione: novembre 1974
Quinta edizione: gennaio 1976
Sesta edizione: giugno 1977
Settima edizione: giugno 1980
Ottava edizione: giugno 1982
Nona edizione: ottobre 1984

© 1973 by Arnoldo Mondadori Editore, S.p.A., Milano

Indice

PREMESSA	7
I DALLA LUNA AL SOLE	11
L'energia del Sole, 12 - L'aspetto del Sole, 14 - Nell'interno del Sole, 30 - La fucina degli elementi, 33 - Cos'è il Sole, 39.	
II NEL SISTEMA SOLARE	42
I pianeti vicino al Sole, 42 - I pianetini, 71 - I pianeti giganteschi, 76 - Il pianeta più lontano, 84 - I satelliti, 88 - Le comete, 90.	
III LE STELLE VICINE	100
La stella più vicina, 100 - Le stelle doppie, 103 - Stelle eccezionali, 108 - I pianeti delle stelle più vicine, 111 - Varietà stellari, 114 - I dintorni del Sole, 123.	
IV STELLE VARIABILI	126
Eclissi di stelle, 126 - Stelle pulsanti, 138 - Esplosioni stellari, 145 - Le supernovae, 149.	
V DOVE NASCONO LE STELLE	161
Le nebulose, 161 - Stelle guizzanti, 168 - La fucina delle stelle, 172 - Due-mila anni fa, 178.	
VI GLI AMMASSI	183
Gruppi di stelle, 183 - Altri gruppi: altre stelle, 188 - Sguardi nel cosmo, 194.	
VII LA GALASSIA	199
Struttura della Galassia, 199 - Tra le stelle, 202 - La Galassia si muove, 208 - Quanto pesa la Galassia, 213 - Il centro della Galassia, 214.	
VIII AL DI LÀ DELLA GALASSIA	222
Le Nubi di Magellano, 222 - Lasciando le Nubi di Magellano e la Galassia, 228 - Galassie nane e galassie compatte, 240.	

XI	TRA LE GALASSIE	247
	Eventi eccezionali, 248 – Gruppi di galassie, 261 – Lo spazio intergalattico, 270.	
X	AI LIMITI DEL TEMPO E DELLO SPAZIO	275
	Le galassie si muovono, 275 – I quasar, 280 – Visione cosmica, 288 – Creazione continua, 293 – La grande esplosione, 296.	
	CONCLUSIONE	301
	APPENDICI	
I	LA DETERMINAZIONE DELLE DISTANZE DELLE STELLE	307
II	SCOPERTA, NOMENCLATURA E DISTRIBUZIONE DELLE STELLE VARIABILI	311
III	ATLANTI E CATALOGHI CELESTI	316
IV	LE GALASSIE MAFFEI	320
V	LA VITA NELL'UNIVERSO	330
	INDICE ANALITICO	335
	INDICE DEI NOMI	340

Premessa

L'idea di scrivere questo libro venne in mente all'autore, subito dopo l'impresa di Apollo 11, sotto l'influenza di due impressioni essenziali, nette e contrastanti. Da una parte che l'uomo moderno medio ha già acquistato una specie di "coscienza spaziale", valutando l'importanza dello sbarco sulla Luna e rivedendo la sua vita e i suoi problemi in una luce nuova, che sarà quella del prossimo futuro. Dall'altra che a questa sensibilità diffusa, acquisita nei modi più disparati (attraverso i film e i fumetti di fantascienza o la visione della Terra fotografata dalla Luna, attraverso gli slogan giornalistici o la memorabile trasmissione televisiva del 21 luglio 1969) corrisponde una scarsissima conoscenza astronomica, che genera concetti e idee completamente errati.

Per questo c'è chi crede che la scienza abbia distrutto la fantascienza e che ormai non ci sia più margine per la fantasia e per il senso del mistero; c'è chi ritiene che l'uomo abbia fatto materialmente un grande balzo nello spazio e che, anche se non ha raggiunto oggi i confini dell'universo, per lo meno si è spinto molto lontano e, presto o tardi, completerà il resto del percorso.

Niente di più falso di queste e di tante altre idee che attribuiscono alle spedizioni dell'uomo sulla Luna e ad altre più recenti imprese spaziali, un valore ed un significato completamente diversi da quelli che hanno.

Per vederli nella loro giusta luce non c'è altro da fare che rendersi conto di ciò che c'è al di là della Luna.

Queste pagine hanno appunto lo scopo di offrire una visione del cosmo a tutti quegli uomini moderni e proiettati verso il futuro che non hanno avuto la sorte di dedicarsi alle ricerche astronomiche.

Questo scritto non è un trattato di Astronomia, anche se ne contiene molte informazioni, ma il resoconto di un viaggio nello spazio. Un viaggio che

parte dalla Luna (non più considerata come un oggetto astronomico) e si svolge fino alle più grandi distanze accessibili all'esplorazione e al pensiero. La conoscenza dell'universo avviene attraverso quella degli oggetti più significativi che lo compongono e che s'incontrano, generalmente, a distanze sempre più grandi dalla Terra. La misura dei tempi e degli spazi viene data soprattutto da come si vedono la Terra e il Sole da distanze sempre più grandi e da come essi, a un certo punto, spariscono, dispersi nell'enorme varietà di tutti gli altri corpi celesti. La varietà della natura al di là del sistema Terra-Luna, insospettabile per un profano, viene mostrata descrivendo rapidamente alcuni dei panorami che si possono scorgere in questo viaggio: altrettante porte aperte alla meditazione e alla fantasia.

Questa forma è stata adottata perché il lettore penetrasse nell'essenza della moderna astronomia e ne conoscesse i risultati più significativi, senza essere distratto e stancato dai metodi che hanno permesso di raggiungerli. Alcuni di questi, unitamente a qualche argomento particolarmente recente o ancora controverso, sono stati esposti in alcune appendici, che possono essere lette anche dopo aver ultimato la lettura del testo, non essendo necessarie per la sua comprensione, esclusa l'appendice I dove, tra l'altro, si chiarisce la terminologia relativa alle distanze usata poi nel resto del testo, che può essere letta dopo il capitolo III.

Il libro è stato aggiornato il più possibile sia nei dati che nella parte iconografica, in modo che il tutto risulti piacevole e utile per la persona colta non specializzata, pur restando accessibile anche a chi, pur non avendo avuto la possibilità o il desiderio di continuare a studiare, non per questo perde il diritto di essere pienamente un uomo del suo tempo, un uomo moderno che, insieme a milioni di suoi simili, costruisce il futuro dell'umanità e sente la necessità di vedere come si inserisce in un contesto più vasto la sua stessa opera.

PAOLO MAFFEI

AL DI LÀ DELLA LUNA

I

Dalla Luna al Sole

Siamo sulla Luna. L'abbiamo raggiunta con un viaggio di quattro giorni dopo aver abbandonato quel meraviglioso globo multicolore che ora vediamo sospeso, immobile, in un cielo nerissimo. Quella sfera che ci sembra tanto grande anche dalla distanza di quattrocentomila chilometri è il mondo sul quale abbiamo lasciato tutto ciò che avevamo conosciuto finora attraverso l'esperienza diretta o un'indiretta partecipazione storica e geografica.

È tutto là: panorami incantevoli e fenomeni terrificanti; serene notti d'estate e fresche mattinate primaverili; cicloni, terremoti, guerre; millenni di storia, civiltà fiorenti e resti, ancora imponenti, di civiltà passate; un ricchissimo patrimonio di scienza, di arte, di religione, di pensiero; centinaia di miliardi di esseri viventi, tra i quali alcuni miliardi simili a noi, che si stanno aggirando su quella superficie col loro carico di gioie, di dolori, di speranze.

È veramente una sfera immensa: la sua circonferenza misura quarantamila chilometri, il suo peso in tonnellate si esprime con un 6 seguito da ventuno zeri. Eppure, questa sfera enorme e pesantissima si muove nello spazio alla velocità di centomila chilometri all'ora: mille volte più velocemente di quando percorriamo l'autostrada con la nostra vettura lanciata a 100 chilometri all'ora¹. Quella sfera è il nostro mondo: il mondo dell'uomo che l'uomo ha cominciato ad abbandonare per raggiungere il corpo celeste più vicino, la Luna.

L'impresa del 21 luglio 1969 è stata l'esaltante trionfo delle conoscenze

¹ Tenendo presente che una tartaruga percorre in un'ora circa 100 m, ne segue che la nostra velocità sull'autostrada, confrontata con quella della Terra nello spazio, corrisponde a quella di una tartaruga.

scientifiche di pochi accumulate nei secoli, dello sforzo tecnologico collettivo di oggi e del coraggio individuale degli ardimentosi di sempre. Essa ha aperto una nuova via, quella che con slogan giornalistico tutti chiamano ormai la via del cosmo. Ma come avviene per tutte le strade, quando ci si avvia non si riesce a scorgere la fine, anche perché sono ben poche quelle che conducono a una sola meta. Così non è facile prevedere oggi quanta parte della via del cosmo potrà essere percorsa dall'uomo, in quanto tempo, a quale prezzo e, soprattutto, è quasi impossibile intuire fin da ora dove si potrà arrivare. Ma è destino dell'uomo essere continuamente sospinto dal desiderio di conoscenza e dallo spirito d'avventura che, prima ancora di trascinare materialmente, eccita e travolge il pensiero. Per questo, fin da ora, vogliamo prevedere e preparare quei momenti che vivranno altre generazioni. Più ancora: vogliamo, prima di tutto, sapere cosa c'è oltre il nostro satellite che ormai conosciamo meglio della Terra, a distanze sempre maggiori, fino a quei limiti che erano stati intravisti già prima di uscire dalla Terra e che col progredire delle nostre conoscenze si spostano sempre più lontano.

Lasciemo dunque anche la Luna e, con la più fantastica e avventurosa esplorazione che l'uomo possa intraprendere, ci inoltreremo nello spazio alla ricerca di ciò che ci attende al di là delle sue squallide rocce. Conosceremo corpi che forse un giorno potranno essere raggiunti dall'uomo e altri che, per la loro natura o per la distanza, l'uomo non potrà mai toccare. Giungeremo fin dove potrà arrivare a imprimersi l'orma umana e oltre: dove, fin da ora, può spingersi lo sguardo o arrivare il pensiero. E quando termineremo questo viaggio, avremo una visione ben più chiara di cosa rappresenta per l'umanità la conquista della Luna, di cosa siamo nell'universo, di cosa potremo divenire.

Dovendoci spostare realmente nello spazio e raggiungere un corpo celeste sul quale sia possibile atterrare, dovremmo scegliere, come prima tappa del nostro viaggio, un pianeta vicino, come Venere o Marte. Ma la nostra esplorazione non è soggetta a questo genere di limitazioni fisiche e possiamo, quindi, indirizzarci subito verso quel corpo celeste che è più logico esplorare per primo. È il corpo intorno al quale la Terra e la Luna si muovono continuamente, compiendo ogni anno una rivoluzione completa, è la più diretta fonte di energia per ogni nostra attività, è l'astro che con la luce e il calore ci dispensa la vita: è il Sole.

L'ENERGIA DEL SOLE

Dalla Terra, sulla quale siamo protetti dall'atmosfera, vi sono particolari circostanze in cui il Sole può essere guardato anche dall'occhio disarmato, per esempio in una giornata di nebbia, al sorgere o al tramontare. Dalla

Luna, invece, fissarlo direttamente è impossibile. Dominando un cielo nero e stellato, esso riversa in pieno su ogni cosa tutta la sua energia sotto forma di luce, di calore o di qualsiasi altro tipo di radiazione, che giunge interamente, senza essere ridotta o alterata da un qualche mezzo assorbente. Sulla Luna, dunque, dove un guasto al condizionamento della tuta dell'astronauta sarebbe sufficiente a farlo morire dal caldo in pochi minuti sotto la sfera del Sole o a fargli fare una fine non meno terribile in una morsa di gelo se il Sole fosse sotto l'orizzonte, l'entità dell'energia che ci giunge dal Sole si manifesta nella forma più brutale ma anche più esplicita.

Questa energia era stata misurata già prima di raggiungere la Luna. Le misure erano state eseguite dalla superficie terrestre e poi, con opportuni calcoli e procedimenti, il valore ottenuto era stato modificato per correggerlo dall'assorbimento atmosferico, in modo da sapere quanta energia proveniente dal Sole investe la Terra al di fuori dell'atmosfera. Il risultato ottenuto è stato impressionante. Un metro quadrato della superficie terrestre riceve dal Sole (supposto allo zenit) una potenza di 1360 W (watt). Tenendo conto dell'atmosfera, la potenza si riduce, in cifra tonda, a 1 kW (kilowatt). Ciò significa che un modesto giardino di 200 m², in una giornata di sole (della durata ad esempio di 10 ore) riceve un'energia di 2000 kWh. Sotto forma di energia elettrica, la stessa quantità di energia costerebbe al proprietario oltre 38 000 lire¹. Alla fine di un anno sono dunque piovuti dal cielo gratuitamente sul suo giardino oltre 14 milioni di lire di energia solare, che egli ha utilizzato solo in minima parte, per i suoi fiori o per prendere un po' di tintarella nel periodo estivo. Se tanta è l'energia che investe un modestissimo appezzamento di terreno, possiamo bene immaginare quanto grande dovrà essere quella raccolta da tutta la superficie terrestre. La cosa non deve meravigliarci troppo se pensiamo che quasi tutta l'energia che usiamo quotidianamente non è altro che energia solare trasformata. L'energia elettrica viene normalmente prodotta da turbine mosse dall'acqua che cade entro condotte forzate, ma è il Sole che compie continuamente il lavoro di riportare quell'acqua dal livello del mare all'altezza dalla quale precipita poi sotto forma di pioggia o di neve. Il carbone o la legna che bruciano restituiscono l'energia solare che avevano immagazzinato milioni di anni orsono o appena qualche anno fa. L'energia che ricaviamo dal vento o dalle correnti marine, quella contenuta nei nostri cibi, il nostro stesso lavoro muscolare, il lavoro intellettuale che compiamo in questo stesso momento nel seguire questo ragionamento, hanno origine soprattutto dall'energia solare.

Oggi l'uomo ha cominciato a utilizzare un'altra fonte di energia, com-

¹ Al prezzo attuale (1977), imposte escluse.

pletamente indipendente dal Sole, dal cui uso dipende certamente l'avvenire dell'umanità: l'energia atomica. Tuttavia essa è usata, per ora, solo in minima parte. Il resto proviene ancora dal Sole ed è uno di quei beni gratuiti, come l'aria e l'acqua, dei quali non riusciamo ad apprezzare l'immenso valore per il solo fatto che ci sono indispensabili e che senza di essi non saremmo mai esistiti.

Il fatto che quasi tutta l'energia usata sul nostro pianeta è di origine solare non deve trarre in inganno sulla quantità annualmente ricevuta dalla Terra che è ventimila miliardi di volte più grande. Ma non è su questo punto che ci fermeremo; non solo perché non è troppo edificante, rendendoci conto di quanto siamo sciuponi, ma anche perché, dal risultato che abbiamo ottenuto, possiamo giungere a una scoperta ben più interessante: possiamo scoprire quanta energia irradia nello spazio il Sole.

Infatti abbiamo visto che alla distanza della Terra giunge dal Sole una potenza di 1360 W/m^2 . Siccome il Sole emette energia in tutte le direzioni, la stessa potenza ricevuta da 1 m^2 della Terra investirà anche tutti i metri quadrati di una superficie ideale che ha per centro il Sole e per raggio la distanza dal Sole alla Terra. Questa distanza è conosciuta ed è uguale a $149\,600\,000 \text{ km}$. Basta dunque ricavare, in metri quadrati, il valore della superficie di una sfera avente questo raggio e moltiplicare il risultato per 1360, per ottenere la potenza di tutto il Sole in watt. Il valore che ne è risultato è stato di 380 000 miliardi di miliardi di kilowatt. Traducendo questo valore così alto in una forma più accessibile alla nostra fantasia, diremo che il Sole emette in un solo secondo più energia di quanta ne abbia consumata l'umanità in tutta la sua storia.

Essendo conosciuta la superficie totale del Sole, basterà dividere la potenza totale per questo valore espresso in centimetri, per ottenere quella di un centimetro quadrato della superficie solare. Ne risulta una potenza di 6,2 kW. Dunque una parte di superficie solare grande come un francobollo, cioè 5 cm^2 , emette più energia di cinquecento lampade da 60 W, una sola delle quali illumina normalmente una stanza di medie dimensioni.

Conoscendo l'energia emessa per unità di superficie, una legge fisica (detta di Stefan) permette di risalire, sotto particolari condizioni, alla temperatura. Si trova, così, che la temperatura superficiale del Sole è di 5750 K (kelvin o gradi assoluti), di gran lunga superiore a quelle che è possibile incontrare normalmente sulla Terra.

L'ASPETTO DEL SOLE

Dalla distanza e dalle dimensioni apparenti del Sole si può ricavare anche la sua grandezza reale e, con un metodo sul quale non insistiamo, quanto pesa. È risultato che il Sole ha un diametro di $1\,392\,000 \text{ km}$, corrispondente

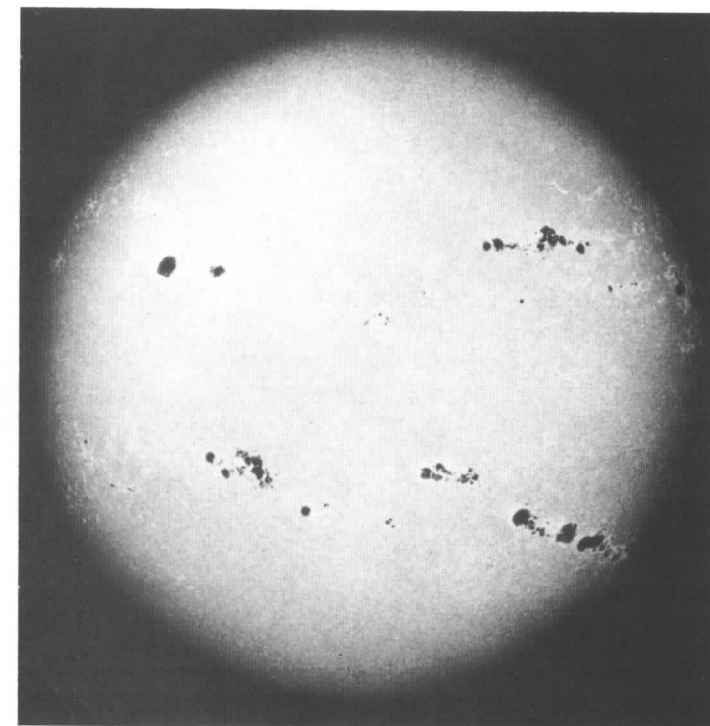


Fig.1 Il disco solare osservato al telescopio. Il bordo appare sfumato e meno luminoso per il diverso grado d'assorbimento dei gas sovrastanti. Sono visibili anche la granulazione e diverse macchie, isolate o a gruppi (Mount Wilson and Palomar Observatories).

a più di tre volte la distanza dalla Terra alla Luna. Il valore della massa, in tonnellate, è 199 seguito da ventinove zeri. Per la nostra fantasia è più comprensibile dire che il Sole pesa quanto 322 270 pianeti come la Terra.

Già da questo primo contatto risulta, dunque, che il Sole è un corpo immenso, dal quale si libera continuamente un'enorme quantità di energia.

Sulla Terra i luoghi in cui si produce energia sono caratterizzati, quasi sempre, da eventi violenti. Basterebbe ricordare i terremoti, le eruzioni vulcaniche, i cicloni o anche semplicemente il fuoco del nostro caminetto o l'acqua che bolle in una pentola, che devono apparire di una grandiosità terrificante agli occhi di un moscerino. Non diversamente si svolgono le cose sul Sole. Il disco perfettamente omogeneo, a contorno ben definito, senza tracce di perturbazioni, che vediamo a occhio nudo, è solo un'apparenza dovuta alla distanza e all'insufficienza della nostra vista. Ben diverso si rivela, invece, l'aspetto dell'astro all'osservazione strumentale.

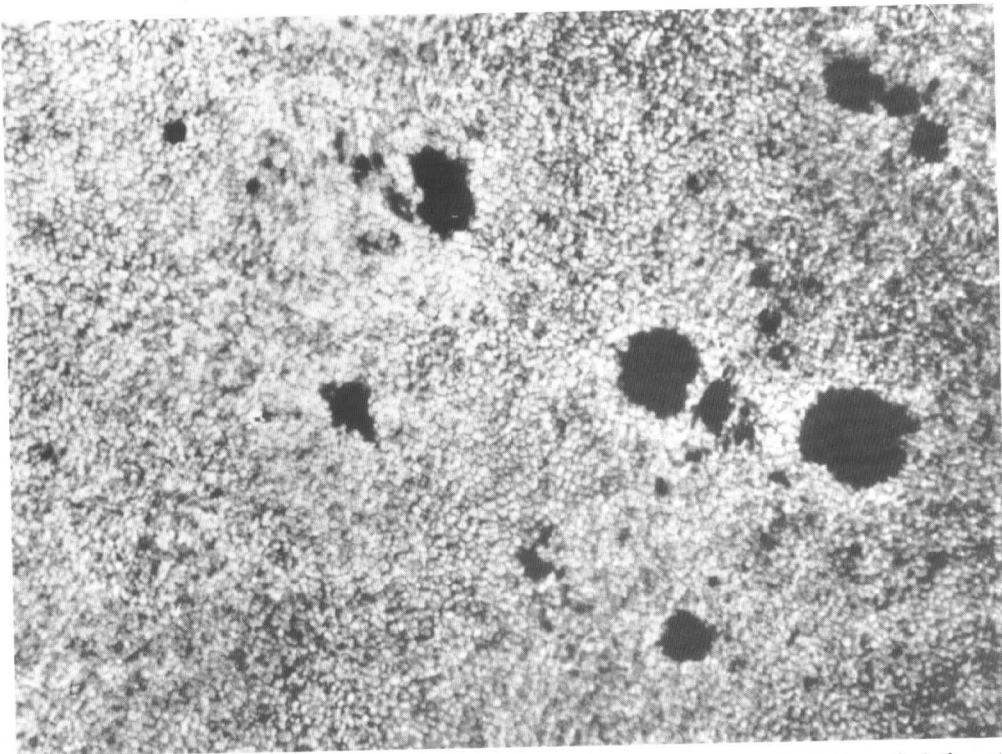


Fig. 2 La granulazione solare, in un'eccezionale fotografia ad alto potere risolutivo ottenuta da Janssen il 5 luglio 1885; sono anche visibili alcuni pori (*Observatoire de Meudon*).

Cominciamo con l'esaminare quella parte del Sole che vediamo sia a occhio nudo sia attraverso un normale telescopio, chiamata fotosfera. Osservandola con un buon cannocchiale si nota che non appare omogenea, ma formata da una miriade di grani brillanti, sparsi su un fondo più scuro (FIG. 1). Secondo Rösch il numero totale di questi granuli è di tre milioni e mezzo. Il singolo grano, che ha in media un diametro di un migliaio di chilometri, non è una configurazione stabile ma ha, anzi, una vita breve, poiché compare, brilla e scompare nel giro di pochi minuti. Spesso lo spazio tra un gruppo di granuli è più largo del normale, per la mancanza di alcuni di essi, e nel reticolo granuloso viene a formarsi una lacuna oscura, rotondeggiante, chiamata poro (FIG. 2). I pori resistono più a lungo dei granuli, forse più di un'ora.

Secondo l'interpretazione corrente i granuli non sono altro che la parte terminale di enormi colonne di gas che, alla velocità di circa un kilometro

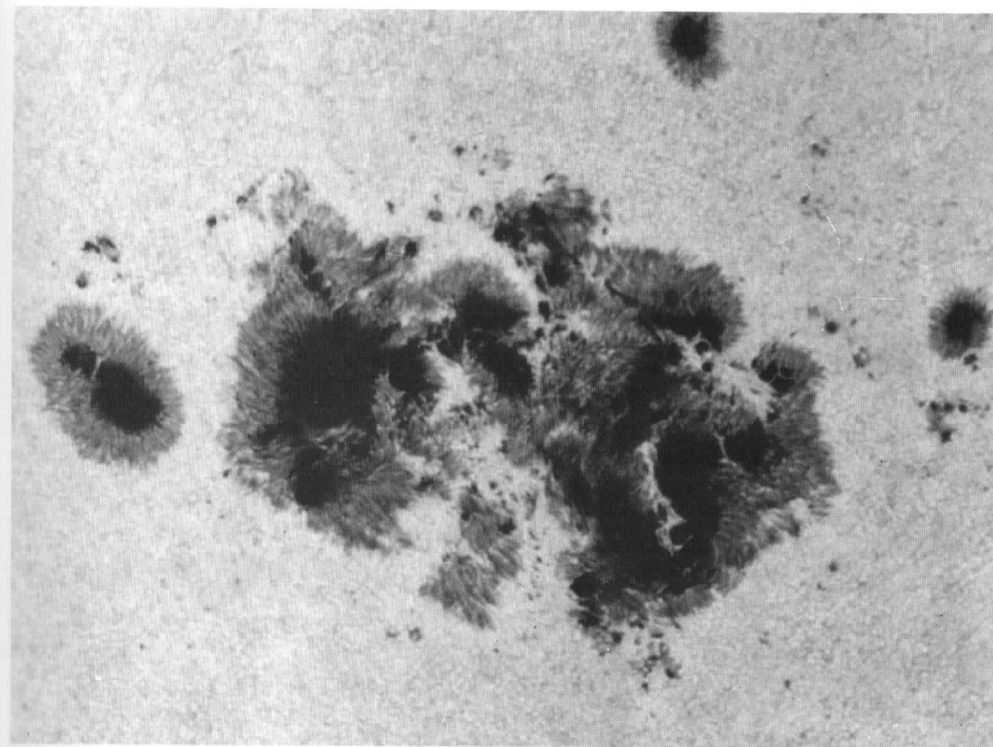


Fig. 3 Un notevole gruppo di macchie solari, esteso e intricato, fotografato all'osservatorio di Mount Wilson il 17 maggio 1951 (*Mount Wilson and Palomar Observatories*).

al secondo, salgono continuamente dalle zone più basse della fotosfera ai livelli più alti, che noi vediamo dall'alto e quindi non secondo l'altezza della colonna ma secondo la sua sezione. Quando un intero gruppo di granuli vicini viene a mancare, al suo posto si osserva il fondo più scuro e appare un poro.

Talvolta, però, vengono a essere perturbate zone estesissime della fotosfera, i granuli spariscono e al loro posto appaiono zone scure, a struttura complicata, circondate da una parte meno scura e attraversate, talvolta, da filamenti brillanti. Sono le famose macchie solari (FIG. 3) che possono essere talmente grandi da divenire visibili anche ad occhio nudo. La zona centrale, più scura, viene chiamata ombra, quella marginale penombra. Osservazioni ad alto potere risolutivo mostrano che la penombra ha una struttura raggiata, cioè composta da un numero enorme di filamenti del diametro medio di 300 km e della lunghezza di circa 5000 km,

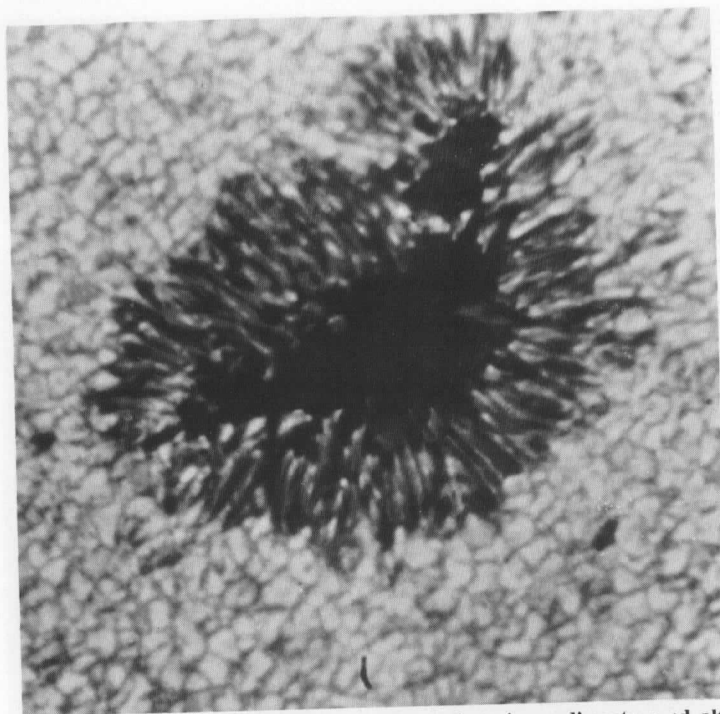


Fig.4 Una macchia solare a forte ingrandimento e ad alta risoluzione: si noti in particolare la struttura raggiata della penombra. Questa fotografia è stata ottenuta, nell'ambito delle osservazioni *Stratoscope*, mediante un telescopio trasportato da un pallone al di sopra degli strati più densi dell'atmosfera terrestre (*Harvard College Observatory*).

puntati verso il centro dell'ombra (FIG. 4). Anche questi filamenti si formano e si dissolvono continuamente, poiché ognuno di essi dura, in media, non più di tre quarti d'ora.

Da elementi così irrequieti non può nascere certamente qualcosa di stabile. Infatti anche le macchie subiscono continue variazioni. Una macchia si forma dall'unione di più pori, s'ingrandisce, si moltiplica, diviene un gruppo costituito da alcune macchie maggiori circondate da una miriade di altre più piccole, poi, a poco a poco, si richiude e svanisce; e quella parte della superficie solare torna a non presentarne più la minima traccia, esattamente come era prima che la macchia si formasse.

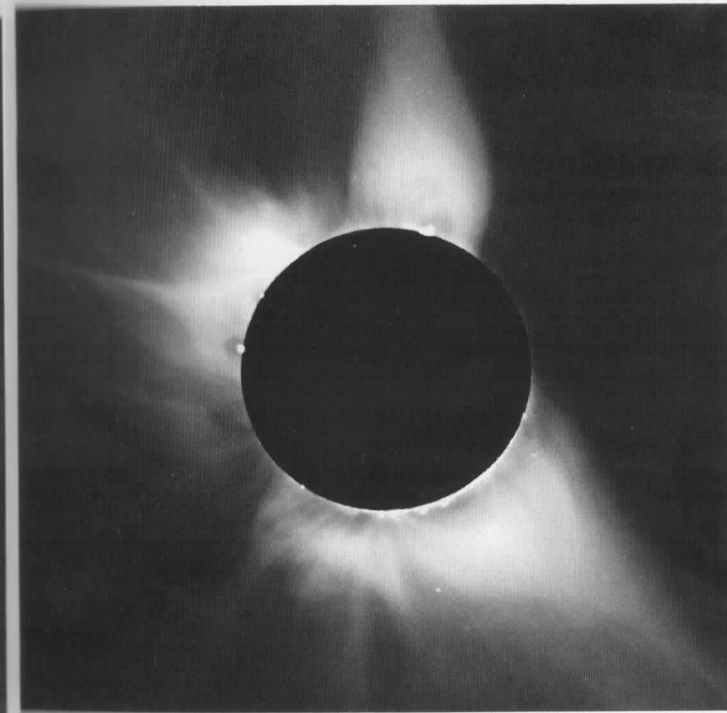
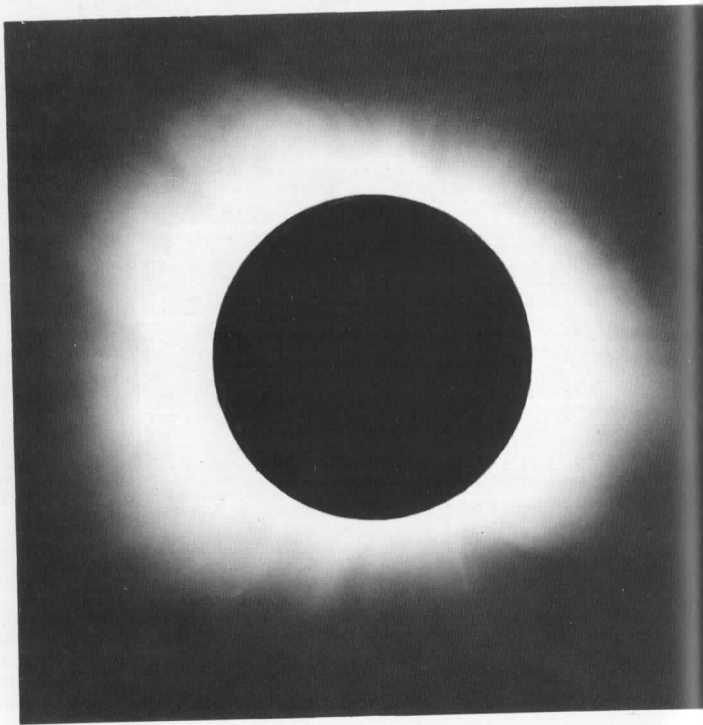
Le dimensioni delle macchie vanno da poche migliaia di chilometri a oltre centomila chilometri; alcuni gruppi sono tanto grandi che potrebbero contenere diversi pianeti delle dimensioni della Terra. La loro durata è estremamente variabile e può andare da meno di un giorno a oltre tre mesi.



Fig.5 Rotazione del disco solare ed evoluzione delle macchie (*Mount Wilson and Palomar Observatories*).

Osservando quotidianamente un gruppo di macchie, si nota che esso appare spostarsi sul disco del Sole (FIG. 5). Si scoprì così, fin dalle prime osservazioni agli inizi del XVII secolo, che il Sole ruota su sé stesso con un periodo di quasi un mese. Osservando macchie a diverse latitudini, si scoprì anche che la velocità di rotazione non è la stessa: un punto sulla superficie solare all'equatore compie una rotazione completa in 25 giorni, mentre uno alla latitudine di 40° ne impiega 27. Ciò significa che il Sole non è una sfera rigida.

Ma c'è di più. Il Sole non è neppure una sfera a contorno ben definito, come appare a occhio nudo o al cannocchiale. È piuttosto un'enorme quantità di materia disposta con simmetria sferica e sfumante verso l'esterno in gas sempre più rarefatti che, a grandi distanze dal centro, non si dispongono più neppure secondo una simmetria sferica. La fotosfera, dunque, non è una superficie ben definita come il suolo terrestre, ma una zona gassosa di un certo spessore (come d'altronde ci era già stato rivelato dalla natura dei granuli) e il gas si estende non solo al di sotto di essa ma anche al di sopra, cioè verso di noi, anche se, normalmente, non riusciamo a vederlo. Come



mai, allora, essa ci appare così ben definita? Cercheremo di trovare la risposta attraverso una semplice esperienza. Prendiamo un foglio di cellophane, come quello usato per confezionare i mazzi di fiori. Esso appare trasparentissimo. Pieghiamolo ora in due, poi in quattro, e così via, in modo da raddoppiare ogni volta lo spessore. La combinazione di tutti questi fogli diverrà sempre meno trasparente e a un certo punto vedremo addirittura comparire uno strato lucido, d'aspetto ben definito, al di là del quale non riusciremo a vedere niente, come se avessimo infilato in mezzo al cellophane una lama d'acciaio. Naturalmente la lama non c'è ma l'effetto è stato ugualmente raggiunto accumulando tanti fogli ognuno dei quali non era, come ci era sembrato, completamente trasparente.

Così avviene per il Sole. L'accumularsi di tanti strati gassosi non completamente trasparenti crea, a un certo punto, una barriera opaca al di là della quale l'occhio non riesce a penetrare. Questa è la fotosfera. Ma come al di sopra della lama d'acciaio, apparentemente inseritasi nel cellophane, vi sono diversi foglietti (quelli che, pur contribuendo a intercettare individualmente una piccola frazione della luce, da soli non sarebbero

Fig.6 Due aspetti della corona solare: nella pagina a fronte la zona più interna, fotografata in occasione dell'eclisse dell'8 giugno 1918; qui a fianco quella più esterna fotografata durante l'eclisse del 12 novembre 1966 (Harvard College Observatory; High Altitude Observatory, Boulder).

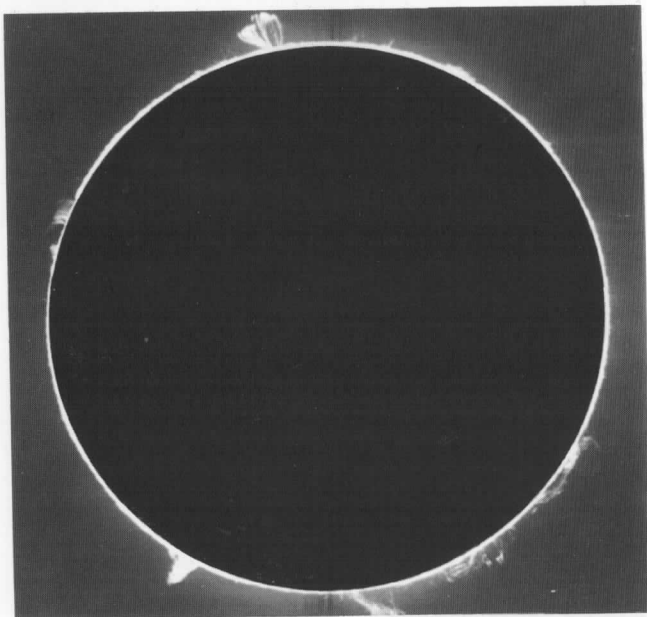


Fig.7 Fotografia della cromosfera solare e di alcune protuberanze, alte circa 100 000 km, ottenuta il 9 dicembre 1929. In questa immagine, dato il basso ingrandimento, non è possibile distinguere la struttura filiforme della 'prateria infuocata' (Mount Wilson and Palomar Obs.).

giunti a creare l'effetto della lama d'acciaio), così al di sopra della fotosfera solare vi sono strati gassosi sempre più trasparenti, sempre più rarefatti, che non ci impediscono di vedere la fotosfera sottostante e restano, essi stessi, invisibili all'osservazione ordinaria. Ben diversamente vanno le cose se si osserva il Sole con strumenti speciali o in particolari momenti.

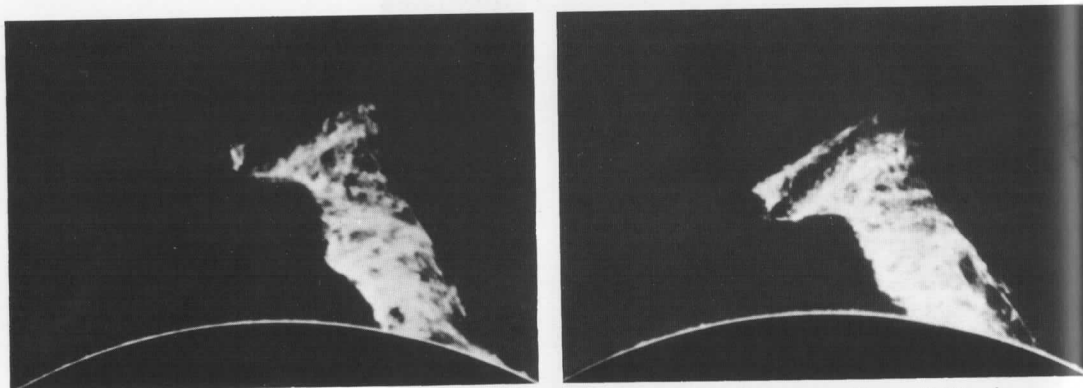
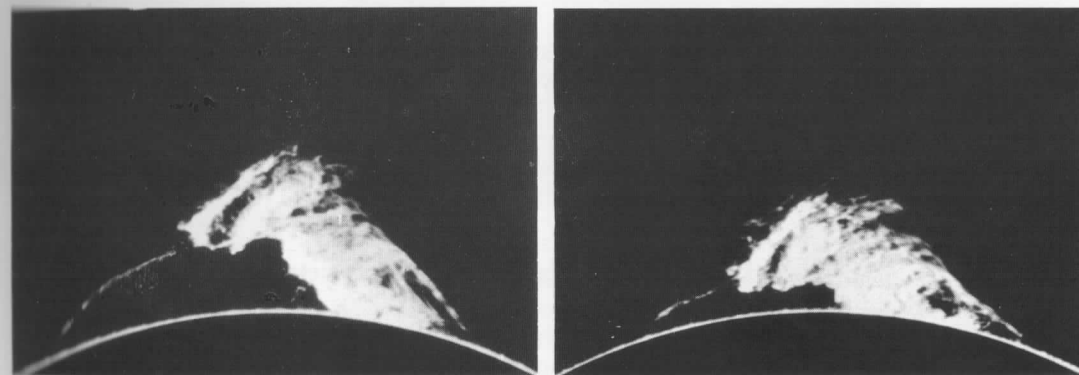


Fig.8 Qui e nella pagina a fronte, evoluzione di una protuberanza nell'arco di 29 min.

Chi ha avuto la fortuna di assistere all'imponente spettacolo di un'eclisse totale di Sole, avrà notato, nei brevi minuti della totalità, una splendida aureola d'argento, intorno al disco nero della Luna, sovrapposto a quello solare. Quell'aureola, sfumata in magnifici pennacchi, che splende come la luna piena e che si spinge fino alla distanza di otto milioni di chilometri dal Sole, è lo strato più esterno dell'atmosfera solare: la corona (FIG. 6, a e b). Essa consiste in un enorme alone di elettroni, più interno, e in una zona formata da piccolissime particelle di polvere, più esterna. L'analisi spettroscopica ha rivelato anche la presenza di diversi elementi fortemente ionizzati, e ciò dimostra che la corona deve avere una temperatura di circa un milione di gradi.

Sempre durante le eclissi totali di Sole, nella parte più bassa della corona, aderente al nero disco della Luna, si nota un altro strato dell'atmosfera solare, invisibile in condizioni normali: la cromosfera (FIG. 7). Questa appare come un sottile arco roseo che, osservato con un cannocchiale a forte ingrandimento, rivela una fitta struttura filiforme, in continua agitazione, come l'erba di un prato mossa dal vento. È questa una specie di 'prateria infuocata', come la chiamò padre Angelo Secchi, in cui i fili d'erba sono lingue d'idrogeno incandescente della lunghezza di circa ottomila chilometri, mosse da forti squilibri termici e dall'azione di campi magnetici.

Spesso in seno alla cromosfera si sviluppano enormi fiammate rosse che s'innalzano per migliaia di chilometri e ricadono, poi, centinaia di chilometri più oltre, formando enormi ponti. Queste fiammate, composte essenzialmente da idrogeno ed elio, sono chiamate protuberanze. Alcune di esse, come quelle a ponte, hanno una durata maggiore e un'evoluzione più lenta. Altre, a carattere eruttivo, si slanciano verso l'esterno del Sole raggiungendo in poche ore delle altezze veramente enormi (FIG. 8). Le più alte sono sta-



Essa è vista mentre ricade sulla superficie solare. Luce della riga H α (Sacramento Peak Obs.).

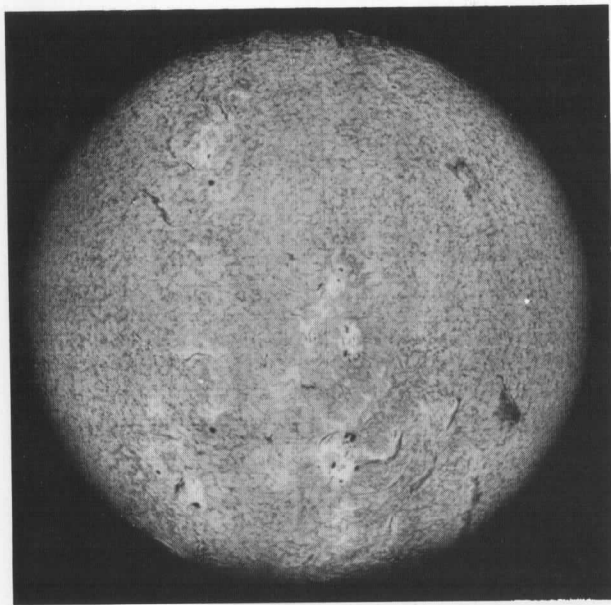


Fig.9 Il disco solare come appare fotografato in corrispondenza della riga $H\alpha$ dell'idrogeno. I filamenti scuri sono protuberanze che si proiettano sul fondo luminoso del disco e la loro sottigliezza rivela che queste enormi fiammate hanno uno scarso spessore (*Mount Wilson and Palomar Observatories*).

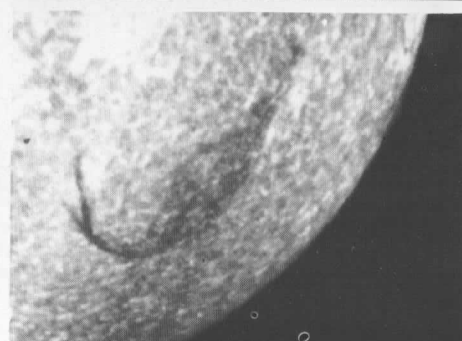
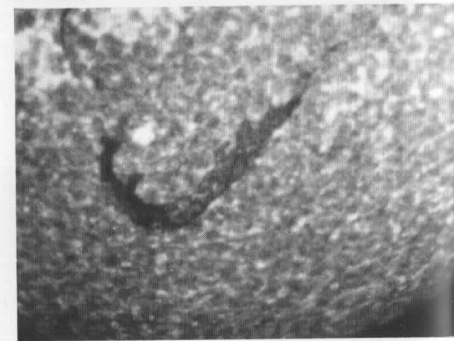
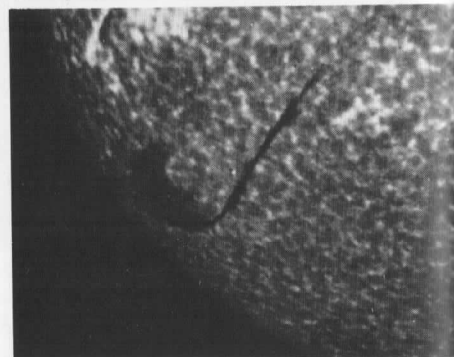
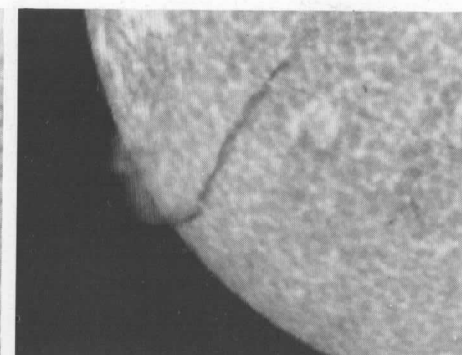
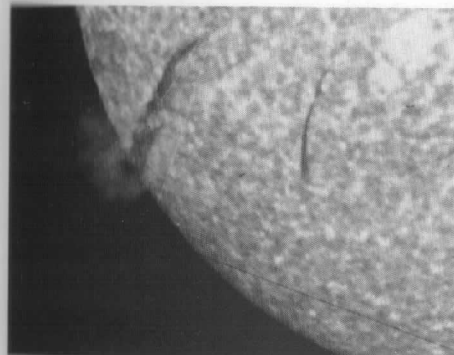
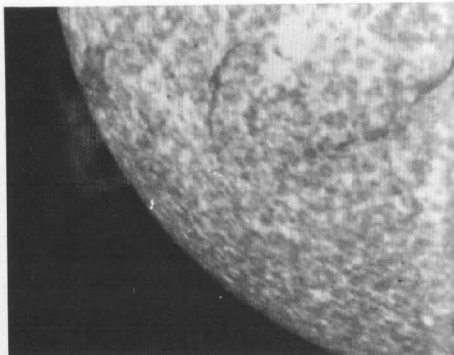


Fig.10 Qui e nella pagina a fronte cambiamento d'aspetto di una protuberanza, che appare trasformarsi in filamento a mano a mano che, a causa della rotazione solare, viene a mostrarsi proiettata sul disco. Si noti anche l'evoluzione della protuberanza-filamento al passare del tempo. La sequenza si legge da sinistra a destra e dall'alto in basso (*Obs. de Meudon*).

te viste spingersi fino a oltre mezzo milione di chilometri al di sopra della cromosfera.

La cromosfera ha uno spessore relativamente modesto, cioè di circa dieci mila chilometri e, come abbiamo detto, è composta prevalentemente di idrogeno. Ma non basta. Abbiamo visto che all'osservazione diretta appare

rossa. Questo perché sia la cromosfera che le protuberanze irradiano luce essenzialmente in corrispondenza della cosiddetta riga $H\alpha$ dell'idrogeno, che è rossa. Se dunque applichiamo al cannocchiale un filtro rosso, che lasci passare soltanto la luce corrispondente alla riga $H\alpha$ dell'idrogeno, tutto il resto della luce proveniente dal Sole sarà come se non esistesse e vedremo

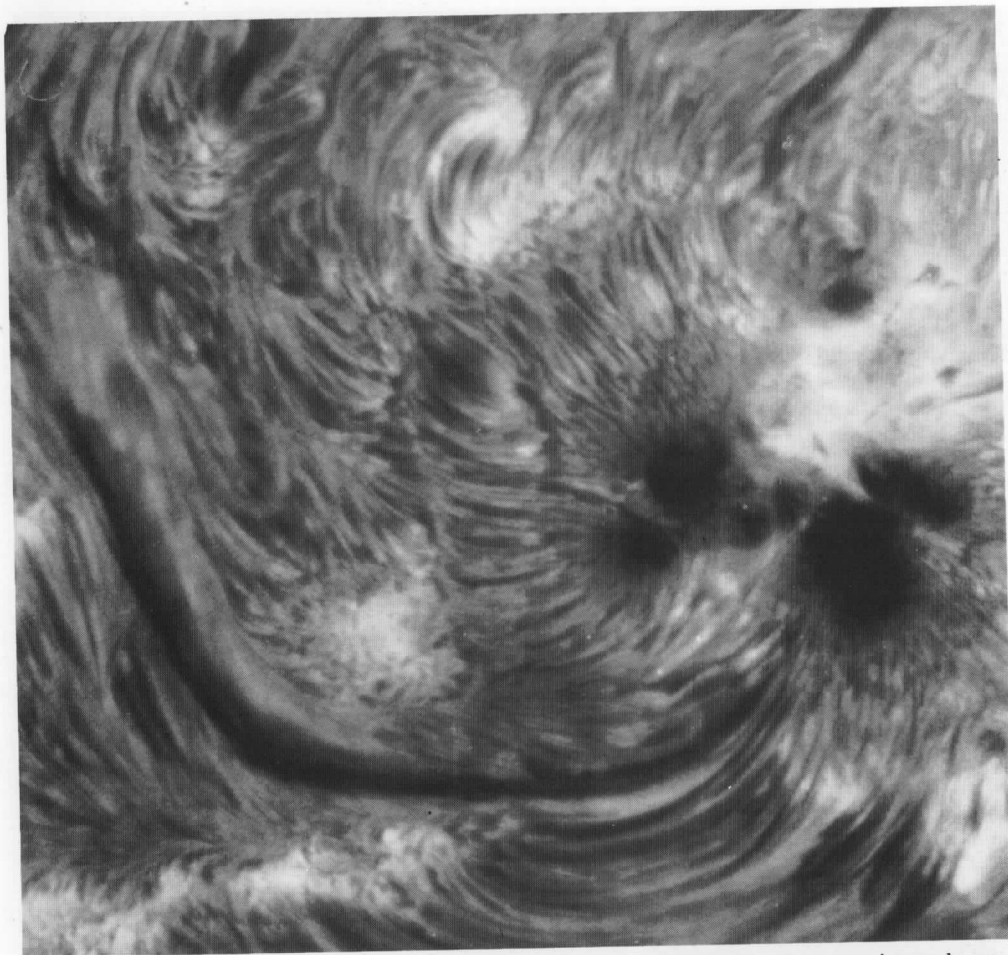


Fig.11 Strutture vorticosse della cromosfera solare in tempesta che suggeriscono la presenza di campi magnetici, rivelati e misurati attraverso le osservazioni spettroscopiche. La fotografia è ripresa nella luce rossa dell'idrogeno $H\alpha$ (Big Bear Solar Observatory).

soltanto la cromosfera (FIG. 9). Così, con questo miracoloso filtro, riusciamo a vedere anche quello strato quasi trasparente e meno luminoso dell'atmosfera solare che la preponderante luce della fotosfera sottostante ci impedisce, normalmente, di osservare¹; e questo non solo al bordo, come

¹ La costruzione dei filtri adatti a questo scopo è stata tutt'altro che facile e si è sviluppata notevolmente solo nell'ultimo decennio.

durante le eclissi totali, ma su tutto il disco e in qualunque momento.

Naturalmente gli stessi fenomeni, proiettati sul disco del Sole, ci appariranno in forma diversa. Per esempio, una protuberanza che vedevamo al bordo come un enorme arco la vedremo ora 'dall'alto' sotto forma di filamento (FIG. 10) e, dalla notevole sottigliezza del filamento, scopriremo che le gigantesche protuberanze, alte decine di migliaia di chilometri e lunghe centinaia di migliaia, hanno uno spessore di appena 6000 km.

Le macchie solari appaiono ridotte alla sola zona d'ombra, ma la struttura della cromosfera a esse sovrastante mostra stranissime configurazioni, disposte come le linee di forza di un campo magnetico (FIG. 11). Infatti è stato scoperto che le macchie solari sono sedi di intensi campi magnetici, che vanno dai 100 Gs (gauss) per alcuni pori ai 4000 Gs per certi grossi gruppi.

Talvolta in una zona perturbata del Sole, sede di macchie o di pro-

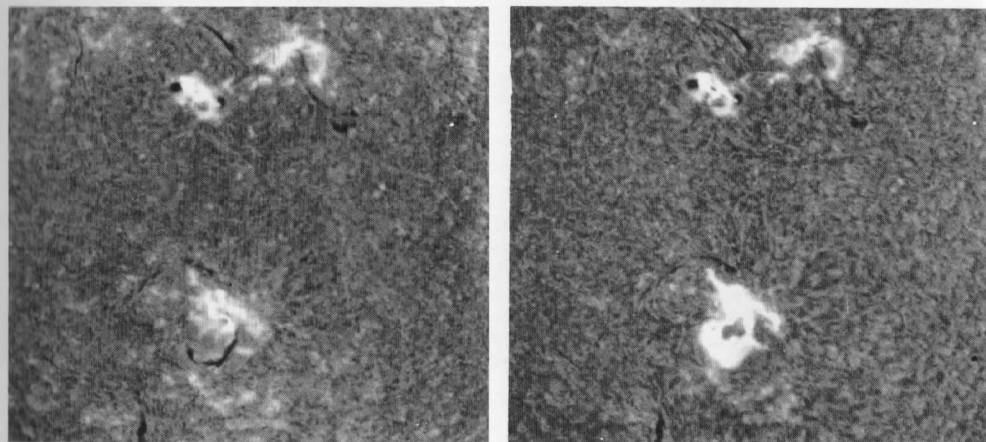


Fig.12 Flare solare fotografato all'osservatorio di Catania il 9 giugno 1968. La foto a sinistra, ottenuta alle 8,25, mostra la zona perturbata nella quale, dopo un quarto d'ora, apparirà il flare; quella a destra, effettuata alle 8,48, mostra il flare già sviluppato. Il fenomeno terminò alle 11,20 (foto G. Godoli).

tuberanze, si manifesta un altro fenomeno improvviso e di breve durata: il *flare* (FIG. 12).

I flare (che in Italia sono chiamati anche brillamenti) sono improvvise vampate di luce, a volte talmente intense da superare lo stesso splendore della fotosfera. In questi casi eccezionali possono essere osservati anche con un normale telescopio, senza cioè ricorrere alla tecnica del filtro di luce, usata per osservare la cromosfera. Lo sviluppo del fenomeno è di

una rapidità impressionante, potendo insorgere e svilupparsi in un tempo brevissimo: una fiammata, un lampo forse, che in pochi minuti si estende su una superficie che può andare da cinquanta milioni a mille milioni di chilometri quadrati. Dopo alcune ore, o addirittura dopo poche decine di minuti, tutto è scomparso. Spesso, però, al primo brillamento ne succedono altri in rapida successione. In alcuni gruppi di macchie, sviluppatasi in tutta la loro pienezza, ne sono stati osservati fino a una cinquantina.



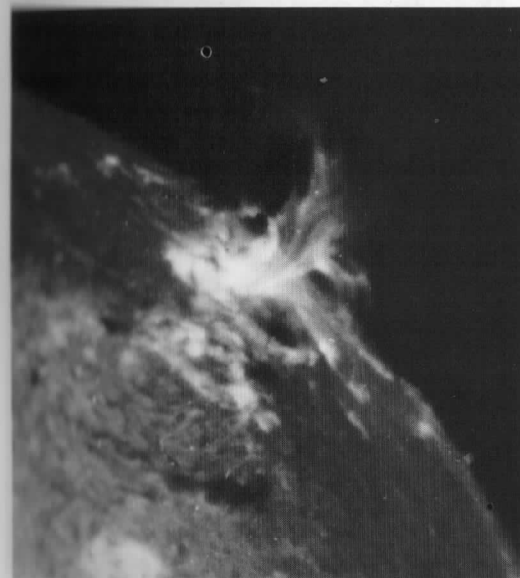
Fig.13 Qui e nella pagina a fronte, in sequenza, espulsione di materia associata a un flare. Le foto sono state riprese in luce rossa dell'idrogeno $H\alpha$ il 15 maggio 1957, rispettivamente alle ore 15,51, 15,56, 16,10. I getti sono ben visibili, poiché il fenomeno, in questo caso, è stato osservato di profilo, verso il bordo del Sole (*Fraunhofer Institut*).

I flare solari vengono regolarmente studiati da una ventina di anni. Solo più recentemente, però, è stata compiuta una scoperta di grande importanza pratica, soprattutto in relazione ai viaggi umani nello spazio. Si è trovato che alcuni di essi producono protoni ad alta energia e raggi cosmici con energia relativistica (FIG. 13). Queste radiazioni e particelle emesse dal Sole, dopo pochi minuti o poche ore investono la Terra e i suoi dintorni.

Il Sole, dunque, non raggiunge la Terra solo con i suoi benefici raggi che portano luce e calore, ma anche con radiazioni mortali che penetrano nello spazio interplanetario, interagendo con la materia in esso sparsa. Per chi abita sulla superficie terrestre non c'è nessun pericolo, perché l'atmosfera costituisce un efficace scudo protettore, ma per gli astronauti in

viaggio nello spazio o sulla Luna, investiti in pieno dalla radiazione primaria emessa direttamente dal flare, il pericolo può diventare mortale. Si ricorderà che ci sono stati momenti di ansia per gli astronauti di Apollo 12, proprio perché nel corso del secondo sbarco sulla Luna si stavano verificando sul Sole alcuni flare protonici.

Ma lasciamo ai biologi lo studio di questo aspetto della questione e torniamo sul Sole per chiederci, prima di tutto, cosa sono i flare. Benché



non si sappia ancora dare una risposta precisa, si può intuire un'interpretazione che, almeno qualitativamente, potrebbe essere quella giusta. Abbiamo visto che le zone in cui si verificano i flare sono sedi di intensi campi magnetici. A noi succede che, strappando di colpo un filo percorso da una corrente elettrica, la brusca interruzione del campo magnetico a essa associato provochi una scarica luminosa abbagliante e brevissima. Può darsi che qualcosa del genere avvenga nei campi magnetici associati alle zone perturbate.

D'altra parte l'esistenza delle macchie stesse, delle protuberanze e di tutti gli altri fenomeni collegati all'attività solare non ha ancora ricevuto una spiegazione completa e soddisfacente.

La stessa attività, nel suo complesso, presenta uno strano comporta-

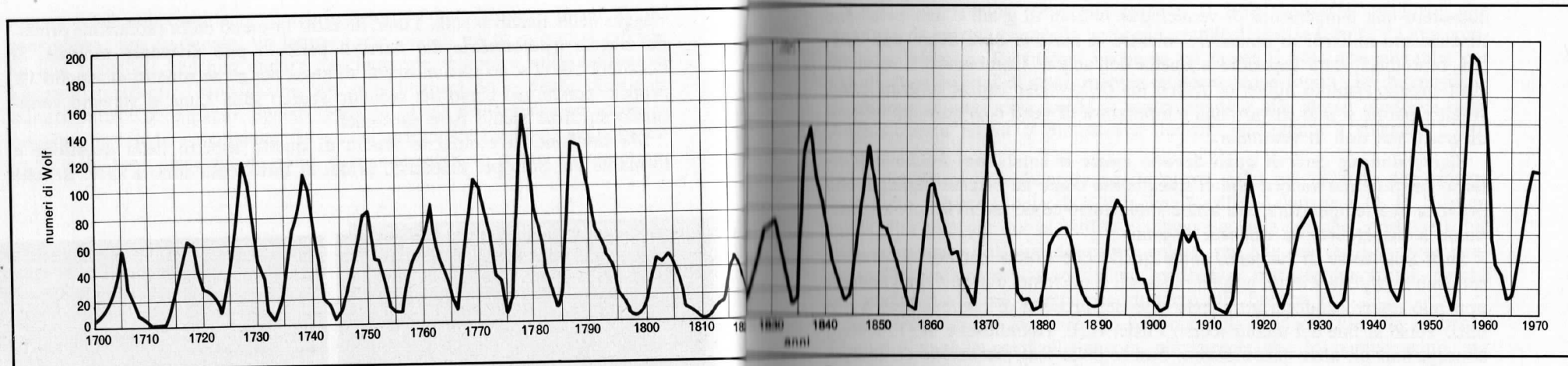


Fig.14 Variazioni periodiche dell'attività solare nel periodo compreso tra il 1700 e il 1970.

Il numero di Wolf esprime l'attività solare in funzione dei gruppi e delle singole macchie.

mento su vasta scala e a lunga scadenza, la cui interpretazione è tuttora alquanto discussa.

Come abbiamo visto, osservando il Sole anche con un modesto cannocchiale, si nota un certo numero di macchie, isolate o a gruppi. Continuando le osservazioni per mesi e anni si noterà che il loro numero medio non rimane sempre lo stesso e che vi saranno lunghi periodi in cui non si osserverà nessuna macchia e altri in cui il Sole mostrerà macchie così numerose e tanto grandi da essere visibili persino a occhio nudo. Il fenomeno ha un carattere ciclico e dura undici anni (FIG. 14). Negli ultimi tempi, per esempio, sono stati anni di massimo il 1947, il 1958 e il 1969; anni di minimo il 1944, il 1954 e il 1964. Lo stesso ciclo si manifesta, anche se sotto aspetti diversi, per le protuberanze, i flare e la forma della corona. I periodi di massima attività vengono chiamati del Sole attivo, quelli di minima del Sole quieto. Durante questi cicli si osservano altri particolari fenomeni riguardanti le posizioni delle macchie e i campi magnetici associati. Senza entrare in dettagli basterà aggiungere che essi permettono di rilevare che il vero ciclo è di durata doppia, cioè di 22 anni, ed è certamente più complesso di quanto mostra l'osservazione al telescopio delle sole macchie.

NELL'INTERNO DEL SOLE

Tutto quello che abbiamo visto fino ad ora è ciò che accade, a breve o a lunga scadenza, nelle zone dalle quali si irradia l'enorme quantità di energia, di cui anche noi godiamo continuamente il beneficio. Non ci siamo

ancora spiegati, però, dove e come si produce questa energia che il Sole dissipa nello spazio da miliardi di anni. Per chiarire il mistero dovremo carlarci nell'interno del Sole.

Partiamo dalla fotosfera, lo strato che emette la maggior parte della luce e del calore che sfuggono dal Sole verso lo spazio esterno. Questo strato, composto essenzialmente di idrogeno a una temperatura di 6000 K deve ricevere il calore dalla regione sottostante che deve essere non solo più calda, ma anche più densa, essendo compressa dagli strati più esterni. Ripetendo questo ragionamento per strati sempre più profondi, si arriva a considerare il Sole come una sfera gassosa sempre più densa e sempre più calda, a mano a mano che si avanza dall'esterno verso le zone più interne. Queste idee, impostate da un punto di vista quantitativo, tenendo conto delle leggi fondamentali della fisica (che si ammette debbano valere anche sul Sole) condussero diversi astrofisici teorici della fine del secolo scorso e della prima metà di quello corrente, alla costruzione di schemi e modelli che interpretavano in modo ragionevole le zone interne del Sole.

Facendo delle ipotesi solo sulla *distribuzione* delle sorgenti di energia e accantonando, in un primo momento, il problema della sua *origine*, si ottennero vari modelli. Uno dei più ragionevoli è sembrato essere quello secondo il quale l'energia ha origine solo in una zona ristretta al centro del Sole e si trasferisce poi dall'uno all'altro degli strati sovrastanti, finché sfugge all'esterno. Sono stati così trovati per la temperatura e la pressione valori impressionanti.

Secondo uno dei modelli più accettati, nella zona centrale del Sole devono

sussistere una temperatura di venticinque milioni di gradi e una pressione di duecento miliardi di atmosfere, mentre la materia deve avere una densità centodieci volte superiore a quella dell'acqua. Cambiando il modello si ottengono risultati numerici diversi ma dello stesso ordine di grandezza. In altre parole si può trovare una temperatura di venti o di quindici milioni di gradi, ma non di ventimila.

Siamo dunque certi di quali devono essere le condizioni fisiche dall'interno del Sole ma ancora non ci spieghiamo come ha origine l'energia che provoca una temperatura così alta e soprattutto come faccia il Sole a continuare a disperderla da miliardi di anni.

Se il Sole fosse di carbone, come quello che brucia nei nostri forni, si ridurrebbe in cenere in un migliaio di anni. È evidente, dunque, che l'energia non può essere prodotta attraverso uno dei processi di combustione a noi noti. Verso la fine del secolo scorso i fisici H. L. Helmholtz e W. T. Kelvin concepirono un altro meccanismo, basato sulla trasformazione di energia meccanica in calore. È noto che questo procedimento è sempre possibile e che lo applichiamo spessissimo, per esempio quando ci strofiniamo le mani per il freddo o quando scaldiamo i freni della nostra auto frenando continuamente.

Immaginiamo, allora, il seguente esperimento. Supponiamo di lasciar cadere una pietra in uno stagno. Soggetta alla forza di gravità, la pietra cade con una certa velocità e ha quindi una certa energia (ce ne accorgemmo ancora meglio se invece di cadere nello stagno ci cadesse su un piede). Ebbene, ci si può domandare: dove va a finire questa energia quando la pietra, giunta sul fondo dello stagno, si ferma? La risposta è semplice: è stata assorbita dalle particelle d'acqua dello stagno che si muoveranno con una certa velocità. Continuando a gettare pietre la velocità delle particelle d'acqua aumenterebbe continuamente e questo vuol dire esattamente aumentare la temperatura dell'acqua, poiché, come ci potrebbe dire un fisico, la temperatura di un fluido è data proprio dalla velocità con cui si muovono le particelle piccolissime, invisibili, che lo compongono.

Questo procedimento non è certamente il più pratico per scaldare una certa quantità d'acqua ma poteva andare bene, secondo Helmholtz e Kelvin, per il Sole. In altri termini essi ammisero che gli strati più esterni del Sole cadessero verso l'interno, come un tutto unico. L'energia gravitazionale si trasforma allora in calore e la temperatura degli strati sottostanti, s'innalza. Il meccanismo è sempre quello della pietra che cade nello stagno, ma la massa ora in gioco è di gran lunga superiore e l'energia che se ne può ricavare risulta enorme¹.

¹ Come è noto, l'energia che possiede (e può quindi cedere) un corpo in moto non dipende solo dalla sua velocità ma anche dalla massa. Chi non ne fosse convinto provi a immaginare di essere investito da una mosca o da un autotreno che viaggiano alla stessa velocità.

Così, contraendosi progressivamente, il Sole potrebbe produrre una quantità di energia diecimila volte più grande di quella fornita da una combustione chimica. Purtroppo anche in tal modo il Sole non vivrebbe per più di dieci milioni di anni, mentre esistono prove fossili che da centinaia di milioni di anni esso scalda il nostro pianeta allo stesso modo di oggi. Anche questa teoria si dimostrava dunque inadeguata a spiegare i fatti osservati.

La via giusta fu imboccata per la prima volta nel 1927 da due giovani fisici della celebre scuola di Göttingen: R. d'E. Atkinson e G. F. Houtermans. Era una via nuova, ardita e suggestiva, una via che condusse i due fisici a spiegare l'origine del calore solare, ma che più tardi avrebbe condotto l'intera umanità al bivio più terribile di tutta la sua storia, perché era anche la via più diretta per giungere alla bomba H.

Siamo così giunti al punto più sublime della moderna filosofia naturale. L'atomo, anzi le particelle ancora più piccole che lo compongono, sta per intervenire e renderci ragione dell'universo.

Nei tempi passati alcuni scienziati si erano lanciati verso l'infinito, altri erano scesi nell'infinitesimo. Avevano scoperto due abissi in mezzo ai quali è sospeso l'uomo, partecipe di entrambi. Ora l'infinitamente piccolo fugge dai nostri laboratori per riapparire nell'interno degli astri, quale artefice di quel mondo immenso sul quale ci affacciamo osservando il cielo. La particella ci spiega l'universo. Perché l'universo è fatto di particelle. Particelle che unendosi formano gli atomi; le stelle, in cui nascono gli elementi; lo spazio interstellare, in cui gli elementi si aggregano in composti molecolari; i pianeti, sui quali le molecole possono riunirsi in modo tale da formare la vita. E questa vita, che è per noi il fenomeno più grande e misterioso, sale dall'essere unicellulare alla pianta, all'animale, all'uomo, che, attraverso la sua intelligenza, tende a comprendere e a contemplare l'universo, e ancora più su, fino al genio capace di creare. Il genio: il dono più grande fatto da Dio agli uomini, l'intermediario tra Lui stesso e la sua opera.

Non c'è sintesi più grandiosa di questa; e il suo punto di partenza è là, nell'interno di un astro, nell'interno di un atomo, che ora dovremo esplorare se vorremo proseguire, poi, il nostro viaggio nell'infinito.

LA FUCINA DEGLI ELEMENTI

Secondo gli antichi l'atomo, la più piccola parte di un elemento che ne conservasse ancora le proprietà, era indivisibile. La fisica moderna ci ha insegnato, invece, che anche l'atomo è composto da particelle più piccole, dotate di massa o carica elettrica diversa che, secondo il numero con cui intervengono, formano i diversi elementi chimici. Le particelle fonda-

tali che costituiscono la materia sono tre: elettroni, protoni e neutroni¹.

L'elettrone ha una massa trascurabile e una carica elettrica negativa sensibile. Il protone ha una massa notevole (1836 volte quella dell'elettrone) e una carica elettrica dello stesso valore di quella dell'elettrone ma di segno positivo. Il neutrone ha la stessa massa del protone ma è privo di carica elettrica, cioè è elettricamente neutro.

Ogni atomo è costituito da un nucleo formato da un certo numero di protoni e di neutroni che risulta, quindi, elettricamente positivo. Intorno al nucleo, su un certo numero di livelli confrontabili alle orbite di un sistema planetario, si aggirano un certo numero di elettroni, precisamente tanti quanti ne occorrono per bilanciare elettricamente la carica del nucleo, cioè il numero dei protoni, cosicché l'atomo normale di un elemento risulta elettricamente neutro. Il numero dei protoni presenti nel nucleo determina l'elemento: l'idrogeno, che è il più semplice, è caratterizzato dalla presenza di un protone, l'elio ne ha due, il litio tre e così via fino all'uranio, l'elemento naturale più complesso, che ne ha novantadue. Normalmente al numero di protoni presenti nel nucleo corrisponde, all'esterno, un numero uguale di elettroni. Così l'atomo d'idrogeno si ottiene completando il nucleo con un elettrone, quello dell'elio con due elettroni e quello dell'uranio con novantadue elettroni. Talvolta, però, uno o più elettroni possono mancare. Allora l'atomo non risulta più elettricamente neutro ma carico positivamente, più o meno secondo il numero di elettroni perduti. In questo caso si dice che esso è ionizzato una, due o più volte, secondo che abbia perduto uno, due o più elettroni. Naturalmente anche in questo caso l'atomo appartiene sempre a quell'elemento; per esempio un atomo di ferro che abbia perduto due elettroni è sempre un atomo di ferro.

Il numero dei protoni presenti nel nucleo genera anche il peso dell'atomo poiché, come abbiamo visto, la massa degli elettroni è trascurabile. Ma al peso di un atomo contribuiscono, in maniera determinante, anche i neutroni che, pur non avendo carica, hanno massa pari a quella dei protoni. Il numero di neutroni nel nucleo dell'atomo di uno stesso elemento non è sempre lo stesso. Si possono avere, quindi, diversi atomi di quell'elemento con diversi pesi. Questi diversi atomi si chiamano isotopi. Così l'idrogeno normale, come abbiamo visto, è formato da un nucleo di un solo protone e da un elettrone. Un isotopo dell'idrogeno ha il nucleo composto da un protone e da un neutrone; un altro isotopo, molto più raro, ha il nucleo composto da un protone e due neutroni. Il primo di questi isotopi si chiama idrogeno pesante, il secondo, trizio.

A questo punto non sfuggirà che abbiamo in mano la chiave per realiz-

¹ Si conoscono anche molte altre particelle elementari ma, dato che queste ultime non intervengono nell'essenza dei presenti ragionamenti, non verranno ricordate.

zare il sogno degli alchimisti medioevali: quello di trasformare un elemento in un altro. La cosa infatti, almeno in teoria, è semplice. Se un elemento è determinato dal numero dei protoni presenti nel suo nucleo, basta aggiungere o togliere protoni per trasformarlo in un altro. Così, per esempio, il nucleo di un atomo di litio è composto da tre protoni e quattro neutroni; se vi aggiungiamo un nucleo di idrogeno (cioè un protone) possiamo avere un nucleo composto da quattro protoni e quattro neutroni, o meglio due nuclei di elio, ognuno dei quali è composto da due protoni e due neutroni (FIG. 15).

La realizzazione di questa trasformazione è però estremamente difficile, almeno finché la materia si trova nelle condizioni fisiche in cui è normalmente presente sul nostro pianeta. Ma se, con particolari accorgimenti, riusciamo a realizzarla, scopriamo uno stranissimo fenomeno. Prendendo il necessario numero di nuclei di un elemento leggero, per esempio di idrogeno o di elio, e adoperandoli tutti per costruire il nucleo di un elemento più pesante, ci accorgiamo che la somma delle masse dei nuclei usati non è uguale a quella del nucleo ottenuto, che risulta, invece, un poco più leggero. Questo fatto si verifica, in misura sempre minore, per tutti gli elementi più leggeri del ferro. Per quelli più pesanti, invece, accade il contrario e cioè che il nucleo di un elemento più pesante formato sommandone due più leggeri ha una massa maggiore della somma delle masse dei due nuclei che l'hanno costituito.

In questo fenomeno sta la chiave delle bombe nucleari e la soluzione del mistero dell'origine del calore all'interno del Sole. Più esattamente la chiave non risiede soltanto in questo fatto ma essenzialmente in una delle formule fondamentali della teoria della relatività.

È una formula molto semplice e racchiude in sé tutto il destino dell'umanità, la felicità o l'autodistruzione:

$$E = mc^2.$$

I simboli indicano: l'energia (E), la massa (m) e la velocità della luce (c). Questa formula esprime l'equivalenza tra la massa e l'energia, e significa che un corpo di una certa massa contiene in sé tanta energia quanto è il valore della massa stessa moltiplicato per il valore della velocità della luce moltiplicato per sé stesso. Tenendo presente che la velocità della luce è rappresentata da un numero grandissimo, appare evidente che anche una massa piccolissima equivale a un'energia enorme. Per esempio, l'energia che può produrre la massa di un grammo, in elettronvolt, è espressa dal numero 56 seguito da trentuno zeri. Ecco dunque dove va quella piccola frazione della massa che scompare quando formiamo un atomo dall'unione di due elementi più leggeri o quando ne rompiamo uno più pesante del ferro per farne due più leggeri: la massa scomparsa si è trasformata in energia.







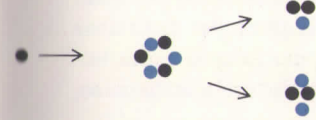
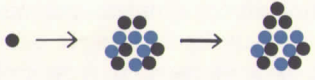

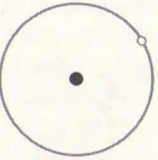

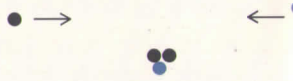
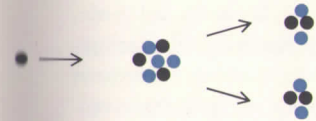


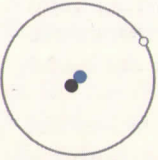


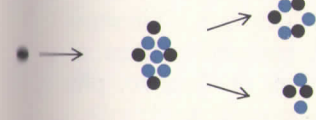

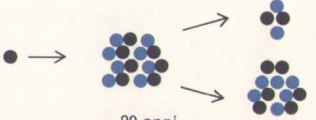
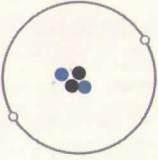

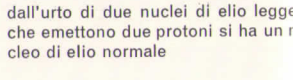
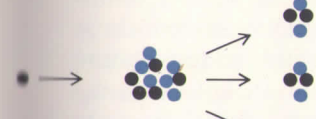
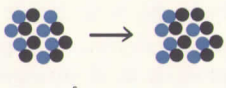
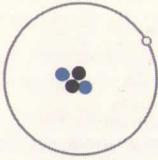


atomi	nuclei degli otto elementi più leggeri (isotopi più comuni)	prime reazioni nucleari ($T \geq 1\,000\,000\text{ K}$)	reazioni del litio, berillio e boro ($3\,000\,000\text{ K} < T < 7\,000\,000\text{ K}$)	ciclo del carbonio-azoto ($T \approx 20\,000\,000\text{ K}$)	
<p>elettrone</p>  <p>protone (carica positiva)</p>  <p>neutrone (senza carica)</p> 	<p>idrogeno</p>  <p>elio</p> 	 <p>dall'urto di due protoni e dalla trasformazione di uno di essi in neutrone si ha la formazione di un nucleo di idrogeno pesante, detto deutone</p>	 <p>un nucleo di litio leggero con l'aggiunta di un protone forma un nucleo di elio normale e uno di litio leggero</p>	 <p>$2,5 \times 10^8$ anni</p> <p>da un nucleo di carbonio normale con l'aggiunta di un protone si forma un nucleo di azoto leggero</p>	 <p>2,1 minuti</p> <p>un protone si trasforma in neutrone dando luogo a un nucleo di azoto pesante</p>
<p>atomo di idrogeno</p> 	<p>litio</p> 	 <p>dall'unione di un deutone con un protone si ha un nucleo dell'isotopo più leggero dell'elio</p>	 <p>un nucleo di litio normale con l'aggiunta di un protone forma due nuclei di elio normale</p>	 <p>9,9 minuti</p> <p>uno dei protoni di questo nucleo si trasforma in neutrone; si ha così il nucleo di un isotopo pesante del carbonio</p>	 <p>20 anni</p> <p>con l'aggiunta di un quarto protone il nucleo di azoto pesante si trasforma in un nucleo di ossigeno ordinario, oppure...</p>
<p>atomo di idrogeno pesante o deuterio</p> 	<p>berillio</p> 	 <p>dall'urto di due nuclei di elio leggero che emettono due protoni si ha un nucleo di elio normale</p>	 <p>un nucleo di berillio normale con l'aggiunta di un protone forma un nucleo di litio leggero e uno di elio</p>	 <p>50 000 anni</p> <p>con l'aggiunta di un secondo protone l'isotopo pesante diventa un nucleo di azoto normale</p>	 <p>20 anni</p> <p>...in un nucleo di elio e in uno di carbonio normale che viene così ripristinato</p>
<p>atomo di elio neutro</p> 	<p>carbonio</p> 	 <p>dall'urto di due nuclei di elio normale</p>	 <p>un nucleo di berillio normale con l'aggiunta di un protone forma tre nuclei di litio leggero e uno di elio</p>	 <p>4×10^6 anni</p> <p>si aggiunge un terzo protone formando un nucleo di ossigeno leggero</p>	<p>Delle ultime due reazioni, la seconda è un milione di volte più probabile della prima. Quindi, a eccezione di una volta su un milione, tutto il ciclo conduce alla trasformazione di quattro nuclei di idrogeno in uno di elio, ripristinando il carbonio iniziale che si comporta da catalizzatore.</p>
<p>atomo di elio ionizzato</p> 	<p>azoto</p>  <p>ossigeno</p> 				

Fig.15 Qui e nella pagina a fronte, da sinistra a destra: atomi più leggeri, nuclei più leggeri, prime reazioni nucleari, reazioni del litio, berillio e boro, ciclo del carbonio-azoto.

Tutti questi processi portano, in definitiva, alla formazione di nuclei di elio. In particolare quelli relativi al litio, al berillio e al boro bruciano irreversibilmente litio, berillio e boro.

Così, se riusciamo a spezzare l'atomo di un elemento pesante, per esempio dell'uranio, per ottenere due elementi più leggeri nei quali, lo ripetiamo, la somma delle masse sarà inferiore a quella dell'uranio, la massa scomparsa si libera trasformandosi in energia. Questa è, appunto, la bomba atomica.

Inversamente, se riusciamo a fondere più nuclei leggeri per formarne altri pesanti, la cui massa risulterà inferiore alla somma di quelle dei nuclei di origine, la massa scomparsa si trasforma, anche in questo caso, in energia. Questa è la bomba a idrogeno.

La rottura, o meglio, la fissione dell'atomo di uranio si può realizzare più semplicemente della fusione dei nuclei leggeri, poiché quest'ultima si verifica solo a pressioni e, soprattutto, a temperature altissime, che non sussistono alla superficie della Terra ma che, come abbiamo visto, sono assolutamente normali all'interno del Sole¹. Gli astrofisici hanno scoperto diverse reazioni termonucleari che possono sussistere all'interno del Sole, ciascuna delle quali richiede un optimum della temperatura. Alla temperatura di un milione di gradi si può formare l'idrogeno pesante dall'unione di due protoni. A temperature fra i tre e i sette milioni di gradi si svolgono rispettivamente le fusioni dei protoni del litio, del berillio e del boro. Infine, alla temperatura di circa venti milioni di gradi si svolge il cosiddetto ciclo del carbonio-azoto, in cui quattro nuclei di idrogeno si trasformano in uno di elio, passando attraverso la formazione e il disfacimento di carbonio e azoto che, però, alla fine di ogni ciclo tornano a trovarsi nella stessa quantità iniziale.

Abbiamo dunque trovato la chiave dell'origine dell'energia all'interno del Sole. E non abbiamo scoperto questo soltanto, ma anche come si formano gli elementi, a partire da quello più semplice, più leggero, più diffuso in tutto l'universo: l'idrogeno.

Infatti dalla reazione protone + protone si forma idrogeno pesante. Dalla fusione dell'idrogeno pesante e dell'idrogeno normale si forma l'elio. Così nascono elementi sempre più pesanti, con reazioni più complesse che richiedono temperature sempre più alte ma che sviluppano, a loro volta, un'enorme quantità di energia che in parte si disperde ma in parte contribuisce a innalzare la temperatura del materiale reagente, accelerando le reazioni stesse e rendendo possibili poi le altre che richiedono temperature maggiori. In questo modo si potrebbe procedere fino al ferro. A partire da questo elemento, però, non si possono più fondere i nuclei ricavando energia ma, al contrario, la fusione può essere realizzata solo a patto di

¹ La genialità dell'uomo ha saputo però supplire a questa lacuna. Infatti, usando come detonatore una bomba atomica (cioè all'uranio), si può realizzare quella temperatura, dell'ordine di qualche milione di gradi, sufficiente a rendere possibili i processi di fusione degli elementi leggeri, rendendo così realizzabile la bomba all'idrogeno, capace di distruggere l'umanità in modo molto più rapido ed efficace.

fornire energia. Si ritiene quindi che, cominciando dagli elementi poco più leggeri del ferro, fino ai più pesanti conosciuti, il processo di formazione sia diverso. I luoghi nei quali si producono gli elementi più pesanti sembrano oggi ben individuati e più tardi li troveremo.

In tutto questo ragionamento c'è ancora un punto che non appare ben chiaro. Abbiamo visto che i processi di fusione possono fabbricare gli elementi a partire dall'idrogeno e, al tempo stesso, produrre energia. Ma abbiamo anche visto che, perché possano verificarsi, sono necessarie temperature di almeno un milione di gradi. E come si produce allora, inizialmente, quella temperatura altissima che rende possibili le prime reazioni termonucleari?

La risposta ce l'hanno già data Helmholtz e Kelvin: mediante la contrazione gravitazionale. Quella teoria che non era sufficiente a spiegarci la produzione dell'energia solare per miliardi di anni, si può benissimo applicare, invece, per le prime fasi della vita del Sole, quando questo era un'enorme e informe nube d'idrogeno. A quell'epoca la nube si contrasse sotto la spinta del suo stesso peso e, cadendo verso il centro, sviluppò energia, una parte della quale contribuì ad aumentare la temperatura, e la contrazione continuò finché la temperatura fu tale da rendere possibile l'innesco delle prime reazioni nucleari. Allora l'energia prodotta nell'interno del Sole aumentò, fino a equilibrare la caduta della materia verso l'interno, la contrazione gravitazionale si arrestò e l'energia continuò a essere prodotta con i processi di fusione che continuano anche oggi.

COS'È IL SOLE

Ora che ci siamo calati nel suo interno, nell'immensa fucina dove si produce il calore e si fabbricano gli elementi, possiamo finalmente avere un'idea completa di ciò che è il Sole (FIG. 16).

Una sfera bruciante dove a temperature e pressioni altissime, che possiamo esprimere solo con numeri che vanno al di là della nostra immaginazione, si sviluppa un'enorme quantità di energia. Gran parte di questa energia affiora fino all'esterno, attraverso strati infuocati (anche se a temperature enormemente più basse di quelle dell'interno) dove i gas, soggetti a una molteplicità di forze, si agitano in immani uragani che producono squarci, lampi, gigantesche eruzioni. Al di là delle fiamme della cromosfera si estende l'argentea corona. Con essa questo corpo mostruoso, questa colossale bomba termonucleare in esplosione continua, svanisce nello spazio in una delicata nube dalla luce di perla. Ma forse la corona non finisce dove giungono a rivelarla l'occhio e la fotografia durante le eclissi totali. Nei periodi degli equinozi (poco dopo il tramonto, nel cielo di ponente, o poco prima dell'alba, in quello di levante) si nota un cono lumi-

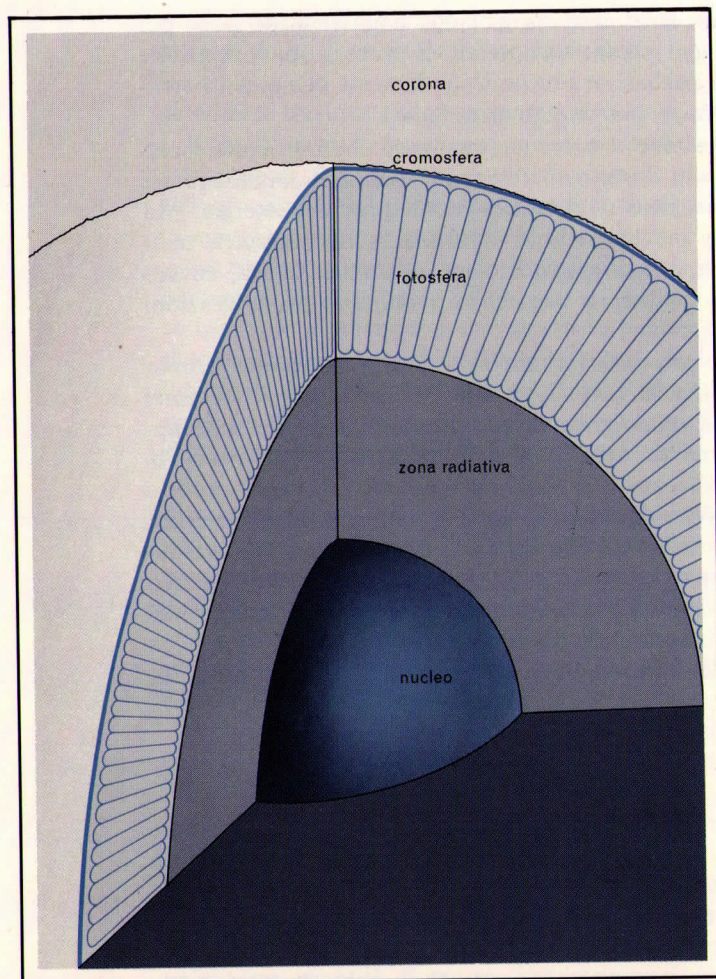


Fig.16 Sezione del Sole. Dall'esterno: la corona molto estesa e senza contorni netti; la cromosfera dello spessore di 10 000 km; la fotosfera in cui sono rappresentati i processi convettivi che danno origine alla granulazione; la zona radiativa, così chiamata perché il calore viene trasmesso per irraggiamento; il nucleo, in cui avvengono le reazioni termonucleari di fusione che sono la fonte di energia del Sole.

noso del chiarore della Via Lattea, il cui prolungamento ideale giunge fino al Sole. È la cosiddetta luce zodiacale, una luminosità dovuta alla luce solare diffusa da polvere sparsa nel sistema solare, molto oltre la corona, della quale costituisce, in un certo senso, il proseguimento. Questa polvere giunge fino oltre l'orbita della Terra, mostrandoci che gli strati più esterni

del Sole arrivano fino qui. Così, nella forma più concisa, possiamo definire il Sole come un colossale forno che irradia energia nello spazio in tutte le direzioni e si estende materialmente per milioni di chilometri, svanendo in veli sempre più rarefatti.

E di astri simili al Sole ce ne sono a centinaia, a milioni, a miliardi. Basta alzare lo sguardo verso il cielo in una notte serena per scorgere una schiera sterminata.

Perché ogni stella è un sole.