

IL SOLE

Esposizione delle principali scoperte moderne sulla struttura di questo astro,
sul suo influsso nell'universo e sulle sue relazioni con gli altri corpi celesti

di Padre A. Secchi

Direttore dell'Osservatorio del Collegio Romano

traduzione del testo: prof. Gianluigi Trivia

Parigi - 1870

INTRODUZIONE

Cos'è il Sole? Chi è questo astro luminoso e potente che dissipa le tenebre della notte, porta sulla Terra la luce del giorno, che ci inonda di calore, di luce e di vita, e nello stesso tempo tramite la sua attrazione misteriosa tiene legato attorno a sé il sistema dei pianeti, contribuendo così in modo fino a mantenere l'ordine della creazione? Questa è la domanda che si pongono tutte le persone che amano riflettere sui grandi fenomeni della natura, invece di imitare gli esseri senza ragione che si nutrono di frutti che incontrano sul sole senza mai innalzare il loro sguardo verso l'albero che li produce.

Parecchie persone dell'antichità adoravano il sole, errore meno umiliante rispetto molti altri, perché questo l'astro è l'immagine più perfetta della divinità, lo strumento di cui si serve il creatore per comunicarci quasi tutte le sue opere dell'ordine fisico. Benché ai nostri occhi sia solo una semplice creatura, il suo studio è tuttavia uno dei principali ai quali si possa dedicare un sapiente, e la storia delle conquiste fatte in questo campo sarà sempre uno degli scopi più degni della nostra attenzione e più in grado di innalzarci.

Sfortunatamente, scienza è lontana dall'essere all'altezza del suo scopo. Non sono né le ricerche, nelle speculazioni che mancano; le difficoltà inerenti la natura stessa di questo studio paralizzano i nostri sforzi, e malgrado l'attività che dedichiamo, *vincit natura latendi*: a natura vuole ancora rimanere nascosta. Ma la nostra generazione, che ha smentito queste parole scoprendo le sorgenti del Nilo, riuscirà forse un giorno a sottrarre al Sole questi segreti che nasconde così abilmente, togliendoli dalle tenebre e rischiarandoli con una luce abbagliante.

La storia ci insegna che tutte le scoperte della scienza, tutti i miglioramenti apportati ai metodi di osservazione sono stati immediatamente applicati allo studio del sole: la fisica solare ha fatto un passo avanti tutte le volte che la fisica generale ha fatto una conquista. La scoperta dei cannocchiali fece dapprima conoscere il suo moto di rotazione, l'esistenza, la struttura, le variazioni delle sue macchie, e la maniera in cui la luce è distribuita alla sua superficie. Non dimentichiamo di segnalare l'impiego dei vetri colorati che segue da vicino la scoperta del telescopio; è grazie ad essi che il P. Scheiner poté dare il via con grande profitto a uno studio che privò della vista l'infortunato Galileo.

Questi primi mezzi di osservazione espressero ben presto tutte le loro potenzialità. Ne risultò un periodo di interruzione nel progresso delle nostre conoscenze e una profonda indifferenza per questo genere di ricerche. Tutto ciò fin quando W. Herschel si mise all'opera con gli strumenti che aveva costruito con le proprie mani. Lo studio del sole fece con lui grandi progressi, ma le sue scoperte e i suoi metodi restarono legati alla sua persona così come gli strumenti; non ebbe imitatori, e dopo di lui ci fu una seconda interruzione.

nonostante ciò l'Ottica fece progressi; i grandi strumenti divenivano più numerosi e preparavano nuove scoperte; ma le preparavano soltanto, poiché questi strumenti così perfezionati rimasero lungo tempo inutili; solo ai nostri giorni si sono trovati metodi che permettono di impiegare allo studio del sole e ingrandimenti enormi che si ottengono con i più grandi cannocchiali.

Ma ciò che soprattutto ha fatto avanzare la fisica solare, e il perfezionamento della teoria matematica dei moti celesti. Quando, nel calcolo di un'eclissi, si giunse a determinare in modo preciso i luoghi in cui doveva passare la linea centrale della totalità, solo allora gli astronomi poterono riunirsi in grande numero in questi luoghi privilegiati, portando con essi strumenti di tutte le grandezze e di tutti i tipi, ciò che permise loro di fare le scoperte più inattese.

La fotografia non poteva mancare di venire in aiuto allo studio del sole: essa ha già fornito immagini rappresentanti con la precisione più assoluta le macchie con tutti i loro dettagli, e dei differenti fasi delle eclissi; essa ci ha reso immensi servizi certi brevi istanti delle eclissi totali dove l'occhio si trova sorpreso rimane incerto; essa ci ha dato il modo di risolvere in pochi istanti quesiti discussi molti anni.

La perseveranza con la quale si sono osservate le macchie ha permesso di constatare la periodicità di questo fenomeno, e da questo studio si è ricavato un gran numero di opere altre volte derise o ridicolizzate, ma che contengono malgrado ciò documenti preziosi. Confrontando questi periodi di vicissitudini solari con altri fenomeni che non hanno con essi alcuna relazione apparente, si è potuto stabilire che il sole non si comporta solo come centro di attrazione e come sorgente luminosa, ma che esercita un'azione incontestabile sui fenomeni magnetici.

Infine l'analisi spettrale ha aperto una strada immensa che avremo per sempre la possibilità di percorrere: essa già fatto conoscere la natura chimica delle sostanze che compongono l'atmosfera solare, e anche in modo approssimato la temperatura di questa atmosfera. Si è potuto così fare l'analisi qualitativa dell'astro del giorno, e imparare a studiare in tutti i i periodi certi fenomeni che potevamo osservare solo durante le eclissi totali. È così che la chimica, a sua volta, è venuta in aiuto all'astronomia. Bella scoperta della dissociazione e la teoria meccanica del calore si hanno infine mostrato in cosa consiste il potere calorico del sole, e ci hanno spiegato come questo potere o rimanere invariato per tanti secoli, malgrado l'irraggiamento continuano sembra doverlo affievolire un poco alla volta.

Allo stato attuale della scienza, ho creduto che fosse ora di riunire in alcune pagine insieme di queste meravigliose scoperte che fanno così tanto onore ai sapienti della nostra epoca, e che hanno il vantaggio di unire l'utile al dilettevole.

Allo scopo di seguire l'ordine nelle idee, esporrò prima i lavori degli antichi, ma brevemente, senza occuparmi di questioni inutili, né i risultati ipotetici. Inoltre, allo scopo di rendere quest'opera accessibile al maggior numero di persone, entrerà qualche volta in dettagli che non saranno necessari per gli esperti, ma che mi si perdoneranno in considerazione dello scopo che mi sono proposto.

La contemplazione delle opere di Dio è una delle più nobili occupazioni della mente, è lo scopo principale dello studio della natura; ma questo studio ci conduce spesso a risultati utili e non potremo disdegnare. Studio del sole non appare, almeno per ora, presentarsi questo vantaggio. Qualunque siano le nostre ricerche e le conoscenze che potremo acquisire, non sarà mai in nostro potere regolare l'influenza del sole. Tuttavia, l'azione di questo astro è troppo intimamente legata con i fenomeni della vita, del calore e della luce, perché sia inutile cercare di conoscerne la natura. E d'altronde, chissà se non vi è una relazione stretta tra certi fenomeni solari e qualche fenomeno terrestre che potremo prevedere con qualche certezza?

Ciò sarebbe uscire dal nostro scopo qui considerato; le meraviglie della creazione non devono essere esclusivamente studiate dal miserevole punto di vista dell'utilità momentanea. Sappiamo per esperienza che ciò sembrerebbe oggi solo una speculazione può divenire domani una fonte di ricchezza; dopo tutto, l'uomo non vive solo di pane, deve anche, per mantenere la via del suo animo, assimilare le verità astratte o sensibili il cui insieme costituisce per il nostro intelletto la parola del Creatore.

Andiamo quindi ad affrontare questo importante tema al quale abbiamo, per parecchi anni, consacrato tutte le nostre attenzioni e le nostre ricerche. Non ci limiteremo ad esporre i nostri lavori; prenderemo il vero e il bello dovunque lo troveremo. Ma non enunceremo alcuna opinione senza averne prima verificato i fatti sui quali si basano; non esporremo alcuna teoria senza averne compreso la natura stessa dell'argomento.

Questa Opera, che pubblichiamo oggi per la prima volta, era composta in italiano da parecchi anni; ne abbiamo dato un saggio in una conferenza fatta nel 1867 agli studenti della Scuola Sainte Genevieve e riprodotta dagli *Studi religiosi*. Alla sollecitazione di parecchi nostri amici, l'abbiamo scritto in francese, abbreviandolo un poco. Il R. P. Larcher, professore di Fisica e prefetto degli studi all'Ecole Sainte Genevieve, ha voluto ritoccare il nostro manoscritto affinché lo stile sia corretto ed elegante; ha tradotto il nostro pensiero con la più grande esattezza, conservando quasi sempre le espressioni che noi stessi abbiamo impiegato; non lo ringrazieremo mai troppo per la pazienza e l'abnegazione di cui ha dato prova in questo suo lavoro. Nonostante queste precauzioni non fossero necessarie, abbiamo rivisto tutte le dimostrazioni, al fine di evitare gli errori che si insinuano così facilmente nelle Opere così composte. L'editore e l'incisore non hanno trascurato nulla per assicurare la perfezione tipografica e artistica; così speriamo che i lettori siano soddisfatti. Pubblicando questa Opera in francese, l'autore è felice di poter pagare alla Francia un piccola parte del tributo di riconoscenza che le è dovuta per l'accoglienza ricca di simpatia che ha ricevuto durante l'Esposizione universale.

Possa questo lavoro essere utile al lettore, istruendolo e invitandolo a rendere omaggio a Colui che ha posto la sua tenda nel Sole: *in Sole posuit tabernaculum suum Altissimus*.

Indice

I	Struttura del Sole	6
1	Aspetti Generali del Sole; le sue Macchie e le loro principali leggi	7
1.1	Aspetto generale del Sole	7
1.2	Scoperta delle macchie solari - Modi di osservarle	8
1.3	Leggi fondamentali del moto delle macchie.	9
1.4	Ipotesi avanzate sulla natura delle macchie	12
1.5	Lavori di Herschel	12
2	NUOVI METODI DI OSSERVAZIONE	14
2.1	Oculari elioscopici.	14
2.2	Fotografie solari. Disegni	16
3	STRUTTURA GENERALE DELLE MACCHIE SOLARI	19
3.1	Aspetto generale della fotosfera	19
3.2	Formazione delle macchie	22
3.3	Le macchie sono cavità	25
3.4	Struttura delle macchie	28
3.5	Nuovi dettagli relativi alle macchie. - Velature rosa all'interno	34
3.6	Conclusioni relative alla struttura delle macchie	38
4	Moti propri delle macchie - Rotazione del Sole	40
4.1	Importanza della questione	40
4.2	Risultati ottenuti riguardo alla rotazione del Sole	42
4.3	Teorie proposte per spiegare i moti delle macchie	47
4.4	Su qualche movimento apparente dovuto alla profondità delle macchie e alla rifrazione dell'atmosfera solare.	48
4.5	Riassunto dei moti delle macchie	50
4.6	Variazioni secolari delle macchie	50
5	L'atmosfera solare	54
5.1	Assorbimento dei raggi luminosi da parte dell'atmosfera solare	54
5.2	Assorbimento dei raggi chimici	55
5.3	Assorbimento dei raggi calorifici	56
5.4	Conseguenze che derivano dalle osservazioni precedenti	58
6	Fenomeni osservati durante le eclissi; conseguenze tratte riguardanti l'atmosfera solare	61
6.1	Storia	61
6.2	Fenomeni generali che si osservano in una eclissi totale	62
6.3	Fenomeni che accompagnano la scomparsa e la ricomparsa del Sole nelle eclissi totali	64
6.4	La corona	68
6.5	I pennacchi	70
7	Protuberanze o fenomeni rosa che si osservano durante le eclissi totali di Sole	75
7.1	Prime osservazioni delle protuberanze	75
7.2	Fotografie ottenute in Spagna durante l'eclissi del 1860	77
7.3	Natura delle protuberanze solari visibili nelle eclissi	82
7.4	Risultato degli studi spettrali fatti in pieno giorno sulle protuberanze	84
7.5	Conclusioni relative all'atmosfera solare	87

8	Analisi spettrale della luce solare	89
8.1	Analisi della luce solare con il prisma - Spettro solare	89
8.2	Confronto tra la luce solare e le altre luci. Inversione degli spettri	95
8.3	Applicazione dei principi precedenti alla costituzione della fotosfera solare	98
8.4	Analisi spettrale delle macchie. Conseguenze relative alla costituzione del Sole	101
9	Temperatura solare - Sua origine - Sua conservazione	105
9.1	Misura dell'intensità della radiazione solare	105
9.2	Perdite di forza viva subite dal Sole	108
9.3	Sorgenti di calore esterne al Sole	110
9.4	Costanza della radiazione solare; sua spiegazione	111
II	Attività esterna del Sole	114
10	Le Radiazioni	115
10.1	Effetti della radiazione nell'universo	115
10.2	Radiazione luminosa	117
10.3	Radiazioni termiche	118
10.4	Azione chimica dei raggi solari	121
10.5	Attività magnetica del Sole	122
11	Il Sole centro di forza - La Gravitazione	125
11.1	Formazione del sistema planetario	125
11.2	I Pianeti	128
11.3	Le comete	133
11.4	Le stelle cadenti	137
11.5	La luce zodiacale	140
III	I Soli o le Stelle	142
12	Capitolo Unico	143
12.1	Rapporto del nostro Sole con le stelle	143
12.2	Relazione sulla composizione tra i soli. Spettri stellari	144
12.3	Colpo d'occhio sulla distribuzione delle stelle nello spazio	150

Parte I

Struttura del Sole

Capitolo 1

Aspetti Generali del Sole; le sue Macchie e le loro principali leggi

1.1 Aspetto generale del Sole

Il sole si presenta ai nostri occhi come un disco o rotondo che sottende un angolo di 32 minuti, cioè poco più di mezzo grado. Se teniamo conto della distanza, questo diametro apparente presuppone dimensioni enormi, di cui è difficile farci un'idea esatta. La distanza media che separa il sole dalla terra è uguale a 23150 raggi terrestri, cioè 148 milioni di chilometri. Il diametro reale del sole è 108 volte il diametro del nostro pianeta, in modo che il suo raggio è quasi il doppio della distanza tra la luna e la terra. Così, il suo volume è quasi uguale a quello di otto sfere aventi un raggio uguale alla distanza che ci separa dalla luna. È 1259712 volte più grosso della terra; un arco di un secondo, visto dalla terra al centro del disco solare, è equivalente a 715 chilometri; l'intera terra, è dovuta solo a, tendere le solo un angolo di $17''$, 82; il suo raggio sottenderà quindi $8''$, 91; è il valore della parallasse equatoriale del sole attualmente adottata, e sulla quale si basano tutti i nostri calcoli. Questi numeri ci serviranno presto per valutare le dimensioni degli oggetti che vediamo sul disco solare e per valutarne i moti.

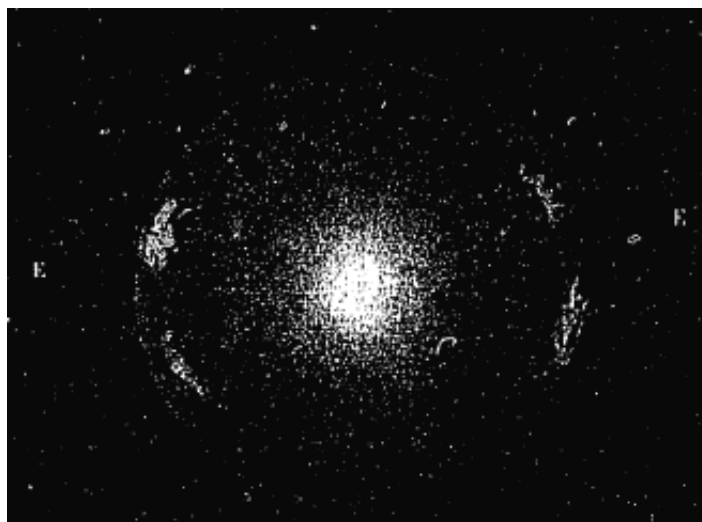
Gli antichi non conoscevano alcune delle particolarità relative alla costituzione fisica di questo astro. Erano state segnalate di volta in volta alcune macchie nere che si potevano distinguere a occhio nudo quando era vicino all'orizzonte; ma si considerava dei pianeti in congiunzione o dovuti a fenomeni a cui causa era sconosciuta. Tali sono le macchie che furono osservate, una ai tempi di Carlo Magno, l'altra nel 1588. Fabricius osservava il sole introducendo un raggio luminoso attraverso una stretta apertura in una stanza completamente oscura; e così che nel mese di dicembre 1610, riuscì a vedere una macchia significativa e a studiare il suo movimento in modo assai preciso per poterne concludere il moto di rotazione del sole. Ma quest'osservazione pubblicata solo più tardi, allorché altri osservatori, armati di cannocchiale, avevano ottenuto risultati migliori.

Le macchie solari si presentano di solito come punti neri e forma rotonda; molto spesso, tuttavia, sono raggruppate in modo da formare nell'insieme figure irregolari. La parte centrale è nera; si chiama il *nucleo* o l'*ombra*: il contorno è formato da una semi zona che si chiama la *penombra*. I contorni dell'ombra e quelli della penombra sono nettamente divisi, almeno nella maggior parte dei casi.

Le dimensioni delle macchie sono estremamente variabili. Alcune si presentano come semplici punti neri, che si chiamano *pori*; si osserva sovente che sottendono angoli da 30 a 40 secondi. Le macchie grandi sono rare, e risultano formate di solito da parecchie macchie sovrapposte. Si sono visti gruppi simili raggiungere diametri di parecchi minuti; essendo loro superficie più grande di quella della terra, più grande anche di quella del pianeta Giove.

La figura 1 rappresenta l'aspetto che presentava il sole qualche istante prima dell'eclissi del 18 luglio 1860; essa può dare un'idea del numero e della grandezza relativa delle macchie.

Sui bordi del disco, si vedono piccole macchie bianche che gli astronomi chiamano *facole*; le studieremo presto. Tutte queste macchie cambiano posizione forma, secondo leggi che impareremo a conoscere. Infine i bordi dell'immagine sono sempre molto meno luminosi del centro; le si riconosce facilmente utilizzando un forte ingrandimento, e spostando alternativamente il centro dalla proiezione al bordo e al centro del disco solare (fig.1).



1.2 Scoperta delle macchie solari - Modi di osservarle

La scoperta delle macchie è una di quelle in cui si può dire che sono legate ad un'epoca e non a una persona. Molti studiosi avendo a disposizione dei cannocchiali, dovevano prima o poi dirigerli verso il sole. La sola difficoltà consisteva nel proteggere gli occhi dell'osservatore. Galilei mostrò le macchie ai letterati di Roma, nel giardino Bandini, ma solo quando il sole era vicino all'orizzonte; nello stesso periodo (marzo 1611), Scheiner le osservava a Ingolstadt, con l'aiuto di un vetro blu posto davanti all'oculare. Questa scoperta è quindi stata fatta da parecchi studiosi; non sappiamo che Fabricius li aveva preceduti tutti.

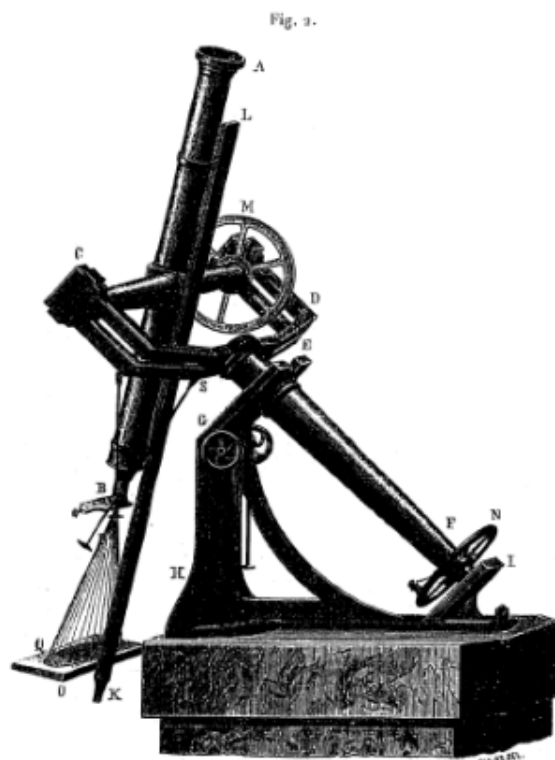
Galileo sembra abbia preceduto Scheiner nell'osservazione delle macchie; ma non le studiò in modo continuo, e non ne comprese l'importanza se non dopo la pubblicazione delle tre lettere pseudonime indirizzate dal gesuita tedesco a Marco Vesler, borgomastro di Augsbourg, con la data del 12 dicembre 1611. Scheiner parlava in queste lettere del numero delle macchie, della variazione delle loro forme e del loro moto apparente sul disco solare; parla allo stesso modo di penombre, di facole e di strumenti di osservazione. Ma propose una spiegazione malaugurata attribuendo questo fenomeno a pianeti molto vicini al sole.

Queste lettere sollecitarono fortemente l'attenzione di Galilei; egli riconobbe ben presto l'interesse, ma anche le difficoltà di questo argomento. Si mise quindi al lavoro, e, dopo alcuni mesi di osservazioni, poi in grado di dare l'esatta teoria. Riconobbe che le macchie sono aderenti al corpo solare, e che la loro traslazione apparente è dovuta al moto di rotazione dello stesso astro. Era allora molto difficile giungere a questa conclusione, poiché il cannocchiale di Galileo, il solo conosciuto a quell'epoca, non permette l'impiego del micrometro; non si poteva dunque prendere la posizione se non in modo molto inesatto, e le misure non divennero precise fino al momento in cui si cominciò a studiare le immagini proiettate su uno schermo con l'aiuto del cannocchiale.

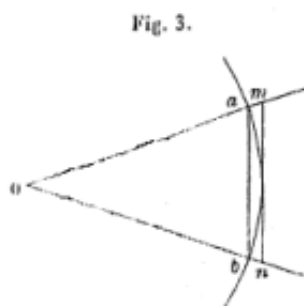
Sfortunatamente, la storia di questa bella scoperta sarebbe incompleta, se non dicessimo qualcosa sulla polemica che essa sollevò riguardo alla questione della priorità. Noi l'abbiamo detto, la stessa scoperta si doveva fare necessariamente, era solo una questione di tempo e di fortuna. Ma in seguito, essa appartenne al genio di scoprire la teoria esatta, alla pazienza attenta e perseverante nello studio dei fenomeni. Dal punto di vista della genialità, Galileo è senza rivali; ma sotto l'aspetto delle osservazioni, Scheiner ha grandi meriti scientifici. Più tardi, nell'ardore della controversia, lo accusò di plagio; ma la testimonianza di Galileo fu sufficiente a rispondere a questa accusa. Si deve alla perseveranza tutta tedesca di Scheiner una lunga serie di osservazioni ricche dettagli interessanti, e che sono stati ultimamente apprezzati nel loro giusto valore. Egli impiegò per primo le lenti colorate e il sistema di proiezione con il cannocchiale. Perfezionò questo procedimento con i consigli di P. Grienberger e costruì così uno strumento che è la prima forma del moderno equatoriale.

L'osservazione delle macchie mediante proiezione è assai comoda ed esatta per cui ne diamo la descrizione. In una camera oscura si fa una apertura della grandezza dell'obiettivo; si pone il cannocchiale nella direzione dei raggi solari, e si sposta l'oculare finché l'immagine risulta ben definita ai suoi bordi; le macchie, se ve ne sono, non tarderanno ad apparire ben nette e definite.

Gli osservatori impiegano ora per queste proiezioni grandi strumenti che servono pure a fotografare il Sole. La fig. 2 rappresenta lo strumento impiegato al Collegio Romano, dove ogni giorno si osservano le macchie, quando il tempo lo permette. M. Carrington ha impiegato un procedimento simile all'osservatorio di Redhall. Ecco la descrizione dello strumento:



AB , cannocchiale che supporta, per mezzo della barra LK , la tavoletta OQ , sulla quale viene fatta la proiezione. EF , asse polare inclinato sotto l'angolo della latitudine, che sostiene due bracci CD , sui quali poggia l'asse del cannocchiale. GHI , supporto dell'intero strumento, e fissato su un pilastro in muratura. M e N sono i cerchi di declinazione e di ascensione retta. RS è un'asta di ferro che serve a fissare il cannocchiale.



Quando le proiezioni avvengono su una grande scala, bisogna introdurre una correzione nelle misure che può divenire importante. L'immagine solare si forma in realtà su una superficie sferica ab (fig. 3), avente centro O , mentre l'immagine si forma su un piano tangente mn , o piuttosto sul piano ab , se lo si mette nel punto del bordo del Sole. La differenza tra la corda ab e la tangente mn non è trascurabile, e questa causa d'errore non era sfuggita a Scheiner¹. Del resto, questo metodo può servire solo per ricerche generali; quando si vuole ottenere i dettagli con precisione, bisogna impiegare le misure cronometriche.

1.3 Leggi fondamentali del moto delle macchie.

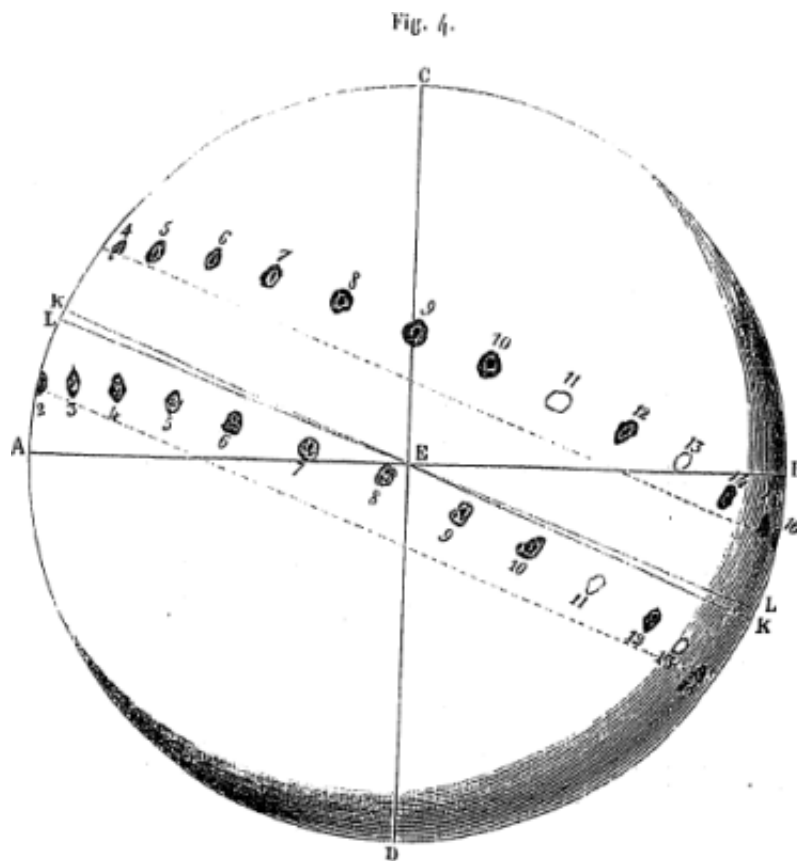
1° In generale, le macchie si presentano sul bordo orientale del Sole, attraversando il disco seguendo linee oblique rispetto al moto diurno e al piano dell'eclittica, e dopo circa quattordici ore, esse scompaiono al bordo occidentale. Non è raro vedere una macchia, dopo essere rimasta invisibile per un periodo di quattordici ore, apparire di nuovo al bordo orientale per compiere una seconda, a volte un terza e anche quarta rivoluzione; ma più in generale esse si deformano e finiscono per dissolversi prima di lasciare il disco, o mentre si trovano sul lato opposto.

2° Quando sul disco solare appaiono simultaneamente numerose macchie, esse descrivono, nello stesso tempo, traiettorie simili e pressoché parallele. Se ne conclude che esso non sono indipendenti, come nel caso di satelliti,

¹Vedere la *Rosa ursina* e le opere di Galileo. La *Rosa ursina* contiene anche numerose cose inutili. Ma cosa non perdoneremmo a Keplero? Era l'errore dell'epoca e del paese.

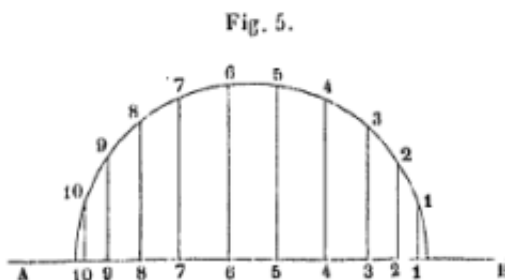
ma che esse si trovano sulla superficie del Sole, e che sono trascinate nel suo moto di rotazione. Inoltre, se le macchie fossero astri indipendenti, bisognerebbe spiegare altrettante facole, che sono soggette allo stesso moto di traslazione; ipotesi assurda, perché, come ben diceva Galileo, non si può supporre che esistano attorno al Sole astri più brillanti del Sole stesso.

3° Se si nota ogni giorno sulla stessa figura la posizione delle macchie, si vede che il loro moto apparente è più rapido vicino al centro, mentre diviene più lento al bordo del disco solare. Noi diamo nella *fig. 4* le traiettorie di due macchie osservate da Scheiner, dal 2 al 14 marzo 1627.



Le aree puntiformi indicano le lacune dovute alla presenza di nubi. Le macchie sono nettamente definite, le ombre e le penombre perfettamente delineate. Si può valutare la curvatura delle traiettorie mediante le loro corde. Si vede facilmente che esse non descrivono sempre la stessa distanza a parità di tempo.

Ma questa differenze sono solo apparenti, e esse risultano dal fatto che il movimento ci appare avere luogo su un piano, mentre in realtà avviene su un cerchio parallelo all'equatore solare; proiettiamo questo parallelo, e con le posizioni successivamente occupate dalle macchie, su un piano perpendicolare al raggio visuale. Per rappresentare il fenomeno, tracciamo un semicirconferenza, la dividiamo in un certo numero di parti uguali, e da ognuna di queste suddivisioni, abbassiamo perpendicolari sul diametro *AB* (*fig. 5*); suddividiamo così il diametro in un certo numero di parti diseguali, ma che sono tuttavia le proiezioni di archi uguali tra loro, e queste proiezioni sono tanto più piccole quanto gli archi corrispondenti si avvicinano sempre più all'estremità del diametro.



Impiegando una simile costruzione, Galileo mostrò che le macchie non possono essere corpi staccati dal Sole e lontani dalla sua superficie, poiché il raggio del parallelo solare soddisfaceva solo al calcolo delle traslazioni diurne.

4° Le macchie, avvicinandosi al bordo, perdono la loro forma arrotondata, divenendo ovali, poi si restringono fino a divenire quasi lineari; si possono valutare dalle quattro figure amplificate che qui riproduciamo (*fig. 6*).

Fig. 6.

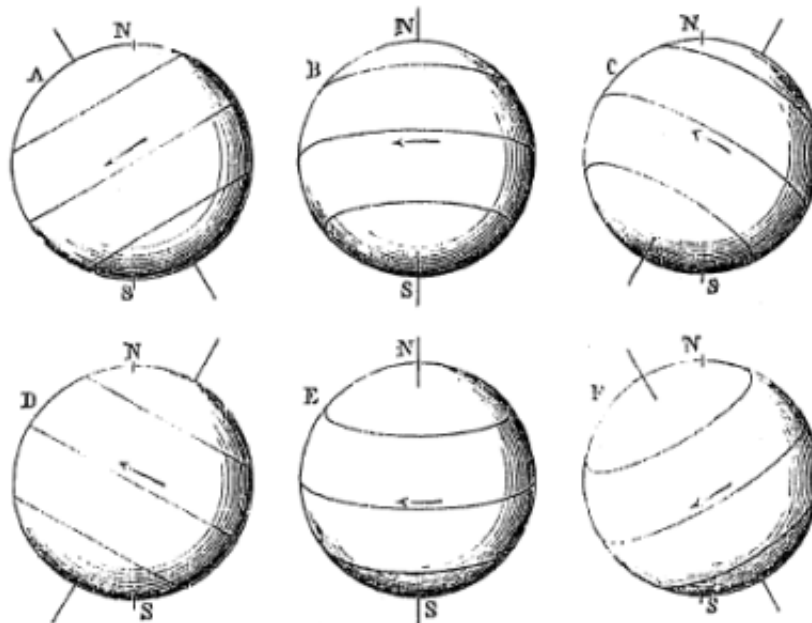


Questi cambiamenti sono ancora semplici apparenze dovute ad un effetto di prospettiva; li si spiega nello stesso modo del rallentamenti apparente. Ma questo fenomeno prova ancora che le macchie aderiscono alla superficie del Sole; poiché, nell'ipotesi contraria, bisognerebbe attribuirle a corpi molto appiattiti, e ciò sarebbe contrario a tutto quanto sappiamo sulla forma propria dei corpi celesti. Galileo le paragonò a delle nubi; più tardi Scheiner le pensò come cavità. Vedremo presto come considerarle.

5° Oltre queste deformazioni apparenti, ve ne sono di reali. La forma delle macchie cambia qualche volta in modo molto evidente, non solo da un giorno all'altro, ma nello spazio di qualche ora. A volte parecchie macchie si confondono in una sola; a volta una macchia si divide in parecchie altre; vedremo presto esempi sorprendenti. Questi cambiamenti di forma influiscono molto sul moto; la regolarità geometrica indicata sopra ne è profondamente alterata, ed è questo che impedì ai primi osservatori di determinare con precisione la durata della rotazione solare.

6° Le traiettorie descritte dalle macchie variano con la stagione: nel mese di marzo, sono ellissi molto allungate con convessità verso nord, e con l'asse maggiore dell'ellisse quasi parallelo all'eclittica (*fig. 7, B.*).

Fig. 7.



Successivamente, la curvatura delle ellissi diminuisce gradualmente, nello stesso tempo in cui si inclinano sull'eclittica come in (*fig. 7,C*), in modo che nel mese di giugno si trovano trasformate in linee rette come in (*fig. 7, D*). Da giugno a settembre, le curve ellittiche riappaiono, ma la loro posizione è inversa della precedente (*fig. 7,E*). Poi, seguendo fasi inverse, ripassano per la curva allungata (*fig. 7,F*), e assumono la linea retta (*fig. 7, A*), per ritornare infine, al termine di un anno, alla forma *B*. In questa figura, le curve sono state un poco esagerate, per far meglio comprendere le loro variazioni.

Tutti questi tipi di traiettorie apparenti sono solamente effetti di prospettiva. In realtà, le macchie seguono i paralleli solari; sono questi paralleli che proiettiamo in ogni istante su un piano perpendicolare alla retta che passa per il punto di osservazione e il centro del globo solare. Queste proiezioni devono necessariamente variare la loro forma con lo spostamento dell'osservatore; esse ci appaiono sotto aspetti differenti, secondo la posizione che la Terra occupa rispetto all'equatore solare. Quando essa è a uno dei suoi nodi, cioè a uno dei punti dove l'eclittica incontra l'equatore solare, le proiezioni di tutti i paralleli sono linee rette, e le traiettorie apparenti delle macchie risultano rettilinee. È ciò che avviene quando la longitudine del Sole è di $74^{\circ} 30'$ e $254^{\circ} 30'$, cioè il 4 giugno e il 6 dicembre. Quando al contrario la Terra si trova sopra o sotto l'equatore solare, le proiezioni delle traiettorie assumono forme ellittiche, e queste curve sono tanto più pronunciate, quanto noi siamo più lontano da questo piano. Il massimo della curvatura si avrà per longitudini che differiscono di 90° da quelle che indichiamo per i nodi.

7° Le macchie non si mostrano indifferentemente su tutti i punti del disco. Esse sono poco numerose nelle vicinanze immediate dell'equatore, e molto rare nelle latitudini superiori a 35° o 40° . Si presentano in quantità maggiori nelle due zone simmetriche dette zone reali comprese tra 10° e 30° di latitudine eliocentrica.

8° Il numero delle macchie è molto variabile. A volte sono molto numerose perché si possa, con una sola osservazione, riconoscere le zone che le contengono abitualmente. A volte invece sono così rare, che può trascorrere un anno intero senza che se veda nemmeno una. Si è osservata una significativa regolarità nel modo in cui questi periodi si succedono.

9° Quando si cerca di determinare la durata della rotazione solare mediante la ricomparsa delle macchie, si trovano grandi anomalie, la cui spiegazione è rimasta a lungo sconosciuta. Si trova in media che una macchia ritorna (almeno in apparenza) alla sua posizione originaria al termine di circa ventisette giorni. Ma vi è in questa valutazione una delle cause di variazione, di cui bisogna tener conto. Durante questo tempo, la Terra non rimane immobile; ha percorso circa 25° della sua orbita, nello stesso verso della rotazione solare. Nel momento in cui una macchia termina la sua rotazione apparente, essa ha descritto un cerchio completo, e, dopo circa due giorni, ha iniziato una seconda rivoluzione. Effettuando la correzione richiesta dalle circostanze, si troverà come vera rotazione solare quella di circa venticinque giorni e mezzo.

Ma questa è ancora per gli scienziati una approssimazione insufficiente. Il contorno apparente del Sole non divide sempre in due parti uguali il cerchio descritto da una macchia; da qui deriva una nuova irregolarità nel moto apparente. Dalla combinazione di questi movimenti deriva che invece di descrivere un'ellisse semplice, un punto della superficie del Sole, visto dalla Terra, descrive un'ellisse i cui assi variano costantemente in grandezza e posizione. Da ciò l'origine di un problema complesso del quale i geometri hanno dato parecchie soluzioni utili e interessanti.

1.4 Ipotesi avanzate sulla natura delle macchie

Scheiner aveva dapprima supposto che le macchie fossero satelliti ruotanti attorno al Sole: opinione insostenibile, presto abbandonata dal suo autore, e che si è cercato in seguito di far rivivere. Dopo aver mantenuto a lungo un silenzio prudente, Galileo le attribuì a nubi fluttuanti nell'atmosfera solare: era la migliore conclusione che poteva trarre dalle osservazioni poco precise che aveva potuto compiere. Questa opinione ebbe per lungo tempo l'approvazione generale; ed è stata ripresa ai nostri giorni da numerosi scienziati rispettabili. Noi non crediamo tuttavia che la si possa sostenere, e all'inizio le si rivolgevano obiezioni molto serie. Negli ultimi anni della sua vita, Scheiner annunciò che le macchie erano situate al di sotto del livello generale della superficie solare, ma senza far conoscere con sufficiente dettaglio i fatti sui quali si basava tale opinione.

Alcuni astronomi credettero al contrario che fossero montagne i cui fianchi più o meno scoscesi producessero il fenomeno della penombra: opinione inconciliabile con il moto proprio che le macchie possiedono a volte in modo molto evidente. Infine, le si immaginò come ammassi di scorie fluttuanti sulla superficie dell'oceano di fuoco che costituiva il Sole.

Tuttavia era trascorso appena un secolo, che un astronomo inglese, Wilson, fece una scoperta memorabile; mostrò in modo evidente che le macchie sono dovute a delle cavità, e fornì la prima idea esatta di come è composta la fotosfera². Svilupperemo in seguito le sue osservazioni; ciò che ci basta ricordare in questo momento è che esse sono state il punto di partenza dei grandi lavori di Herschel, di cui dobbiamo parlare. Ne diremo solo qualcosa, poiché l'epoca di quest'astronomo tocca da molto vicino quella in cui diviene impossibile seguire l'ordine cronologico nell'esposizione delle scoperte.

1.5 Lavori di Herschel

W. Herschel era un uomo di genio, ma era soprattutto un osservatore eccezionale. Ha osservato numerosi fenomeni servendosi di potenti strumenti costruiti con le proprie mani, e ha così minuziosamente descritto le

²Si chiama così lo strato luminoso che avvolge il Sole.

meraviglie che gli si erano rivelate, che ha lasciato poche cose da completare ai suoi successori. Solo i suoi strumenti gli erano per così dire personali, e così pure fu per il linguaggio che dovette creare per esprimersi; questo linguaggio non fu sempre compreso, e solo ora, grazie a strumenti paragonabili ai suoi, possiamo valutare la portata delle sue scoperte.

L'idea base di Herschel riposa sulla scoperta di Wilson. Sottolineò con ragione, come aveva fatto questo astronomo, che se le macchie sono delle cavità, la materia luminosa non potrebbe esistere, propriamente parlando, né allo stato liquido né a quello gassoso; essa precipiterebbe con una tremenda rapidità a riempire il vuoto, è ciò renderebbe impossibile la permanenza delle macchie che vediamo a volte persistere per parecchie rivoluzioni. D'altronde, i moti propri delle macchie dimostrano che la fotosfera non è solida; la si può quindi paragonare alla nebbia e alle nubi, e deve essere sospesa in una atmosfera simile alla nostra; questa è la sola ipotesi che possa spiegare le rapide variazioni di cui siamo testimoni.

In una seconda Memoria, Herschel perseguì questo studio con una perspicacia degna del suo genio. Sfortunatamente si lasciò sedurre dall'idea dell'*abitabilità* del Sole. Ci doveva quindi essere un nucleo solido sul quale gli abitanti potessero stare, e una circostanza qualunque che li proteggesse contro le radiazioni della fotosfera. Perciò, suppose, al di sopra del nucleo, uno strato di nuvole sempre contigue alla fotosfera che lo circondava, e che nello stesso tempo si lacerava per lasciar vedere il nucleo: ipotesi arbitrarie, che non avevano alcun fondamento nell'osservazione, e che conducevano a spiegazioni in completo disaccordo con i principi della fisica moderna.

Tuttavia i lavori di Herschel contengono tante cose positive, e idee giuste, che hanno fatto compiere grandi progressi alle nostre conoscenze sulla reale costituzione del Sole, e che prenderemo spesso come guida nell'esposizione che faremo.

Non abbiamo detto nulla dei lavori degli antichi astronomi, Hevelius, Cassini, Huyghens, ecc. Le loro osservazioni, per quanto laboriose, hanno reso pochi servizi alla scienza. Non è la stessa cosa in epoca moderna. Citeremo spesso Sir John Herschel, M. Carrington, M. Warren del la Rue, M. Faye, M. Spoorer, M. Wolf, M. Schwabeen. Accontentiamoci di citare questi nomi che ritroveremo spesso nel corso di questo lavoro.

Capitolo 2

NUOVI METODI DI OSSERVAZIONE

2.1 Oculari elioscopici.

La grande intensità della luce del Sole è sempre stata la principale difficoltà da superare nell'osservazione dei fenomeni che avvengono alla superficie di questo astro. L'impiego di lenti fortemente colorate è un mezzo prezioso per i cannocchiali ordinari; ma, nei grandi strumenti, esse si rompono o si fondono con grande facilità. Per rimediare a questo inconveniente, si è a lungo impiegato diaframmi destinati a ridurre l'apertura dell'obiettivo; ma si perde così una parte dei vantaggi che presentano i grandi strumenti, e nello stesso tempo si diminuisce di molto la nitidezza dell'immagine. Quest'ultimo risultato riguarda un fenomeno di diffrazione, che è tanto più significativo quanto più stretta è l'apertura del diaframma; ogni punto si trova rappresentato da un cerchio di una certa estensione, e, tutti questi cerchi raccolti gli uni sugli altri, danno un'immagine piatta e confusa, nella quale diventa impossibile distinguere i dettagli.

Herschel aveva verificato questi inconvenienti, anche se preferiva usare vetri fortemente colorati, conservando tutta l'apertura del suo telescopio. Provò parecchi altri mezzi, e in particolare liquidi diversamente colorati, per esempio acqua mescolata a inchiostro; ma il calore produceva in questi liquidi moti tumultuosi, e ne derivava una grande confusione nelle immagini. Suo figlio John propose l'impiego di uno specchio concavo di vetro non stagnato; si otteneva così, visto il debole potere riflettente del vetro, un'immagine ancora troppo mossa per essere esaminata ad occhio nudo, assai debole tuttavia per quanto si poteva osservare con un vetro colorato, malgrado l'apertura considerevole dello strumento. M. Chacornac ha recentemente impiegato questo procedimento, con un telescopio Foucault non argentato. Foucault, al contrario, ha proposto di argentare la superficie anteriore degli obiettivi dei cannocchiali, e di guardare il Sole attraverso questo sottile strato di metallo. Si assicura che le immagini sono molto belle e molto gradevoli alla vista. Ma questi diversi procedimenti richiedono uno strumento specificamente destinato al Sole, e pochi astronomi si decisero senza dubbio a sacrificare i loro migliori obiettivi.

Era quindi importante trovare un mezzo che si potesse facilmente adattare a tutti gli strumenti. L'astronomo inglese Dawes propose di mettere il diaframma, non all'obiettivo, ma all'oculare; perciò, riceveva l'immagine su una lastra d'avorio ricoperta di cerume, e guardava attraverso un foro molto piccolo. Io ho spesso impiegato a questo scopo un semplice biglietto da visita ricoperto di cerume, e forato con uno spillo; lungi dal rompersi, esso non si anneriva malgrado la grande quantità di calore che si concentra nel fuoco di un grande obiettivo. Il solo inconveniente, è che il campo visivo diviene molto stretto. Questo inconveniente non è senza qualche compensazione, poiché, essendo nascosta la maggior parte del disco, l'occhio è più a suo agio nello studio dei dettagli.

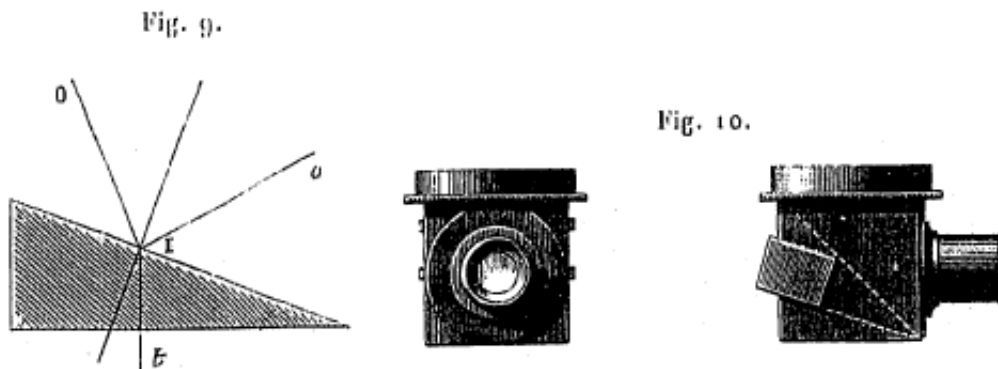
Tuttavia, anche con piccoli diaframmi, bisogna sempre impiegare un vetro colorato. I migliori sono quelli detti vetri *graduati*, formati da due pezzi tagliati a forma di cuneo; uno bianco e l'altro blu; li si sovrappone semplicemente, poiché tutte le sostanze che potrebbero servire per incollarli si gonfiano con il calore e formano delle bolle. Mettendo questi vetri graduati (fig. 8) in una montatura che si infila davanti all'oculare, si può regolare a volontà l'intensità della luce con notevoli vantaggi.

Fig. 8.

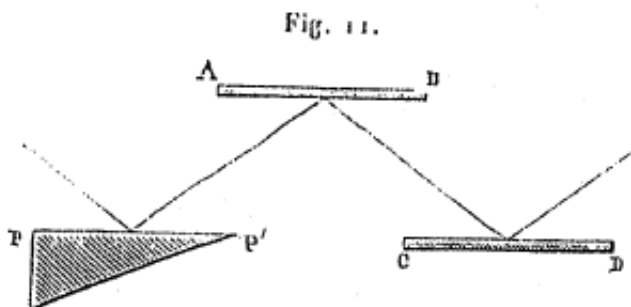


Ma il modo migliore è stato proposto da Sir John Herschel. Consiste nell'impiego della luce riflessa. Si è provato a produrre questa riflessione alla superficie di una lamina di vetro molto intensamente colorata; si evitava così la riflessione sulla seconda faccia, e di conseguenza si eliminava una fonte di disturbo nella formazione

dell'immagine. Ma allora i raggi che non sono riflessi vengono assorbiti; il vetro si scalda, si deforma e finisce col rompersi. Herschel ha evitato tutti questi inconvenienti adottando la seguente disposizione: un prisma rettangolare di cristallo è disposto in modo che il raggio incidente OI (fig. 9) si riflette sulla sua ipotenusa; i raggi che penetrano nel cristallo escono perpendicolarmente alla seconda faccia, lungo la direzione It , e si evitano così le riflessioni interne che sarebbero nocive. Il prisma è fissato in una montatura a giorno (fig. 10) onde evitare l'innalzamento di temperatura. Con questa disposizione, l'apparecchio si scalda assai poco e la luce è talmente indebolita, che ci si può accontentare di un vetro colorato molto sottile.

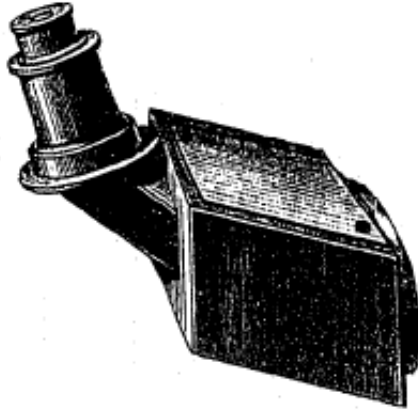


Tuttavia, il vetro colorato rimane sempre, e impedisce di vedere il Sole con il suo colore reale. Questo inconveniente scompare nell'oculare polarizzatore pensato dal P. Cavalleri di Monza. Noi ci serviamo di uno di questi elioscopi, costruito a Milano da MM. Porro e Dell'Aqua. La luce è dapprima ricevuta su un prisma PP' simile a quello di Herschel (fig. 11), solo che l'incidenza avviene sotto un angolo di 36° , sotto la quale il vetro polarizza la luce. Da lì i raggi vengono poi a cadere su uno specchio di vetro nero AB , parallelo al prisma; questa incidenza avviene quindi ancora sotto l'angolo di 36° . Infine la luce subisce un'ultima riflessione in CD , sempre secondo l'angolo di polarizzazione. Il prisma e il primo specchio sono fissati in una posizione immutabile l'uno rispetto all'altro; ma lo specchio CD è montato in un tubo che ruota liberamente, in modo che si può disporre in tutti gli azimut possibili rispetto al raggio riflesso. Disponendo CD perpendicolarmente al piano di polarizzazione, si indebolisce la luce al punto che l'occhio può sopportarla senza inconvenienti, anche nel periodo in cui il Sole è alla sua massima altezza. La luce non scompare completamente, ma ciò sarebbe inutile.



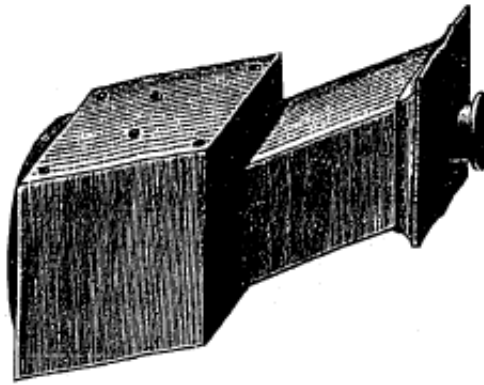
La fig. 12 rappresenta questo oculare ridotto a un quarto della sua grandezza naturale.

Fig. 12.



M. Merz ci ha inviato un oculare costruito secondo gli stessi principi (fig. 13), nel quale l'estinzione della luce è completa, grazie a un quarto riflettore. Le superfici sono perfettamente piane, ma il prisma è sostituito da un vetro colorato, ciò che fa credere che il calore non lo rompa. Questo dispositivo ha d'altronde un grande vantaggio: i raggi escono parallelamente all'asse della lente, cosa impossibile nell'altro sistema.

Fig. 13.



Questi elioscopi sono molto costosi, ma presentano notevoli vantaggi, e in particolare quello di moderare a piacere l'intensità della luce. Tuttavia, malgrado tutte le precauzioni che si prendono per preservare la vista dell'osservatore, e ottenere buone immagini, permane un inconveniente che non si può evitare, cioè il riscaldamento degli obiettivi e quello della massa d'aria contenuta nei tubi. Ne risultano irregolarità molto significative nella rifrazione; anche in capo a qualche minuto le immagini non presentano più la stessa nettezza, e si è obbligati ad interrompere l'osservazione per qualche tempo per consentire l'abbassamento della temperatura. M. Nashmyth ha proposto di impiegare lenti senza tubi, come quelle di Huyghens. Questa procedura potrebbe riuscire per i grandi riflettori; per i rifrattori, si potrebbero adottare tubi a giorno; l'aria circolante liberamente si riscalderebbe molto meno.

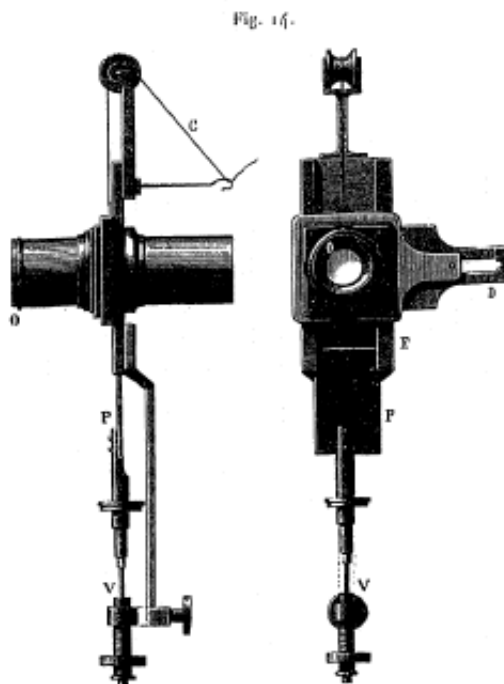
Noi raccomandiamo agli osservatori di evitare i vetri rossi e i neri; lasciano passare molto calore, e il loro colore affatica la vista. I colori verdi, gialli o neutri sono i migliori.

2.2 Fotografie solari. Disegni

La fotografia ha reso grandi servigi, sia nelle osservazioni comuni del Sole, sia nelle eclissi. Si ottengono le evidenze fotografiche con lo stesso apparecchio che serve per le proiezioni; solo si mettono nel fuoco due fili incrociati che serviranno ad orientare l'immagine.

La durata dell'esposizione deve essere talmente corta, che, per regolarla, bisogna impiegare una speciale apparecchiatura. Essa consiste in una lastra metallica che scorre in una scanalatura, e che porta una fessura molto stretta, di larghezza variabile a piacere. Nel momento dell'operazione, si lascia andare un grilletto; la lastra è sottoposta all'azione di una molla, e la fessura passa rapidamente attraverso il cono luminoso.

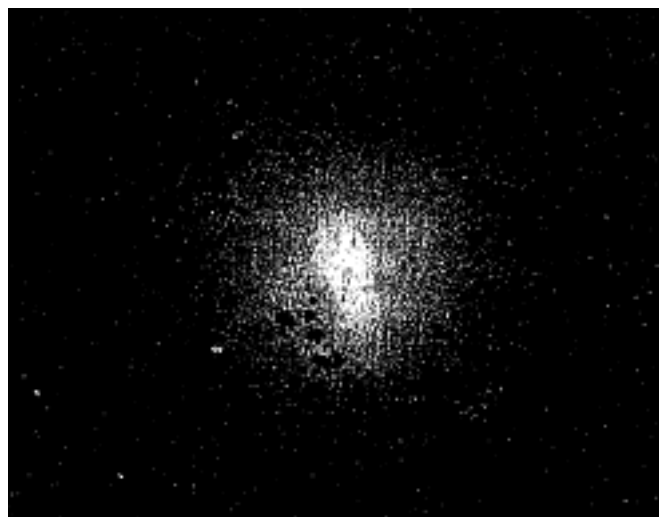
La fig. 14 rappresenta l'oculare che adattiamo come equatoriale, per queste operazioni. È simile a quello di Kiew, e l'abbiamo fatto costruire da Dallmayer a Londra. La lente deve essere supportata da un movimento d'orologeria, anche se la si può muovere manualmente; inoltre, deve avere un cercatore molto potente per essere certi che nel momento dell'operazione la lastra si trova in una posizione opportuna.



O è l'oculare positivo, composto da lenti acromatiche, destinate a formare l'immagine; *P* è la lastra che scorre verticalmente, munita di una lente *F*, e di una diaframma circolare nella parte superiore. *D* è una lastra che scorre orizzontalmente, e forata in due punti, uno completamente libero, l'altro che porta due fili micrometrici incrociati ad angolo retto. *V* è una molla in caucciù o in acciaio per muovere la lastra verticale; *C* un filo che deve trattenere la lastra fino al momento dell'operazione.

L'operazione si fa nel modo seguente: la lastra *P* essendo disposta in modo che i raggi luminosi possano giungere al vetro smerigliato, si mette a punto come di consueto; poi si solleva la lastra finché la lente *F* sia interamente sopra il cono luminoso, e la si mantiene in questa posizione con l'aiuto del filo *C*. Quando lo specchio sensibilizzato è stato messo al posto del vetro smerigliato, si taglia il filo; la lente *F* passa rapidamente nel cono luminoso, e l'immagine è prodotta. Si rivela poi l'immagine e la si fissa con le comuni procedure.

Si valuta a un centesimo di secondo il tempo necessario ad ottenere una buona misura; ma ciò dipende da parecchie circostanze. Se l'esposizione è stata troppo prolungata, le macchie scompaiono e i bordi sono poco nitidi. Il diametro dell'immagine dipende pure dalla durata dell'esposizione; se il tempo è troppo breve, i bordi sono mal delineati, si riconosce con evidenza la forma sferica del Sole, e lo si può valutare dal forte assorbimento esercitato dalla sua atmosfera. La fig. 15 è stata ottenuta in circostanze simili da M. Selwyn, nell'ottobre del 1860.



L'oculare e la lastra devono essere racchiusi in una camera oscura sul prolungamento della lente, e solidali con essa; con l'aiuto di una stoffa nera molto spessa, si trasforma la cupola in una camera oscura, per evitare l'azione della luce diffusa. È raro che il fuoco ottico coincida esattamente con il fuoco chimico; così va individuato con una serie di esperienze preliminari.

I disegni delle macchie sono molto difficili da realizzare, avendo una forma alquanto complessa; e tuttavia non ci si può esimere, poiché è il solo modo per ottenere con esattezza certi dettagli che la fotografia riproduce con difficoltà. Questi dettagli sono talmente cangianti, che bisogna a volte cogliere al volo.

Sarebbe quindi importante avere un mezzo che permettesse agli osservatori di fissare questi ricordi, senza che si presentino come realizzazioni artistiche. Il metodo migliore che abbiamo trovato consiste nel disegnare su carta nera con bianco di piombo; il bianco che impieghiamo, noto in commercio sotto il nome di *paillard*, è in panetti molto piccoli, chiamati *bianco d'argento*. Impiegando dei pennelli molto sottili, riproduciamo anche i più piccoli dettagli. Pertanto, iniziamo a prendere, con il cannocchiale, una proiezione molto ingrandita della macchia; due fili di ragno, di cui si è determinata la distanza angolare, proiettano nello stesso tempo la loro immagine sullo schermo, e ciò serve per avere punti di riferimento per le misure da effettuare; poi completiamo questo schizzo. È così che abbiamo eseguito con i Padri Ferrari e Capelletti, la maggior parte dei disegni che conserviamo all'Osservatorio.

Queste figure definite, siccome sono disegnate su una grande scala, vengono ridotte con la fotografia. Le figure riprodotte su questo libro sono state ottenute in questo modo, e in particolare quelle che rappresentano i dettagli delle penombre. Le incisioni stesse sono stati fatti dopo la riproduzione fotografica.

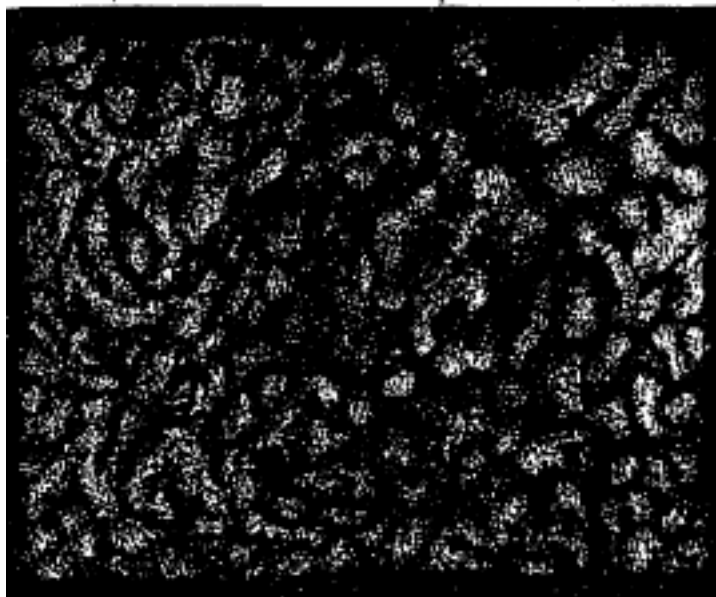
Capitolo 3

STRUTTURA GENERALE DELLE MACCHIE SOLARI

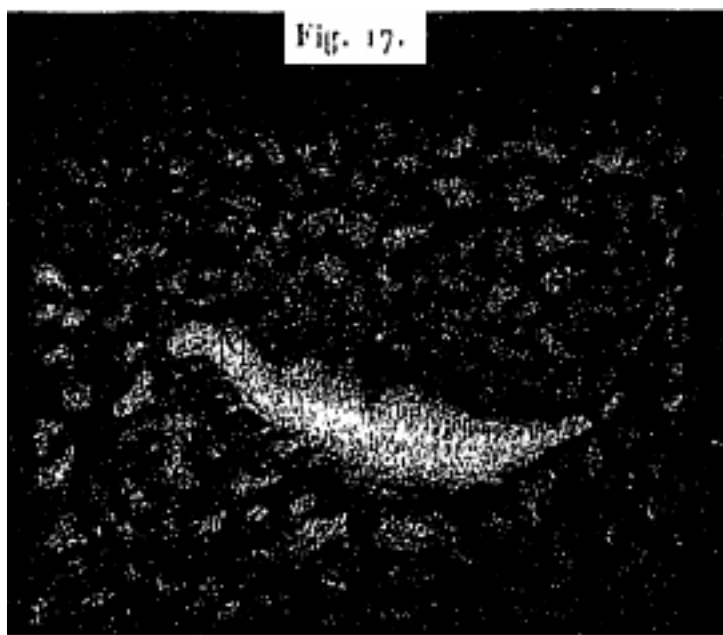
3.1 Aspetto generale della fotosfera

Quando si esamina il Sole con strumenti dotati di grande apertura e di un forte potere di ingrandimento, si vede che la sua superficie, lungi dall'essere liscia e uniforme, presenta una apparenza irregolare e ondulata, come un mare agitato dalla tempesta. Quando lo si proietta su uno schermo bianco, con l'aiuto di un potente oculare, vi si trova l'aspetto rappresentando nella fig. 16, caratterizzata da una moltitudine di increspature e anfrattuosità impossibili da dettagliare.

Fig. 16.



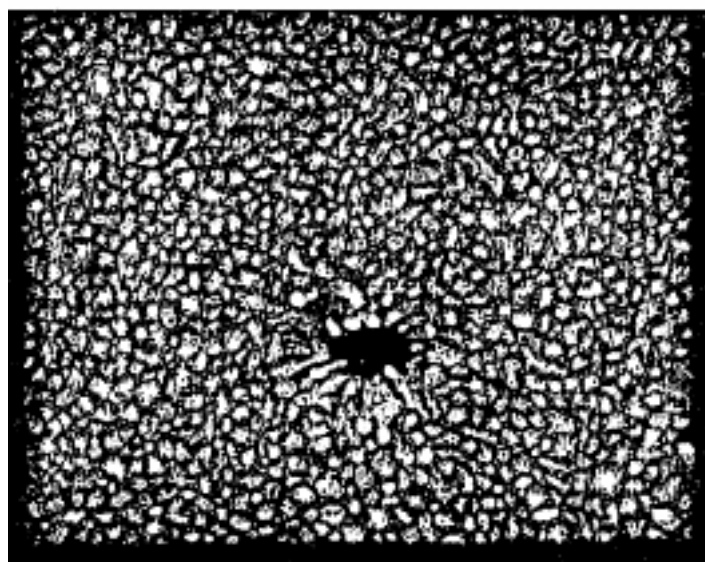
Qualche volta, soprattutto vicino ai bordi, e nelle vicinanze delle macchie, si osservano qua e là masse più luminose dette *facole*. Esse occupano spesso uno spazio alquanto considerevole; è raro che siano molto vicine ed isolate. La fig. 17 rappresenta una facola notevole osservata al Collegio Romano.



Se si vuole conoscere questa struttura in maniera più precisa, bisogna rinunciare alla proiezione ed esaminare direttamente il Sole, con un potente oculare, e in un momento in cui l'atmosfera è perfettamente calma. Allora si vede che la superficie è ricoperta di una moltitudine di piccoli grani, aventi quasi tutti le stesse dimensioni, ma di forme molte diverse, tra le quali sembra prevalere l'ovale. Gli interstizi molto sottili, che separano questi grani, formano un reticolo scuro, ma non completamente nero. Nella fig. 18, abbiamo provato a fare un schizzo che rappresenta l'aspetto caratteristico della superficie, poiché i dettagli sembrano di difficile riproduzione. Ci sembra difficile trovare un oggetto noto che ricordi questa struttura; si ottiene qualcosa di analogo guardando al microscopio del latte un poco essiccato, i cui globuli hanno perso la regolarità della loro forma.

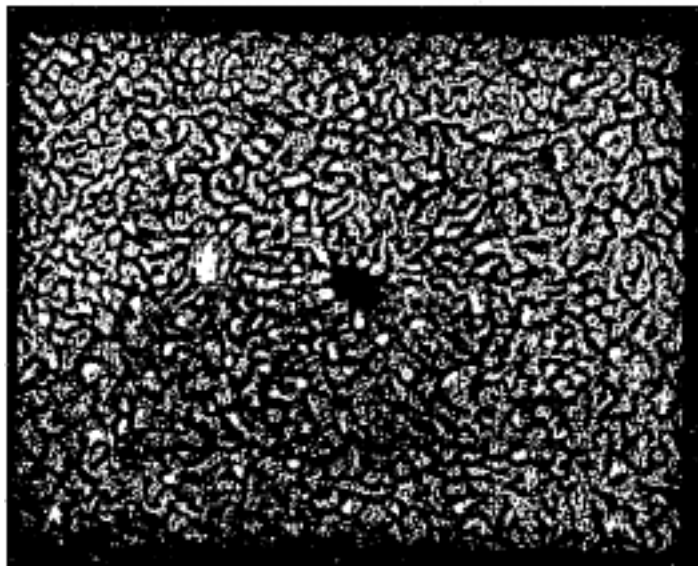
Questi grani si riuniscono a volte in piccoli gruppi, e formano allora una massa più brillante, come si vede nella fig. 19. La loro forma ovale li fa assomigliare a grani di riso. M. Nashmyth li aveva chiamati foglie di salice; ma la loro forma richiama piuttosto quella dei grani di riso, benché in realtà sia molto irregolare.

Fig. 18.



Questa struttura è stata osservata solo con strumenti di grande apertura, poiché con grani aventi dimensioni molto piccole, la diffrazione li amplificava e li faceva sconfinare uno sull'altro, producendo così una generale confusione. Le reali dimensioni di questi grani non sono facilmente determinabili, a causa della difficoltà di fissarli individualmente sotto il filo del micrometro. Ci si può riuscire solo confrontando i loro diametri con quelli dei fili micrometrici, e li si valuta in $\frac{1}{4}$ o $\frac{1}{2}$ di secondo.

Fig. 19.



Si possono misurare direttamente quando si presentano nelle vicinanze di pori o macchie molto piccole. Allora non sono più tondi, ma sembrano allungarsi e assumere la forma di piccole foglie con l'asse maggiore diretto verso il centro dell'apertura. È questo il caso della piccola macchia della fig. 18, osservata il 10 agosto 1865. Essa era quasi tonda con un diametro di $6''$,38; il suo perimetro conteneva da 24 a 32 di queste piccole foglie, ed era difficile contarle in modo più preciso; la loro larghezza era quindi, in media, di $0''$,6 a $0''$,8; e se teniamo conto dello spazio che le separava, spazio che è pressoché uguale a un terzo di ognuna di esse, resta per la loro lunghezza un terzo di secondo, o un mezzo secondo.

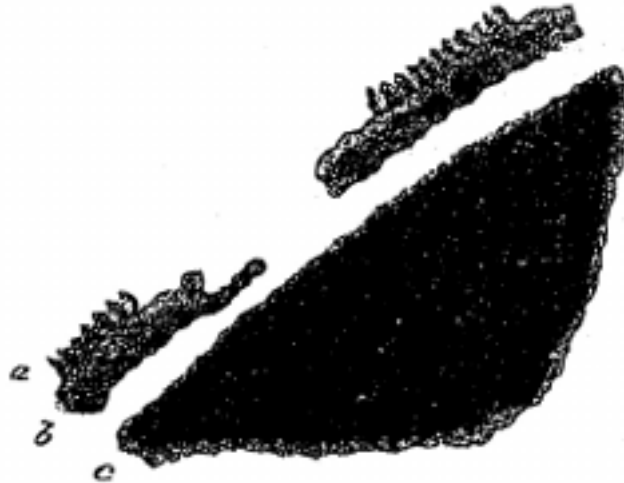
Questi valori sono certamente esagerati, poiché i grani sono sempre più piccoli delle foglie, e inoltre, il loro diametro è sempre amplificato dalla diffrazione. Ogni punto luminoso produce qui un fenomeno analogo a quello mostrato dalle stelle; l'angolo da esse sotteso è effettivamente nullo, e di conseguenza esse si dovrebbero presentare a noi come singoli punti; tuttavia i migliori cannocchiali ce le mostrano come piccoli cerchi di dimensioni valutabili. Lo strumento che impieghiamo ha un diametro apparente da noi valutato in $\frac{1}{3}$ di secondo, poiché due stelle di grandezza media più vicine, invece di separarsi, si confondono in una sola immagine di forma ovale.

Per quanto è possibile giudicare dalle osservazioni fatte finora, questi grani sono veri punti luminosi, e li si può considerare come somma di tanti coni aventi diametri di base tra 240 e 260 *km*.

I grani sono animati da moti evidenti, ma molto difficili da determinare per mezzo della massa brillante della fotosfera. È vicino ai pori che li si può valutare comodamente. Sul bordo di queste aperture, si vedono i grani allungarsi, muoversi, e modificare completamente il contorno dei pori. Dopo una mezzora, il foro circolare rappresentato in fig. 19 si trova per metà sovrapposto; sei grani occupavano quasi la metà della sua superficie, disponendosi perpendicolarmente a un diametro passante per il centro. Dopo un'ora, la cavità era del tutto scomparsa.

W. Herschel aveva messo in evidenza queste granulazioni; dava loro il nome di *corrugamenti* o *increspature*, espressione meno esatta forse, ma per la quale, come ben mostrato dalle sue descrizioni, designava lo stesso fenomeno di cui parliamo. Aveva anche evidenziato il reticolo scuro che separa i grani, e lo indicava con il termine *indentazione*. Costruì pure una teoria per spiegare queste apparenze. Per lui, i punti brillanti *a* (fig. 20) erano le sommità dei coni di fiamme di cui era ricoperto il Sole, mentre la penombra *B* del reticolo scuro si spiegherebbe con le nubi planetarie di cui ammetteva l'esistenza: *c* è il nucleo solare oscuro. La figura è quella da lui presentata nelle *Philosophical Transaction* (1802), per illustrare le sue idee.

Fig. 20.



Questa spiegazione non è ammissibile, ad eccezione della prima parte che è molto naturale, salvo che essa supponga una regolarità che non abbiamo osservato. Infatti, abbiamo detto che la materia luminosa del Sole è analoga alle nebbie o alle nubi; è quindi assai naturale ammettere che i grani sono le sommità dei coni arrotondati che chiudono queste masse vaporose che fluttuano come *cumuli*, nell'atmosfera solare. Fenomeno assai comune anche sulla Terra quando si osserva, dalla sommità di un monte, nebbie e nubi produrre un effetto simile; le enormi dimensioni di questi corpi solari, presentanti una estensione di parecchie centinaia di chilometri, possono solo rendere questa spiegazione più plausibile. In tutti i casi, si deve ritenere come certo che i grani sono le sommità di prominente relativamente piccole, che ricoprono la superficie solare, poiché queste strutture sono ben visibili verso la zona centrale del disco, come ben sottolineato da Herschel; esse scompaiono vicino ai bordi, poiché queste masse coniche si oscurano l'un l'altra, e ciò impedisce di vedere gli interstizi ai quali si deve il reticolo nero.

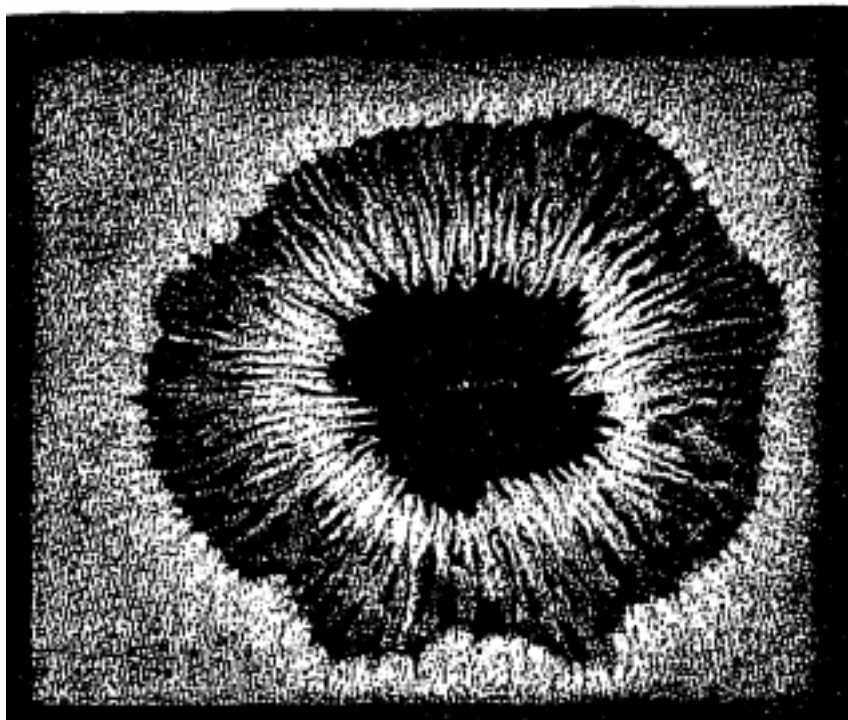
Abbiamo detto che i grani si allungano nelle vicinanze dei pori. Questo fenomeno è reale o solo apparente? Si può sostenere l'una e l'altra di queste ipotesi; può essere che questi grani pressati da quelli che li circondano, tendano ad allungarsi realmente per riempire lo spazio lasciato vuoto, come osserviamo qualche volta per le nubi che fluttuano nella nostra atmosfera; può essere anche che i coni luminosi si inclinino verso l'apertura vicina, senza allungarsi realmente. Torneremo presto su questa questione per trattarla con nuovi dettagli.

La superficie del Sole è a volte talmente ricoperta da queste granulazioni, il reticolo è talmente pronunciato che si sarebbe tentati di vedere dappertutto pori e frammenti di macchie. Ma questo aspetto non è costante, e bisogna cercarne la causa, non solo nelle variazioni della nostra atmosfera che rendono a volte difficili le osservazioni, ma anche nelle variazioni che subisce il Sole. Del resto, bisogna riconoscerlo, queste piccole granulazioni sono le particolarità più difficili da osservare, a causa del riscaldamento assai rapido dell'obiettivo e del tubo. M. Nashmyth assicura che eliminando il tubo dal suo cannocchiale distingueva molti dettagli che gli sfuggivano senza questa precauzione.

3.2 Formazione delle macchie

Il tempo necessario alla formazione di una macchia è alquanto variabile, ed è impossibile determinarne una legge; alcune si formano molto lentamente, altre appaiono quasi istantaneamente. Tuttavia, se si osserva il Sole tutti i giorni con molta cura, si riconosce che questa formazione non è mai del tutto istantanea, per quanto rapida possa essere. Il fenomeno è sempre annunciato con qualche ora di anticipo; si avverte nella fotosfera una grande agitazione che si manifesta sia attraverso le facole sia attraverso i pori e un assottigliamento dello strato luminoso che li separa; questi pori si spostano dapprima con rapidità, poi, uno di essi sembra prendere il sopravvento e si trasforma in una grande apertura. Nei primi istanti della formazione, non vi è una penombra nettamente definita; essa si sviluppa progressivamente e diviene regolare e la macchia assume forma arrotondata come in fig. 21.

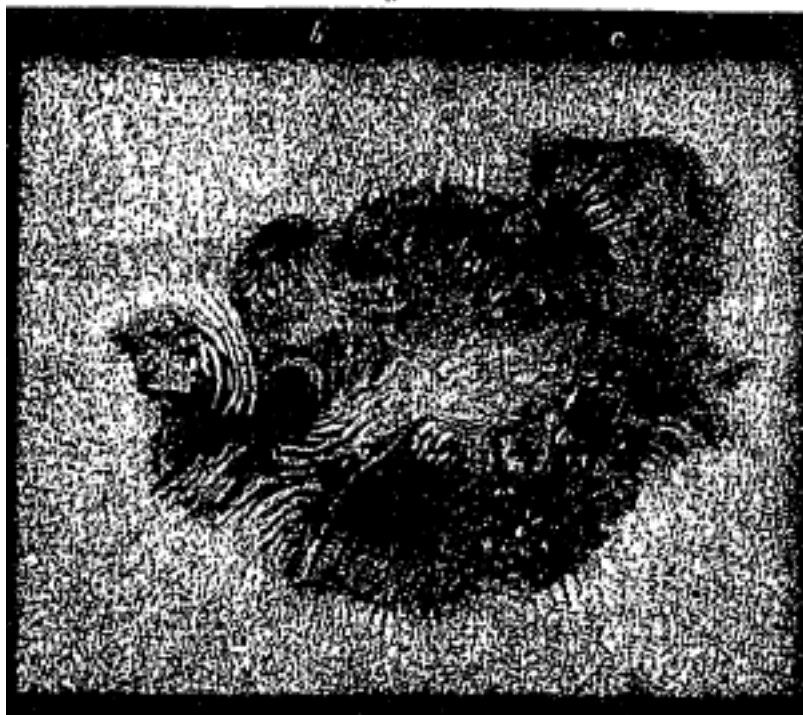
Fig. 21.



Questa formazione tranquilla e pacifica si realizza solo in periodi in cui sembra regnare la calma nell'atmosfera solare; in generale, lo sviluppo è tumultuoso e più complesso. Riportiamo solo qualche esempio, poiché potremmo moltiplicarli all'infinito, e gli osservatori che si vorrebbero dedicare a questo genere di ricerche non tarderanno a trovarne in grande numero, tutti molto capricciosi e alquanto diversi tra loro.

Sceghieremo, come primo esempio, la macchia che apparve il 30 luglio 1865 (fig. 22),

Fig. 22.



Il 28 luglio, in questa zona non si osservava nulla di straordinario, né pori, né facole. Il 29 vi erano semplicemente tra punti neri. Il 30 alle 10^h30^m , fummo alquanto sorpresi di trovare una macchia enorme corrispondente all'incirca al centro del disco. Il diametro medio della parte offuscata era di 76 secondi, cioè quattro volte e mezza circa il diametro della Terra. Al centro, si notava una massa di materia luminosa che sembrava vorticare,

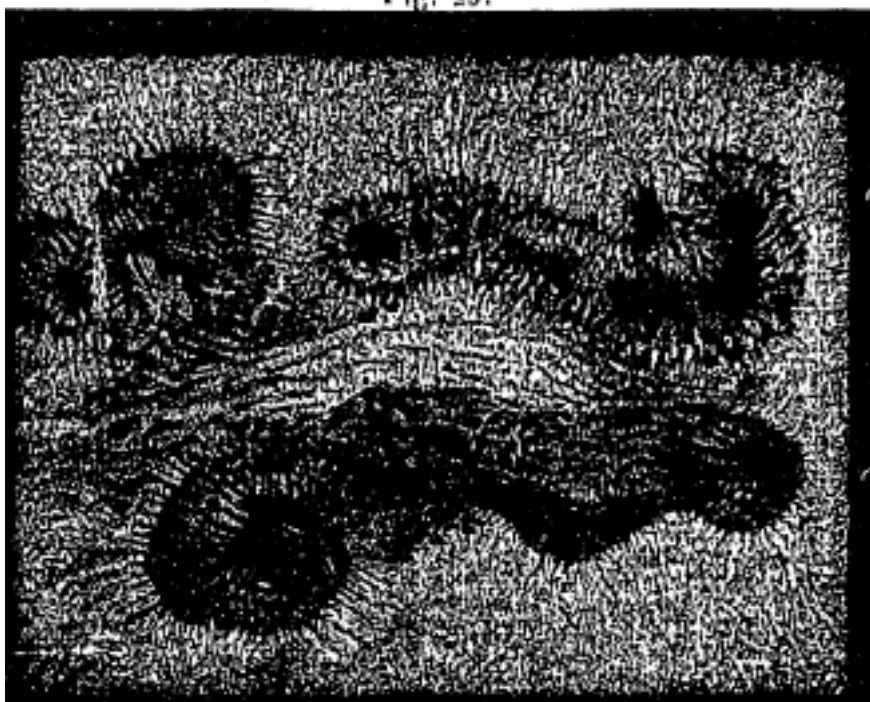
e attorno alla quale si erano prodotte numerosi strappi. In mezzo a questo caos, si potevano distinguere quattro centri principali di movimento. A sinistra, in *a*, si presentava una vasta apertura; attorno ad essa lingue di fuoco vorticavano in direzioni diverse, e in mezzo a queste lingue, si distinguevano nettamente velature per metà luminose che circondavano una cavità più scura.

Al di sopra, in *b*, si trovava un secondo centro, più piccolo del primo, il cui bordo superiore era nettamente definito, ma con la sua parte inferiore un gran numero di piccole lingue di fuoco analoghe alle precedenti. A destra, in *c*, una grande fenditura presentava all'incirca la forma di una S; su essa erano sparpagliate lingue di fuoco e tratti luminosi scollegati. Infine, nella parte inferiore, al livello del punto *d*, si vedeva un'altra fenditura allungata e ricurva, che offriva all'occhio un disordine che sfida ogni descrizione. Tra queste quattro cavità, vi era un ammasso di facole e di materia luminosa che presentava l'aspetto di una massa in ebollizione.

Il tutto era animato da moti tumultuosi ed estremamente rapidi. Lo si riprodusse con un disegno il più rapidamente possibile, ma non si era ancora concluso che la prima parte aveva già cambiato completamente forma. La sera, si fece un secondo disegno, ma non assomigliava al precedente se non per la caratteristica fondamentale; al centro, una materia fotosferica molto agitata; attorno, una corona di voragini aperte, le cui quattro principali rimangono ancora, occupando le stesse posizioni.

Il giorno dopo, l'aspetto era completamente cambiato. La fig. 23 dà un'idea della nuova disposizione. Si riconoscono ancora i quattro centri principali, ma sono come allineati a due a due, e sono congiunti da crepacci sinuosi. La cavità *b* è già molto evidente, e separata dalla grande fenditura da un istmo composto di materia fotosferica allo stato normale. I due punti inferiori *a* e *d*, sono ancora riuniti, ma meglio delineati; la massa intermedia è come stirata e il suo aspetto ricorda quello di una palla di cotone cardato allungata come se tirato dai due lati. Questo confronto è il solo che possa esprimere le apparenze che abbiamo tentato di riprodurre nel disegno. In ventiquattro ore, le dimensioni si erano notevolmente modificate; la lunghezza era quasi raddoppiata: essa era di 147 secondi. Nei giorni successivi, la massa che separava le quattro aperture si trasformò all'incirca in penombra sulla quale erano dispersi dei grani luminosi.

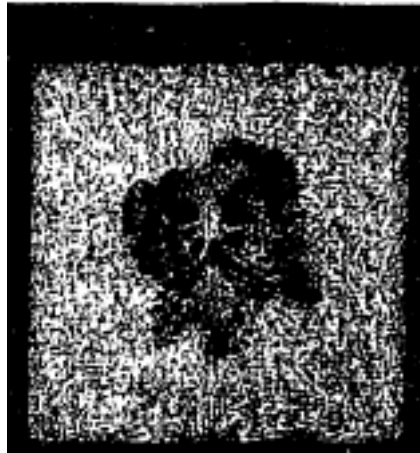
Fig. 23.



Rimpiangiamo di non poter dare qui la serie completa dei disegni eseguiti ogni giorno con molta cura, ma torneremo poi su qualche dettaglio interessante e molto istruttivo. Due parole soltanto per concludere la storia di questa macchia. I centri si isolarono e pronunciarono sempre più; l'intervallo che li separava rimase coperto da piccole macchie isolate. Il 27 agosto, cioè dopo una rotazione completa del Sole, la grande apertura a forma di S rimaneva ancora nel punto *c*; i centri *a* e *b* erano ancora nettamente visibili nella parte anteriore. In questo giorni sembra che vi sia stata una recrudescenza nella perturbazione; tra i centri *a* e *b*, e gli altri due *c* e *d*, vi era una distanza di parecchi minuti. Il 17 settembre, dopo una nuova rotazione, si vedevano semplicemente porosità e facole. Infine, dopo una terza rotazione, non rimaneva alcuna traccia di questa immensa perturbazione che aveva agitato l'atmosfera del Sole.

Citiamo ancora un esempio. Il 29 maggio 1865, osservammo una macchia le cui dimensioni non avevano nulla di straordinario: essa misurava circa 50 secondi (fig. 24).

Fig. 24.



Essa presentava, distribuita attorno ad una massa centrale, un grande numero di aperture separate tra loro da filamenti luminosi, la cui disposizione somigliava a quella dei raggi di una ruota che, partendo dall'asse, si dirigono verso la circonferenza. Questi nuclei erano cosparsi di velature e di piccoli grani slegati alcuni dei quali disposti a spirale. La sera qualche raggio era scomparso, e la spirale era diretta in senso contrario. Il 30 (fig. 25), rimanevano solo tra raggi. Il 31 (fig. 26), al centro non vi era più materia fotosferica; restavano soltanto alcune bande ricurve a forma di anse, che non si collegavano con il centro. Nei giorni seguenti, la massa si divide, e il 3 giugno, si erano definitivamente formate due macchie isolate, aventi forma arrotondata, ma poco regolare.

Fig. 25.



Fig. 26.



Questi fenomeni sono molto interessanti, e possiamo già trarne una conseguenza: la forma tonda è per così dire la forma normale con cui si manifestano tutte le macchie quando sono completamente formate. Dopo essere passate per questa forma, sono di nuovo invase da filamenti brillanti detti *ponti*, e dalla materia luminosa che parte dai bordi ed invade il centro. Ma questo fenomeno è molto complesso; ci basta per ora indicarlo riservandoci di studiarlo poi con maggior dettaglio.

La descrizione letta mostra che il fenomeno delle macchie non è puramente superficiale; ha la propria sede nelle profondità della massa solare che si mescola e sconvolge in una zona a volte anche molto estesa. Vedemmo alcuni di questi movimenti estendersi fino a un quarto del diametro del disco solare! Tutte le perturbazioni non producono lo stesso effetto, ed esse potrebbero a volte manifestare la loro esistenza con semplici facole. Le macchie sono quindi solo le conseguenze di una forte agitazione nella materia che compone il Sole, e se vogliamo trovare la causa di queste crisi, bisogna cominciare a studiare il fenomeno stesso, e le leggi che presiedono alle sue manifestazioni.

3.3 Le macchie sono cavità

È trascorso quasi un secolo da quando Wilson, con osservazioni ben dirette ed interpretate, fece conoscere la reale natura delle macchie, mostrando che esse sono dovute a cavità di cui poté anche misurare la profondità. Rese conto di queste osservazioni nelle *Transactions philosophiques* di Londra, t. LXIV, anno 1774.

Il 22 novembre 1769, il dottor Wilson osservò sul disco solare una bella macchia tonda circondata da una penombra pure circolare, concentrica al nucleo. Seguì questa macchia fino alla sua scomparsa, e notò ben presto che la penombra cessava di essere simmetrica; la parte diretta verso il centro del Sole divenne sempre più larga, mentre quella opposta conservava circa le stesse dimensioni. così, nella fig. 27, supponiamo che *A* rappresenti una macchia posta al centro del disco, e avente una penombra simmetrica rispetto al contorno del nucleo; quando essa raggiungerà il centro del raggio, si presenterà come in *B*; più tardi, scomparirà del tutto la penombra dal lato sinistro, come si vede in *C*; nel punto *D*, il nucleo stesso sarà intaccato; infine, vicino al bordo, in *E*, resterà solo una sottile striscia di penombra, con la completa scomparsa del nucleo. Questo è il fenomeno osservato da Wilson, e spesso studiato in seguito.

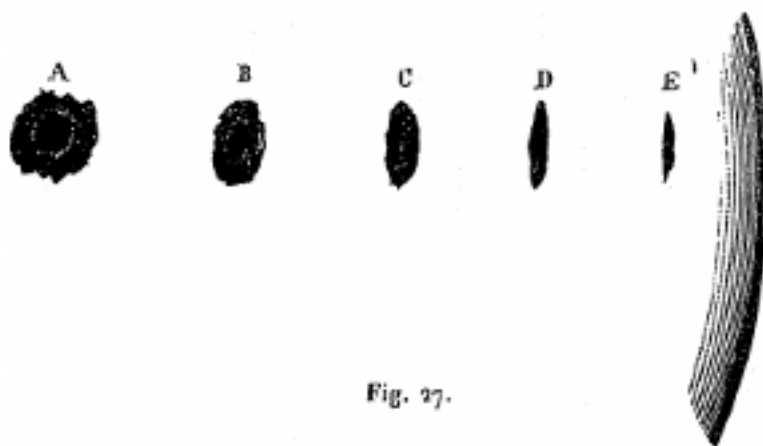
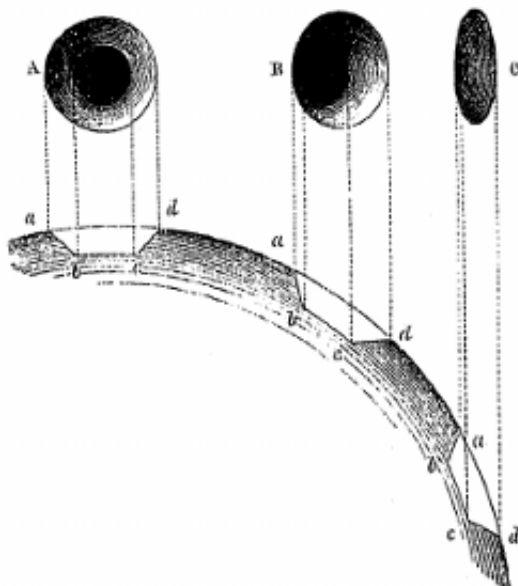


Fig. 27.

A rigore, questi cambiamenti potrebbero essere solo apparenti; le macchie sono così capricciose nelle loro variazioni, che è impossibile costruire una teoria su un fatto isolato. Tuttavia Wilson aveva sospettato in ciò qualche grande legge di natura, e, per non essere indotto in errore, attese il ritorno della stessa macchia che, infatti, riapparve all'inizio del quattordicesimo giorno sul bordo orientale. Allora, osservò di nuovo lo stesso fenomeno; le stesse fasi si riprodussero, da bordo del disco solare fino al suo centro, dove la penombra si mostrò di nuovo simmetrica rispetto al contorno del nucleo.

Ormai il dubbio non era più possibile; la macchia aveva praticamente conservato la stessa forma nel suo movimento, e le variazioni osservate erano pure apparenze derivanti da un effetto di prospettiva molto facile da spiegare. Sia *abcd* (fig. 28) una cavità avente la forma di un tronco di cono, e *ad* e *cd* sono i diametri delle due basi. Vista lungo una direzione perpendicolare a *ad*, questa cavità presenterà un contorno simmetrico *A*; ma se la si guarda obliquamente, come in *B*, il lato *ab* si restringerà nella proiezione, e il lato *cd* si allargherà un poco, restando costante se la cavità è poco profonda. Infine, aumentando l'obliquità, il bordo *ab* si proietterà sul fondo *bc* come si vede in *C*; potrà anche ricoprirlo completamente.

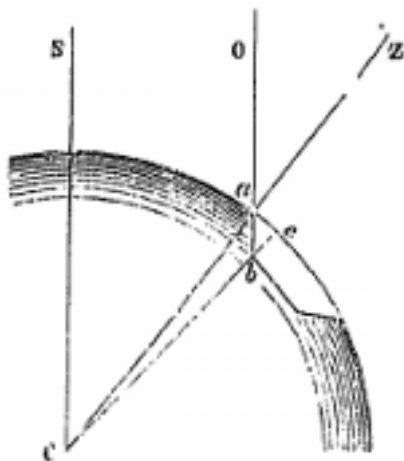
Fig. 28.



Queste differenti fasi saranno tanto più evidenti quanto la cavità sarà più profonda; ma se è molto superficiale, il fondo scomparirà solo per una grande obliquità, ciò che, nel Sole, avverrà solo al bordo; allora l'osservazione sarà molto difficile e richiederà strumenti molto buoni. Si comprende tuttavia che essa sia possibile, e, se è ben eseguita, potrà servire a determinare la profondità di tale cavità dalle dimensioni relative della penombra e il momento in cui essa tocca il nucleo.

Siano CS (fig. 29) il raggio visuale diretto verso il centro del Sole; Oab il raggio che sfiora il bordo della cavità e del nucleo, nel momento in cui la penombra tende a scomparire; CZ una retta passante per il centro del Sole e per il bordo esterno della penombra. Si può sempre conoscere l'angolo SCZ , e dedurne il valore dell'angolo bae che è il complementare. Se si è misurato la larghezza della penombra ae , il piccolo triangolo abc farà conoscere la profondità be della macchia. Wilson trovò che questa profondità non è uguale al raggio della Terra.

Fig. 29.



Tutti gli astronomi successivi a Wilson hanno ripetuto le sue osservazioni con eccellenti strumenti e su un gran numero di macchie. Herschel ne parla spesso; e noi abbiamo avuto, così come molti astronomi ancora viventi, l'occasione di confermare questa scoperta con le nostre osservazioni. I risultati numerici da noi trovati, come quelli di M. Tacchini, differiscono di poco da quelli di Wilson. M. Warren de la Rue, astronomo inglese, discutendo le osservazioni fotografiche fatte a Kew, ha trovato che su 89 macchie, 72 danno risultati conformi alle idee di Wilson, mentre le altre 17 si comportano in modo diverso. Questa proporzione non ha nulla di sorprendente quando si pensa alle considerevoli variazioni che le macchie subiscono realmente nella loro forma. M. de la Rue ha immaginato un mezzo molto semplice per mostrare che le macchie sono cavità. Si prendono due fotografie del Sole fatte in due punti distanti tra loro circa 15° ; le si pone in uno stereoscopio, e si vede perfettamente la cavità interna, i cui bordi risaltano sulla fotosfera circostante, così come riconoscemmo in seguito. È quindi impossibile dubitare di tale struttura.

Quando una macchia formata da una cavità si presenta sul contorno apparente del Sole, si dovrà osservare sul bordo del disco una rientranza tanto più facilmente osservabile quanto la cavità è più profonda. In realtà, questa osservazione è resa difficile da un certo numero di circostanze, e soprattutto dalla relativa piccolezza di queste cavità. Tuttavia, per le macchie di grandi dimensioni, si sono potute constatare depressioni notevoli; così la scoperta di Wilson deve essere considerata come un fatto acquisito alla scienza; l'unica difficoltà è il modo esatto di interpretarlo.

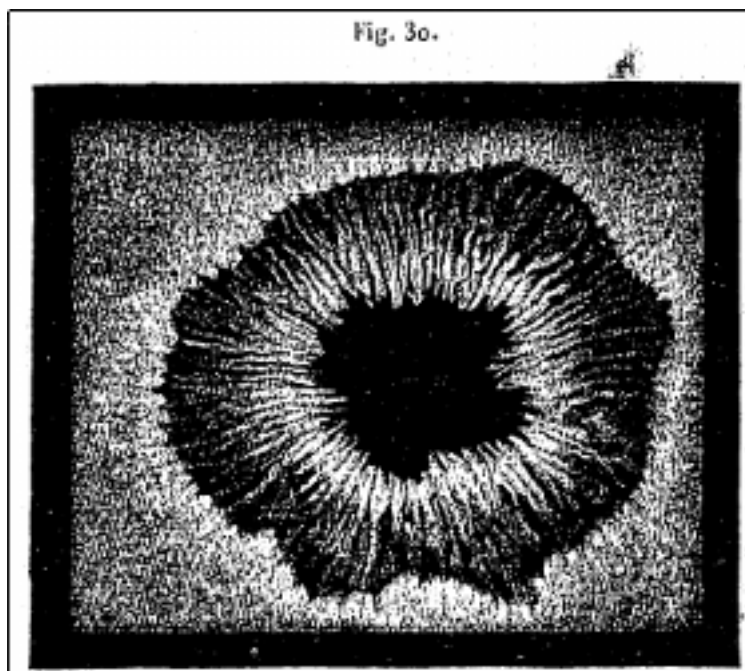
Wilson suppose che le macchie fossero in modo evidente delle cavità, la loro penombra era formata dalle loro stesse scarpate. Egli immaginava che la materia luminosa del Sole fosse fluida, discendesse come una lava in questa specie di voragine, i cui bordi inclinati formavano la penombra. E per confermare la sua interpretazione, ricordava il seguente fatto. Il contorno della penombra è in genere parallelo a quello del nucleo; a volte tuttavia presenta all'interno angoli rientranti che corrispondono ad angoli sporgenti del contorno esterno, come se una frana avesse fatto cadere nella voragine una parte della materia luminosa. Questa disposizione è riprodotta in parecchi dei nostri disegni, e in particolare nella fig. 21.

Questa osservazione dettagliata di Wilson è esatta, e la si verifica spesso. Ma non si può ammettere che la sola inclinazione della voragine basti a spiegare la penombra. L'intensità luminosa della penombra è circa la metà di quella che si osserva sul resto del disco. Una differenza così grande sarebbe a mala pena possibile, se si trattasse di una superficie illuminata da un corpo estraneo. A maggior ragione è impossibile per un corpo luminoso come è il Sole. Completeremo presto la teoria di Wilson, e vedremo che è mancante di poche cose. Gli fu impossibile, con la sua strumentazione, studiare la struttura della penombra, ed è da ciò che dipende la soluzione del problema.

3.4 Struttura delle macchie

Abbiamo visto che la forma delle macchie è alquanto variabile. Esse finiscono, in genere, per divenire tonde, ma è per così dire una forma limite che esse conservano per poco tempo; ben presto si restringono, assumendo l'apparenza di pori e non tardano a fermarsi del tutto. Prima di scomparire, alcune di loro si dividono, e si nota spesso allora una recrudescenza di azione che allarga l'apertura o ne forma qualche altra nelle vicinanze. Entriamo nell'esame dettagliato di questi fenomeni, e per comprenderne il meccanismo, studiamo dapprima la struttura interna.

Cominciamo dal periodo di tranquillità. Allora le macchie presentano la forma tonda o ovale già indicata, e che riproduciamo nella fig. 30.

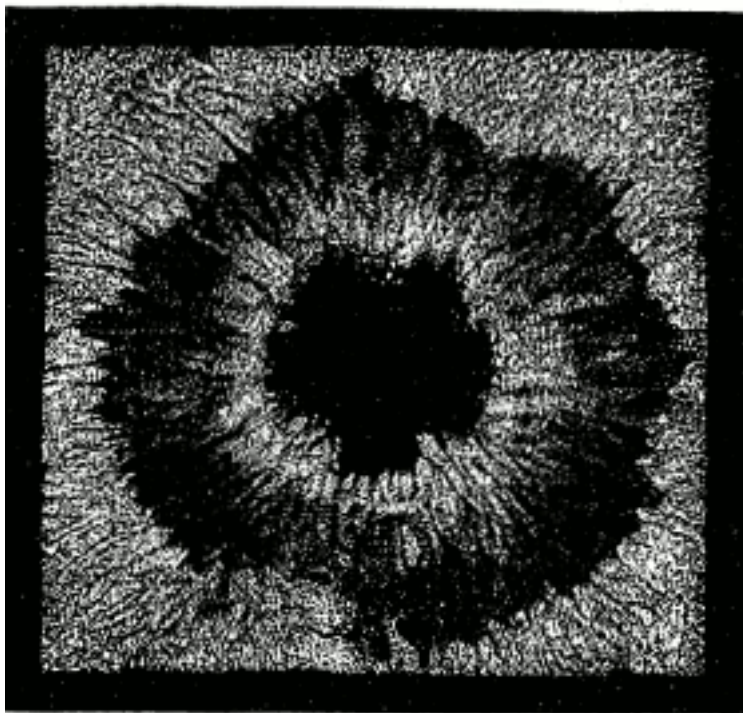


Faremo qui parecchie osservazioni:

1. La penombra ha una larghezza circa uguale a un terzo della macchia; ma essa è ben lungi dall'essere uniforme nella sua struttura, e di avere il suo contorno esterno parallelo a quello del nucleo, come mostrano i disegni che si trovano nella maggior parte del libro. Questa penombra è completamente a raggiera, ma i raggi hanno forme irregolari; alcuni sembrano a correnti sinuose, e tendono ad allargarsi allontanandosi dal centro; sono, per la maggior parte, composti di foglie e specie di nodi allungati, posti da capo a capo, in modo da simulare una corrente all'incirca continua. Questa struttura a raggiera della penombra è molto costante; essa era già stata evidenziata da Capocci, da Pastoroff e da Sir John Herschel. Questa osservazione esige a volte uno strumento potente a grande apertura; tuttavia, quando l'aria è calma, la si vede senza difficoltà.

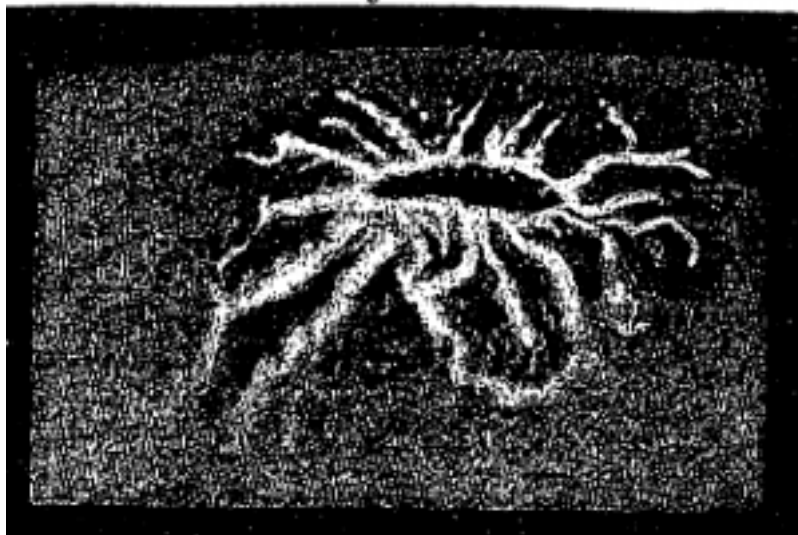
Queste correnti sono meno condensate, meno luminose, e sembrano meno spesse nella regione esterna della penombra, nel punto in cui si staccano dalla fotosfera; nelle vicinanze del nucleo, invece, esse si pressano, si condensano e divengono più brillanti; da cui risulta che la parte interna è notevolmente più illuminata. Questa regione acquista a volte un tale splendore, che la si può confrontare alla fotosfera, e la macchia sembra allora formata da due anelli concentrici ugualmente brillanti. Non è un effetto di contrasto, ma una condensazione reale della materia luminosa. Questo fatto è molto importante, e i fisici non l'hanno considerato, sebbene gli osservatori l'abbiano esattamente rappresentato nei loro disegni. Ne troviamo un altro esempio nella macchia del 16 luglio 1866.

Fig. 31.



1. Il contorno della penombra è circondata da un anello più brillante della restante fotosfera; questo fenomeno già ben visibile al centro del disco solare, quando si osserva con un elioscopio graduato, diviene estremamente evidente quando le macchie si avvicinano al bordo. Si vede allora una specie di corona luminosa dalla quale dipartono ramificazioni molto irregolari, che assomigliano a reali prominente e formano un cuscinetto ben distinto. Rappresentiamo in fig. 32, una di queste macchie disegnate a Palermo, da M. Tacchini, il 3 dicembre 1865.

Fig. 32.

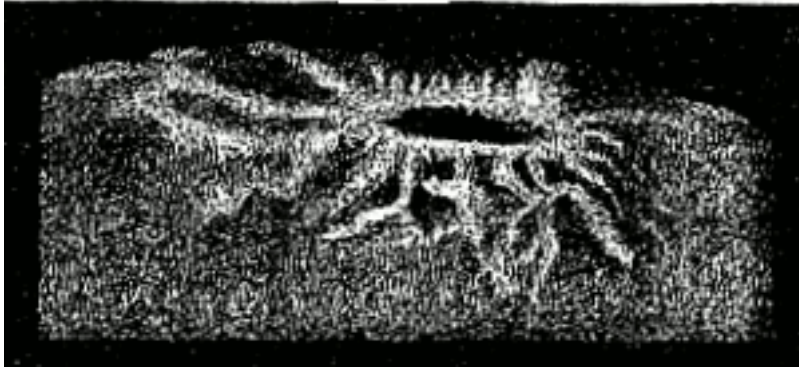


Essa sembra nei suoi dettagli a un cratere lunare, ed è per questo che chiameremo queste macchie tonde *crateri*, senza tuttavia associarli per ora alcuna idea che richiami le eruzione vulcaniche.

Il 14 marzo 1866, una grande macchia tonda si avvicinò al bordo. Essa era circondata da una bella facola dalle quale si irradiavano parecchie ramificazioni; due tra di esse formavano quasi un secondo cratere. Quando questi due rami furono sul bordo del Sole, si vide nettamente una prominente di circa un secondo profilarsi sul contorno del disco. Lo stesso fenomeno si ripeté il 29 giugno seguente.

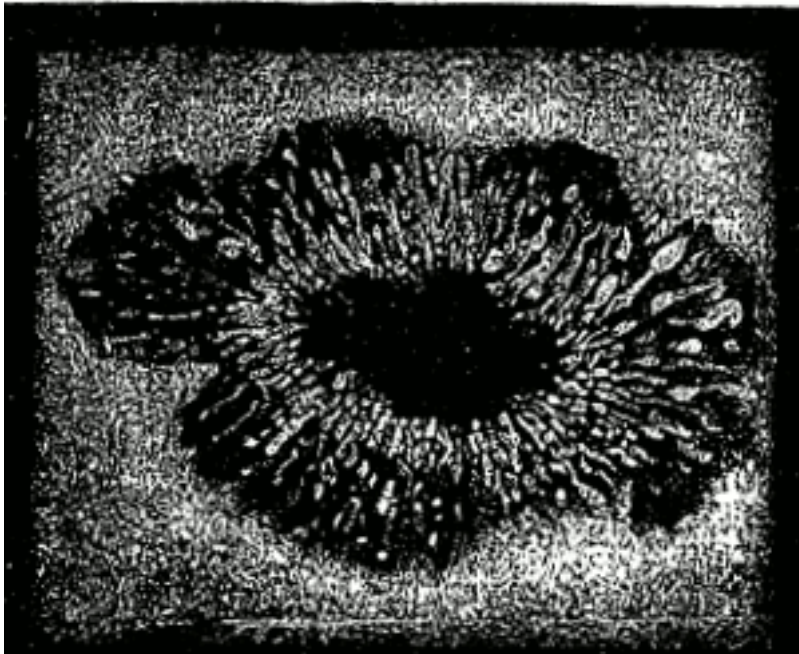
È quindi impossibile avere dubbi sul fatto che queste facole che si vedono spesso attorno alle macchie, soprattutto quando sono vicine al bordo, siano delle effettive prominente. Il cratere che ha determinato questa osservazione è rappresentato in fig. 33.

Fig. 33.



Al bordo interno della penombra, la testa della corrente è ordinariamente proiettata sul fondo nero del nucleo; ma spesso vi sono veli che si sporgono e coprono una parte del nucleo stesso, come si vede nella fig. 34. Ma nella parte più lontana dal nucleo, le correnti composte di grani luminosi delineano sul fondo una velatura o un semi illuminamento.

Fig. 34.

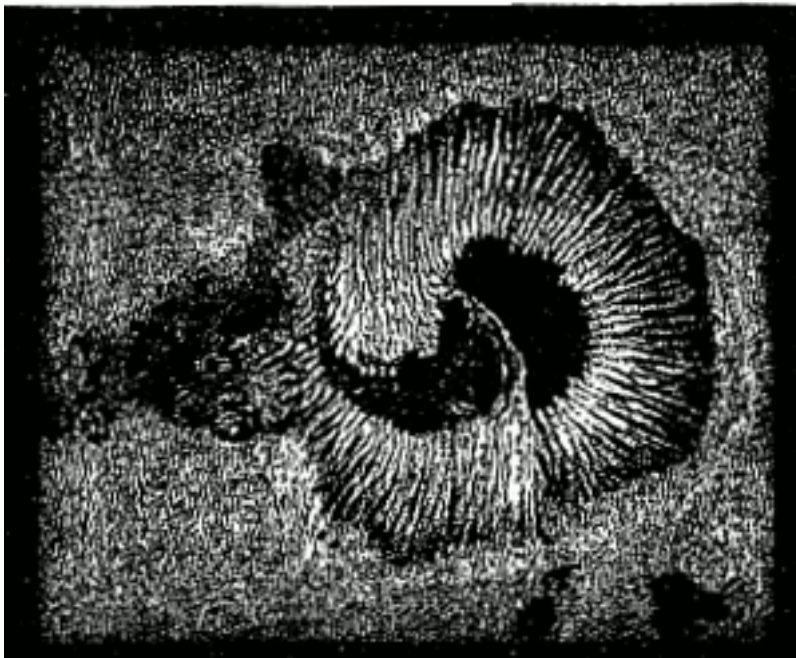


La fig. 34 mostra una di queste penombre formate da un velo di media luminosità sul quale sono proiettati grani brillanti che si portano verso il centro. Si vedono pure questi grani isolati e distinti sul fondo del nucleo. Queste velature si ritrovano ancora nel centro *a* della grande macchia osservata il 30 luglio 1865 (fig. 22). Le correnti composte di grani o di fogli che invadono il nucleo non tardano a dissolversi; basta qualche ora, o anche solo qualche minuto. Così malgrado questo afflusso continuo di materia luminosa, il nucleo rimane sempre nero e permane per lungo tempo. La fig. 21 mostra una di queste foglie staccate che è per metà scomparsa; è un fenomeno assai frequente, di cui potremmo dare numerosi esempi. Del resto, non è particolare solo per tali forme che compongono le correnti, ma si nota a volte per una gran parte della massa circostante. Abbiamo già visto che, nella macchia del 29 maggio 1865 (fig. 26), le masse fotosferiche imprigionate nel nucleo avevano finito per dissolversi. Ma vi è un fatto che ben dimostra un certo potere di attrazione esercitato dalle macchie, ed è l'assorbimento delle piccole da parte di quelle grandi. Le si vede avvicinarsi poco alla volta alla cavità principale, nella quale scompaiono ben presto. Questo fenomeno ha qualche rapporto con quello del moto proprio delle macchie, di cui parleremo in seguito.

I crateri presentano a volte, al loro interno, un moto turbolento molto rapido simile a quello che si nota nel punto *a* nella macchia del 30 luglio 1865 (fig. 22). Questo movimento è molto pronunciato in una macchia del 5 maggio 1854, da noi osservata a Roma mentre M. Fearnely lo osservava a Christiania. Si vedeva un gran numero di fiamme che si avvolgevano a spirale turbinando nel nucleo; dopo due ore, esse erano completamente disciolte.

Riproduciamo in fig. 35 una macchia osservata il 25 settembre 1865, nella quale le correnti mostrano, con la loro disposizione, che sono animate da un moto rotatorio molto pronunciato, ma solo in una parte della penombra; poiché, in tutta la parte di destra, le correnti sono dirette come di consueto, in modo da convergere verso il centro. In realtà, osserviamo questo turbini solo all'inizio e nel periodo di formazione, come abbiamo già sottolineato a proposito della macchia del 30 luglio 1865. Si è spesso creduto di vedere turbini nei fenomeni che sono solo semplici cambiamenti di forma senza alcun moto di rotazione.

Fig. 35.



La fig. 35 è ancora interessante da un altro punto di vista, poiché vi troviamo la struttura che l'astronomo Dawes ha chiamato, *coperta di paglia*, a causa dei fasci di fili paralleli che rappresentano assai bene un tetto di paglia. Questo confronto non è molto felice; tuttavia esprime molto bene la disposizione dei filamenti. Sono in genere poco tortuosi, rigonfi ad una estremità a forma di mazza, o piuttosto come correnti di lava ritardate nel loro movimento dalla resistenza del mezzo circostante. La loro forma è in genere la seguente (fig. 36):

Fig. 36.

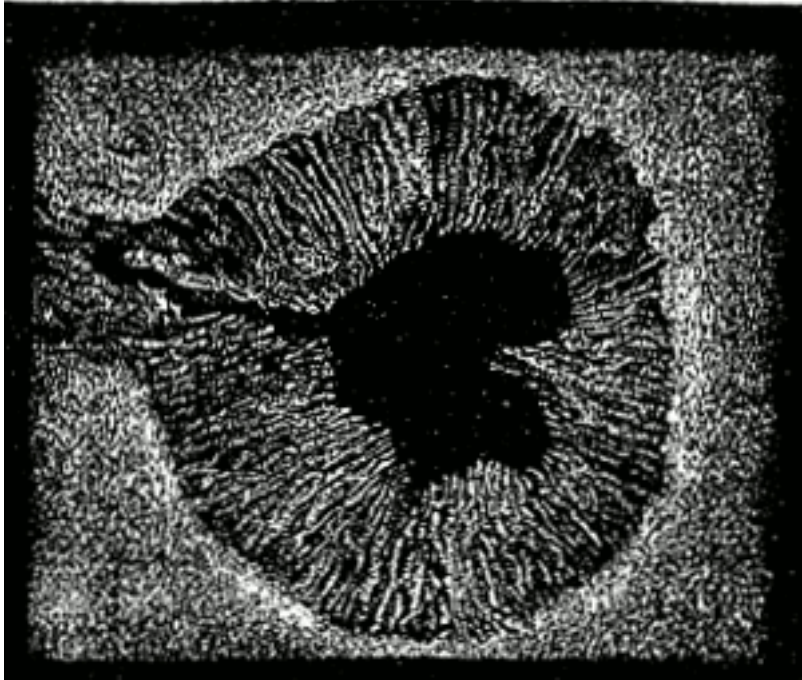


Abbiamo cercato di determinare lo spessore di questi filamenti; abbiamo trovato che l'estremità rigonfia ha una larghezza di $\frac{1}{4}$ o $\frac{1}{2}$ di secondo, cioè 200 o 300 km. Il resto può avere una larghezza da 100 a 200 km.

Si noterà senza dubbio nella fig. 35 una specie di coda composta da un insieme di piccole macchie irregolari, intramezzate da materia luminosa, e irregolarmente disposte nella penombra. Queste code sono molto frequenti, e si trovano sempre in ciò che chiameremo la parte *posteriore* della macchia, cioè nella parte che si trova dietro rispetto al moto di rotazione del Sole.

La fig. 37 rappresenta una macchia osservata il 16 gennaio 1866 a 1^h45^m ; il nucleo si prolunga nella parte posteriore in modo significativo ed eccezionale; di solito il nucleo è fermo, ma dietro si vede sempre una coda composta di tanto di piccole macchie isolate, quanto di facole. M. de la Rue ha esaminato 1137 macchie fotografate a Kew; 584 presentavano queste facole a sinistra, cioè nella parte posteriore; 508 avevano le loro facole regolarmente disposto sul loro contorno; soltanto 45 avevano una specie di coda verso destra, cioè nella loro parte anteriore. Questa disposizione non è certamente accidentale. Vedremo che le macchie hanno una tendenza pronunciata a portarsi in avanti, nel senso della rotazione del Sole; le facole corrisponderebbero quindi a regioni messe sottosopra che la macchia tende ad abbandonare, e che si trova alla sua sinistra.

Fig. 37.



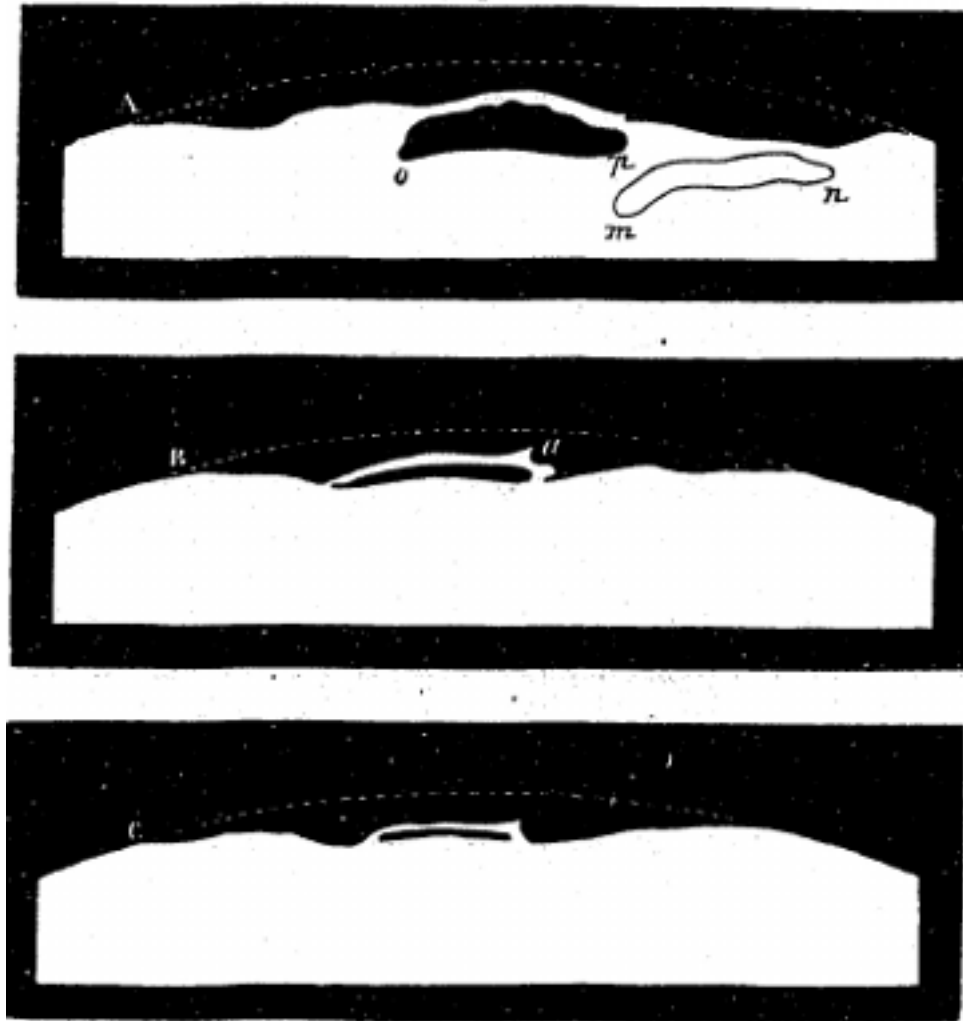
La fig. 37 contiene ancora dettagli importanti. L'estremità dei filamenti non è solo rigonfia, ma è anche leggermente ricurva a forma di uncinetto, ciò che sembra confermare l'idea di una resistenza al moto. Il nucleo è ricoperto di un velo assai evidente, lasciando una traccia nera dalla parte della coda, mentre una parte della regione anteriore è ricoperta di veli rosa; questo insieme fa sì che la figura rappresenti molto bene l'aspetto di una torpedine.

Quando la macchia del 30 luglio giunse vicino al bordo solare, la sorvegliammo con cura, e l'aria era allora così agitata che ci fu impossibile osservarla bene. Il giorno dopo l'aria era calma e il cielo perfettamente limpido; la macchia fu disegnata simultaneamente da tre osservatori. M. Tacchini, di Palermo, si trovava allora al nostro osservatorio, ed è proprio il suo il disegno che riproduciamo nella fig. 38A. Erano le 9; uno dei crateri era quasi vicino al bordo, e si vedeva nettamente il suo contorno formare una prominente al di sopra del disco solare, lasciando due rientranze, una da ogni parte. Sul lato si vedeva una vasta facola *mn*. Questa parte del contorno era depressa al di sotto della superficie generale del Sole, in una regione in cui poco prima si distingueva una vasta penombra.

Alle 10^h20^m , il cratere si era considerevolmente ristretto (fig. 38B)m e presentava parecchi punti molto stretti; se ne distingueva uno, *a*, che tutti gli osservatori evidenziarono a causa delle sue dimensioni e della sua forma ricurva.

10^h32^m . L'interno del cratere era ridotto ad una linea molto sottile che scomparve alle ore 11; il contorno del Sole conservava ancora la sua struttura dentellata (fig. 38C).

Fig. 38.



L'insieme di questi fenomeni ricorda perfettamente quelli che presenta la Luna quando è quasi piena, e un cratere si presenta al bordo del suo disco. Dobbiamo riconoscere che si incontrano raramente circostanze favorevoli a questi tipi di osservazione, poiché per ottenere una depressione di un secondo sul contorno del disco, serve una macchia avente un'ampiezza eliocentrica di 3 gradi, e una differenza di livello di 720 *km*. Anche quando le macchie non sono molto grandi, è impossibile vedere qualcosa; la depressione rimane coperta dai propri bordi; l'ondulazione del bordo solare e l'indecisione dei suoi contorni mascherano i dettagli molto piccoli delle comuni prominente. È per la stessa ragione che è difficile rilevare sul contorno della Luna asperità che relativamente assai più considerevoli.

I dettagli nei quali siamo entrati ci portano ad ammettere come dimostrate le proposizioni seguenti:

I. Le macchie sono cavità o lacune dovute a strappi nella fotosfera. Questi strappi, dapprima irregolari, finiscono per assumere una forma tonda e regolare. Se si suppone che l'intensità della luce diminuisce proporzionalmente alla profondità, ci possiamo rappresentare la forma dei crateri come indicato nella fig. 39.

Fig. 39.



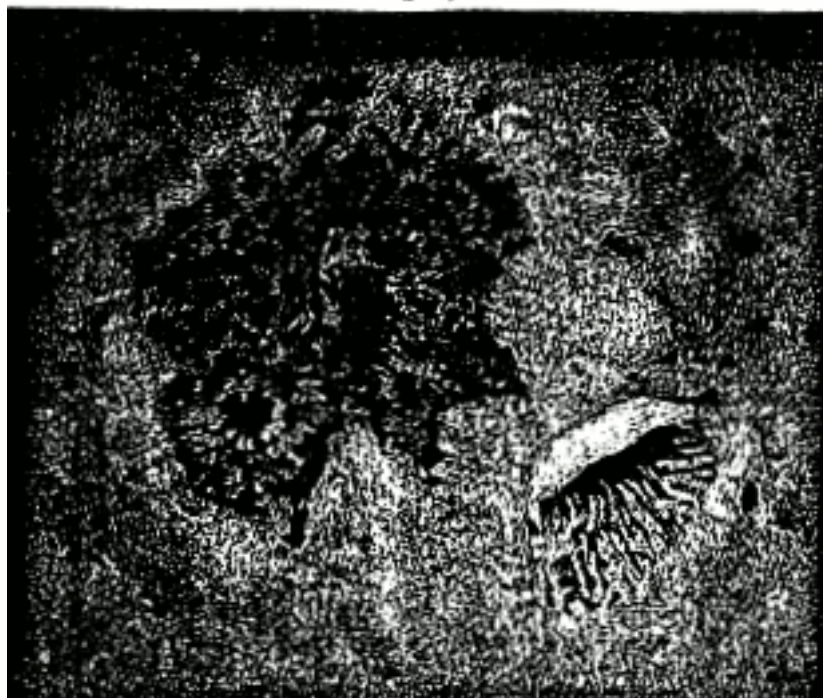
II. Il centro delle cavità è la sede di una forza di aspirazione, che attira le masse circostanti, le assorbe e le dissolve. Per spiegare questo fenomeno importante, si possono ammettere due ipotesi.

1° Il moto di assorbimento sarebbe prodotto da una corrente di gas proveniente dall'interno stesso del Sole, e più calda della fotosfera. L'aspirazione laterale della corrente basterebbe a determinare il richiamo delle masse vicine, e poiché i materiali fotosferici sono in un stato di vapore condensato, entrando in questa corrente la cui temperatura è maggiore, riprenderebbero il loro stato di fluido elastico, e diverrebbero invisibili diventando trasparenti. 2° Si potrebbe ammettere che il nucleo della macchia è analogo ai nostri cicloni; vi sarebbe al centro un abbassamento di temperatura; la materia fotosferica perderebbe la propria luminosità raffreddandosi e diventerebbe invisibile.

Gli astronomi non sono d'accordo su questa questione, e non potremo valutarla prima di aver studiato la distribuzione del calore nel Sole. Attualmente tuttavia, possiamo ritenere la prima ipotesi come la più probabile: la modalità di formazione delle macchie sembra ben indicare una eruzione dall'interno verso l'esterno; inoltre, come ammettere un abbassamento di temperatura in grado di rendere invisibili masse così brillanti e considerevoli?

Non bisognerebbe credere tuttavia che tutte le macchie che appaiono tonde con un piccolo ingrandimento abbiano sempre una struttura così semplice come quella che abbiamo illustrato. La fig. 40 rappresenta una parte della grande macchia del 30 luglio, come la si vedeva il 23 agosto 1865. Essa presenta due cavità che appaiono entrambe tonde, ma che hanno struttura alquanto diverse. In una, la penombra è riempita da una serie di frammenti ricurvi; nell'altra, la penombra è sostituita da un lato da un'enorme facola.

Fig. 40.



Dobbiamo aggiungere tuttavia che questa fase appartiene al periodo in cui la macchia era sul punto di fermarsi, e la regolarità del fenomeno non sussisteva più. Bisogna ben distinguere il periodo finale da quello di formazione. Quando una macchia sta per scomparire, la materia luminosa che attira non è più regolarmente diretta verso il centro, e sembra che precipiti alla rinfusa nella cavità per colmarla.

3.5 Nuovi dettagli relativi alle macchie. - Velature rosa all'interno

I fenomeni studiati ci hanno mostrato che la profondità delle cavità fotosferiche che formano le macchie è relativamente piccola. Dalle misure di Wilson e da quelle da noi eseguite, essa non supererebbe la lunghezza del raggio terrestre, cioè 6377 km . Tuttavia questi risultati sono alquanto incerti: da un lato, sono forse esagerati, poiché la cavità di cui si misura la profondità si trova accresciuta dalla turbolenza delle facole che la circonda; e, dall'altro lato, sono forse troppo deboli, poiché sia possibile misurarne e valutarne l'elevazione dallo strato fotosferico che forma il contorno del nucleo e limita interiormente la penombra.

Proveremo in seguito che queste cavità non sono vuote, ma sono riempite di vapori che, assorbendo energicamente i raggi luminosi emanati dal fondo della macchia stessa, producono questa oscurità che costituisce il nucleo. Per il momento, accontentiamoci di studiare le loro forme in dettaglio.

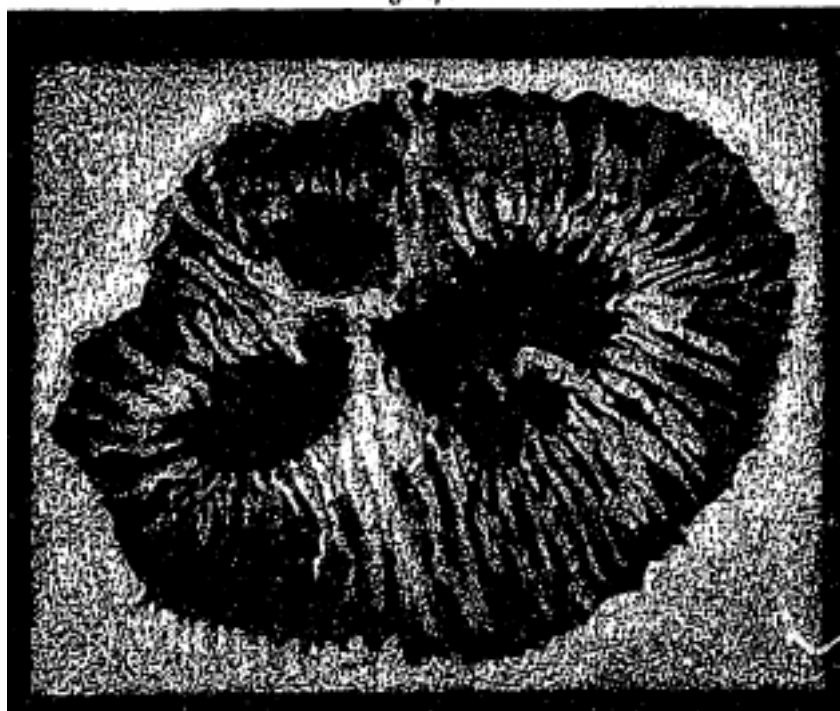
Se la fotosfera ha una costituzione analoga a quella delle nubi, se essa consiste, come diceva Wilson, in una nebbia luminosa (e vedremo che scoperte moderne non si oppongono a questa interpretazione), ci dobbiamo attendere di trovare nella sua struttura tutti gli aspetti potenziati rispetto a quelli delle nuvole, e gli strappi ai quali sono dovute le macchie dovranno presentare le forme più varie. Queste deduzioni sono confermate dall'osservazione, come dimostreremo.

I più antichi osservatori avevano già evidenziato che le macchie che si formano scompaiono assai velocemente in un tempo molto breve. Alcune di loro hanno probabilmente una causa tutta superficiale, mentre altre sono dovute a moti provenienti dalle profondità del Sole. Queste ultime durano più a lungo, ma sono soggette a grandi variazioni con momenti di recrudescenza nell'azione che le produce. Nel 1866, abbiamo osservato parecchie macchie che hanno fatto fino a tre o quattro rivoluzioni, e parecchie volte, nel momento in cui erano sul punto di scomparire, abbiamo constatato questa recrudescenza nel modo più evidente. Quasi sempre questo fenomeno è accompagnato da un cambiamento di posizione. Qualche volta ancora, abbiamo visto una macchia formarsi nel posto in cui era scomparsa la precedente qualche tempo prima. M. Carrington ha constatato lo stesso fatto.

Assai spesso le macchie sembrano dividersi. Questa divisione può essere apparente, formandosi un nuovo nucleo vicino al vecchio, e separandosene sempre più con un moto rapido verso la parte anteriore. Ma assai spesso la divisione è reale, e allora si produce per un meccanismo semplice: la materia luminosa si precipita dai bordi, invadendo l'interno, forma dei ponti e divide il nucleo in parecchie parti. Questi punti hanno uno splendore molto vivo e confrontabile con quello della fotosfera. La macchia del 25 settembre (fig. 35) mostra una di queste linee luminose che la divide in due parti; l'una è composta di una serie di piccoli nuclei, l'altra forma una sola massa nera senza divisione. Due giorni dopo, questa linea era più grossa, le piccole macchie erano scomparse, e vi erano allora due nuclei. Quattro giorni più tardi, il ponte scomparve, i due nuclei si confusero e rimase solo una macchia semplice.

La fig. 41 mostra in modo molto chiaro il meccanismo di divisione con la comparsa di lingue di fuoco che coprono il nucleo da tutte le parti.

Fig. 41.



Gli antichi attribuivano questo fenomeno alla rottura delle croste solide che, secondo loro, formavano le macchie: per sostenere una teoria simile, bastava ignorare la reale struttura della fotosfera e quella delle parti interne delle macchie.

La divisione dei nuclei precede di solito la loro dissoluzione e scomparsa. Ma oltre alla divisione propriamente detta, dovuta a ponti la cui materia possiede uno splendore paragonabile a quello della fotosfera, si presenta spesso un altro fenomeno che abbiamo già avuto occasione di sottolineare, e che richiede uno studio speciale. Vogliamo parlare delle velature, spesso colorate, che appaiono nell'interno delle macchie, e di cui abbiamo un esempio nella fig. 41. Esse sono assai frequenti, e se gli osservatori che ci hanno preceduto non le hanno rimarcate, ciò è dovuto ai vetri colorati che essi impiegano, e che mascherano completamente il colore degli oggetti. Ma con un elioscopio polarizzatore, abbiamo quasi sempre potuto constatare la loro esistenza nelle

grandi macchie, soprattutto nel loro periodo di formazione. Ma ciò che è più importante è studiare la loro origine e il loro modi di svilupparsi.

Nel mese di febbraio 1866, apparve una macchia enorme che abbiamo seguito con molta attenzione. Dapprima si manifestò una nebbia considerevole in una vasta regione, che occupava in longitudine $i \frac{5}{22}$, vale a dire un poco meno del quarto del diametro solare; così il fenomeno era visibile ad occhio nudo. Si direbbe un immenso crepaccio dalle forme più bizzarre, tra le quali sembrava dominare una curva a forma di S. Nel mezzo di questo caos, notammo una regione nella quale apparivano grandi masse di velature rosse, come rappresentate nella fig. 42.

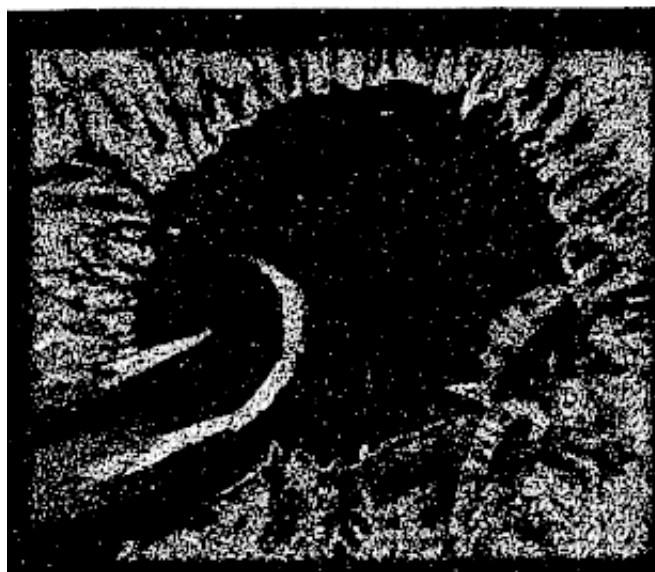
Fig. 42.



La parte più significativa era un ponte a forma d'arco o di ferro di cavallo, formato da una materia estremamente brillante, e all'interno una specie di promontorio luminoso simile ad una facola.

Il giorno dopo 17 (fig. 43), troviamo l'arco spezzato; il troncone terminava in un ponte sottile e affilato; la parte scomparsa era sostituita da una velatura rossa; altre velature, rosse o bianche, ricoprivano il resto della macchia. Dall'altro lato del nucleo, la grande corrente che dava vita alla vecchia era quasi completamente scomparsa ed era sostituita da una striscia rossa. Abbiamo appena finito il disegno, che l'uncino che si trova a sinistra era svanito; solo la base era ancora visibile, e il resto era rimpiazzato da una velatura di color rosa.

Fig. 43.



Si presentava allora un problema. Vi è in questi fenomeni una trasformazione reale da aree brillanti in velature rosse, o si tratta di una sovrapposizione puramente accidentale? Per risolvere questo importante

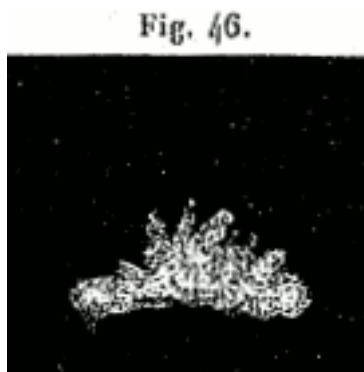
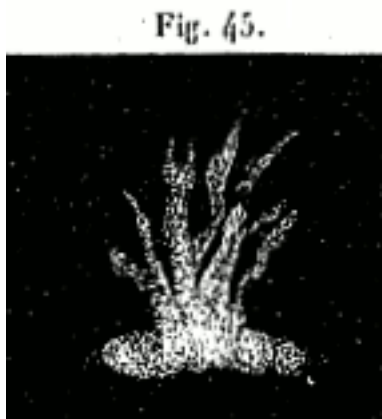
quesito, abbiamo per lungo tempo, e con molta cura, sorvegliato e studiato le macchie, e ci siamo potuti assicurare che le correnti luminose si trasformano a volte in velature rosa.

Il 23 gennaio 1866, esaminammo una macchia a forma di ∞ ; due getti di lingue brillanti si lanciavano da una parte all'altra, e sembravano doverla dividere con un ponte.



La fig. 44 rappresenta uno di questi zampilli di fiamme visto alle 10^{h45^m} . Cinquanta minuti più tardi, le lingue di fuoco si erano sfilacciate alle loro estremità; esse presentavano la forma indicata nella fig. 45.

Dopo dieci minuti, riguardando nel cannocchiale le si vide trasformate in velature rosa (fig. 46). Infine le velature si dissiparono, e a 1^{h45^m} rimaneva solo uno zampillo più corto di quello iniziale (fig. 47).

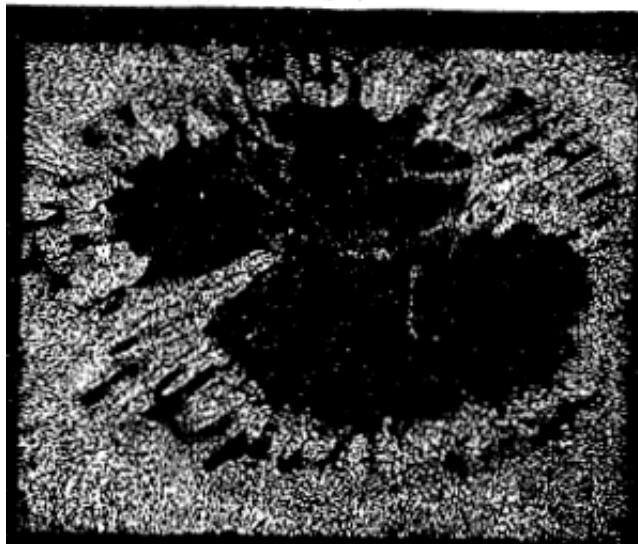


Non si poteva quindi dubitare della realtà di questa trasformazione. Un fenomeno di questa natura non si può ritenerlo dovuto ad illusioni dell'elioscopio, poiché dobbiamo queste scoperte agli elioscopi polarizzati che non colorerebbero una parte del campo senza colorarlo interamente. Inoltre, bisognerebbe proprio essere cattivi osservatori per confondere, come si è preteso che noi facessimo, i colori che presentano le velature con le apparenze risultanti da un difetto di acromatismo nel cannocchiale.

Terminiamo citando un'ultima osservazione. Il 23 settembre 1866, il Sole si trovava in un periodo di tranquillità, presentava una delle più belle macchie nucleari che noi avessimo visto. Il suo nucleo, visto con un piccolo ingrandimento, sembrava un ovale, o piuttosto una losanga dagli angoli smussati. La fig. 48 la rappresenta vista con maggiore ingrandimento. Vi si riconosce la struttura a raggiera che possiede di solito la penombra; il mezzo è interamente riempito di velature rosa e bianche, che si incrociano in tutte le direzioni. Se la colorazione fosse dovuta a un difetto dello strumento, come spiegare che sia visibile nella parte centrale, dove i colori sono più deboli, e non nelle zone in cui la luce è più viva¹?

¹In questo disegno, solo le velature interne sono rappresentate con precisione; i dettagli della penombra sono solo abbozzati.

Fig. 48.



Giungiamo quindi alla considerazione che sulla superficie del Sole vi sono ammassi di velature rosa analoghe a quelle fiamme che si osservano attorno al disco della Luna durante le eclissi solari, e che sono note con il nome di *protuberanze rosse*. Inoltre, queste velature ci appaiono analoghe ai *cirri*, mentre le granulazioni possono essere confrontate con i *cumuli*. Nulla ci prova che questi *cirri* formino uno strato continuo più basso dei *cumuli*; vediamo queste masse mescolate le une con le altre, ed è assai difficile determinare la loro posizione relativa. Possiamo solo affermare che le penombre non sono composte esclusivamente da velature come supponeva W. Herschel, ma che esse contengono ancora grani e correnti che *appaiono* sovrapposti alle velature.

I ponti si presentano a volte come archi sospesi al di sopra del nucleo, come si vede nella fig. 49, che rappresenta una macchia osservata il 14 aprile 1869, alle ore 10. Il punto principale era formato da una doppia raggiera di grani; l'altro sembrava sospeso al di sopra della cavità. Ma non si può provare che questa differenza di livello esista realmente. La cosa certa è che le velature non formano, come supposto ancora da W. Herschel, uno strato continuo, si strappano sempre parallelamente alle lacerazioni della fotosfera, poiché abbiamo spesso visto lingue di fuoco proiettarsi ben al di là delle velature, quando anche queste formano il fondo della penombra. Si deve quindi respingere l'idea di un doppio strato distinto, sebbene l'esistenza dei due tipi di nubi sia perfettamente certa.

Fig. 49.



3.6 Conclusioni relative alla struttura delle macchie

Da ciò che abbiamo presentato, le macchie sono semplicemente soluzioni di continuità in questo strato di nebbie o di vapori luminosi che formano la fotosfera. Queste nubi differiscono dalle nostre per due aspetti: non sono formate da vapore acqueo ma di sostanze metalliche; e, grazie alla loro temperatura elevata, emettono luce.

Quanto all'aspetto esterno, è completamente lo stesso; la Terra interamente ricoperta di nubi offrirebbe ad uno spettatore posto al di fuori una struttura bitorzoluta come quella del Sole, e molto spesso si può osservare un fenomeno simile in cima alle montagne. In molte circostanze, ma soprattutto nei temporali, si vedono, come nel Sole, nubi a forma di *cumuli* allungarsi verticalmente o allargarsi orizzontalmente, secondo la direzione delle forze che agiscono su di esse; spesso anche esse si trasformano in *cirri* o velature vaporose, ed è in questo che l'analogia è completa.

Questa teoria spiega, senza ricorrere a velocità fantasiose, la rapidità con la quale avvengono certi cambiamenti di forma nelle macchie. Lo spostamento apparente di una nube si può spiegare senza supporre che la materia abbia percorso lo stesso spazio del contorno della nube. Basta un cambiamento di temperatura che produce in una parte la condensazione, dall'altra la dissoluzione del vapore su una superficie molto estesa. È così che con un tempo calmo vediamo il cielo coprirsi di nubi quasi istantaneamente, o aprirsi con la stessa rapidità, anche se le correnti d'aria hanno velocità incomparabilmente inferiori a quella del moto apparente delle nubi. Una nube può anche apparire immobile malgrado un vento violento dovrebbe trasportarla, e la trasporta realmente con grande velocità; ne abbiamo un esempio in quelle che si chiamano nubi *parassite* delle nostre montagne: quando l'aria attraversa una regione molto fredda, il suo vapore si condensa per vaporizzarsi un poco più lontano, di modo che la stessa regione è sempre riempita di vapore condensato che si rinnova continuamente. Analogamente, dalla stabilità di qualche macchia, non sarà possibile concludere dell'immobilità della materia solare.

Dopo i dettagli nei quali abbiamo trattato la struttura delle macchie, ci sembra impossibile spiegarle con un abbassamento della temperatura sufficiente ad offuscare una di queste nubi brillanti. Bisognerebbe dapprima, come abbiamo già fatto notare, che queste nubi fossero sempre sovrapposte a due a due, in modo i loro contorni fossero simmetrici: ipotesi inammissibile, proposta dapprima da Galileo e ripresa in questi ultimi tempi da M. Kirchoff. La temperatura del Sole è talmente elevata, lo vedremo presto, che per produrre nubi oscure, sarebbe necessario supporre un enorme raffreddamento difficilmente spiegabile.

Le difficoltà che presenta un problema riguardano spesso il modo in cui viene formulato. A noi sembra che la questione relativa alla natura delle macchie deve essere posta nel modo seguente: "Le macchie sono dovute ad una materia oscura che si espande al di sopra della materia luminosa, o, al contrario, alla materia luminosa che invade uno spazio oscuro?"

La questione posta in modo così netto deve essere risolta mediante l'osservazione e lo studio dettagliato dei fenomeni che presentano le penombre e le correnti fotosferiche. Tutti i fenomeni che abbiamo descritto ci sembrano spiegabili con la seconda ipotesi. Da dove viene questo spazio oscuro? Come si trova nella massa incandescente del Sole? È un altro tema che discuteremo in seguito; per il momento, ancora una volta, constatiamo una cosa: nelle macchie esiste una materia luminosa che si muove e invade uno spazio meno brillante; bisognerebbe rinunciare all'evidenza e a tutte le analogie fisiche, per sostenere il contrario. Se si vuole, si potrà usare il termine nube per la parte oscura, ma non sarà meno vero che è la parte luminosa che cerca di penetrare in questa parte oscura. Seguendo questo percorso separiamo la questione dei termini, e rimane solo la questione fisica posta in modo alquanto netto, risolta solo in parte, poiché rimangono da decidere le questioni relative alle temperature che possiedono le diverse parti, allo stato e alla natura delle sostanze che riempiono queste cavità.

Del resto, la spessa nebbia che forma la fotosfera non si muove nel vuoto, e non può suggerire di credere che le macchie non contengono alcuna materia pesante, ma solo una sostanza trasparente, meno brillante della fotosfera e di natura gassosa. La nostra atmosfera presenterebbe lo stesso aspetto ad un osservatore esterno ad essa, per esempio nella Luna; le nubi illuminate dal Sole apparirebbero brillanti, mentre si vedrebbero macchie nere nei luoghi in cui l'aria è trasparente.

Ancora una parola per capirci. Noi non impieghiamo il termine *nucleo* per indicare la massa interna del Sole, poiché, sotto la penna di Herschel, questa espressione significa una massa *solida* e a temperatura relativamente bassa. Nulla impedirebbe tuttavia di servirsene avendo cura di scartare utilizzando le idee che Herschel vi associava, e che è ormai impossibile ammettere. Così, dopo aver scartato la questione dei termini, ci applicheremo alla soluzione dei problemi che abbiamo enunciato, ma cercheremo dapprima di farci un'idea esatta dei moti generali che si osservano sulla superficie del Sole.

Capitolo 4

Moti propri delle macchie - Rotazione del Sole

4.1 Importanza della questione

Al termine del capitolo precedente, abbiamo esposto parecchie questione impossibili da risolvere senza sapere se le macchie sono fisse sul corpo solare, oppure se possiedono un moto proprio di traslazione. È facile riconoscere che esse non sono assolutamente fisse, giudicandole le loro trasformazioni e le suddivisioni di cui abbiamo dato parecchi esempi. Ma si tratta di sapere se, oltre a questi movimenti accidentali, non vi sia anche un moto sistematico che le trasporti tutte in una direzione costante. Questo moto proprio, se esiste, si compone con il moto di rotazione del Sole; e poiché quest'ultimo può essere studiato solo tramite la rotazione stessa, si comprende che la questione che ci occupa presenta una difficoltà tutta particolare.

I primi osservatori riconobbero delle diversità nel movimento delle macchie, e le colsero tramite la diversa durata delle loro rivoluzioni. Secondo le osservazioni di Scheiner, questa durata variava da 25 a 27 e anche 28 giorni. Galileo suppose che si sbagliasse; ma non riuscì a fare di meglio; fissò la rivoluzione del Sole a un mese lunare, circa, valutazione alquanto grossolana, e inoltre non riconobbe l'inclinazione dell'equatore solare sull'eclittica¹.

Per eliminare l'influsso del moto proprio, è disponibile un solo mezzo: determinare la durata della rotazione solare, dal moto di un grande numero di macchie. Se si impiega una sola osservazione, i risultati saranno necessariamente soggetti ad un errore uguale al moto proprio stesso; se si calcola la rivoluzione da parecchie osservazioni, ma in piccolo numero, gli errori non scompaiono a colpo sicuro; essi si compensano perfettamente tra loro solo tramite una lunga serie. Nell'ultimo secolo, i geometri si sono molto occupati di determinare la rotazione solare basandosi su tre osservazioni di una stessa macchie; ma le loro soluzioni, ingegnose ed eleganti dal punto di vista geometrico, non sono state di alcuna utilità reale nel risolvere un problema così complesso. È quanto ha espresso Delambre, cioè che questo problema era più curioso che utile, e che un astronomo se ne doveva occupare una sola volta nella sua vita, per vedere se questa rotazione è costante. (*Astronomia*, t. III, p. 59). Fortunatamente il suo consiglio non è stato seguito in questi ultimi tempi, abili scienziati hanno ripreso la questione in modo più razionale, e sono giunti ad un risultato soddisfacente.

Una delle difficoltà maggiori deriva dai cambiamenti di forma che subiscono le macchie; il loro contorno varia da un giorno all'altro, non si è mai sicuri di vedere sempre lo stesso punto nelle osservazioni successive. Si evita in larga parte questo inconveniente studiando preferibilmente macchie tonde che variano poco, e che fanno spesso parecchie rivoluzioni consecutive; tuttavia, anche con queste precauzioni, non si è mai esenti dal dubbio.

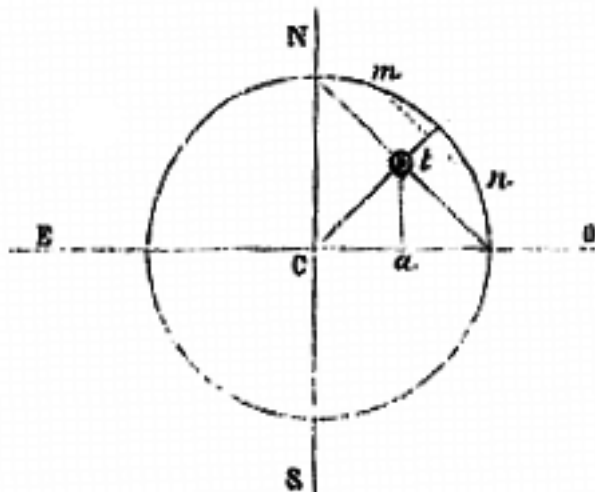
Per farsi un'idea della precisione che converrebbe avere in queste osservazioni, basta ricordare che un arco di secondo, al centro del disco, corrisponde ad un angolo eliocentrico di $5'37''$, e che questo valore cresce allontanandosi dal centro, a tal punto che presso il bordo, un arco di un secondo corrisponde a circa 3° .

Il metodo migliore di osservazione consiste nel misurare direttamente la distanza della macchia al bordo del disco, e in secondo luogo l'*angolo di posizione*, cioè l'angolo che forma il raggio del disco passante per il punto osservato con il cerchio orario che passa per il centro del disco stesso.

¹Abbiamo spesso citato l'opera di Scheiner come riferimento. Questo testo è stato talmente citato quando era ancora vivo il suo autore, che noi crediamo di dover registrare qui l'apprezzamento di un giudice alquanto competente, Lalande, nel terzo volume della sua *Astronomia*, n° 3227, dice queste memorabili parole: "Sebbene possa essere tra quelli a cui il caso ha mostrato per la prima volta le macchie, è certo che non vi è chi le osservò così bene e ne diede la teoria in modo così completo come Scheiner. La sua Opera presenta 774 pagine su questo argomento, e ciò basta a mostrare con quale assiduità se ne occupò, e quanto estese furono le sue ricerche. Hevelius lo cita con il massimo elogio: *Incomparabilis et omnigenie eruditionis... ut in hunc materia omnibus palmam quasi praeripuisse dici posset* (*Selenog.* p. 82)". È alquanto spiacevole non essere riusciti a trovare i suoi manoscritti, che abbiamo richiesto a M. Wolff di Zurigo.

Sia C il centro del disco (fig. 50), Ct la direzione della macchia, NCS il cerchio orario condotto dal centro del Sole; l'angolo di posizione sarà $N Ct$. Quando si conosce questo angolo e la distanza Ct , si può calcolare la longitudine e la latitudine eliografica della macchia, cioè fissare la sua posizione assoluta, come la si vedrebbe dal centro del Sole, mediante formule note.

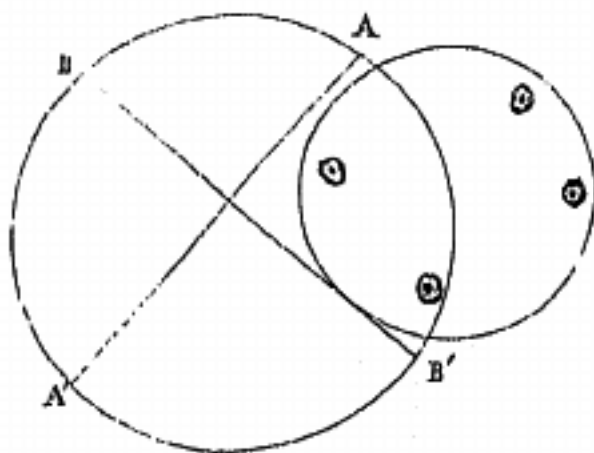
Fig. 50.



Poiché è impossibile prendere esattamente la direzione del centro, si dispone il micrometro in modo che uno dei suoi fili sia perpendicolare, l'altro tangente al bordo; è meglio che il secondo filo sconfini un poco sul disco, come si vede in mn ; si valuterà, dall'uguaglianza dei due segmenti m e n , che il reticolo è opportunamente disposto. Si ottengono così risultati eccellenti; ma bisogna convenire che questo metodo è laborioso, e che si presta male ad una lunga serie di osservazioni. Il metodo delle proiezioni è preferibile, ma è necessario effettuare le correzioni che abbiamo indicato nel primo capitolo. Le si può evitare proiettando il filo del reticolo, o, meglio ancora, proiettando, come si fa M . Sporer e M . Heis, un reticolo di tratti rettangolari posto nel fuoco stesso dell'obiettivo, in questo modo le deformazioni sono le stesse per l'immagine del Sole e per quella del reticolo.

M . Carrington ha impiegato un altro metodo in una grande serie di osservazioni. Nel piano focale dell'obiettivo, piazzò due fili d'oro, o, meglio, due fili di ragnatela AA' , BB' (fig. 51) rettangolari tra loro, e inclinati di 45 gradi sul cerchio orario. Poi, proiettò questo reticolo su uno schermo, e osservò gli istanti in cui il bordo del Sole e le macchie venivano successivamente attraversare le proiezioni dei fili. Fatte queste osservazioni, poteva calcolare facilmente la distanza dal centro del disco e l'angolo della posizione. Tuttavia, quando le macchie sono prese al bordo, questo metodo è difficilmente impiegabile, e non offre risultati precisi.

Fig. 51.



In una serie di osservazioni molto delicate di cui parleremo presto, abbiamo impiegato semplicemente il metodo micrometrico; ma abbiamo trovate che i disegni eseguiti sulle proiezioni, quando vengono opportunamente

corretti, forniscono dati ben sufficienti per i calcoli ordinari, e li si può perfettamente impiegare per la maggior parte delle ricerche che rimangono ancora da compiere.

Qualsiasi mezzo si impieghi, bisognerà sempre combinare un gran numero di osservazioni per rendere i risultati indipendenti dalle cause di errore che abbiamo segnalato, e ciò comporta un notevole lavoro. M. Carrington, dopo un esame coscienzioso della sua grande serie di osservazioni, che fu in larga parte calcolata e stampata a spese del governo inglese, concluse che, per accrescere la nostra conoscenza più di quanto non abbia fatto nel suo lavoro, bisognerebbe spendere almeno 125000 franchi. Questo punto di vista puramente finanziario potrà conforme ad un mercante piuttosto che a uno scienziato; ma è certo, e noi lettori ne converremo presto, che, visto il lavoro e l'assiduità necessari, le ricerche relative al Sole non potranno essere l'opera di un amatore, nemmeno di uno scienziato isolato.

4.2 Risultati ottenuti riguardo alla rotazione del Sole

La determinazione della rotazione solare contiene tre elementi: 1° la durata della rivoluzione; 2° la posizione dei nodi dell'equatore solare rispetto alla linea degli equinozi; 3° l'inclinazione dell'equatore solare sul piano dell'eclittica.

Gli antichi astronomi determinavano separatamente ognuno di questi elementi, scegliendo osservazioni eseguite in circostanze opportune. Per valutare la durata della rivoluzione, si misurava il tempo che una macchia impiegava a ritornare nello stesso punto del disco, per esempio nel centro. Questo metodo, lo si comprende facilmente, è applicabile solo in un piccolo numero di casi. Non ci si può accontentare di osservare il tempo impiegato da una macchia a passare davanti al disco, poiché la sua traiettoria è divisa in parti diverse dal contorno apparente del Sole, che si chiama spesso l'*orizzonte delle macchie*. In seguito ad uno studio lungo e minuzioso, Scheiner poté valutare in 27 giorni la durata della rivoluzione sinodica (è così chiamata la rivoluzione apparente, nella quale la macchia ritorna nello stesso punto del disco rispetto all'osservatore). Si hanno quindi $25 \frac{1}{3}$ per la durata della rivoluzione siderale, cioè per il tempo impiegato da un punto del Sole a descrivere un cerchio intero.

Si determinava la posizione del nodo osservando il momento in cui le macchie sembrano descrivere linee rette, trovandosi allora l'osservatore nello stesso piano in cui si muovono le macchie. Scheiner trovò per la sua longitudine 69 o 70 gradi.

Infine, deducendo l'inclinazione della grandezza del piccolo asse dell'ellisse che descrivono le macchie nel momento di massima curvatura, Scheiner, avendo sempre trovato i suoi risultati tra 6 e 8 gradi, adottò $7,5^\circ$ per il valore approssimato.

Cassini diede risultati di poco differenti da quelli di Scheiner, dedotti pure da un grande numero di osservazioni. Questi risultati presentano un grande interesse, e li ricordiamo allo scopo di riconoscere l'estensione delle variazioni subite da tali elementi. Più tardi, si ebbe l'idea sciagurata di impiegare solo un piccolo numero di osservazioni, e allora le anomalie si manifestarono in modo molto saliente, come ci si può convincere dalla seguente tabella:

ASTRONOMI	Durata della rotazione in giorni solari medi	Inclinazione dell'equatore solare sull'eclittica	Longitudine del nodo ascendente	Anno
Scheiner	25,33	$7^\circ 30'$	$69^\circ - 70^\circ$	1675
Cassini	25,38	7.30	70.10	1678
Lalande	25,42	7.20	78	1776
Delambre	25,01	7.19	80.17	1775
Bianchi	25,35	7.19	80.17	1839
Laugier	25,34	7.9	75.8	1840
Petersen	25,34	6.51	73.29	1841
Böhem	25,52	6.37	76.47	1833
Kysaens	25,09	6.38	76.38	1841
Carrington	25,09	7.15	73.40	1850
Spoerer	25,234	6.57	74.36	1866

Tra tutti questi risultati vi è una discordanza sorprendente. M. Carrington la rimarcò, costringendosi ad una serie continua di osservazioni con il metodo da noi indicato.

Prima di esporre i risultati ai quali è giunto, evidenziamo che non si constata alcuna variazione considerevole nella posizione dell'equatore solare. Scheiner dava come posizione del nodo ascendente 69 o 70 gradi, e ora $72^\circ 55'$, tenendo conto della precessione degli equinozi. Questo risultato è in accordo in modo sufficiente con quello di M. Carrington, vista la scarsa precisione delle antiche osservazioni.

Il lavoro di M. Carrington, iniziato nel novembre 1853, è continuato fino al marzo 1861. I dati dell'osservazione sono stati discussi con un'analisi attenta e minuziosa che gli hanno attribuito grande importanza. Nella sua discussione, assumeva come punto di partenza il valore presunto il più esatto degli elementi di rotazione solare, e se ne serviva per calcolare le diverse posizioni che doveva occupare una stessa macchia. Determinava poi le differenze tra le posizioni calcolate e osservate, e queste differenze servivano a calcolare le correzioni destinate a rettificare i numeri inizialmente adottati. I risultati sono stati pubblicati a Londra nel 1863, in una grande opera arricchita da ottime incisioni.

M. Spoorer, d'Anclam, ha pure eseguito una lunga serie di osservazioni, che ancora continuano, ed è giunto a conclusioni simili a quelle di M. Carrington.

Abbiamo anche discusso un certo numero di nostre osservazioni; la nostra serie, iniziata nel 1859, può fare seguito a quelle di M. Carrington, e la continueremo ancora.

Infine, si hanno le fotografie di Kew, che si potranno utilizzare con vantaggio. Ma non essendo ancora state discusse tutte queste osservazioni, ci limiteremo a citare quelle di M. Carrington e Spoorer.

La prima legge segnalata da questi osservatori è la conferma di un farro già evidenziato dagli antichi, e cioè "le macchie sono molto rare oltre i 30° di latitudine eliocentrica". Nel mese di giugno 1846, M. Peters osservò a Napoli una macchia avente per coordinate 134°20' di longitudine e 50° di latitudine nord. Questa macchia è la più lontana dall'equatore mai osservata. Essa possedeva un moto proprio molto pronunciato, ma in senso inverso alla rotazione solare; in questo movimento essa percorreva ogni giorno -64 minuti in longitudine e +11 minuti in latitudine. Si è osservato anche che le macchie sono rare sull'equatore, e che si mostrano in maggiore quantità nelle due zone poste simmetricamente, al nord e al sud, tra i 10° e i 30° di latitudine.

La seconda legge è più importante: "La rotazione solare non ha la stessa durata su tutti i parallassi": *la velocità è maggiore all'equatore che ai poli*, e di conseguenza, è sull'equatore che l'arco percorso in un giorno diviene massimo. Si è cercato di esprimere in modo empirico questa rotazione diurna. Diamo tre formule che sono dovute, la prima a M. Carrington, la seconda a M. Faye, la terza a M. Spoorer. (ξ rappresenta la rotazione diurna e λ la latitudine):

$$\begin{aligned}\xi &= 14^{\circ}25' - 16' \sin^4 \lambda \\ \xi &= 12^{\circ} - 186' \sin^2 \lambda \\ \xi &= 16^{\circ}8475 - 3^{\circ},3812 (\sin \lambda + 41^{\circ}13')\end{aligned}$$

È quindi certo che la velocità angolare di rotazione non è la stessa su tutti i paralleli. Non conosciamo la velocità di rotazione vicino ai poli, ed è solo per analogia che possiamo generalizzare la legge. Oltre il 50° parallelo, non si sono mai osservate macchie, e di conseguenza non è possibile studiare il modo in cui avviene la rotazione di questi punti; il solo fenomeno che funga da base per questo studio sarà quello delle facole; ma esse sono così variabili nelle loro forme, che non è possibile alcuna fiducia.

Per dare un'idea del modo in cui varia la velocità di rotazione secondo la latitudine, riprodurremo la tabella seguente estratta dal lavoro di M. Carrington, aggiungendo un'ultima colonna estratta dallo stesso lavoro per i moti in latitudine.

Latitudine della macchie	Rotazione diurna in arco	Peso, secondo il numero di osservazioni	Moti in latitudine
+50 N	787'	1	-17
35	806	18	+14
30	824	59	+14
25	831	116	+5
20	840	151	-1
15	851	127	-5
10	859	142	-12
5	863	85	+10
Equatore	867	5	-21
-5	865	31	+4
10	856	218	-2
15	845	98	+14
20	839	200	+15
25	827	75	+6
30	814	67	-10
35	805	19	
40	729	2	

La seconda colonna mostra il modo in cui varia la rotazione. La terza contiene una valutazione numerica dell'importanza che si può assegnare ai risultati, visto il numero delle macchie utilizzate per il calcolo; è quanto

indichiamo con il nome di *peso*. Questa colonna mette in evidenza le zone dove si producono i massimi delle macchie. Potendosi appoggiare su un numero assai limitato di anni, si potrebbe dire che vi sono quattro zone di massimo corrispondenti alle latitudini:

$$+20 \quad +10 \quad -10 \quad -20$$

alle quali i massimi osservati sono

$$151 \quad 142 \quad 218 \quad 200$$

Si può facilmente evidenziare che queste posizioni corrispondono all'incirca a quelle per le quali i moti in latitudine cambiano di segno. Questa coincidenza è importante, poiché sembra indicare una relazione tra i moti in latitudine e gli archi che limitano le diverse zone in cui le macchie si producono.

In terzo luogo, anche le latitudini delle macchie sono variabili, ma la legge non è così semplice come per le longitudini. L'ultima colonna della tabella precedente, estratta da una tabella più dettagliata di M. Carrington, mostra che la legge è un poco confusa, essendo il numero delle osservazioni senza dubbio insufficiente. Tuttavia questa tabella, per quanto sia imperfetta, ci permette di fare le seguenti osservazioni.

1° Da 5 a 20 gradi N, e da 10 a 15 gradi S, il moto è negativo, cioè diretto verso l'equatore;

2° Da 20 a 35 gradi N, e da 15 a 30 gradi S, il moto è diretto verso i poli: per i punti più lontani, è impossibile stabilire una legge; le macchie sono troppo poco numerose e i risultati troppo discordanti affinché si possa trarre qualche conclusione;

3° I cambiamenti di segno più pronunciati corrispondono a punti vicini a quelli dove il numero di macchie passa per un massimo o per un minimo;

4° Confrontando i moti in longitudine e latitudine, si vede che l'equatore solare non divide le zone delle macchie e le loro traiettorie in due parti uguali; la linea mediana sembra coincidere con la parallela di 5 gradi N: questo fatto è importante, e lo evidenzieremo nel successivo paragrafo, quando riconosceremo che l'equatore termico non coincide con quello geometrico.

Le leggi esposte risultano dalla discussione delle medie; ma nei casi particolari, vi sono grandi divergenze. Per riconoscerle, basta fare una serie molto lunga di misure, e calcolare le longitudini giorno per giorno. Nell'anno 1866, abbiamo voluto esaminare seriamente questa questione, e abbiamo discusso le traiettorie di tutte le macchie apparse dopo il primo gennaio fino al termine di luglio. Altre occupazioni ci hanno impedito di proseguire questo lavoro per un tempo maggiore; ma ecco le conclusioni alle quali siamo giunti:

Gli elementi determinati da M. Carrington, confrontati con le nostre osservazioni, lasciano a desiderare; essi presentano differenze sistematiche che derivano dalla loro inesattezza. M. Spoorer ha combinato le nostre osservazioni con le sue, ottenendo risultati che riportiamo qui sotto rispetto agli elementi forniti da M. Carrington; tutti i valori sono riferiti allo stesso periodo, 1869:

Elementi	Carrington	Spoorer
Nodo	73°57'	74°37'
Inclinazione	7°15'	6°57'
Rotazione diurna	14°18'	14°, 2664
Durata della rotazione	25 ^g , 38	25 ^g , 2340

Queste due serie di risultati devono essere visti come preferibili rispetto a tutti quelli prodotti finora. La loro differenza è assai evidente, ma non deve essere attribuita a difetti nelle osservazioni. Quando ci si impegna a calcolare la posizione delle macchie, si trova tutta una serie di macchie che differiscono dalle posizioni teoriche per eccesso, mentre altre per difetto; se ne deve concludere che siamo in presenza di moti reali. Ma, per dirimere ciò, servirà un lavoro molto lungo e assai intenso.

Esaminando un gran numero di macchie calcolate con il massimo rigore, siamo giunti alle seguenti conclusioni, che ci trovano pure verificate nel grande insieme di M. Carrington, come abbiamo riconosciuto:

1° Tutte le volte che una macchia si divide, o subisce un mutamento significativo nella forma, si osserva sempre un movimento repentino, una specie di salto che avviene sempre dalla parte anteriore, cioè nel verso crescente delle longitudini.

2° Le grandi macchie, anche quando hanno una lunga durata, non sono prive di questi moti repentini, e si evidenziamo via via recrudescenze di attività nella intensità o nel moto che le produce. (Esempio: macchia dal 14 al 26 marzo, dal 12 al 23 aprile, dal 1 al 12 giugno, dal 28 giugno al 9 luglio).

3° Le macchie tonde a forma di cratere mostrano una stabilità maggiore della macchie i cui contorni sono frastagliati, i nuclei multipli e irregolari; esse fanno spesso parecchie rotazioni.

4° Le macchie piccole e superficiali hanno moti alquanto irregolari. Non è come per le grandi macchie, sia al momento della loro formazione, sia al momento in cui stanno per scomparire.

5° Tutte le volte che una macchia cambia forma, o che se ne produce un'altra nelle sue vicinanze, si nota una perturbazione o uno spostamento.

6° Le grandi macchie, dopo essersi disciolte, riappaiono spesso ad una piccola distanza dalla loro posizione iniziale, ma sempre verso la parte anteriore. Così, la macchia n° 43, dopo essere scomparsa, si ripresentò una trentina di gradi più lontano, alla stessa latitudine.

Per dare al lettore una idea di questi moti, noi produrremo qualche esempio di macchie che hanno compiuto parecchie rotazioni, e che sono state calcolate con misure micrometriche fatte al grande equatoriale del Collegio Romano, con il sistema di formule di M. Carrington.

Questi fenomeni mostrano che è impossibile non riconoscere alle macchie moti propri di trasporto sulla superficie solare.

Tabella 1

data civile	Giorno dell'anno e frazioni	Angolo di posizione	DISTANZA DAL BORDO		Valore di P .	Latitudine eliografica λ	Longitudine eliografica Δ	NOTE
			Lato interno	Lato esterno				
Macchia n. 32; dal 8 al 17 maggio 1866. Primo Nucleo								
Mai 8	127,9097	69. 6'	455,70	"	31.17.43"	- 3.48,3	107,24	Irrégulière.
10	129,8819	83.28	698,16	"	15.23.26	7. 9,0	97,73	"
11	130,8923	146. 9	895,53	"	3.22. 4	6.16,3	98,457	Divisé en 2.
12 S.	132,0833	235.34	648,89	"	18.27.17	6.43,9	101,911	"
13	132,8888	240.48	484,20	"	29.16.39	6. 7,9	101,637	"
15	135,1891	243.48	111,239	134,303	60.21.48	5.24,6*	102,979	"
16	135,9851	243.15	49,87	"	71. 6.34	6.28,9	103,235	Diam. 20' 30'.
17 S.	137,0694	242.54	1,064	"	87. 1.36	6.47,9	104,725	"

La stessa. Secondo nucleo

Mai 10	129,8819	77. 5'	598,87	"	21.41.31"	- 6.22,2	91,14	"
11	130,8923	87.15	805,06	"	8.49.22	5.51,3	90,882	"
12 S.	132,0833	218.30	816,57	"	8. 6.54	6.50,2	90,581	"
13	132,0833	235. 6	643,30	"	18.48.19	6.52,6	91,253*	Traînée de petites taches.

Tabella 2

data civile	Giorno dell'anno e frazioni	Angolo di posizione	DISTANZA DAL BORDO		Valore di P .	Latitudine eliografica λ	Longitudine eliografica Δ	Diametro apparente eliografico
			Lato interno	Lato esterno				
Tache n° 36. Deuxième rotation de la précédente; du 1^{er} au 12 juin.								
Juin 1	151,9336	79.52.48"	32,231	46,808	73.12.55"	- 5.13,6	107,673	3. 5'
2	152,9012	81.16.30	114,378	134,319	59.59. 5	5.41,7	108,193	2.41
3	153,8905	81.46.48	227,828	256,008	47.57.30	4.59,1	107,177	2.32
4	154,8681	84.15.36	402,200	433,433	33.51.20	4.53,9*	108,461	2.16
5	155,8876	90.31.12	602,202	632,889	20.17.43	5. 5,8	108,243	1.59
8	158,9048	240.39. 0	595,293	628,777	20.38.27	5.29,9	108,386	2. 9
9	159,8463	248.28.12	416,176	441,078	33. 3.18	4.38,4	108,834	1.47
10	160,9174	250. 0. 6	232,435	250,690	47.55. 5	4.49,8	109,726	1.39
11	161,9004	252.48.12	110,899	124,487	61. 6.32	4.40,9	109,870	1.42
12	162,9033	253.54. 0	26,882	39,249	74.37.35	4.39,6	110,135	0.52

Tache n° 39; du 25 au 26 juin.

Juin 23	173,8603	243. 4.12"	408,452	"	34.28.51"	- 8. 0,3	283,694	"
24	174,8943	249.40.48	231,271	"	48.52.30	8. 9,9	284,828	"
25	175,8751	252.28.12	99,675	114,240	61.19.16	7.35,1	283,600	Irrégulière.
26	176,8800	255. 7.48	22,305	30,652	75. 7.15	7.26,4	286,416	"

Tabella 3

data civile	Giorno dell'anno e frazioni	Angolo di posizione	DISTANZA DAL BORDO		Valore di ρ	Latitudine eliografica λ	Longitudine eliografica λ	Diametro eliografico
			Lato interno	Lato esterno				
N° 40. Terza rotazione della 32^{me}; dal 28 giugno al 9 luglio								
Juin 28	178,8717	92.10.12 ⁿ	29,447	37,996	74.25.31 ⁿ	— 3.12,2	110,247	1.56.19 ⁿ
29	179,9227	94. 9.26	111,486	123,345	60.55.41	5.29,9	109,913	1.39. 7
30	180,9003	96.58.48	233,485	245,712	48. 6.51	5.31,0	110,019	1. 6.35
Juillet 1	181,9240	101.58.48	397,071	416,333	34.36.33	5.39,9	110,351	1.24.54
2	182,8973	110.12.12	572,945	593,282	22.27.27	5.27,4	110,134	1.19.44
4	184,8958	213.18. 8	767,38	789,88	10. 8.41	5. 1,6	111,086	1.22.44
5	185,8517	245.49.48	604,590	617,747	20.38.11	4.37,3	110,857	0.50.54
6	186,8632	255.48.48	420,562	431,110	33.13.18	4.31,9	110,781	0.56.53
7	187,8667	260.48. 0	256,212	268,035	46. 6.28	4. 8,2	110,724	1. 2. 0
8	188,9280	263.42.12	120,607	128,374	60. 3.18	4. 3,8	110,792	0.57.24
9 S.	189,8462	665.16.12	41,691	45,205	72.21. 4	4.16,4	111,006	0.43.53
9 M.	190,2472	266.15. 0	28,998	23,619	77.34.39	3.57,5	110,980	1.19.75

Tabella 4

data civile	Giorno dell'anno e frazioni	Angolo di posizione	DISTANZA DAL BORDO		Valore di ρ	Latitudine eliografica λ	Longitudine eliografica λ	Diametro eliografico
			Lato interno	Lato esterno				
N° 43. Seconda rotazione dalla precedente, n° 39; dal 28 giugno al 9 luglio								
Juillet 11	191,8981	99.42. 0 ⁿ	9,862	5,569	82.13.19 ⁿ	— 7. 6,8	290,265	1.31,5
12	192,8906	101.24. 0	60,705	52,605	69.48.34	7.17,5	289,748	1.23
13	193,8748	104. 5. 1	155,574	141,059	57.16.19	7. 7,2	289,489	1.38
14	194,8494	108.18. 4	285,791	266,186	44.55.12	7.24,8	289,418	1.40,5
15	195,9250	115.48. 0	470,556	448,836	30.48.56	7.11,8	290,015	1.31,5
16	196,8930	128.39. 6	639,422	613,740	19.39.51	6.37,51	289,625	1.39
17	197,8924	172.23. 0	750,594	777,789	11. 3.33	6.10,8	290,203	1.41,5
18	198,8854	229.30. 0	717,255	686,173	14.55.22	5.55,9	289,868	1.56*
19	199,8850	251.25. 2	545,553	521,387	25.45.53	5.48,3	289,704	1.37
20	200,8790	259.31. 8	372,890	351,785	37.57.31	6. 1,6	289,460	1.38
21	201,8651	264.44. 2	221,435	205,119	59.34.54	5.43,2	289,509	1.33,5
22	202,8876	267. 6. 0	101,922	90,241	63.44.22	6.22,3	289,308	1.36,5
23 M.	203,8956	269.55. 2	26,510	21,759	76.56.21	5.54,4	289,411	1.34,5
23 S.	204,1935	270. 9. 6	14,035	10,217	80.35.21	6.12,4	289,126	1.27

Un semplice colpo d'occhio gettato sulle tabelle precedenti ci permetterà di avanzare qualche interessante osservazione.

La macchia n° 32 apparve l'otto maggio; le sue coordinate erano 3°48' di latitudine, 107°24' di longitudine. Dopo due giorni, era divisa in due parti aventi come coordinate, l'una 7°9' di latitudine e 97°73' di longitudine, l'altra 6°22' di latitudine e 91°14' di longitudine. La longitudine del primo nucleo va aumentando, mentre rimane stazionaria per il secondo; quanto alle latitudini, non si notava un moto regolare.

Questa macchia riapparve il primo giugno (n° 36); il secondo nucleo è scomparso e rimane solo il primo. La latitudine tende a diminuire progressivamente, mentre la longitudine cresce. Al 1° di giugno, il diametro era di 3°5'; il 9, è ridotta a 1°39'. Il 4 giugno, vi fu un salto brusco di 1° e una grande diminuzione in estensione.

Abbiamo inserito sotto il n° 40 la terza rotazione della stessa macchia (32 e 36). Vi troviamo una latitudine oscillante, e una longitudine sempre crescente. Il diametro decresce fino al 5 luglio per poi aumentare di nuovo facendo bruschi movimenti che annunciano la sua dissoluzione vicina. Infatti, questa macchia non è più riapparsa.

Con i numeri 39 e 43 si trovano due rotazioni di un'altra macchia. Dal 25 al 26 giugno la sua latitudine diminuisce mentre la longitudine cresce. Durante la sua seconda rotazione, essa possiede un moto in latitudine alquanto pronunciato, mentre la sua longitudine è molto stabile e il suo diametro costante.

Potremmo moltiplicare gli esempi, ma quando detto basterà per mostrare al lettore quali sono le difficoltà che presenta la teoria di questi moti. Mentre una macchia presenta gli elementi della rotazione solare, l'altra non li presenta più e la correzione definitiva può derivare solo da un lavoro molto lungo e paziente.

4.3 Teorie proposte per spiegare i moti delle macchie

I risultati presentati provano che le nostre osservazioni non riguardano la parte solida del Sole, ma solo la sua atmosfera fluida. Infatti, quando un corpo solido possiede un moto di rotazione, è evidente che tutti i suoi punti devono possedere la stessa velocità angolare, e che, di conseguenza, devono tutti impiegare lo stesso tempo per compiere una rotazione completa. Abbiamo quindi ragione di dire, basandosi sui cambiamenti di forma e i moti che si osservano nell'interno delle macchie, che lo strato fotosferico nel quale avvengono tutti questi fenomeni è mobile come le nubi che fluttuano nella nostra atmosfera.

Si pone ora una nuova questione. La fluidità è propria dello strato fotosferico, o si estende all'intero corpo solare? In altre parole, esiste nell'interno del Sole un nucleo solido? Questo nucleo è luogo di azioni fisiche, di cui le macchie sarebbero le manifestazioni? Si è ammesso per lungo tempo questa ipotesi, ma diverse considerazioni ci hanno convinto che essa è insostenibile, poiché incompatibile con la temperatura elevata del Sole, come vedremo presto. Nel mese di gennaio 1864 annunciammo che il Sole potrebbe essere gassoso². Fummo portati a questi ipotesi dalla legge di Carrington sulle rotazioni, e dal fatto che le macchie possiedono un movimento che è più rapido nel periodo della loro formazione.

Sottolineiamo che l'ipotesi di un Sole completamente gassoso è lontano dall'essere in contraddizione con le idee generalmente ammesse sulla formazione dei corpi celesti. Il Sole ha dovuto passare prima per lo stato nebuloso; poi si è condensato per raffreddamento; ma nulla prova che la sua temperatura si sia abbassata al punto di solidificazione della sua massa interna. Dobbiamo quindi affrontare il problema della sua condensazione fisica, liberi da tutte le idee preconcepite e da tutte le ipotesi al riguardo.

Gli scienziati che ammettono l'esistenza di un nucleo solido all'interno della fotosfera, confrontano il moto delle macchie solari a quello dei nostri venti alisei. I marinai e i meteorologi sanno perfettamente che esistono, nella zona torrida, correnti atmosferiche che soffiano costantemente da Nord a Est nell'emisfero nord, e da Sud a Est in quello sud. Queste correnti derivano dal moto di rotazione della Terra combinato con la forza di richiamo che esercita il calore del Sole riscaldando l'aria delle regioni equatoriali, e determinando un moto dal basso verso l'alto. Nelle regioni torride tende così a formarsi una zona vuota che richiama l'aria dalle regioni vicine. In questo movimento, l'aria passa da un parallelo di raggio più piccolo a uno di raggio maggiore; da ciò una differenza di velocità che produce l'effetto del vento che soffia da Est; infine questa corrente combinandosi con il moto di traslazione dell'aria dei poli verso l'equatore, ne derivano venti composti e inclinati rispetto all'equatore come in precedenza affermato.

Queste correnti inferiori sono accompagnate da correnti superiori da un'altezza di 2000 a 3000 *m*, soffiando da S-O nel nostro emisfero, e da N-O nell'emisfero sud. Inoltre, oltre i 30° di latitudine esistono zone di calma nelle quali l'aria discende, si divide in due parti, una delle quali si dirige di nuovo verso l'equatore, mentre l'altra va in senso contrario e serve ad alimentare le correnti polari.

Questa è in linea di massima la natura di questa grande circolazione terrestre che si è creduto di riconoscere anche nell'atmosfera solare. Questa teoria non è di per sé impossibile. Si potrebbe obiettare che il Sole non è, come la Terra, sottoposto all'azione di una forza esterna in grado di determinare questi movimenti, scaldando preferibilmente le zone equatoriali. Ma non è impossibile che lo stesso effetto sia prodotto da una causa del tutto interna, e di fatto vedremo che la temperatura è più alta all'equatore che ai poli.

Invece di cercare se esistono cause in grado di produrre nel Sole una circolazione analoga a quella dei venti alisei, seguiamo un metodo più positivo, e vediamo se i fatti si prestano a questa interpretazione. In questo movimento atmosferico, le macchie si troverebbero o nella corrente inferiore o in quella superiore. Nella prima ipotesi, partendo da un parallelo dove la velocità è meno elevata, arriverebbero all'equatore con un moto relativo diretto in senso contrario alla rotazione generale; nella seconda, partendo dall'equatore, dove la velocità è massima, arriverebbero nelle regioni dove il loro movimento relativo sarebbe diretto nello stesso verso della rotazione; in entrambi i casi, la loro velocità angolare sarà minore all'equatore, più elevata sui paralleli. Questa conclusione inevitabile della teoria degli alisei è assolutamente contraria alla legge perfettamente certa e constatata dall'osservazione del moto delle macchie in longitudine; è all'equatore che esse hanno la maggiore velocità.

I movimenti delle macchie in latitudine hanno evidenziato linee nodali e cambiamenti di segno che indicano un trasporto delle macchie verso l'equatore solare, tra le latitudini 25° *N* e 20° *S*. Al di là di questi limiti, il moto diviene divergente, e le macchie si dirigono verso i poli. Questi moti sono, in realtà, confrontabili con quelli che

²Vedere *Bollettino meteorologico dell'Osservatorio Romano*, 1 gennaio 1864, p. 4, col. 1, lig. 34.

si osservano negli alisei terrestri, e ne concludiamo che esistono nel Sole correnti che trasportano la fotosfera. Ma siccome la componente che agisce lungo la longitudine è diretta in senso contrario dell'analoga componente negli alisei terrestri, è impossibile ammettere completamente la stessa teoria, bisogna quindi cercarne un'altra che meglio si accordi con i fatti.

Supponiamo che il Sole sia gassoso in tutta la sua massa, e che la sua rotazione sia meno rapida alla superficie che negli strati più vicini al centro. Queste due ipotesi non sono inammissibili; si realizzano anche nella massa nebulosa che si condensa, e da ciò si è avuta la formazione dei pianeti interni che possiedono una velocità maggiore di quelli esterni. Supponiamo allora che una massa di materia, partendo dall'interno del Sole, sia condotta da una causa qualsiasi verso la superficie; essa vi arriverà con il suo eccesso di velocità, e possiederà di conseguenza un moto relativo diretto nel verso crescente delle longitudini; essa sembrerà quindi lanciata in avanti, ed è ciò che realmente avviene per le macchie che sono in via di formazione. Il mezzo nel quale questa massa perverrà poi le opporrà una resistenza considerevole, rallentandone il moto fino al raggiungimento di un equilibrio relativo, cioè fino a che la macchia possiede la stessa velocità del mezzo che la circonda. Si troverà in tal modo spiegato il salto in avanti che si osserva, non solo nel periodo di formazione, ma anche nei periodi di recrudescenza dove nuove eruzioni modificano la forma delle macchie.

Non pretendiamo di assegnare le cause che producono questo movimento dal basso verso l'alto nella massa gassosa del Sole; deve essere comunque tale da essere predominante nella produzione di questi fenomeni. La fotosfera, raffreddandosi per irraggiamento, diviene via via più densa; essa deve quindi, per obbedire alle leggi dell'equilibrio, discendere verso l'interno e cadere verso il centro. In questo movimento, essa sposta una massa gassosa più leggera, che si innalza secondo le leggi dell'idrostatica, e che, dotata di una velocità maggiore, deve produrre la circolazione che ci indica l'osservazione.

Nelle zone lontane dall'equatore, il fenomeno si complica a causa delle numerose correnti che devono esistere in una massa così grande; è così impossibile spiegarne il meccanismo in modo più preciso senza fare ipotesi completamente arbitrarie, per esempio sulla profondità degli strati da cui partono le masse che producono le macchie; sul raffreddamento che esse subiscono alla superficie, ecc. È per questo che, nel Sole, questi fenomeni non possono presentare lo stesso grado di semplicità della Terra, dove le cause si riducono a due: l'innalzamento della temperatura prodotto dal Sole; la forma e la distribuzione dei continenti e dei mari. E tuttavia, anche sulla Terra, sono talmente complessi, che i meteorologi sono lontani dal concordare sulla teoria e la spiegazione precisa dei movimenti.

Si è obiettato che il Sole non sarebbe gassoso senza essere trasparente, e che, se è trasparente, l'esistenza delle macchie diviene impossibile. Nella nostra teoria, le macchie sono cavità che si sono formate nelle nubi della fotosfera. Esse sono riempite di gas assorbente, da cui deriva che non dobbiamo percepire lo strato fotosferico che si trova dall'altro lato.

Inoltre, possiamo aggiungere che:

1° È falso che le macchie siano assolutamente nere. Per convincersene, basta confrontare una macchia con un pianeta, Mercurio per esempio, nel momento del suo passaggio sul Sole; si vedrà che la differenza è estremamente grande.

2° Questa pretesa trasparenza dei gas, quando si tratta di masse assai considerevoli, è una supposizione completamente gratuita. L'atmosfera terrestre, anche allo zenit, assorbe circa un terzo della luce solare.

3° L'atmosfera del Sole, sui bordi del disco, assorbe almeno la metà dei raggi emessi dalla fotosfera; è quindi naturale supporre che, con uno spessore uguale al diametro del globo solare, l'assorbimento sarà infinitamente maggiore.

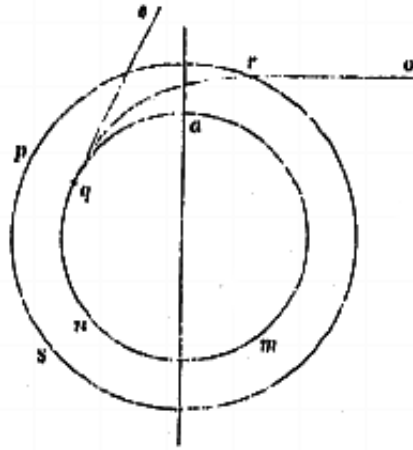
M. Faye ha adottato, dopo di noi, questa idea che il Sole è completamente gassoso; è considerato anche in Francia come l'ideatore di questa teoria, poiché l'ha sviluppata nei *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*. Ma non ha avanzato l'ipotesi della rotazione più rapida all'interno, ipotesi che noi crediamo necessaria per spiegare i moti sistematici delle macchie, poiché questi movimenti non possono essere prodotti da una circolazione analoga a quella dei venti alisei.

4.4 Su qualche movimento apparente dovuto alla profondità delle macchie e alla rifrazione dell'atmosfera solare.

Quando si studiano i moti in longitudine di una macchia, si trovano, come abbiamo detto, variazioni alquanto considerevoli e che appaiono del tutto anomale. Ma oltre a questi moti irregolari, si constatano, vicino ai bordi, aberrazioni sistematiche di cui si può cogliere le leggi. Vicino al bordo orientale, la macchia appare avvicinarsi al centro: la sua longitudine aumenta, e, vicino al bordo occidentale, sembra avanzare in senso contrario e avvicinarsi ancora al centro mentre la sua longitudine diminuisce. Pertanto, da una parte del centro, gli archi diurni aumentano e diminuiscono dall'altra.

Dopo aver evidenziato questo fatto esaminando le tabelle di M. Carrington, ne cercammo la causa, e fummo portati ad attribuirle alle rifrazioni dell'atmosfera solare. Già M. Carrington aveva indicato questa causa di irregolarità, ma non l'aveva analizzata con la cura che essa merita.

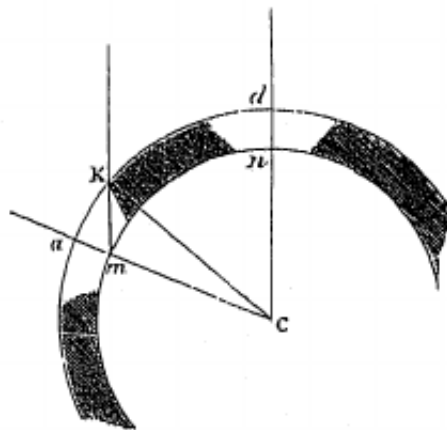
Fig. 52.



Sia amn (fig. 52) il disco solare; rpS lo strato atmosferico da cui è ricoperto. Se questo strato possiede un potere rifrangente molto importante, un raggio emesso dal punto q , invece di seguire la direzione qe lungo la quale si propagherebbe nel vuoto, sarà deviato lungo una curva del tipo qro , tangente alla retta qe . Questo raggio così deviato potrà giungere all'occhio dell'osservatore posto in o , per il quale il punto q sarebbe rimasto invisibile senza la rifrazione. Un punto qualunque diverrà quindi visibile a noi un poco prima di incontrare il cerchio che forma il contorno geometrico del Sole, e che, senza la rifrazione, separerebbe la parte visibile da quella invisibile; le macchie saranno quindi visibili un poco troppo presto da un lato del disco, mentre dall'altro scompariranno un poco più tardi. Si potrà, per il calcolo relativo a questi fenomeni, impiegare le formule che servono a valutare l'influenza delle nostre rifrazioni atmosferiche sul sorgere e tramontare degli astri.

Mentre esaminavamo il ruolo delle rifrazioni dovute all'atmosfera, M. Faye forniva un'altra spiegazione delle irregolarità sistematiche che si presentano ai bordi del disco. Secondo lui, queste anomalie sarebbero prodotte da un fenomeno detto *parallasse di profondità*, che risulta infatti dal fatto che le macchie sono cavità.

Fig. 53.



Supponiamo (fig. 53) una macchia avente la forma di una cavità conica. L'osservatore vede il centro n del nucleo, e nelle sue valutazioni la rapporta al punto d dove il suo raggio visuale incontra la superficie della fotosfera. Se la macchia occupa il centro del disco, il raggio visuale dn passante per il centro C del Sole, il punto osservato si proietterà al centro stesso della penombra. Ma se la macchia si trova vicino al bordo, il punto m visto dall'osservatore lungo la direzione Km , invece di essere riferito all'estremità a del raggio solare Cma , apparirà proiettato nel punto K dove il raggio visuale incontra la fotosfera; la macchia apparirà quindi essersi avvicinata al centro della quantità aK . Quando si cerca di calcolare l'influenza di questa parallasse, si trova che essa produce un errore proporzionale alla tangente della distanza eliocentrica, e espressa dalla stessa formula trigonometrica utilizzata per le rifrazioni. Diverrà quindi impossibile determinare direttamente la parte spettante a ciascuna di queste due cause nelle produzioni dei moti apparenti di cui ci occupiamo. Il dubbio era tanto più legittimo quanto i calcoli fatti da M. Faye, partendo dalla sua ipotesi, attribuivano alle macchie una profondità assai maggiore di quella che risulta da misure dirette.

L'osservazione poteva solo risolvere la questione fornendo dati nuovi. Pertanto, bisognava cercare di sottrarsi a una delle due cause di errore, al fine di poter valutare l'influenza dell'altra. Era evidentemente impossibile evitare la rifrazione; ma pensavo che fosse possibile eliminare la parallasse di profondità prendendo la posizione dei due bordi della macchia, e calcolando separatamente le loro coordinate eliografiche. Ho avuto la fortuna, nel 1866, di incontrare alcune macchie molto regolari e aventi un piccolo movimento in longitudine, soprattutto quella dal 28 giugno al 9 luglio, e quella dal 11 al 23 luglio. Le ho seguite giorno per giorno con molta cura, prendendo misure micrometriche con il grande rifrattore, e ottenni i risultati riportati nelle tabelle da cui sono estratti quelli del paragrafo precedente.

Dopo aver così evitato gli errori della parallasse di profondità, si trova ancora una perturbazione nel cammino in longitudine, e queste perturbazioni, che sono tutte nel verso indicato dalla teoria, possono essere attribuite solo alla rifrazione. Tuttavia il loro valore non supera di molto il limite degli errori di osservazione. Siamo convinti che la rifrazione solare esista, ma potremo valutarla solo dopo aver fatto numerose osservazioni sulle macchie di regolarità e stabilità straordinaria³.

Sono queste misure, prese con la massima cura, che ci hanno mostrato che le macchie subiscono spesso cambiamenti molto grandi nelle loro reali dimensioni, e che ogni cambiamento di forma un poco considerevole contiene una irregolarità nel percorso in longitudine.

La teoria di M. Faye, sulla parallasse di profondità, si trova così perfettamente verificata, e a sua volta serve da conferma alle idee di Wilson. Le macchie sono quindi cavità. Ma queste cavità sono prodotte da eruzioni vulcaniche, o dovute a vortici analoghi a quelli dei nostri cicloni? Tratteremo questa questione quando avremo raccolto tutti i dati necessari alla sua soluzione. Una circostanza ci porterebbe attualmente ad adottare l'assimilazione con i cicloni; il massimo delle macchie coincide con i limiti delle zone dove si produce l'inversione del moto in latitudine.

4.5 Riassunto dei moti delle macchie

Si vede, da quanto detto finora, che invece di osservare il moto di rotazione del corpo solare, abbiamo studiato quello della sua atmosfera. Siamo pertanto nelle condizioni in cui si troverebbe un astronomo che vorrebbe, ponendosi sulla Luna, determinare il moto di rotazione della Terra, prendendo come riferimento una nube. Dovrebbe dapprima studiare la circolazione atmosferica e determinarne le leggi: compito assai difficile, e quasi impossibile nelle attuali circostanze.

Le conoscenze da noi acquisite ci permettono tuttavia di dividere i moti delle macchie in tre categorie.

La prima comprende tutti i movimenti generali; e da questo punto di vista, il risultato più importante è l'ineguaglianza delle rotazioni sui diversi paralleli; la velocità angolare è massima all'equatore e diminuisce col crescere della latitudine.

La seconda categoria comprende i moti apparenti dovuti alla parallasse di profondità e alla rifrazione. La prima di queste due cause può essere eliminata con il metodo di osservazione da noi proposto, e rimane solo la seconda la cui influenza non è ancora stata sufficientemente determinata, ma che non è trascurabile.

La terza contiene tutti i moti irregolari e straordinari che dipendono dalle cause stesse che producono le macchie, cause ancora oscure e che resteranno ancora a lungo incognite.

Abbiamo evidenziato più volte che questi movimenti si producono soprattutto al momento della comparsa di una macchia; si formano spesso parecchi centri senza che si possa prevedere quello tra di loro che si manterrà formando in modo definitivo il nucleo della macchia. Le stesse irregolarità si ripresentano al momento della dissoluzione finale. Così le macchie più stabili sono quelle che sembrano più profonde.

Infine è impossibile spiegare i moti sistematici delle macchie con correnti analoghe a nostri venti alisei. Questa ipotesi non spiega il fatto fondamentale del trasporto delle macchie verso l'equatore con accelerazione del moto angolare. Per spiegare questo fenomeno, bisogna necessariamente ammettere che il Sole è gassoso in tutta la sua massa, e che la velocità dei diversi strati cresce passando dalla superficie alle zone centrali. Del resto, vedremo presto altri fenomeni che rafforzeranno questa opinione.

4.6 Variazioni secolari delle macchie

Ci si può chiedere se le apparizioni delle macchie siano soggette a qualche legge generale. Questa questione è una di quelle che hanno molto occupato gli astronomi moderni. Gli osservatori più antichi hanno evidenziato che ogni anno non si presentava lo stesso numero di macchie. Vi sono stati periodi nei quali sono trascorsi mesi e anni senza poterne osservare nessuna. Anche ammettendo che quest'ultima affermazione sia un poco esagerata, e che derivi dalla poca precisione con la quale le osservazioni erano effettuate, non è men vero che il numero di macchie sia estremamente variabile.

³Vedere i Comptes rendus des séances dell'Académie des Sciences, 1866, t. LXIII, p- 163-170.

W. Herschel è il primo ad essersi occupato di questo problema. Cercò di stabilire un rapporto tra le variazioni delle macchie e la meteorologia terrestre, e, trascurando altri elementi, confrontò il numero annuale di macchie con il prezzo del grano. Ma, lo si comprende, non poteva derivarne alcunché da un tale approccio. Senza dubbio i fenomeni meteorologici del globo devono dipendere in certa misura dalle vicissitudini solari, e ne vedremo una prova eclatante, ma il termine di confronto scelto da Herschel non ha alcuna relazione diretta con la condizione del Sole.

Il primo lavoro serio sulla questione è stato fatto dal barone Schwabe de Dessau. Dal 1826, analizzò in forma statistica le macchie solari, e fino al 1868, non ha smesso di osservare il Sole ogni giorno, condizioni atmosferiche permettendo. Esaminando questa lunga serie di osservazioni, riconobbe una periodicità molto evidente: massimi e minimi molto pronunciati si succedevano ad intervalli di circa dieci anni. Senza dubbio, in una simile classificazione, vi sono elementi con qualche difetto. Dapprima, non si può osservare il Sole tutti i giorni, e le lacune che ne derivano tendono necessariamente ad aumentare il numero dei giorni in cui non vi sono macchie. Inoltre, il numero di macchie è sempre un poco arbitrario; vi sono spesso gruppi che, per le loro suddivisioni, si prestano a diversi modi di conteggio. Ma in una considerevole quantità di osservazioni come quella del barone Schwabe, queste differenze si compensano tra loro e scompaiono nel risultato finale. Infatti, la legge è così evidente, che basta una rapida osservazione su una tabella per riconoscere che non è possibile avanzare alcuna obiezione. Essendo questa tabella molto interessante, la riproduciamo qui aggiungendo i risultati delle osservazioni fatte al Collegio Romano negli ultimi dieci anni.

Tabella del numero di macchie durante 42 anni

ANNÉES.	JOURS d'observations.	JOURS sans taches.	NOMBRE des taches.	COLLÉ E ROMAIN.
1826	277	22	118	
1827	273	2	161	
1828	282	0	225	
1829	244	0	199	
1830	217	1	190	
1831	239	3	149	
1832	270	49	84	
1833	267	139	33	
1834	273	120	51	
1835	244	18	173	
1836	200	0	272	
1837	168	0	333	
1838	202	0	282	
1839	205	0	162	
1840	263	3	152	
1841	283	15	102	
1842	307	64	68	
1843	312	149	34	
1844	321	111	52	
1845	332	29	114	
1846	314	1	157	
1847	276	0	257	
1848	278	0	330	
1849	285	0	238	
1850	308	2	186	
1851	308	0	141	
1852	337	2	125	
1853	299	4	91	
1854	334	65	67	
1855	313	146	28	
1856	321	193	34	
1857	324	52	98	
1858	335	0	202	
1859	343	0	205	257
1860	332	0	211	251
1861	312	0	204	251
1862	317	3	160	168
1863	330	2	124	165
1864	325	4	130	97
1865	307	26	93	86
1866	349	76	45	81
1867	312	195	25	72
1868	301	12	101	92

Questa tabella è alquanto significativa, e si notano due cose: 1° il periodo è all'incirca decennale; 2° ogni massimo è più vicino al minimo seguente che al precedente.

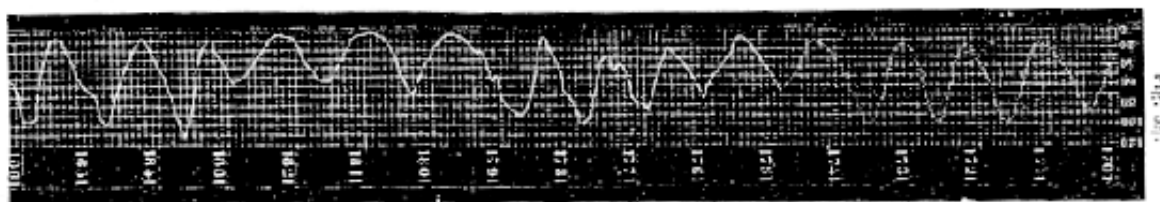
Per determinare questo periodo con la massima precisione, parecchi astronomi hanno fatto ricorso alle osservazioni antiche. M. Wolff, di Zurigo, nella sua opera sulle macchie solari (*Mittheilungen der Sonnenflecken*) ha svolto al riguardo un lavoro interessante. Ha potuto stabilire la cronologia delle fasi che il nostro Sole ha presentato dopo la scoperta delle macchie fino ai giorni nostri. I suoi calcoli hanno dato un periodo di 10 anni e $\frac{1}{9}$. M. Lamont ha trovato 10^{anni}, 43.

Noi traiamo da un'importante Memoria di M. Fritz la serie di massimi e minimi osservati e raccolti da diversi osservatori. Aggiungiamo a ciascuno di questi dati un numero facendo conoscere il grado di approssimazione di ogni epoca. Si può notare che l'incertezza è molto maggiore nelle osservazioni antiche che in quelle più recenti.

Tabella dei periodi di massimo e minimo delle macchie solari, da M. Fritz.

MAXIMA.		MINIMA.	
Serie antica			
1615,0	± 1,5	1610,8	± 0,4
1626,0	± 1,0	1619,0	± 1,5
1639,5	± 1,0	1634,0	± 1,0
1655,0	± 2,0	1645,0	± 1,0
1675,0	± 2,0	1666,0	± 2,0
1685,5	± 1,5	1679,5	± 2,0
1693,0	± 2,0	1689,5	± 2,0
1705,0	± 2,0	1698,0	± 2,0
1717,5	± 1,0	1712,0	± 1,0
1727,5	± 1,0	1723,0	± 1,0
1738,5	± 1,5	1733,0	± 1,5
		1745,0	± 1,0
Serie moderna			
1750,0	± 1,0	1755,7	± 0,5
1761,5	± 0,5	1766,5	± 0,5
1770,0	± 0,5	1775,8	± 0,5
1779,5	± 0,5	1784,8	± 0,5
1788,5	± 0,5	1798,5	± 0,5
1804,0	± 0,4	1810,5	± 0,5
1816,8	± 0,5	1823,2	± 0,2
1829,5	± 0,5	1833,8	± 0,2
1837,2	± 0,5	1844,0	± 0,2
1848,6	± 0,5	1856,2	± 0,2
1860,2	± 0,2	1867,1	± 0,1

Allo scopo di evidenziare ogni dettaglio di questa legge, riproduciamo la curva costruita da M. Fritz per riassumere la sequenza delle variazioni annuali. M. Carrington ha costruito una curva del tutto simile. Le ascisse rappresentano gli anni e le ordinate il numero di macchie osservate.



Lo studio di questa curva mostra due cose: 1° il periodo è decennale, come detto; 2° tuttavia non è così semplice come lo si potrebbe credere in prima istanza: in realtà, vi sono due periodi sovrapposti, uno semi

secolare, l'altro decennale; non abbiamo osservazioni antiche così precise da riconoscere la legge della variazione secolare, ma possiamo solo constatarne l'esistenza.

I passaggi dai massimi ai minimi sono accompagnati da una circostanza assai curiosa. Disponendo le macchie secondo la loro longitudine e latitudine, su un diagramma molto stretto, M. Carrington ha mostrato che la loro latitudine tende a diminuire con l'avvicinarsi del minimo; poi, quando il loro numero cresce, esse si mostrano ad una latitudine maggiore. Questa legge si verifica ancora nell'ultimo periodo a partire dall'ultimo minimo che si è verificato nel 1867, come risulta dalle osservazioni di M. Spörer e dalle nostre.

In presenza di queste variazioni sorprendenti, e la cui importanza non sfuggirà ad alcuno, siamo, come sempre, portati a chiederci quale sia la legge che le regola. La storia ci ha conservato il ricordo di parecchi periodi in cui l'intensità luminosa del Sole fu notevolmente diminuita. Virgilio, eco di una tradizione che si ritrova nella storia, ci riferisce che il Sole si oscurò alla morte di Cesare,

Ille etiam extincto miseratus Caesare Romam,
Quum caput obscura nitidum ferrugine textit,
Impiaque aeternam timuerunt saecula noctem.

Nell'anno 553 e nell'anno 626 dell'era attuale, il Sole rimase oscurato per parecchi mesi. Ma questi fatti, d'altra parte mal osservati, e riferiti senza dubbio con molta esagerazione, si sono presentati in periodi che sembrano completamente indipendenti tra loro; mentre le variazioni da noi analizzate offrono una regolarità quasi astronomica. Quale può dunque esserne la causa?

Secondo l'ipotesi più plausibile, bisognerebbe attribuirle all'azione dei pianeti che, con la loro attrazione, produrrebbero effettive maree sul globo solare. Il periodo principale apparve dapprima coincidere con la rivoluzione di Giove. Ma M. Carrington ha mostrato che questa coincidenza puramente accidentale in un'epoca non si verifica più in quelle seguenti, e che non è possibile trarre alcuna conclusione seria. L'azione di Mercurio e di Venere sarebbe forse più efficace. La loro distanza dal Sole è poco considerevole; ma, d'altra parte, la loro massa sembra alquanto piccola per produrre simili effetti. Non si può tuttavia cassare questa ipotesi senza un serio esame; è compito degli astronomi matematici studiarla e risolverla.

Il periodo decennale delle macchie coincide in modo alquanto inatteso con un fenomeno di meteorologia terrestre, la variazione della forza magnetica. Noi ci accontentiamo di indicare qui questo fatto; lo studieremo nella seconda parte di quest'opera, parlando dell'influsso che il Sole esercita sul suo sistema solare.

Andiamo ora a studiare i fenomeni che si producono nell'atmosfera solare. Troveremo in questo studio qualche chiarimento sulle variazioni che abbiamo discusso. La sola conclusione che possiamo trarre per ora, è che il Sole è un astro soggetto a variazioni periodiche che devono influire sull'intensità delle sue radiazioni luminose e caloriche, e troveremo altri motivi per annoverarlo tra le stelle variabili.

Capitolo 5

L'atmosfera solare

Nei capitoli precedenti, abbiamo spesso parlato di una atmosfera gassosa e trasparente, che avvolge il Sole, e la cui esistenza risulterebbe necessariamente dalla teoria che abbiamo ammesso sulla natura dello strato fotosferico. Dobbiamo ora affrontare lo studio di questa atmosfera, e fornire prove dirette della sua esistenza. Queste prove saranno dedotte: 1° dall'assorbimento che essa esercita sulle radiazioni luminose, chimiche e calorifiche; 2° dai fenomeni che si osservano durante le eclissi totali. Questo capitolo sarà dedicato alla prima di queste due questioni; parleremo delle eclissi nel seguente.

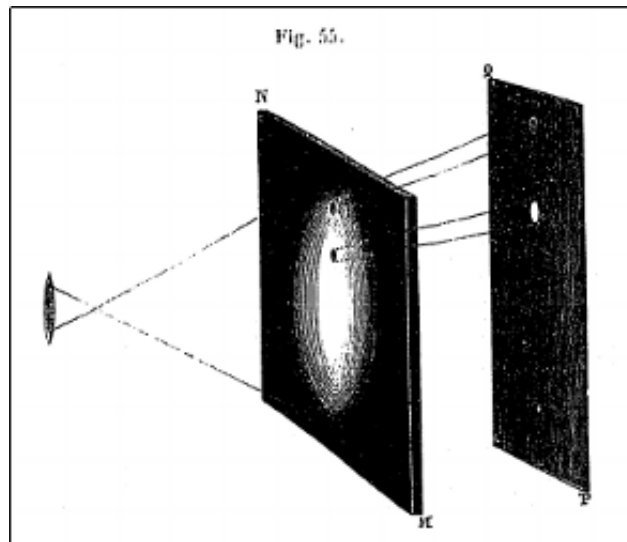
5.1 Assorbimento dei raggi luminosi da parte dell'atmosfera solare

Dai momenti in cui iniziarono gli studi del Sole, Luca Valerio, dell'Accademia dei Lincei, evidenziò che l'immagine del Sole era più brillante al centro che ai bordi. Questo fatto importante fu posto in dubbio da Galileo¹, ma era esatto. Per convincersene, basta esaminare un istante in una camera oscura l'immagine del Sole prodotta con un buon cannocchiale su uno schermo bianco; si nota immediatamente che i bordi sono molto meno luminosi. Bouguer tentò di determinare con misure fotometriche il rapporto esistente tra l'intensità luminosa del centro e quella di un punto posto ad una distanza uguale ai $\frac{3}{4}$ del raggio; trovò questo rapporto uguale a $\frac{1}{0,729}$; ma vicino ai bordi l'intensità decresce molto più rapidamente.

Arago mise in dubbio i risultati di Bouguer; ma molti osservatori li hanno trovati esatti, e anche noi li abbiamo verificati. Per eseguire queste misure con la massima precisione, ecco il procedimento da noi impiegato. Il nostro equatoriale era racchiuso in una cupola trasformata in camera oscura, e con un forte oculare abbiamo prodotto una proiezione del Sole del diametro di circa un metro. Per ridurre il problema della luminosità, che rappresenta una condizione essenziale per valutare le intensità relative, mettiamo un diaframma all'obiettivo, e facciamo riflettere il raggio emergente sull'ipotenusa di un prisma ad angolo retto. L'immagine così prodotta comprendeva circa la metà del disco solare; la si riceveva su uno schermo nero MN (fig. 55) avente due aperture del diametro di un centimetro, e i due fasci luminosi a e b , ricevuti su uno schermo bianco PQ , erano esaminati con un procedimento fotometrico. Le due aperture erano mobili e si poteva in tal modo studiare fasci presi a piacere in una parte qualsiasi del disco solare.

Quando i raggi così analizzati appartenevano al centro dell'immagine, si trova che la luce è bianca e che la sua intensità è circa la stessa in tutti i punti. Quando si supera un quarto di raggio, si trova una significativa differenza. Ma quando si arriva vicino al bordo, la differenza diviene estremamente grande, non solo per l'intensità, ma anche per il colore; la luce emessa da questa parte del Sole è di un rosso opaco, e questa circostanza presenta un ostacolo molto serio per l'esecuzione di misure fotometriche. Questo fenomeno non è stato ancora sottolineato; è tuttavia molto importante, perché questa colorazione dei bordi del disco spiega perfettamente il colore che presenta l'orizzonte durante le eclissi, nel momento in cui il Sole ci illumina solo con la sua parte esterna.

¹Galileo, Opere, L. VI, p. 198.

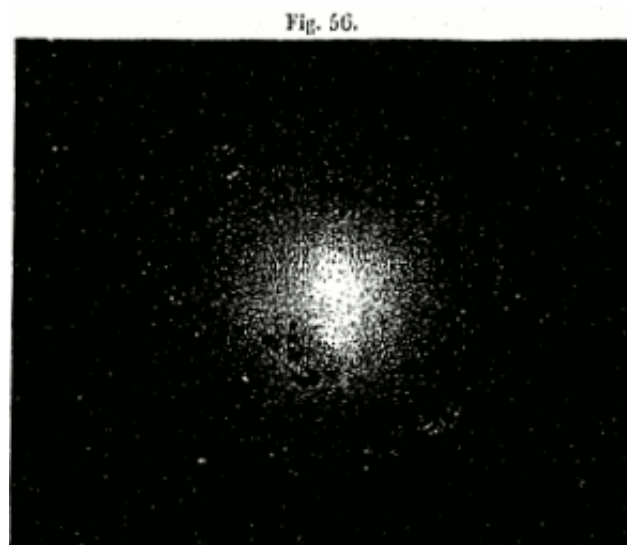


Lo strumento era disposto in modo che uno dei due fasci partisse dal contorno stesso del disco, l'altro da un punto posto ad una distanza dal centro uguale a tre quarti del raggio e il fascio più brillante era inviato su un prisma birifrangente, e si ottennero così due nuove immagini ognuna delle quali era più brillante di quella che proveniva dal bordo.

Allo scopo di valutare più facilmente l'intensità relativa dei due fasci, si utilizzò un fotometro a ruota mobile con aperture variabili, e ruotabile molto rapidamente mediante un ingranaggio. Trovammo che in uno dei punti posti, uno a 1 minuto e l'altro a 5 minuti dal bordo, le intensità luminose stavano nel rapporto 1 a 3. Inoltre, nel secondo di questi punti l'intensità luminosa era $\frac{2}{3}$ di quella centrale; pertanto il rapporto tra il punto più lontano e il centro sarà $\frac{1}{3} \times \frac{2}{3} = \frac{2}{9} = \frac{1}{4,5} = 0,22$. Prendendo punti più vicini al bordo, l'intensità sarà ancora minore, ma difficilmente valutabile a causa del colore rossastro della regione. I risultati che presentiamo qui sono più rilevanti di quelli di Bouguer; non li crediamo tuttavia esagerati, e li si troverà probabilmente troppo piccoli se si riprendono le stesse esperienze tenendo conto della differenza di colore nella valutazione delle intensità. Ci si può ora rendere conto dell'assenza di nitidezza e di precisione del bordo del Sole nelle comuni osservazioni, e soprattutto in quella delle eclissi.

5.2 Assorbimento dei raggi chimici

Vi sono anche differenze molto grandi tra le radiazioni chimiche emesse da diversi punti del disco solare. Abbiamo potuto constatare questo fatto fissando su lastre fotografiche parecchie fasi dell'eclissi del 1851. In queste prove, il bordo interno dello spicchio era perfettamente ritagliato, mentre si poteva appena definire il limite esterno del corpo solare. Poi tutte le osservazioni fotografiche hanno confermato tale risultato.



Riproduciamo qui (fig. 56) la fotografia fatta a Ely con l'eliografo di M. Selvyn, nella quale si riconosce perfettamente la diminuzione del potere fotografico. Questa riduzione è molto grande e tale da impedire l'impiego

della fotografia nello studio delle dimensioni del Sole; poiché il diametro dell'immagine dipende dalla durata dell'esposizione, o dal tempo di posa, ne comune linguaggio fotografico.

Si dovrà prevedere tale difficoltà, se si vuole impiegare la fotografia per studiare il passaggio di Venere nel 1874. Quando si vogliono ottenere negativi in cui il contorno del disco sia nettamente dettagliato, l'azione della luce deve durare a lungo; ma allora le macchie scompaiono quasi completamente, e le penombre sono completamente spente come abbiamo osservato in Spagna. È vero che l'immagine di Venere non dovrebbe sparire allo stesso modo, poiché essa si evidenzierà sul disco del Sole come un cerchio completamente nero; ma si presenteranno altre difficoltà che non discuteremo qui.

La scomparsa delle macchie nei negativi fotografici si accorda perfettamente con le misure fotometriche di M. Chacornac, assegnando all'intensità luminosa dei bordi del Sole un valore circa uguale a quello delle penombre.

L'esatta misura delle variazioni dell'esposizione nei diversi punti del disco solare è estremamente difficile, e non è ancora stata fatta.

5.3 Assorbimento dei raggi calorifici

Per determinare la temperatura relativa dei diversi punti del Sole, ci siamo serviti dell'apparecchio destinato alle proiezioni; lo schermo sul quale si produce l'immagine aveva un'apertura centrale dietro la quale si pone una pila termoelettrica estremamente sensibile. Il galvanometro era posto su un supporto fissato al muro onde evitare tutte le vibrazioni derivanti da un possibile movimento della cupola. Un diaframma, ricoperto di velluto nero, era posto dietro la pila per impedire alle radiazioni estranee di perturbare l'esperienza; con lo stesso scopo, si tendevano drappi neri sul parquet e attorno alla cupola. Sul diaframma anteriore, un regolo graduato in parti del diametro solare consentiva di conoscere immediatamente la posizione del punto osservato rispetto al centro o al contorno.

In una prima esperienza fatta il 19 marzo 1852², la pila era completamente aperta e l'immagine mediocrementemente ingrandita, la deviazione del galvanometro fu di 31 gradi per il centro e di 21 gradi per una superficie uguale presa vicino al bordo. Per ottenere risultati più esatti, si adattò alla pila un diaframma la cui superficie equivaleva circa a un quadrato di lato un arco di un minuto, e si regolò lo strumento in modo da ottenere variazioni di temperatura proporzionali agli angoli di scarto dell'ago. Per rendere i risultati sempre tra loro confrontabili, si indicò con 100 l'irraggiamento osservato al centro, e si ottenne la tabella seguente:

Distanza della Pila dal centro del Sole, espressa in minuti	Numero esprimente la radiazione di ogni punto
+14', 90	57, 39
+11, 31	88, 81
+1, 77	99, 48
-10, 90	81, 32
-14, 88	54, 34

Queste osservazioni sono state fatte dal 19 al 23 marzo 1852. Il segno + indica la parte del disco situata sopra il centro; il segno - la parte posta al di sotto.

In queste esperienze, ci fu impossibile avvicinarci a meno di un minuto dal bordo. Più tardi, ripetendo le stesse osservazioni con il grande equatoriale di Merz, abbiamo potuto spingerci più lontano, e abbiamo trovato una diminuzione ancora maggiore. Ma a questo limite estremo, anche impiegando i mezzi di osservazione più precisi, si incontrano difficoltà difficilmente superabili in modo completo. Si è obbligati, pena l'ottenimento di risultati molto irregolari, a lasciare alla pila una certa apertura; ma allora la regione che si esamina è lontana dal possedere una radiazione uniforme. Inoltre è impossibile studiare separatamente il bordo, poiché i movimenti inevitabili dell'immagine non permettono di mantenerla esattamente nello stesso punto della pila. Non abbiamo potuto approfondire l'esattezza oltre quanto speravamo, e abbiamo cessato di proseguire queste ricerche; tuttavia i risultati ottenuti sono assai interessanti.

I valori presentati nella tabella precedente portano a due conclusioni: 1. La temperatura, come la luce, diminuisce nel disco solare, dal centro alla circonferenza. Questo fatto, allora contestato, fu assodato dalle nostre esperienze. II. Il calore non è simmetricamente ripartito nei due emisferi. Per spiegare questo fatto, che deriva evidentemente dai nostri dati, si possono fare tre ipotesi: 1° la differenza sarebbe dovuta ad un'influenza dell'atmosfera terrestre; 2° esisterebbe nel Sole stesso, ma sarebbe puramente accidentale; 3° sarebbe costante, e allora meriterebbe di essere studiata con precisione.

²Sottolineiamo questa data poiché negli Atti dell'Accademia dei Lincei, vi è una grande confusione nelle date di pubblicazione. Alcune esperienze posteriori alle nostre sono state pubblicate con una data anteriore a quella a loro spettante. Nessuno si è occupato di questa questione prima di noi.

Per eliminare la prima di queste cause, si è dall'altra dell'afa lo studio comparativo di due punti posti simmetricamente rispetto all'equatore solare, esaminando prima il punto più basso, poi osservando quello più in alto con un poco di ritardo, quando raggiunge la stessa altezza del precedente; in questo modo, l'influenza dell'atmosfera terrestre, essendo la stessa nei due casi, deve scomparire nelle differenze. I risultati furono gli stessi di prima, e ciò mostra che la prima ipotesi deve essere abbandonata.

La seconda non va meglio, poiché le osservazioni furono prolungate per parecchie rotazioni consecutive senza che i valori risultassero modificati.

Le differenze sono quindi costanti, e la loro causa risiede nel Sole. Ma quale è questa causa? Non sarà piuttosto la posizione particolare dell'equatore solare, che si proietta sul disco al di sopra del centro?

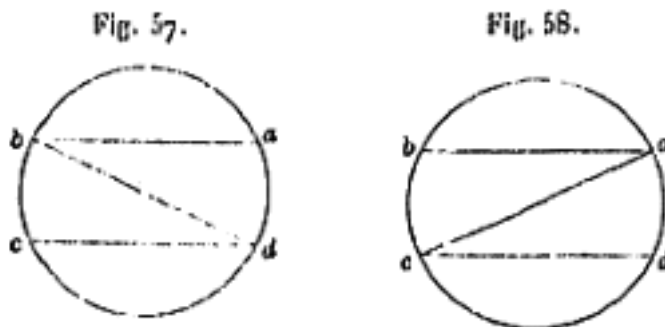
Per risolvere questa questione, si prolungarono le osservazioni fino al mese di settembre, periodo nel quale l'equatore si trovava proiettato sull'emisfero opposto. Il risultato fu il seguente: fino al mese di agosto, si trovò che la temperatura era più alta nell'emisfero superiore; ma più tardi, e soprattutto nel mese di settembre, la differenza fu più spesso in senso contrario. La tabella seguente contiene le medie dei risultati ottenuti dall'8 al 15 settembre:

Distanza dal centro	Radiazione in gradi
+14', 2	10°, 3
+10, 5	14, 6
centro 0, 0	17, 8
-10, 5	15, 48
-14, 2	10, 4

Questi risultati sono evidentemente in disaccordo con quelli del mese di marzo, e il confronto attento tra questi due periodi porta alle seguenti conclusioni: 1° la temperatura è più alta nelle regioni equatoriali; 2° l'emisfero nord appare tuttavia un poco più caldo di quello sud.

Per controllare quest'ultimo risultato, la cui stessa singolarità richiese la nostra attenzione, abbiamo seguito il seguente procedimento.

Siano bd (fig. 57) l'asse dell'ellisse secondo il quale si proietta l'equatore solare nel mese di marzo, ab e cd le corde delle due parallele tracciate dalle estremità b e d di questa ellisse. Se l'equatore solare possiede una temperatura più elevata delle zone vicine, i punti b e d devono essere più caldi dei punti a e c . Al contrario, quando l'equatore si proietta lungo ac (fig. 58), i punti a e c devono essere a una temperatura più alta dei punti b e d .



Con questo metodo, è possibile eliminare l'effetto prodotto dall'atmosfera terrestre osservando vicino al meridiano. Abbiamo fatto così un gran numero di osservazioni prima con l'equatoriale di Cauchoix e poi con l'equatoriale di Merz. I risultati che si trovano esposti nelle Mémoires del nostro Osservatorio sono sempre stati concordanti e ci hanno fornito le medie seguenti:

1° Per il mese di giugno (fig. 57),

a	b	c	d
17°, 1	17° 8	16°, 6	17°, 6

2° Verso la fine di settembre (fig. 58),

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
20°, 2	19°, 7	21°, 1	20°, 0

Si riconosce perfettamente che sull'equatore la temperatura è massima. Inoltre, se si confronta con l'equatore il 30^{esimo} parallelo, le temperature di questi due punti stanno tra loro nel rapporto di 15 a 16. Si trovano differenze ancora più sorprendenti prendendo come termini di confronto punti più vicini ai poli; ma non li abbiamo utilizzati, onde evitare l'influenza delle diverse altezze e della rifrazione. Non abbiamo mai osservato variazioni di temperatura alle diverse longitudini; non oseremo tuttavia affermare che non esiste in assoluto, e forse la si scoprirà nelle prossime indagini. Abbiamo sempre trovato una temperatura inferiore nelle macchie e nelle regioni che le circondano; abbiamo pure notato numerose anomalie nelle leggi che cerchiamo di riconoscere, quando fummo condotti ad osservare un punto vicino a una macchia.

Sarebbe utile ripetere queste osservazioni allo scopo di vedere se le leggi che abbiamo indicato sono costanti; ma ci siamo occupati di altro. Del resto, queste ricerche non sono facili come si potrebbe credere: esse richiedono molta pazienza; le condizioni meteorologiche disturbano spesso le osservazioni, anche nella stagione più favorevole; molte serie di misure rimangono incomplete e, di conseguenza, inutilizzabili. Aggiungiamo che, nei paesi caldi, queste osservazioni sono molto faticose nel periodo estivo, anche se sarebbero più facili e proficue.

5.4 Conseguenze che derivano dalle osservazioni precedenti

I fatti presentati portano direttamente alle seguenti conclusioni:

1° Tutte le radiazioni subiscono un considerevole assorbimento che cresce dal centro del disco solare verso il bordo, dove raggiunge il suo massimo;

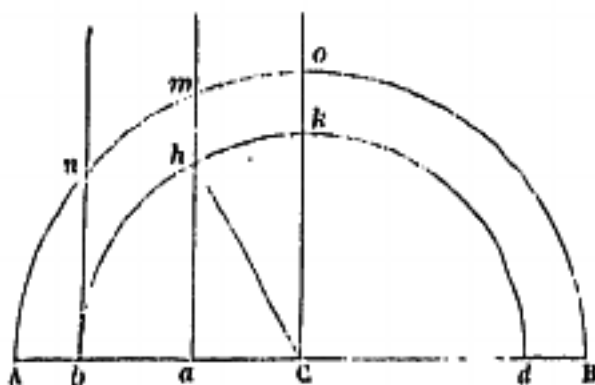
2° Le regioni equatoriali si trovano ad una temperatura maggiore di quelle poste oltre i 30° di latitudine, e la differenza è almeno di $\frac{1}{16}$;

3° La temperatura è un poco più alta nell'emisfero nord rispetto a quello sud;

4° Siccome le macchie emettono meno luce, emettono pure meno calore di altre regioni.

La prima di queste conclusioni ci permette di dimostrare in modo rigoroso che esiste un'atmosfera attorno al Sole. Per ben comprendere il nostro ragionamento, bisogna rifarsi ai principi sui quali si basano gli astronomi per analizzare gli effetti dovuti alle atmosfere dei corpi celesti.

Fig. 59.



Siano *bkd* (fig. 59) la superficie del Sole, *AoB* la superficie esterna della sua atmosfera. I raggi emessi dal corpo solare attraversano uno strato atmosferico il cui spessore sarà tanto maggiore quanto più partiranno da un punto lontano dal centro. Lo spessore più piccolo sarà *ok*, per un raggio che parte dal centro; il più grande sarà *bn*, per un raggio che parte dal bordo; esso assumerà un valore intermedio, come *hm*, per un punto posto tra il bordo e il centro. Osservatori posti nel Sole in questi diversi punti osservano la Terra ad altezze zenitali diverse. Nel punto *k*, corrispondente al centro del disco solare, la Terra apparirebbe allo zenit; dal punto *b*, la si vedrebbe all'orizzonte; dal punto *h*, posto tra i due, la si vedrebbe ad una distanza dallo zenit misurata dall'angolo *hck*. In questa traiettoria, i raggi uscenti dall'atmosfera solare si trovano nelle stesse condizioni, quanto ai risultati, di quelli che penetrano nell'atmosfera terrestre; così, il massimo di assorbimento avviene per il bordo dove il raggio esce orizzontalmente; il minimo corrisponde al centro, dove il raggio esce lungo la verticale. È facile calcolare, dalla teoria, l'assorbimento che corrisponde a un punto dato dal quale la Terra sarà vista ad una distanza zenitale θ , essendo questo angolo quello che formano con la verticale del luogo i raggi che si dirigono verso la Terra. Prendendo la media dei valori che abbiamo dato nelle nostre tabelle, si arriva ai seguenti risultati:

Distanza dal centro	Valore di θ	Intensità luminosa
0', 00	0°, 0'	100, 00
11, 10	43, 55	85, 06
14, 92	68, 38	55, 86

Introducendo questi valori nelle formule è possibile calcolare l'assorbimento prodotto in un punto qualsiasi della superficie solare; si trova che in un punto che corrisponde ai $\frac{3}{4}$ del raggio, è uguale a 0,725. Bouguer aveva trovato 0,729. Non si potrebbe desiderare una coincidenza più perfetta.

Si vede che la quantità di calore che viene liberata dal Sole si trova singolarmente ridotta dall'azione atmosferica; ma siccome tale azione non è la stessa per tutti i punti, si è portati a porre le due questioni seguenti: 1° quale è l'assorbimento esercitato dall'atmosfera nella direzione del suo minore spessore, cioè per $\theta = 0$? 2° quale è l'assorbimento totale, e di conseguenza quale sarà la radiazione assoluta, se non vi fosse l'atmosfera? Si può rispondere ai due quesiti impiegando le formule note, sebbene siano solo approssimate, poiché i dati relativi al Sole non escono dai limiti che gli astronomi hanno adottato introducendo queste formule.

I risultati sono inseriti nella tabella seguente. Si trova nella prima colonna la posizione del punto utilizzato come base per il calcolo; nella seconda, il valore corrispondente dell'angolo θ , cioè la distanza zenitale della Terra vista dal Sole; nella terza, l'intensità della radiazione che rimane dopo l'assorbimento per il punto posto al centro del disco, essendo la radiazione totale intesa come unitaria; infine, la quarta indica la frazione della radiazione totale che fuoriesce dall'atmosfera solare, e si distribuisce realmente nello spazio.

Posizione sul raggio	Valore dell'angolo θ	Intensità della radiazione al centro	Intensità residua totale
0,666	43°.35	0,2833	0,1019
0,750	48.34	0,2606	0,0794
0,875	68.49	0,4045	0,1711
Media		0,3095	0,1172

I valori dell'ultima colonna dovrebbero essere identici tra loro, ma si vede facilmente che questi risultati sono lontani dall'essere in perfetto accordo; ciò può dipendere dalle ipotesi adottate, che non sono senza dubbio applicabili in modo rigoroso all'atmosfera solare. Malgrado ciò, possiamo da questa tabella trarre due sorprendenti conclusioni: 1° al centro del disco, cioè perpendicolarmente alla superficie della fotosfera, l'assorbimento raggiunge circa i $\frac{2}{3}$, o più esattamente i $\frac{62}{100}$, del totale; 2° l'azione totale di questo involuppo assorbente sull'emisfero visibile del Sole è talmente grande, che lascia uscire solo i $\frac{12}{100}$ della radiazione totale, mentre il resto, cioè $\frac{88}{100}$ viene assorbito. In altre parole, se il Sole fosse spogliato della sua atmosfera assorbente, ci apparirebbe otto volte più caldo e più brillante di quanto non è attualmente.

Questo ruolo sorprendente dell'atmosfera solare ha il vantaggio di impedire una dispersione troppo grande e rapida del calore solare. La forza viva delle radiazioni rimane immagazzinata nell'atmosfera del Sole, e contribuisce a conservare la sua alta temperatura. L'assorbimento non produce alcuna perdita reale; esso non distrugge le radiazioni che arresta al passaggio; impedisce una dispersione che sarebbe inutile e anche nociva per i pianeti. Cosa diverrebbe, infatti, il nostro globo sotto una radiazione otto volte maggiore di quella che attualmente riceve? L'esperienza prova che, nei climi in cui il cielo è puro, non si può impunemente rimanere esposti ai raggi del Sole se si raddoppia la sua potenza con una semplice riflessione su uno specchio piano; se quindi l'irraggiamento divenisse otto volte maggiore, nessuna creatura potrebbe più vivere sul nostro pianeta.

Bisognerà tener conto di questo assorbimento atmosferico quando si cercherà di valutare la temperatura del Sole, poiché i calcoli fatti senza tenerne conto darebbero evidentemente un risultato otto volte inferiore.

Del resto, non è sorprendente che un'atmosfera così considerevole possieda un grande potere assorbente, poiché l'atmosfera terrestre, che ci appare così trasparente, assorbe lungo la verticale un quarto dei raggi che cadono sulla sua superficie superiore.

L'atmosfera solare possiede un assorbimento selettivo e un comportamento cromatico speciale? Melloni ci ha inviato questo quesito, e per rispondere abbiamo fatto ricorso a un grande numero di esperienze; abbiamo fatto passare i raggi solari attraverso diverse sostanze; l'acqua, il vetro, il quarzo affumicato, ecc.ma non abbiamo ottenuto alcun risultato certo. Ciò deriva evidentemente dall'obiettivo e dall'oculare, oltre dell'atmosfera solare, influenza sufficiente per spogliare i raggi solari osservati degli elementi già noti come i più simili ai raggi luminosi.

Vedremo in seguito che le radiazioni solari non sono omogenee, anche quanto ci giungono lungo la verticale, e che esiste senza dubbio una somiglianza con i raggi luminosi; ma questo studio richiederebbe strumenti più sensibili di quelli di cui disponiamo.

La bella esperienza di M. Tyndall sulla calorescenza, cioè sulla trasmissione isolata dei raggi oscuri attraverso una soluzione di iodio nel solfuro di carbone, è un fatto che prova l'esistenza di un reale comportamento simile

ai raggi luminosi. Ne parleremo poi discutendo la composizione dell'atmosfera solare; per il momento, ci basta averne constatato l'esistenza, e aver mostrato l'enorme potere assorbente che ne deriva.

Capitolo 6

Fenomeni osservati durante le eclissi; conseguenze tratte riguardanti l'atmosfera solare

6.1 Storia

Le eclissi totali furono un tempo un elemento di terrore per le popolazioni ignoranti e superstiziose; sono divenute in seguito per la scienza una fonte di conoscenze preziose sulla costituzione dell'atmosfera solare. L'astro del giorno, cessando di illuminare la nostra atmosfera, ci permette di studiare alcuni fenomeni, curiosi e istruttivi, molto utili allo scopo che ci siamo proposto. Non possiamo quindi trascurare questa questione; le studieremo in tutti i loro dettagli a volte così complessi e interessanti. Cominciamo con qualche nozione generale che è assolutamente essenziale.

Le eclissi totali sono sempre state osservate con sollecitudine e descritte con entusiasmo; ma è da solo un quarto di secolo che si studiano in modo del tutto razionale. Da questo periodo, perfezione delle Tabelle solari e lunari, l'esattezza dei dati geografici, hanno permesso agli astronomi di calcolare in modo rigoroso la linea che deve tracciare sul nostro globo il centro dell'ombra lunare, la sua esatta larghezza e la durata precisa del fenomeno. Soltanto gli astronomi hanno potuto spostarsi in tutta sicurezza per andare ad osservare le eclissi, senza rischiare, come altre volte, di perdere il frutto di spedizioni laboriose.

L'osservazione delle eclissi si riduceva fino a poco fa alla determinazione dell'istante preciso in cui avveniva l'occultamento; i risultati erano utilizzati per correggere le Tavole del Sole e della Luna, e per conoscere con maggiore precisione il rapporto tra i loro diametri. Siccome questi calcoli si fanno bene prendendo come punto di partenza l'osservazione di una eclissi parziale, non vi era un interesse speciale a compiere lunghi viaggi per trovarsi nella zona della totalità. Ma ai nostri giorni, gli astronomi, incoraggiati dai nuovi mezzi di osservazione di cui dispongono, si occupano in modo più speciale dello studio fisico dei corpi celesti. Bisogna quindi dirigere verso questo obiettivo l'osservazione delle eclissi, possibile solo spostandosi nelle zone privilegiate dove l'occultamento del Sole è completo.

Nel 1842 gli scienziati mostrarono per la prima volta un tale interesse. Si osservarono fenomeni che non si erano supposti fino ad allora, e ciò fu come una rivelazione reale; un nuovo orizzonte sembrava offrirsi alla contemplazione degli studiosi, e non si trascurò alcun mezzo per studiarlo con precisione. Da questo periodo, infatti, un grande numero di astronomi intrapresero simultaneamente viaggi, a volte anche molto lunghi, per andare ad osservare ognuna delle eclissi che si presentavano. Questi viaggi presentano vantaggi notevoli. Moltiplicando il numero delle località di osservazione, e scegliendole in modo opportuno, si prevengono i disaccordi che, per un osservatore isolato, possono facilmente derivare dalle condizioni del cielo; ma soprattutto si può distinguere a colpo sicuro ciò che è accidentale nei fenomeni, da ciò che è indipendente dagli osservatori e dalle circostanze dell'osservazione; infine, una intelligente divisione del lavoro permette di osservare questi fenomeni nel modo più completo possibile, malgrado la loro breve durata; basta un piccolo numero di eclissi per far avanzare rapidamente lo studio della struttura fisica del Sole; indichiamo i principali.

1° Dobbiamo mettere in prima linea quella del 1842 che fu osservata in Francia dagli astronomi francesi, in Italia dagli inglesi e italiani, in Austria dai tedeschi. Arago ha discusso queste osservazioni in una Memoria inserita nell'*Annuaire du Bureau des Longitudes* per il 1846.

2° L'eclissi del 1851 è stata osservata in Svezia dagli inglesi, tedeschi e russi; una raccolta preziosa di osservazioni è stata pubblicata nel libro XXI delle *Mémoires de la Société Astronomique de Londres*.

3° L'America ha fornito il suo contributo: l'eclissi del 30 ottobre 1853 è stata osservata da Moesta, quella del 7 settembre 1855 da Gillis e dai brasiliani; quelle del 1865 e 1867 dal P. Cappelletti, dall'astronomo Moesta

e da altri. Queste osservazioni hanno molto contribuito ad assicurare la generalità di certi fenomeni la cui importanza è divenuta molto più grande.

4° Nel 1860, i più abili astronomi dell'Europa si erano dati appuntamento in Spagna; le numerose osservazioni fatte, e soprattutto le fotografie ottenute in due punti diversi, fanno di questa eclissi una delle più importanti e più feconde per le conclusioni.

5° Tutti questi lavori sono stati coronati il 18 agosto 1868. L'eclissi presentava una circostanza più favorevole per la sua lunga durata, sei minuti e venticinque secondi, quasi la massima possibile. Ciò spinse i governi a sostenere spese considerevoli, e incoraggiò gli scienziati ad affrontare le fatiche di lunghi e spartani viaggi per andare ad installarsi in paesi appena civilizzati. Questi sacrifici sono stati ricompensati, come riconosceremo presto studiando le scoperte feconde che ne sono state il frutto.

6° Infine, bisogna ricordare l'eclissi che ebbe luogo in America del Nord, il 7 agosto 1869, nella quale si sono ricavate un grande numero di conclusioni ottenute nel 1860 mediante l'uso della fotografia.

In questa esposizione, ci sarà impossibile seguire ognuna delle relazioni che la scienza possiede; trarremo solo ciò che sarà utile al nostro scopo, basandoci principalmente su quelle che abbiamo noi stessi osservato nel 1860; ci siamo posizionati in condizioni molto favorevoli nel Deserto de las Palmas, sulla sommità del monte Saint Michel, ad una altezza di 725 *m* al di sopra del livello del mare, su un picco isolato dove si poteva vedere un orizzonte magnifico e molto esteso; il cielo era di una purezza ammirevole che facilitò molto le nostre osservazioni. Quanto ai dettagli che non potranno trovare posto qui, rinvieremo il lettore alle Memorie del nostro Osservatorio per l'anno 1863, e alle altre pubblicazioni dell'epoca; indichiamo soprattutto la bella descrizione di M. de la Rue che citeremo spesso, e che si trova nelle *Philosophical Transactions*, anno 1862.

6.2 Fenomeni generali che si osservano in una eclissi totale

Una eclissi inizia a presentare un interesse veramente serio solo a partire dal momento in cui il centro del Sole è coperto dalla Luna. La luce inizia allora a diminuire in modo molto evidente, e quando si avvicina il momento della totalità, questa diminuzione è talmente rapida, che ha qualcosa di tremendo. Ciò che colpisce non è solo la diminuzione della luce, ma soprattutto il cambiamento di colore che presentano gli oggetti. Tutto diviene triste, scuro e come minaccioso. Il paesaggio più verde si ricopre di un colore grigio; nelle regioni più alte e vicine al sole, il cielo assume un colore plumbeo, e vicino all'orizzonte diviene di un giallo verdastro. Il volto dell'uomo presenta un colore cadaverico analogo a quello che produce la fiamma dell'alcool saturo del cloruro di sodio. Questo colore giallastro e soprattutto l'abbassamento della temperatura sembrano mostrare una diminuzione della potenza vitale della natura.

Nello stesso tempo, un silenzio generale si stabilisce nell'atmosfera: i piccoli uccelli scompaiono, gli insetti si nascondono; tutto sembra presagire un imminente e terribile disastro. Si capisce molto bene, dice M. Forbes, che le popolazioni ignoranti siano prese da un immenso panico vedendo così impallidire l'astro del giorno, e che si figurassero l'inizio di una notte eterna. Il P. Faura ci dice che, nell'ultima eclissi del 1868, alcuni cinesi si gettarono nelle imbarcazioni per sfuggire al disastro; non furono nemmeno assicurati dalla presenza degli astronomi che si trovavano colà con i loro strumenti tutti intenti alle loro osservazioni.

Circostanze secondarie, che di solito non hanno importanza, contribuiscono a volte a dare a questa impressione qualcosa di sorprendente. Così, nel 1842, una nube che si formava ad una piccola distanza dal Sole, appariva agli occhi di M. Airy come una massa enorme che si precipitava sulla Terra con una sorprendente rapidità.

Tutti gli osservatori sono concordi nel descrivere queste emozioni. Anche noi, sebbene meglio preparati di altri, fummo presi da un sentimento di oppressione e di panico involontario; cadeva tutta la forza della nostra volontà di renderci padroni di tutte le nostre facoltà alla vista di questo fenomeno imponente.

Quando l'osservatore è favorevolmente disposto, gli è facile seguire il cammino dell'ombra totale che avanza come un tenebroso e minaccioso temporale. Dall'altezza del monte Saint Michel, vedemmo questa colonna nera invadere la pianura assai più rapidamente di un temporale, e con una velocità analoga a quella di una locomotiva lanciata a tutto vapore. Allora fummo soprattutto colpiti dal silenzio solenne che si impadronisce della natura in questa notte momentanea. Eravamo circondati da una folla di curiosi e chiacchieroni, le cui conversazioni incessanti ci avevano assai contrariato per l'intera giornata. Ma quando si avvicinò il momento solenne, tutto si tranquillizzò, e potemmo contare i battimenti del nostro cronometro più facilmente di quanto avremmo potuto fare nella solitudine di un osservatorio. Tutti gli occhi e le attenzioni erano fisse sulla sottile falce del Sole che andava a scomparire.

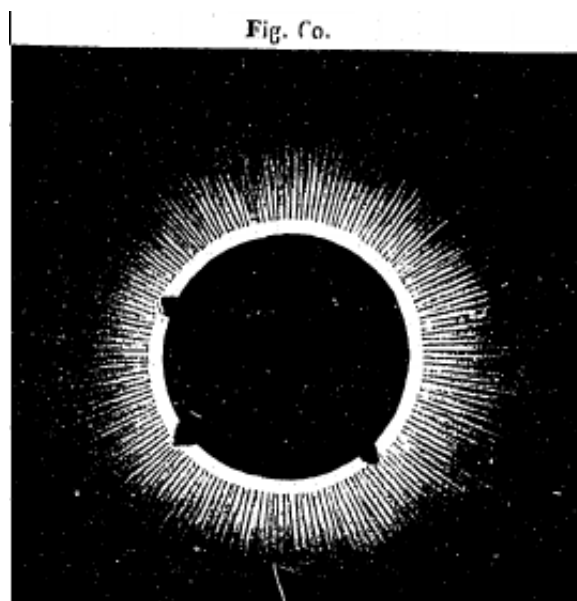
In questi istanti, la falce diminuisce con rapidità sorprendente; ben presto è ridotta a un sottile filetto delimitato da punti molto acuti; le prominente del contorno lunare la dividono spesso in parecchie parti; infine, scompare.

Subito la scena cambia in modo rapido e completo. Nel mezzo di un cielo plumbeo si delinea un disco perfettamente nero, circondato da una aureola magnifica di raggi argentei, tra i quali scintillano dei getti di fiamme rosa. Questo spettacolo è allo stesso tempo sublime e terribile. Per farlo meglio comprendere

trascriviamo semplicemente la descrizione spontanea delle impressioni che l'astronomo inglese Baily provò nel 1842, quando gli scienziati avevano minore familiarità con questi fenomeni.

“Ero, disse, tutto occupato a contare le oscillazioni del mio cronometro, allo scopo di cogliere l'istante preciso della scomparsa totale, immerso in un silenzio profondo nel mezzo della folla che si addensava nelle strade, sulla piazza e alle finestre delle case, e la cui attenzione era completamente assorbita dallo spettacolo che contemplava. D'un tratto, l'ultimo raggio scomparve e rimasi assordato da una esplosione di applausi che scoppiavano in mezzo a questa immensa moltitudine. Tutte le mie fibre si elettrizzarono, e un fremito si impadronì di me; guardo il Sole e mi trovo in faccia allo spettacolo più incantevole che l'immaginazione possa credere. L'astro del giorno era sostituito da un disco nero come pece, circondato da un'aureola brillante analoga a quella che si rappresenta attorno alla testa dei santi (fig. 60).

A questa vista mi riempi di stupore; persi una parte considerevole di questi momenti e fui sul punto di dimenticare lo scopo del mio viaggio. Mi attendevo, dalla descrizione che avevo letto, di vedere attorno al Sole una certa luce, ma debole e crepuscolare; invece vedevo un'aureola brillante il cui splendore, molto vivo sul bordo del disco, diminuiva gradualmente, e scompariva ad una distanza uguale all'incirca al diametro della Luna. Non avevo previsto nulla di simile.



Mi ripresi velocemente da questo momento di smarrimento, e posto di nuovo l'occhio al cannocchiale, dopo aver tolto il vetro nero dell'oculare. Una nuova sorpresa mi attendeva. La corona di raggi che circondava il disco lunare era interrotta in tre punti da immense fiamme di color porpora il cui diametro era di circa 2 minuti. Esse apparivano tranquille e presentavano lo stesso aspetto delle vette nevose delle Alpi illuminate dal Sole al tramonto. Mi fu impossibile distinguere se queste fiamme fossero nubi o montagne; mentre cercavo di analizzarle per determinarne la natura, un raggio del Sole brilla nelle tenebre, e viene e ridare vita alla natura, ma mi immerge in quella tristezza che prova una persona che vede scomparire l'oggetto dei suoi desideri nel momento in cui era sul punto di coglierlo”.

Sebbene mi sia abituato a questi fenomeni, l'impressione che producono sull'osservatore non è meno viva. È impossibile guardare con indifferenza questo disco nero che sostituisce il Sole, e l'aureola argentea che lo circonda, distesa su un cielo color plumbeo che ne aumenta il contrasto.

L'oscurità che regna nel momento in cui l'eclissi è totale dipende molto dalle condizioni del cielo. In generale, la si può confrontare con quella che regna mezzora o tre quarti d'ora dopo il tramonto del Sole, quando non si vedono ancora le stelle più brillanti. Ma di solito si percepisce Venere molto tempo prima del momento della totalità. Per l'effetto di contrasto dovuto alla scomparsa rapida della luce, l'oscurità sembra maggiore di quella che in effetti è. In generale, si può leggere un libro stampato in grossi caratteri, ma è impossibile distinguere nettamente la gradazione degli strumenti, e vedere l'ora su un orologio: così gli osservatori devono accendere lampade per leggere i cronometri e gli strumenti graduati.

La corona, quando il cielo è molto terso, ha una estensione uguale al diametro della Luna; ma brilla di vivo splendore solo entro limiti più ristretti. Lascia spesso sfuggire raggi di lunghezza considerevole di cui avremo occasione di parlare in seguito. Le fiamme rosse sono spesso visibili a occhio nudo, e, al Desierto, gli abitanti dicevano che il Sole *aveva il fuoco*. Durante l'ultima eclissi del 1868, esse presentavano l'aspetto di torri piantate sulla Luna; qualche osservatore, per illusione ottica, le prendeva per insenature del disco lunare.

Il primo raggio del Sole fa scomparire tutta questa scena magica; il Sole brilla come una lampada elettrica, proiettando ombre nette, ma con bordi vacillanti; si crede di vedere onde luminose propagarsi come bande

ondeggianti e serpeggianti. La natura ancora scura sembra riprendere la sua gaiezza consueta, il sentimento di tristezza che si era impadronito di tutti gli spettatori lascia il posto ad una sensazione dolce e gioiosa.

Si può, per qualche tempo, seguire il cammino dell'ombra che si allontana, e dalla sommità del monte Saint Michel, potremmo vedere il cono d'ombra avvolgere dapprima le isole Columbretes, ed espandersi poi sulla superficie lontana del mare.

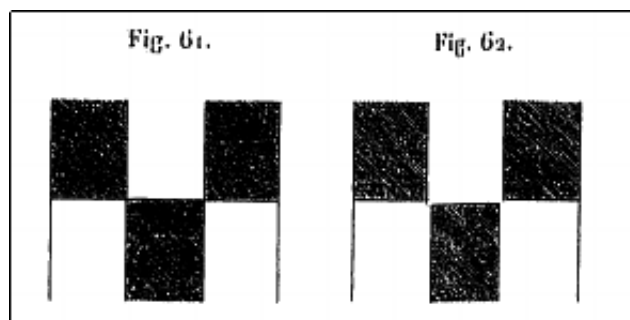
Questa è in poche parole la scena che presenta una eclissi totale. Le descrizioni che si sono fatte sono spesso esagerate, ma questa esagerazione è anche una prova dell'impressione profonda che provano tutti gli spettatori. Sebbene prevenuti dagli scritti dei loro predecessori, gli osservatori dell'ultima eclissi hanno provato le medesime sensazioni; gli scienziati fanno molta fatica a compiere il loro lavoro, distolti dalla contemplazione passiva del grande spettacolo che la natura offre loro. M. de la Rue ci diceva, e l'ha scritto nelle sue memorie, che alla prima occasione si allontanava volentieri per andare a contemplare un'altra eclissi, ma come semplice amatore e senza strumenti, proprio per gioire delle impressione che è stato obbligato a dominare nel 1860.

Terminiamo qui questa descrizione generale, e entriamo nella discussione dei dettagli scientifici che hanno per i nostri lettori e per noi un interesse del tutto particolare.

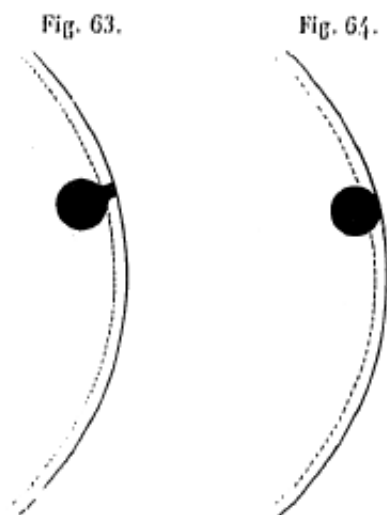
6.3 Fenomeni che accompagnano la scomparsa e la ricomparsa del Sole nelle eclissi totali

Prima di scomparire completamente, il Sole si riduce dapprima a una sottile falce delimitata da punti molto acuti. All'ultimo momento, questo filetto è spesso ritagliato dalle vette dei monti che si trovano sul bordo lunare, e si può prevedere questo fenomeno dalla forma del contorno della Luna che si vede dopo un certo tempo proiettarsi sul Sole. Se le montagne sono numerose, la falce si rompe originando una serie di punti brillanti che assomigliano a grani di rosario. Questa sembianza è molto facile da comprendere; dipende da un fenomeno di irradiazione i cui effetti sono ancora esagerati dai difetti del cannocchiale, o dall'imperfezione della messa a punto. Entriamo in qualche dettaglio.

Quando guardiamo un corpo molto luminoso, ci appare sempre più grande di quello che è. Illuminiamo fortemente una carta ritagliata come in fig. 61; essa ci presenterà l'aspetto indicato dalla fig. 62; la parte bianca sembra dilatata in modo che al centro, gli angoli che si toccano realmente appariranno staccati uno dall'altro.



Tutti conoscono il curioso fenomeno della luce cinerea che si presenta nei primi giorni di Luna nuova; oltre alla falce crescente vivamente illuminata dal Sole, si distingue nettamente il resto del disco debolmente illuminato; ma, per un effetto di irraggiamento, la falce crescente sembra appartenere a un disco più grande di quello della Luna.



L'irraggiamento produce anche un fenomeno importante che rende difficile l'osservazione del passaggio dei pianeti sul Sole. Supponiamo che si cerchi di determinare l'istante preciso del secondo contatto interno. Il pianeta si stacca nettamente come un piccolo cerchio nero sul disco brillante del Sole; è ancora a una certa distanza dal contorno, quando l'osservatore vede formarsi un cordone o legamento nero (fig. 63) che si allarga sempre più fino al momento in cui i due dischi sembrano tangenti internamente; l'osservatore rimane quindi incerto dal momento preciso in cui è avvenuto il contatto, non sapendo se deve annotare il momento in cui si è formato il filetto nero, o quello del contatto apparente (fig. 64).

Tutto diventa facile da spiegare se si nota che il Sole, per un effetto di irradiazione, ci deve apparire più grande di quello che è in realtà. È limitato, non dal suo contorno apparente, ma da un cerchio di diametro inferiore, che indichiamo con una linea tratteggiata. Quando il pianeta arriva a questo limite, il contatto avviene realmente, provenendo tutti i raggi luminosi da quella regione del Sole vengono intercettati, e il filetto si deve formare. Per i contatti interni, quindi, cosa da osservare con attenzione, è all'entrata il momento in cui il filetto si rompe, all'uscita quello in cui si forma. Il P. Hell ha accuratamente annotato questi fenomeni nel 1768, nelle sue osservazioni del passaggio di Venere; ci siamo sorpresi che abbia bene descritto queste sue osservazioni, forse le più dettagliate fatte in quei tempi. M. Faye ha reso migliore giustizia al P. Hell; dopo aver discusso i suoi risultati, aggiunge; "Ci sarà difficile fare di meglio nel 1874".

Ciò che si osserva per i pianeti si verifica anche per la Luna durante le eclissi. Siano *a, b, c* (fig. 65) una serie di protuberanze lunari; quando esse giungono al reale bordo del Sole indicato da una linea tratteggiata, esse dovranno formare una serie di filetti neri; l'anello apparente si troverà così separato in più parti, che assumeranno facilmente la forma di grani irregolarmente arrotondati, se nelle circostanze indicate viene ad aggiungersi una certa imperfezione nel cannocchiale o nelle messa a punto.



Nelle nostre osservazioni al Desierto, abbiamo visto i punti molto affilati della falce rompersi, ma senza che i frammenti offrissero l'aspetto di grani del rosario; ciò deriva dall'assenza di lunghe catene di monti,

ma anche dall'eccellente cannocchiale di Fraunhofer che abbiamo impiegato. M. de la Rue ha fatto le stesse osservazioni, e tutti gli osservatori sono unanimi nel riconoscere che queste illusioni diminuiscono molto quando si ha cura di mettere esattamente a punto muovendo l'oculare, a causa delle variazioni derivate dalle variazioni di temperatura.

Per ben studiare la scomparsa della falce è necessario che l'oculare sia dotato di un vetro graduato, e lo si deve tenere in mano per poterne modificare la posizione e toglierlo all'ultimo istante. Si riconosce allora che la luce è molto debole vicino al bordo. Guardando nella parte mediana del nostro vetro, valutammo che il Sole era scomparso, mentre era ancora visibile nella parte più sottile. Due o tre secondi prima della scomparsa totale, vedemmo la corona, ancora molto pallida, ma nettamente formata.

L'ultimo filetto luminoso con scomparve con quella istantaneità che si osserva nell'occultazione delle stelle; scomparve gradualmente, e risultò difficile valutare la frazione di secondo. Nel momento in cui valutai che l'occultazione era completa, tolsi il vetro colorato, ma rimase ancora un filetto di luce così viva, che rimasi abbagliato. Scomparve tuttavia assai velocemente perché potessi continuare le mie osservazioni, e lo vidi trasformarsi poco alla volta in un arco di luce rosata delimitato da un'infinità di punti. Questi furono eclissati a loro volta dopo sei secondi, e allora apparvero le protuberanze o fiamme rosse.

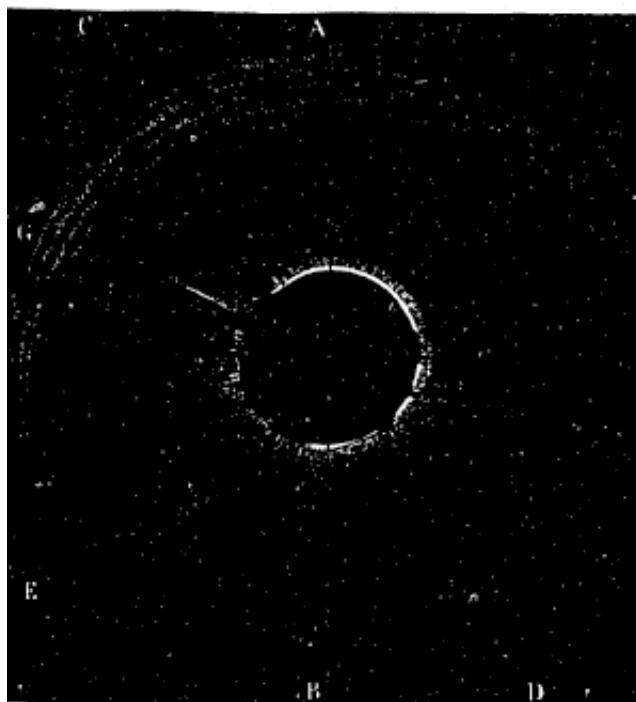
Questi dettagli della nostra osservazione sono conformi a quelli che sono stati dati in precedenza da M. Airy, e più tardi da P. Cappelletti e M. Stephan. M. Airy, nel 1842, era accompagnato da un osservatore che guardava ad occhio nudo, e che era incaricato di valutare il momento in cui il Sole era sul punto di scomparire. Ma quando diede il segnale convenuto, aveva già notato l'istante della scomparsa; così, avendo tolto il vetro nero dal cannocchiale, fu colpito da un vivo raggio di luce. MM. Stephan e Tisserand videro qualcosa di simile nell'osservazione da loro fatta alle Indie nel 1868. Ecco come si espressero: "Il secondo contatto non fu seguito da una scomparsa brusca di tutta la luce viva. Dopo la scomparsa del bordo del Sole, la Luna ci apparve ancora come bordata da un contorno luminoso poco spesso, di un quarto di minuto circa, di uno splendore quasi confrontabile con quello del Sole. Questo anello è talmente brillante che si può sbagliare sulla reale esistenza del contatto".

Il P. Cappelletti disse a sua volta, a proposito dell'eclissi che osservò in Cile, il 25 aprile 1865: "Durante la totalità, la Luna era contornata da un anello di circa un quarto di minuto; attorno a questo anello si trovava la corona (fig. 66).

Questo anello è stato segnalato pure a Mantawalok. Potremmo aggiungere altre testimonianze, ma quelle riportate bastano a mostrare che vi è tra la fotosfera e le protuberanze uno strato molto brillante che si trova pure nelle fotografie.

Siccome questo strato brillante è circondata di luce rosa, è evidente che, nel confronto delle osservazioni, non si può fare astrazione dalla tinta del vetro colorato utilizzato. Per assicurarci, abbiamo misurato il diametro del Sole impiegando in successione un vetro blu e uno rosso, e abbiamo trovato una differenza di circa due secondi.

Fig. 66.



Da quanto abbiamo detto, risulta che il Sole non è limitato da un contorno geometrico nettamente definito; sui bordi vi è una regione dove la luce si riduce rapidamente, ma con gradualità, e questa regione ha una estensione di qualche secondo.

Alla riapparso del Sole, i fenomeni si riproducono in senso inverso, ma alcuni tra di essi sono più facili da cogliere, non essendo l'occhio più, come all'inizio, abbagliato dalla luce. Per esempio, si distingue più nettamente il bordo dentellato di colore rosa che circonda l'intero disco; si possono pure continuare a vedere le protuberanze e la corona qualche istante dopo la ricomparsa del Sole. Nel 1860, M. de la Rue poté vedere una protuberanza prima della totalità, guardando il Sole riflesso su un vetro non stagnato: M. Bruhns ne vide uno due minuti dopo la ricomparsa.

Parleremo in seguito della natura delle protuberanze; qui ci basta, per ora, segnalare una illusione ottica che si è verificata assai spesso e nella quale l'immaginazione gioca un grande ruolo. Siccome il moto della Luna svela successivamente ognuna di queste fiamme, parecchi osservatori hanno creduto che esse si formassero sotto i loro occhi. Sappiamo ora che le protuberanze esistono indipendentemente dall'eclissi, l'oscurità non fa che renderle visibili.

Un poco prima della fine della totalità, la corona diviene generalmente più intensa nella parte del Sole che sta per scomparire, e si vede formare un arco rosa di notevole estensione, che abbraccia all'incirca un sesto del contorno solare. Schumacher lo vide con una estensione di 90° ; il P. Cappelletti ne vide uno esteso solo da 50 a 60° . Questa estensione dipende dalla differenza dei diametri apparenti della Luna e del Sole; quando la si conosce si può calcolare l'altezza dello strato rosa, e la si valuta da 15 a 20 secondi.

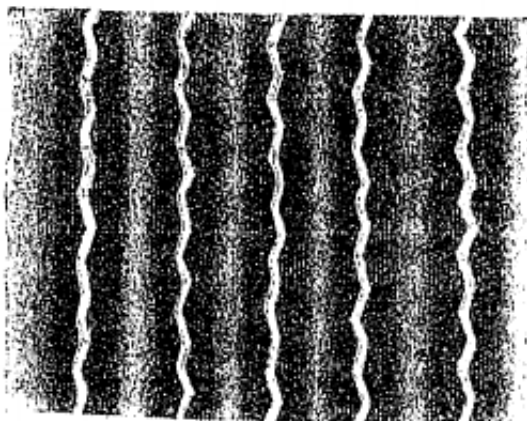
In Spagna, questo arco occupava una estensione di 60° . Poiché osservavo senza vetro colorato, giunse un momento in cui la luce divenne troppo intensa; ritirai l'occhio dal cannocchiale, e in questo momento anche il Sole apparve. Brillava nel mezzo del cielo come una lampada elettrica; la corona fu ancora visibile per venticinque secondi, e anche, togliendo con la mano la parte brillante, la potei distinguere per 45 secondi¹. Le ombre erano perfettamente definite, ma vacillanti.

È importante sottolineare che prima della ricomparsa del Sole, lo splendore della luce mi obbligò a ritrarre l'occhio dal cannocchiale. Questo fatto e una serie di altre osservazioni mostrano che alla fine, come all'inizio, si evidenzia una graduazione rapida, ma osservabile, della luce tra lo strato rosa e la fotosfera.

Molti osservatori hanno evidenziato grandi oscillazioni al bordo del Sole, nel momento della sua ricomparsa. Il P. Cappelletti disse che esse gli ricordavano le onde dell'Oceano a capo Horn. È assai difficile sapere se la causa di questo fenomeno si trova nella nostra atmosfera o in quella del Sole. L'atmosfera terrestre vi può contribuire molto con una agitazione dovuta all'anomalo raffreddamento che subisce. Questo raffreddamento produce spesso nebbie, nubi, a volte anche aloni, come sono stati osservato in Cile (fig. 66).

La comparsa del Sole è accompagnata da ombre vacillanti e da frange luminose che sembravano attraversare l'orizzonte. Questa osservazione è stata fatta in molte eclissi, ma soprattutto nel 1842 e nel 1860. Ultimamente il P. Faura, a Mantawalok, ha cercato di rappresentare il fenomeno con il disegno che riproduciamo in figura 67. Ma bisogna sottolineare che queste linee serpeggianti non hanno la regolarità si è stati obbligati ad assegnare.

Fig. 67.



Per compiere questa osservazione il P. Faura aveva steso a terra un grande foglio di carta bianca sul quale si delineavano linee ondulate che ha tentato di riprodurre. Non si conosce ancora una spiegazione di queste bande, ma le attribuiremo volentieri all'agitazione che abbiamo segnalato nello stesso sole crescente. Qualche volta esse appaiono iridate, e sarei disposto a confrontarle con l'aspetto che presentano le grandi stelle quando

¹Questi dati potrebbero servire a valutare il potere illuminante della corona; poiché al momento in cui essa scompare, la sua intensità luminosa è uguale a quella del fascio di raggi che parte dal Sole.

le si osserva con uno spettroscopio semplice ad una piccola altezza al di sopra dell'orizzonte. Si vedono allora onde nere correre attraverso lo spettro in direzioni più o meno inclinate, e che fanno variare l'intensità dei colori senza cambiare la posizione della stella né quelle delle righe. Questo fenomeno si ricollegerebbe quindi a quello della scintillazione; la parte visibile del Sole, essendo molto stretta, si comporterebbe allora come le stelle. Ecco una delle circostanze poco studiate, e sulle quali sarà utile attirare l'attenzione degli osservatori.

6.4 La corona

Quando si osserva una eclissi ad occhio nudo, il fenomeno più evidente è quello della corona. Gli antichi osservatori la riportano sempre come un fenomeno straordinario e mostrante con certezza l'esistenza di una atmosfera lunare; ma noi siamo certi che bisogna cercarne la causa nel Sole stesso.

L'osservazione più antica in cui si trova descritto questo fenomeno con qualche dettaglio risale all'anno 1239; esso è citato da Muratori (*Ann. Re. Ital.*, t. XIV, col. 1097). Il cronista dice che si vide un cerchio attorno al Sole, con un foro infiammato nella parte inferiore². Si tratta senza dubbio di una protuberanza. Clavius la osservò pure a Coïmbre il 21 agosto 1560 e ne parla con sorpresa.

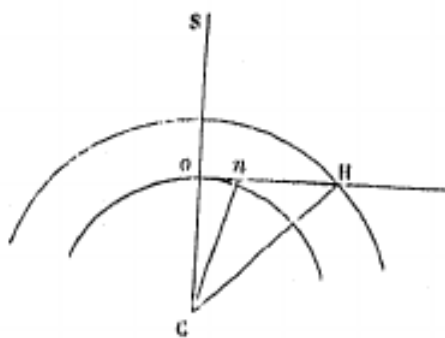
La prima descrizione fatta in modo scientifico è dovuta a Wassenius, che la osservò il 2 maggio 1733; notò nello stesso tempo le protuberanze e le interpretò come nubi fluttuanti nell'atmosfera della Luna. A partire da questa epoca, tutti gli osservatori sono concordi nelle loro descrizioni. È sempre un'aureola composta di raggi divergenti; questi raggi partono da un anello che circonda la Luna, il cui splendore molto intenso, di un bianco argentato o madreperla, si estende ad una distanza variabile con le circostanze atmosferiche, ma di solito uguale al diametro lunare.

Si è tentato di valutare l'intensità luminosa della corona, ma i risultati ottenuti sono assai diversi tra loro. È infatti assai difficile fare una simile valutazione, a causa di variazioni straordinarie e eccezionali che presenta la luce in una eclissi. Ciò che è certo, come già notato, è che nel 1860 abbiamo potuto distinguere la corona quaranta secondi dopo della ricomparsa del Sole. Si può anche, se non vederla, almeno constatarne l'esistenza per un tempo molto più considerevole, sei o sette minuti circa prima e dopo la totalità. Infatti, se si proietta su uno schermo l'immagine del Sole, si vede che al di fuori del disco solare, si distingue ancora nettamente la figura della Luna fino ad una distanza considerevole. Ciò deriva dal fatto che il disco lunare ritaglia con la sua oscurità completa il contorno del Sole dove si sviluppa l'aureola.

Secondo la nostra valutazione, il potere illuminante della corona non deve essere inferiore a quello che possiede la Luna piena nelle circostanze più favorevoli. Infatti, la Luna permette di vedere le stelle di prima e anche di seconda grandezza, mentre durante le eclissi si distinguono appena le più brillanti. Ciò che fa allora apparire le tenebre così terribili, è la rapidità con la quale si manifestano.

Non bisogna tuttavia dimenticare che, durante le eclissi totali, siamo illuminati non solo dalla corona, ma anche dalla parte dell'atmosfera terrestre che non si trova nelle condizioni di totalità. Supponiamo che il Sole sia allo zenit nel punto *S* (fig. 68), essendo *o* la posizione dell'osservatore. Tracciamo una orizzontale che incontrerà in *H* l'estremità dell'atmosfera; il raggio di *on* l'ombra lunare, vista dal centro della Terra, sottende un angolo di 1° , anche in una eclissi della durata di sei minuti, mentre la lunghezza *oH* sottende almeno 7° . Pertanto, al punto *o*, l'osservatore sarà illuminato dalla parte dell'atmosfera posta da *n* a *H*. Ma questa luce sarà necessariamente molto debole, poiché proviene da una parte alquanto ristretta del Sole, e in secondo luogo essa cade su una regione elevata, e di conseguenza rarefatta, dell'atmosfera. Da ciò deriva la colorazione gialla che presenta l'orizzonte; è illuminato solo dai bordi del Sole il cui colore, come visto nel capitolo precedente, è di un giallo fuliginoso.

Fig. 68.

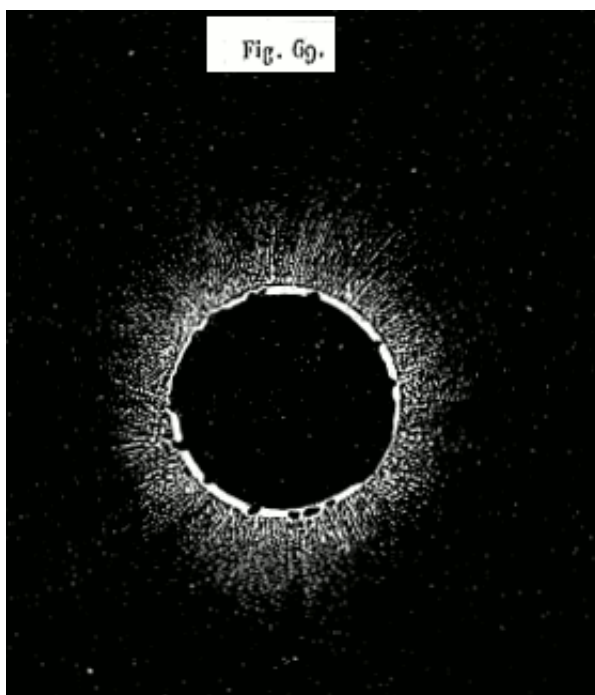


²Quoddam foramen erat ignitum in circulo Solis ex parte inferiori.

Lo splendore della corona dipende molto dalle condizioni del cielo. Sotto il bel cielo delle Indie, durante l'ultima eclissi, la sua luce era molto bella, e alla sua luce si poteva facilmente leggere caratteri di media grandezza. Nel 1842, mentre Baily osservava a Pavia una corona molto brillante, M. Airy la vedeva molto pallida a Torino, dove il cielo era brumoso. Nel 1851, a Gottembourg in Svezia, era molto bella, mentre a Lilla-Edet, pure in Svezia, era molto debole e poco estesa.

A parte queste differenze, era sempre composta allo stesso modo, e vi si distinguevano tre parti ben definite, sebbene le linee di separazione non fossero nettamente distinte. La prima è una zona molto viva, larga da 3 a 4 minuti, con il colore e lo splendore dell'argento. Intorno si trova una zona la cui luce presenta una gradazione molto rapida, e il cui bordo esterno si confonde con il cielo. Infine, dalla prima zona si diparte un certo numero di pennacchi luminosi, composti di linee brillanti intrecciati, e la cui lunghezza, variabile secondo le circostanze, raggiunge a volte il doppio del diametro della Luna.

La fig. 69 mostra l'aspetto della corona come abbiamo osservato nel *Deserto de las palmas*, nel 1860; ma questo aspetto è lontano dall'essere costante in uno stesso eclissi, e varia molto di più da una eclissi all'altra. Basta, per convincersene, confrontare questo disegno con quello di Baily e quello di P. Cappelletti, e proporremo anche altri esempi.



La parte più vivida della corona si trova immediatamente a contatto con la fotosfera, e la materia rosa sembra essere in sospensione in questo strato. Il suo splendore è talmente vivo, che può generare dubbi sull'istante preciso della totalità (Cappelletti, Stephan, Tisserand, ecc.). Quando le circostanze atmosferiche sono favorevoli, questo anello, sebbene alquanto indebolito, possiede ancora uno splendore significativo. Se ne può valutare la larghezza tra 15 e 20 secondi. Attorno a questo primo strato, e a contatto immediato, si trova un'altra regione dove la luce è ancora assai intensa, nella quale si producono le protuberanze e che si estende fino ad una distanza di 4 o 5 minuti. Essa è di un bianco argenteo, e talmente brillante da mostrare un aspetto madreperlaceo. Qualche osservatore parla di *strati* di luce, ma questa espressione non è esatta, poiché l'intensità luminosa diminuisce gradualmente senza poter assegnare un limite preciso tra i diversi strati.

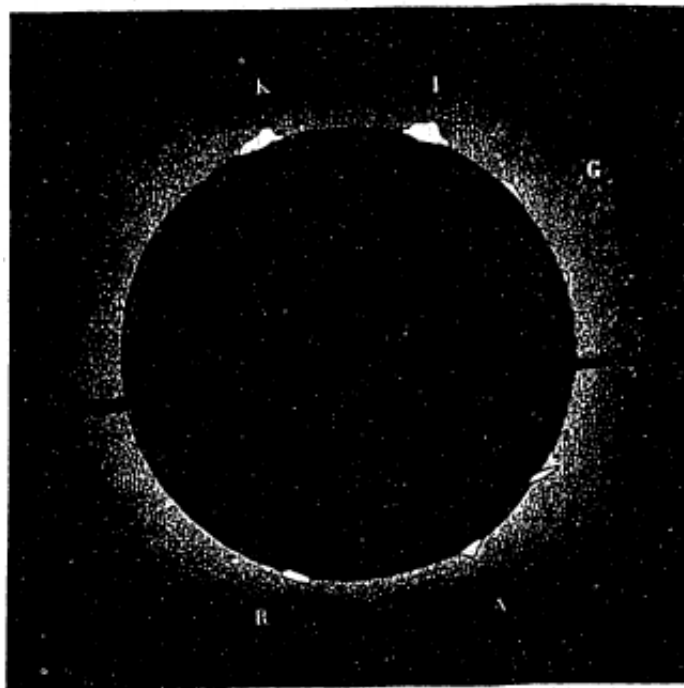
La corona è perfettamente concentrica al Sole; l'aspetto che essa mostra durante l'eclissi non consente dubbi sul fatto che è molto più brillante nella parte in cui il Sole è più vicino al bordo lunare. Non la si può quindi attribuire all'atmosfera della Luna ma appartenente al Sole.

Non è tuttavia uniforme in tutte le parti del suo contorno, come si potrebbe credere in un primo momento. Numerosi osservatori hanno già fatto questa osservazione, e soprattutto Gillis, in America, dove studiò l'eclissi del 1858. Le parti più vive corrispondono in genere alle zone vicine alle protuberanze e alla base dei pennacchi. Ma non si può contare molto sulle osservazioni ottiche per valutare tali differenze: primo perché è sempre difficile valutare l'intensità di una luce in queste circostanze, soprattutto quando non vi sono contorni nettamente evidenziati; in secondo luogo, queste osservazioni sono fatte di fretta, essendo gli scienziati occupati in cose ben più importanti; spesso anche i disegni sono fatti in modo grossolano a memoria, al termine dell'eclissi. Il solo modo per avere misure esatte è quello fotografico. Abbiamo impiegato questo metodo al Desierto, e riproduciamo qui (fig. 70) la prova di quanto ottenuto. La sola analisi della figura mostra che la luce è inegualmente distribuita nelle diverse parti della corona, e che la sua estensione è molto maggiore verso l'equatore. Questa osservazione

importante è confermata dalle prove fotografiche ottenute alle Indie nel 1868 dal maggiore Tennant e da quelle degli Americano nel 1869.

L'impiego della fotografia può anche far conoscere la variazione subita dalla luce tallonandosi dal Sole. Una esposizione di sei secondi mostra una traccia appena osservabile della corona; con dodici secondi, il risultato era migliore; e in trenta secondi, abbiamo ottenuto la prova riprodotta in fig. 70. Il contorno irregolare è assai evidente. La parte più stretta appartiene alla direzione dei poli solari; la linea scura *XY* è l'ombra di un filo teso nel cannocchiale. Gli astronomi americani dell'Harmand College hanno ottenuto ultimamente un risultato simile. Torneremo su questo aspetto interessante.

Fig. 70.



La luce della corona è diretta o riflessa? Questa questione può essere risolta solo mediante l'analisi polariscopica. Nel 1860, M. Prazmowski la trovò polarizzata, così come il capitano Braunfield e pure sir John Herschel nel 1868; è stato pure individuato il piano di polarizzazione passante per il centro del Sole e per il punto osservato. Da questi risultati si potrebbe concludere che la luce della corona è riflessa. Anche noi, al Desierto, osservammo tracce di polarizzazione. Ma gli osservatori francesi ottennero un diverso risultato, e sarebbe necessario, per avere qualche certezza, discutere le circostanze delle loro osservazioni e il tipo di strumenti impiegati.

Nel 1868, ad Aden, M. Rziha osservò lo spettro della corona e lo trovò perfettamente continuo, malgrado tutte le precauzioni osservate per ottenere le righe, in caso di loro presenza. MM. Janssen e Tennant sono giunti allo stesso risultato. Se ne potrebbe concludere che la materia di cui è composta la corona si trova ad una temperatura molto elevata, ma che non è ancora in dissociazione. Tuttavia M. Young crede di aver osservato, nel mese di agosto del 1869m nelle vicinanze di *E*, una riga brillante che gli sembra coincidere con quella osservata nelle righe brillanti dell'aurora boreale. Queste divergenze richiedono nuove osservazioni.

Riassumendo: l'aureola è formata dall'atmosfera del Sole, e non da quella della Luna; essa si estende molto lontano, diminuendo rapidamente di intensità a partire da una distanza uguale a un quarto del raggio solare. Ma tutti questi fenomeni dipendono da due cause difficili da valutare: le condizioni della nostra atmosfera e le circostanze che producono i pennacchi.

6.5 I pennacchi

Gli osservatori non sono del tutto in accordo nel fissare i limiti della corona, ma lo sono ancora meno rispetto ai raggi che ne escono e si prolungano spesso a distanze considerevoli. Le diverse descrizioni da un'eclissi all'altra, e, per una stessa eclissi, sembra che il fenomeno sia stato diverso per le diverse postazioni di osservazioni. Poiché questo argomento è interessante, lo esamineremo con cura per spingere gli astronomi a studiarlo attentamente nelle prossime eclissi.

Nelle antiche osservazioni, ci si è limitati a indicarci l'esistenza dei raggi divergenti, valutando grossolanamente la loro estensione. Nel 1842, le descrizioni furono dettagliate, ma ancora assai difettose. A Torino e a Pavia, Airy e Baily non menzionano tale fenomeno. A Milano, Picozzi e Magrini notarono due fasci di raggi.

Nella Francia occidentale, si segnalavano pure due fasci opposti. Arago vide vicino al punto culminante della Luna una larga macchia luminosa formata da getti incrociati che confrontò ad un intreccio di fili. Petayl li paragonò a un pacco di canapa. Altri osservatori sottolinearono che il prolungamento di questi raggi non passava per il centro del Sole, né per quello della Luna, e che parecchi erano ricurvi. A Tolone, si distinsero tre fasci; i due principali erano sulla linea d'ingresso e di uscita dalla Luna, Pure Petit ne vide tre, come Struve, che assegnò loro una longitudine di $1^{\circ}, 5$.

Come si vede, queste relazioni sono confuse e contraddittorie. Ritroveremo la stessa incertezza per l'eclissi del 1851, e per le seguenti. Nel 1860 osservammo questo fenomeno solo rapidamente, verso la metà dell'eclissi. I pennacchi, che abbiamo disegnato, ci apparvero tranquilli come i raggi che si vedono tra le nubi al tramonto del Sole. M. Cepeda, che osservava vicino a noi, vide un raggio ramificato come un palco di cervo. M. Fielitzch, a Castellon della Plana, non lontano dal Desierto, vide due getti luminosi che paragonarono ai bracci di una lira. M. Struve, a Pobes, vide cinque raggi ben delineati, uno dei quali era ricurvo a forma di uncinetto. Il 29 agosto 1867, M. Grosch vide due grandi masse di raggi nella direzione dell'equatore solare, e un doppio pennacchio rovesciato vicino al polo.

Fig. 71.



Nel 1868, si videro alle Indie grandi irregolarità nella corona, ma mancano dettagli precisi. La fig. 71 è stata disegnata dal capitano Bullock, che condusse a Mantawalok i professori del collegio di Manille. È evidente soprattutto un raggio trasversale, che apparve solo due minuti dopo la totalità, e rimase fino al termine. La sua direzione è obliqua rispetto agli altri raggi che apparvero all'inizio. Questo disegno si caratterizza per la sua grande esattezza, poiché è stato controllato con altri disegni eseguiti alla camera oscura. Non si è mai riusciti a fotografare i pennacchi; è per supplire a questa impossibilità della fotografia che i professori di Manille hanno immaginato il seguente procedimento. Prepararono prima dei fogli sui quali erano delineati l'eclissi e l'aureola; in questo modo, introducendo questi fogli nella camera oscura, si poteva in poco tempo tracciare con esattezza le figure corrispondenti alle diverse fasi.

Dobbiamo ricordare qui il disegno curioso che il P. Cappelletti eseguì in Cile, nel 1865 (fig. 66). Il raggio principale era lontano dall'aver una forma simmetrica e differiva completamente dagli altri. La sua luce era bianca e molto intensa; uno dei suoi bordi era nettamente definito, mentre l'altro era diffuso e andava svanendo progressivamente. Infine, il P. Cappelletti fece osservare che questo raggio corrispondeva alla protuberanza principale.

Questi sono, riassumendo, le conoscenze che possediamo su queste curiose appendici. Quale è la loro causa? bisogna cercarla nel Sole, nella Luna, o nella nostra atmosfera? Dopo un lungo esame, siamo convinti che la loro causa prima sia nel Sole, ma che il loro aspetto possa essere notevolmente modificato dalla presenza della Luna e dalle condizioni atmosferiche.

Per farci comprendere più facilmente, rimandiamo ad una esperienza molto facilmente ripetibile, che abbiamo fatto in occasione dell'eclissi di Spagna. Si pratici ad un'anta della camera oscura un foro grossolanamente tondo, i cui bordi abbiano delle dentellature; lo si chiuda in modo impreciso con un tappo e si faccia passare attraverso gli interstizi un fascio di raggi solari. Guardando di lato, si vedrà una serie di raggi paralleli; ma se si pone l'occhio sull'asse stesso del fascio, si vedrà una corona di raggi divergenti che si estendono ad una grande distanza dal foro. L'esperienza riuscirà ugualmente se si chiuderà un foro perfettamente tondo con un tappo rientrante sul suo contorno. Questa immagine è un puro effetto di prospettiva, analogo a quello prodotto dai raggi che si osservano tra le nubi dopo il tramonto del Sole. Questa esperienza ci mostra che una svasatura molto piccola può generare un raggio di lunghezza molto grande; questa lunghezza sarà ancora ben maggiore se l'aria era stata riempita di polvere o di fumo di incenso.

Applichiamo questi risultati ai fenomeni che si producono durante le eclissi. Il Sole può generare dei raggi simili, sia dalle sue protuberanze, sia dalle parti più brillanti della corona che agiscono attorno alla Luna come le svasature dell'anta attorno al tappo. Ma ci si ingannerebbe completamente se si valutasse dalle dimensioni della massa luminosa che produce questo fenomeno, dall'estensione del raggio che si osserva. Questa estensione dipende molto dal potere riflettente dell'atmosfera, e soprattutto dalla posizione dell'osservatore. Una massa luminosa che supera il contorno della Luna di solo alcuni secondi può, in base allo splendore che possiede, illuminare l'atmosfera terrestre ad una profondità considerevole, e questa profondità di tradurrà in una lunghezza proporzionale al raggio visibile. La Luna stessa, con il suo profilo irregolare, contribuirà alla produzione del fenomeno lasciando passare fasci luminosi più o meno larghi, più o meno nettamente definiti. La forma dei raggi dipenderà soprattutto dalla posizione dell'osservatore; gli effetti di parallasse avranno una notevole influenza, e a qualche chilometro di distanza si potrà vedere la corona e i suoi raggi sotto aspetti alquanto diversi.

Infine l'atmosfera terrestre non sarà illuminata in modo uniforme in tutti i suoi punti, poiché in certi posti è più trasparente, e in altri più ricca di vapore e ciò determinerà delle linee capricciose producenti un effetto analogo a quello dei raggi luminosi che attraversano una camera oscura, quando si solleva la polvere al loro passaggio.

Queste sono le idee generali che bisogna ora controllare con l'osservazione, per vedere fino a quale punto sono esatte e applicabili al nostro scopo.

Se esaminiamo i disegni fatti dai diversi osservatori, troveremo che sono in accordo più spesso nel dare ai raggi la direzione delle protuberanze principali, soprattutto nella regione equatoriale e in quelle delle macchie. Il P. Cappelletti ha fatto questa osservazione ed essa è abbastanza ben verificata dai disegni di Moesta del 1853, di Gillis del 1855, e dai nostri sebbene non richiediamo una esattezza eccessiva.

Questa coincidenza è perfetta nei disegni di Bullock.

Nel 1860, M. Plantamour osservò la corona e la disegnò tre volte: nella fase iniziale, a metà e alla fine. Nel primo disegno, oltre la corona, tracciò tre fasci di raggi corrispondenti alle protuberanze nella regione di ingresso; nel secondo vi sono cinque fasci, due ad est e tre ad ovest; infine nel terzo, vi sono ancora cinque fasci, ma si trovano tutti nella regione di uscita e corrispondono alle numerose protuberanze che apparvero in questa regione al termine dell'eclissi.

Questa osservazione è in accordo con quella di Mantawalok, dove il capitano Bullock vide, due minuti dopo la totalità, formarsi un raggio obliquo diretto verso una delle protuberanze. Altri osservatori, tra gli altri Pope Hennessey, assicurano che questi raggi apparivano animati di un moto facilmente osservabile. Questo movimento apparente si spiega facilmente se si ricorda che la Luna, cambiando la propria posizione da un istante all'altro, fa pure variare la posizione delle parti illuminate rispetto all'osservatore.

Rimane da spiegare la forma curva che possiedono i raggi. È ancora possibile assegnare un grande ruolo alla nostra atmosfera, ammettendo, come già detto, che queste curve dipendano dal modo in cui il vapore è distribuito nell'aria. Questa spiegazione, che abbiamo già proposto, non smette di essere plausibile; tuttavia non è del tutto soddisfacente. Ci siamo convinti della sua insufficienza grazie ad un fenomeno la cui osservazione è dovuta a M. Tacchini. Questo astronomo viaggiava sul Mediterraneo a bordo di un battello a vapore, e osservava il tramonto del Sole, l'8 agosto 1865. Si accorse che il disco solare era come sormontato da due protuberanze luminose, simili a due boccoli ricurvi in senso opposto (fig. 72). La loro altezza al di sopra del disco era all'incirca uguale ai $\frac{7}{10}$ del disco. Infine queste appendici seguivano bene il moto del Sole e sprofondavano con esso sotto l'orizzonte.

Fig. 72.



M. Tacchini ci comunicò questa osservazione, e immediatamente consultammo il registro che riporta le osservazioni da noi fatte regolarmente sulle macchie solari. Trovammo che lo stesso giorno vi era sul bordo del disco una macchia accompagnata da una grande facola avente la forma simile a quella descritta da M. Tacchini (fig. 73); così non abbiamo avuto dubbi nell'ammettere che la protuberanza da lui osservata poteva essere prodotta da una di queste masse luminose che costituiscono le facole, che diviene visibile nelle eclissi.

Fig. 73.



Una nuova osservazione confermò questa idea. M. Grosch, in Cile, durante l'eclissi totale del 29 agosto 1867, ha osservato un fascio di raggi curvi del tutto simili a quello disegnato da M. Tacchini (Si veda *Bollettino meteorologico del Collegio Romano*, 1867, p. 87).

Ultimamente, un viaggiatore ci ha assicurato di, verso la fine del mese di febbraio 1869, aver visto a Poestum il Sole sorgere con una protuberanza analoga a quelle viste nelle eclissi. Le fotografie americano del 1869 mostrano tracce di curvature nei fasci della corona e sostengono tale ipotesi.

È quindi possibile che questi fasci ricurvi che si osservano a volte abbiano la loro causa unica nel Sole. Tuttavia i fatti constatati finora non sono sufficienti a rendere certa tale ipotesi; devono solo indicare una direzione nelle nuove ricerche necessarie.

I raggi obliqui sarebbero prodotti da fasci luminosi lanciati in questa stessa direzione. Si è obiettato che è impossibile ammettere che la lunghezza reale di tali fasci sia uguale a $\frac{1}{4}$ del raggio solare. Sappiamo, infatti, che parecchie comete sono passate così vicine al Sole, al loro perielio, che avrebbero incontrato tali raggi, se avessero avuto l'estensione indicata; il moto di questi astri avrebbe quindi dovuto subire, in questo mezzo necessariamente resistente, un rallentamento che non è mai stato osservato.

È assai facile rispondere a questa obiezione. Alcune comete hanno dovuto attraversare non solo i raggi, ma anche la corona. Passando in tal modo attraverso l'atmosfera solare, hanno potuto in parte volatilizzarsi e poi sfuggire, come fanno i bolidi e le stelle filanti nell'atmosfera terrestre. Per dimostrare che le cose non sono avvenute così, bisognerebbe conoscere la parte dell'orbita che precede il perielio, cosa impossibile in modo sufficiente. Tuttavia, bisogna ammettere che la nostra atmosfera svolge nella produzione delle protuberanze un ruolo incontestabile, sebbene secondario.

Segnaliamo ancora un'idea che non è priva di importanza. La scienza moderna ha constatato che esistono ammassi di materia cosmica, analoga alle nebulose, circolanti come comete all'interno del sistema solare, e che, al loro perielio, si trovano alquanto vicini al Sole.

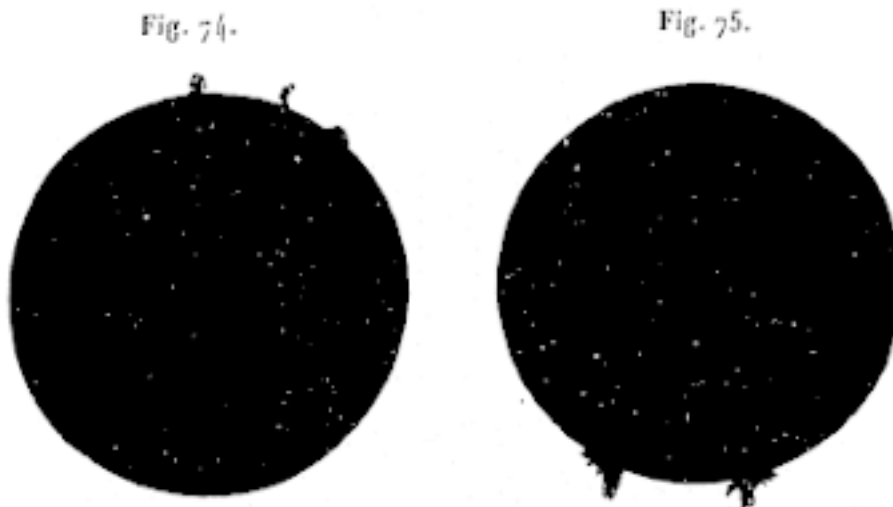
Questa circostanza non può essere estranea a certe manifestazioni straordinarie che si presentano durante le eclissi. Ad alcune di queste masse cosmiche, fortemente illuminate dai raggi solari, si potrebbero attribuire questi raggi e questi archi ricurvi. Solo il tempo potrà far conoscere il valore di queste idee, che sono, in questo momento, semplici congetture.

Capitolo 7

Protuberanze o fenomeni rosa che si osservano durante le eclissi totali di Sole

7.1 Prime osservazioni delle protuberanze

Fu durante l'eclissi dell'8 luglio 1842, che l'attenzione degli astronomi fu attratta da queste protuberanze, che si slanciano attorno alla Luna come fiamme gigantesche, di colore rosato o fiore di pesco. La sorpresa che causò loro tale fenomeno inatteso non gli permise di compiere osservazioni precise, generando un disaccordo completo tra le diverse relazioni. Baily segnalò tre protuberanze molto grandi, quasi uniformemente distribuite dalla stessa parte (fig. 60). Airy ne osservò tre a forma di dente di sega, ma poste alla sommità (fig. 54). Arago ne vide due nella parte inferiore del disco (fig. 75). Struve e Schidlofschi notarono le stesse di Arago, e inoltre una banda rosa comprendente un arco di circa 45° . A Verona, queste fiamme furono visibili per qualche tempo dopo la comparsa del Sole.



Queste appendici avevano dimensioni considerevoli. Petit misurò un'altezza uguale a $1'45''$, che equivale a circa 6 diametri terrestri, cioè $80\,000\text{ km}$. Le valutazioni degli altri osservatori variavano tra 1 minuto e 2 secondi.

La discussione si aprì anzitutto sulla natura di queste protuberanze. Le si considerò dapprima come montagne; ma questa ipotesi era inconciliabile con le osservazioni di Arago, essendo alcune di esse troppo inclinate e in condizioni di equilibrio impossibili. La maggior parte degli scienziati le vedevano come fiamme, o come nubi. Alcuni, basandosi sullo scarso accordo che regnava tra gli osservatori, dichiararono che erano pure illusioni ottiche, miraggi prodotti sulla superficie della Luna; tale era l'opinione di Faye, di Marquez, di Felitzch. Era quindi indispensabile compiere ulteriori osservazioni, sorvegliando con cure le successive eclissi e ricorrere alle osservazioni passate.

In realtà, questi fenomeni non erano nuovi, ma, come succede spesso per le cose straordinarie di cui non abbiamo alcuna idea, non si erano ben compresi i racconti, d'altra parte inesatti ed esagerati degli osservatori. Essi avevano parlato di rientranze viste nel disco lunare, di fiamme, di illuminamenti, di nubi e di burrasche nell'atmosfera della Luna. Questo aspetto di rientranza notato da qualche osservatore è dovuto ad un fenomeno di irraggiamento; esso si produce facilmente quando si osserva ad occhio nudo o con un piccolo ingrandimento, come evidenziato ancora nell'ultima eclissi (Hennessy, Ray; 1868).

Tra tutte le antiche osservazioni, la più dettagliata è quella che Wassenius fece a Gothenbourg il 2 maggio 1733. Nella corona, che egli attribuisce all'atmosfera lunare, credette di vedere fluttuare parecchie nubi rosse; una o due apparivano più grandi delle altre e sembravano formate di tre masse sovrapposte, *completamente separate dal disco lunare* (*Philos. Transac.*, t. XXXVIII, p. 135; e *Astr. Nach.*, n° 463). La fig. 76, mostra bene che queste sono nubi; ma rimane da sapere se appartengono realmente alla Luna o se dipendono invece dal Sole.

Fig. 76.



Si attese con impazienza l'eclissi del 1851 che doveva essere totale in Svezia. M. Airy organizzò una spedizione e preparò strumenti destinati a prendere misure precise. Al momento della totalità, osservò dapprima una protuberanza *a* (fig. 77) avente la forma di una squadra terminante in una punta; al di sotto si trovava un piccolo cono e più lontano, nel punto *d*, una piccola nube sospesa *d*. Poco dopo distinse una punta *c*; poi dopo un minuto la protuberanza *b* posta all'altra estremità del diametro; infine apparve un arco rosa *e*. Le altre osservazioni evidenziarono gli stessi fenomeni con leggere differenze nella forma. La figura riprodotta da Carrington è quasi identica; vi si nota solo una leggera nube biancastra che congiunge la protuberanza principale con la nube isolata *d*. Tuttavia la protuberanza *a* non ha del tutto la stessa forma nel disegno eseguito da osservatori molto lontani tra loro. M. Hind ha prodotto il disegno seguente (fig. 78). M. Dawes ha fornito una forma intermedia tra le due, e inoltre l'arco *c* (fig. 77) gli apparve molto più esteso. M. Talbot, posto quasi al limite della zona della totalità, vide quello stesso arco rosa abbracciare una estensione circa uguale a metà circonferenza.

Fig. 77.



Fig. 78.



Queste osservazioni ci permettono di formulare con certezza le seguenti conclusioni: 1° le protuberanze non sono montagne; 2° le si deve pensare come masse gassose, la cui forma è analoga a quella delle nubi; le loro curvature ricordano molto bene il fumo che fuoriesce dai vulcani; 3° la varietà delle forme attribuite ad una stessa protuberanza può dipendere da reali mutamenti; ma può derivare anche da scarsa precisione nel disegno; 4° vi è una relazione evidente tra queste protuberanze e gli archi rosati già osservati nel 1842, ma che sono stati molto meglio osservati in questo caso: si può legittimamente supporre che questi archi formino la parte visibile di uno strato continuo che avvolge completamente il Sole; 5° si vedeva crescere la dimensione delle protuberanze dalla parte che abbandonava la Luna e diminuire dalla parte in cui avanzava; quindi è sulla superficie del Sole che si trova l'origine del fenomeno; 6° tutti gli osservatori non hanno visto lo stesso numero di protuberanze e

non nello stessa posizione. Ciò è legato alla rapidità del fenomeno, la cui totalità dura un tempo così breve che non è possibile esaminare il contorno del disco con l'attenzione che si avrebbe in altre circostanze.

Questi risultati non apparvero sufficienti ad un certo numero di astronomi. Le misure sembravano poco esatte, le descrizioni scarsamente concordanti; così si continuò a vedere questi fenomeni come illusioni ottiche ed effetti di interferenza. Per convincere tutti erano necessarie testimonianze certe, misure con un grado di esattezza tipico della meccanica; solo la fotografia poteva rispondere a queste esigenze, e ad essa si attribuì, pertanto, grande importanza nel 1860.

A parte i dubbi più fondati, rimanevano ancora da risolvere numerose questioni importanti: 1° quale è l'intensità luminosa delle protuberanze? 2° quale è il loro esatto colore? 3° sono correlate alle macchie e alla facole? Per rispondere a queste domande, bisogna far ricorso a misure molto esatte, misure che solo la fotografia può compiere in un tempo così breve. Tuttavia, poiché la fotografia, soprattutto in circostanze eccezionali, è un mezzo di ricerca capriccioso e poco sicuro, si ebbe cura di controllare le sue indicazioni con strumenti speciali in grado di ottenere direttamente e rapidamente misure sufficientemente precise. Il campo del nostro cannocchiale fu dotato di due fili di platino molto sottili, formanti tra loro un angolo molto acuto per poter valutare le dimensioni delle protuberanze senza l'uso di viti micrometriche. Per prendere gli angoli di posizione, mettemmo all'oculare un alidada con una freccia e mobile rispetto ad un cerchio di cartone; la freccia, premuta al momento opportuno, lasciava sul cartone una traccia che si poteva poi studiare in libertà per dedurre l'angolo di posizione.

Il successo fu completo, come vedemmo presto. Soltanto, la fotografia non ci diceva nulla riguardo al colore, e si poteva supplire solo con osservazioni dirette. Ma tutti gli osservatori non ebbero di fronte allo stesso oggetto impressioni identiche; i loro occhi non sono quindi strumenti confrontabili. Tuttavia erano in accordo nel dire che le protuberanze erano di un rosso più o meno chiaro, mescolato con un viola analogo a quello del fiore di pesca. Si notò tuttavia che la protuberanza ricurva del 1851 era bianca alla base, e ciò era valido anche per le protuberanze del 1860; il colore rosa era quello dominante, ma sui bordi si vedevano nubi gialli perfettamente distinguibili con una base bianca. M. de la Rue fece la stessa osservazione. Questo astronomo aveva preparato stoffe di diverso colore, che dovevano servire da termine di paragone; ma questo metodo non può dare alcun risultato in mancanza della luce necessaria ad illuminare le stoffe. Si potrebbero impiegare fiamme colorate o, meglio ancora, tubi di Geissler illuminati con corrente elettrica. Ma l'analisi spettrale ha fatto abbandonare tutti questi metodi.

7.2 Fotografie ottenute in Spagna durante l'eclissi del 1860

Vennero organizzate due spedizioni per osservare l'eclissi del 1860, la prima da M. de la Rue, la seconda da noi, con la collaborazione di M. Aguilar, astronomo dell'Osservatorio di Madrid, e di M. il professore Monserrat di Valenza. M. de la Rue scelse Rivabellosa, vicino all'Atlantico, mentre noi prendemmo posizione al Desierto de las palmas, vicino al Mediterraneo.

Dovevamo entrambi superare una grossa difficoltà, poiché ignoriamo completamente il potere fotogenico posseduto dalla luce durante le eclissi; non sappiamo quindi se ci sarà possibile ottenere prove operando con la rapidità richiesta dalle circostanze. M. de la Rue aveva adottato l'eliografo di Kew, e poiché le immagini formate direttamente al fuoco dell'obiettivo erano molto piccole, preferì ingrandirle con l'oculare. Noi preferimmo, al contrario, prendere l'immagine diretta data dall'obiettivo di Cauchoix. Questa immagine del diametro di 25 mm offriva già risultati perfettamente visibili, e ci rimaneva comunque sempre la risorsa di ingrandirla con uno dei procedimenti noti. Due raggi ci portarono a preferire questo metodo: 1° la debole intensità della luce, che, supposta uguale a quella della Luna piena, sembrava dover richiedere un minuto di esposizione se avessimo ingrandito l'immagine; operando sull'immagine diretta ci sentiamo più sicuri; 2° questo metodo ci permetteva di effettuare un maggior numero di prove nello stesso tempo, e di conseguenza di fissare un maggior numero di fasi.

Il risultato ha dimostrato che i due sistemi sono eccellenti e che ognuno di essi ha dei vantaggi. Si distinguono maggiori dettagli nelle immagini ingrandite, ma l'immagine diretta fissa una maggiore estensione della corona.

La nostra prima lastra fu esposta per sei secondi, e tuttavia, oltre alle protuberanze, mostra una traccia perfettamente visibile della corona. La seconda fu esposta per circa venti secondi, ma tre colpi impressi all'equatoriale in questo tempo hanno prodotto tante immagini distinte e separate delle protuberanze; se ne deve concludere che con un obiettivo di 6 pollici, come il nostro, basta un tempo molto breve per riprodurre queste appendici.

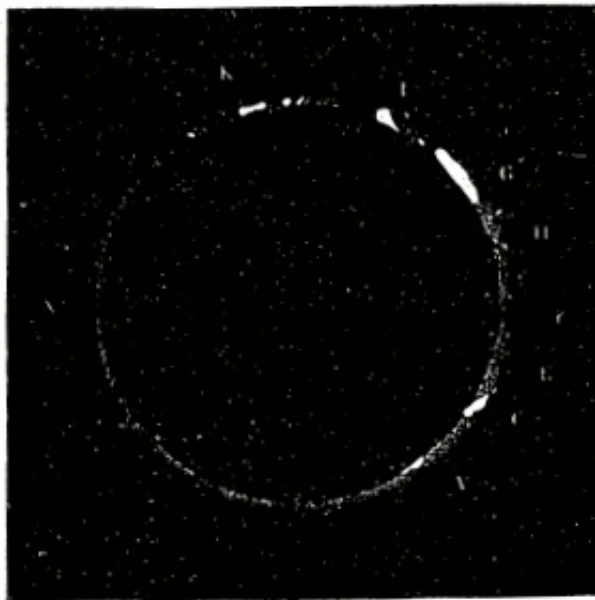
Un anno dopo l'eclissi, abbiamo, con lo stesso M. de la Rue, ingrandito le nostre piccole fotografie onde ottenere prove delle stesse dimensioni delle sei, e ci abbiamo trovato una identità perfetta nei dettagli più minuti. La sola differenza consisteva nel fatto che a Rivabellosa le protuberanze superiori erano più alte, mentre erano un poco più piccole al Desierto; il contrario si ebbe per le protuberanze della parte inferiore. Questo fenomeno era dovuto ad una piccola differenza di parallasse, essendo gli osservatori uno un poco più a nord

e l'altro un poco a sud della linea centrale della totalità (Vedere le *Memorie dell'Osservatorio del Collegio Romano*, 1863).

Basterà quindi descrivere le nostre fotografie e confrontarle con quelle degli scienziati inglesi. Riproduciamo qui le tre più importanti, la prima, quella a metà e l'ultima.

La fig. 79 rappresenta la prima prova presa immediatamente dopo l'inizio della totalità. Essa contiene sette protuberanze principali:

Fig. 79.



A. Protuberanza avente due sommità molto ravvicinate e poco elevate. Nelle fotografie di M. de la Rue, essa è appena visibile; si notano solo le due sommità; ciò deriva, come detto in precedenza, da un effetto di parallasse.

C. Grande protuberanza a forma di nube, inclinata di 45° , arrotondata alla base, a punta in cima, con una struttura elicoidale, come mostra la figura ingrandita di M. de la Rue.

E. Piccole nubi molto sottili il cui insieme forma un corno ricurvo, avente un'altezza di circa $240''$. Questa protuberanza, vista con la lente nelle nostre piccole fotografie, spinse M. de la Rue ad ingrandirle per confrontarle alle sue. Questa circostanza prova la precisione delle nostre lastre. Sfortunatamente, si fecero circolare, immediatamente dopo l'eclissi, negativi su carta alquanto difettosi, nuocendo molto alle fotografie, nella stessa mente degli scienziati, fino al momento della loro riproduzione, fatta sotto gli occhi dello stesso M. de la Rue, che fu in grado di giustificare quanto da noi proposto sull'identità tra i nostri risultati e i suoi.

H. Ammasso complesso di piccole nubi la cui parte inferiore forma una specie di croce.

G. Ammasso enorme di materia brillante che ha sviluppato negativi, facendo scomparire i dettagli interni. La sua forma arrotondata mostra che essa non era a contatto immediato con il Sole, ma sospeso nella sua atmosfera. Visto al cannocchiale, mostrava perfettamente l'aspetto di una catena montuosa, per le dentellature e i punti giallastri alla sommità. Si può sottolineare che questa protuberanza sembra penetrare nel disco della Luna e formarvi una incisione. Questo aspetto è dovuto al movimento stesso della Luna durante l'esposizione della lastra. La Luna, avanzante nella direzione in cui si trova la protuberanza, non poteva distruggere l'immagine già prodotta dalla parte brillante, mentre la sua presenza impediva l'azione della corona che non è così rapida. Negli ingrandimenti delle fotografie, si vede che i bordi della protuberanza sono perfettamente delineati, mentre quelli della Luna rimangono confusi. Questa circostanza spiega pure un fenomeno curioso notato nelle fotografie da M. de la Rue: essendo state esposte le lastre per un minuto, il movimento della Luna è più evidente; così il suo bordo sembra raddoppiare ed è all'interno del suo disco che si vede l'arco rosa di cui abbiamo parlato.

I. Fiamma gigantesca, o piuttosto enorme cumulo, nel quale si distinguevano sfumature di giallo e rosso.

K. Prominenza con due sommità, di cui una, più delineate e meno nitida, si prolunga a forma di corno. Questa protuberanza è più piccola nelle nostre fotografie rispetto a quelle di M. de la Rue, per un caso analogo a quella che ha prodotto l'effetto contrario nel punto A.

In tutta la parte sinistra non si vede alcuna protuberanza.

La linea nera *XY* rappresenta un filo teso nel cannocchiale e diretto lungo la parallela celeste, per rilevare la posizione delle protuberanze rispetto all'equatore solare.

La seconda fotografia era inizialmente stata scartata come inutile, a causa della presenza di immagini multiple; ma in realtà essa è molto preziosa; è una prova evidente del potere attinico di queste fiamme, poiché alcune di queste immagini sono state prodotte in meno di tre secondi.

La terza fotografia (fig. 80) ha richiesto una esposizione di trenta secondi. Le protuberanze iniziano a mostrare le loro sommità dal lato sinistro divenendo sempre più distinte. La corona è la parte più significativa di questa figura. Essa è molto irregolare, ma presenta una estensione maggiore a destra e a sinistra che nelle altre direzioni, cioè è più sviluppata nel piano dell'equatore che lungo la linea dei poli.

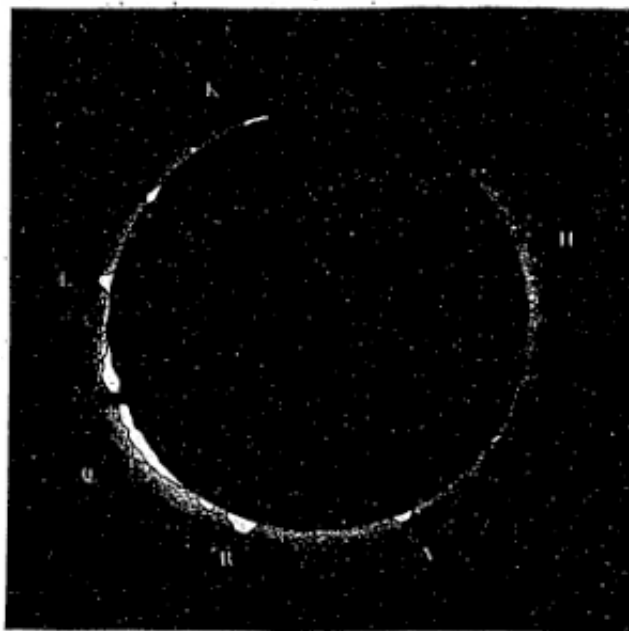
Fig. 80.



Le masse luminose non sono uniformemente distribuite; esse formano, per così dire, due gruppi: uno corrispondente all'equatore, l'altro alla regione delle macchie; l'insieme forma una figura all'incirca rettangolare. Confrontando questa aureola con la posizione delle protuberanze, si riconosce che la maggiore diffusione luminosa corrisponde a queste prominente; ma nelle vicinanze dei poli, questa proporzionalità non è conservata; l'aureola presenta un debole sviluppo, mentre si vedono notevoli protuberanze. Queste osservazioni si applicano a tutte le nostre fotografie, ma in particolare alla quarta, sebbene la corona sia molto debole. Esse ci rivelano un fatto fondamentale mai segnalato in nessuna osservazione ottica, e che le fotografie di M. de la Rue non avevano mai evidenziato: l'atmosfera possiede, cioè, una forma generalmente ellittica e la sua maggiore intensità corrisponde alla regione delle macchie. Quando pubblicammo questi risultati, gli astronomi non dissimularono la loro scarsa fiducia. Ma attualmente abbiamo ricevuto le fotografie di M. Winlock, fatte a Shelbysville, in America, il 7 agosto 1869, con il nostro stesso procedimento, e in esse la corona presenta la stessa forma. Le zone polari sono molto strette; la regione equatoriale e soprattutto quelle delle macchie sono molto dilatate. È quindi evidente che il contorno di questa atmosfera non è parallelo alla superficie del corpo solare.

L'ultima delle nostre fotografie è rappresentata in fig. 81. Di seguito al punto *K*, si incontra una piccola prominente e tra le due un'altra ancora più piccola. Non sono visibili nei negativi di M. de la Rue, a causa della differenza di parallasse già segnalato.

Fig. 81.



L è una protuberanza molto elevata la cui sommità è nettamente definita in tutte le fotografie.

In *Q* vi è un arco rosato molto esteso; è intensificato nei nostri negativi e non è meglio riuscito in quella di M. de la Rue. Fortunatamente, dalle osservazioni dirette, è possibile ristabilire i dettagli che sono sbiaditi. Un istante dopo la metà della totalità, riguardai la regione dove il Sole usciva dal cono d'ombra; vidi apparire una serie di fiamme fortemente colorate di giallo e rosso, e soprattutto notai una nube allungata di colore rosa, perfettamente sospesa all'interno della corona. Ho immediatamente avvisato i miei colleghi, affinché potessero controllare la mia osservazione, e feci anzitutto il disegno che è riprodotto nella fig. 82.

Fig. 82.



Questa forma era per me del massimo interesse, considerandola come decisiva dal punto di vista della teoria; essa confermava, in modo eclatante, idee che possiamo ora sostenere su basi ancora più solide.

È spiacevole che, in questa fase, le due serie di fotografie si siano rivelate imperfette; ma infine possediamo i documenti necessari per constatare ciò che desideriamo conoscere. In esse si evidenziano ancora le protuberanze che sconfinano sul disco lunare, come già da noi fatto osservare. Ritroviamo pure la protuberanza *R*, l'ultima che abbiamo segnalato nella fig. 82.

Per poter confrontare le nostre fotografie con quelle di M. de la Rue, le abbiamo ingrandite per poter ottenere una figura delle stesse dimensioni. Poi, dopo aver oliato un negativo per renderlo trasparente, li abbiamo sovrapposti, constatando una perfetta identità, a parte i dettagli sopra disegnati.

Da queste importanti osservazioni si possono trarre evidentemente le seguenti conclusioni:

1° Le protuberanze non sono semplici visioni prodotte da illusioni ottiche; sono fenomeni reali residenti nel Sole. Le nostre osservazioni sono state fatte in due punti distanti tra loro un centinaio di leghe, ed è impossibile supporre che figure così nitide e anche identiche siano prodotte da un fenomeno di miraggio o da altra causa simile.

2° Le protuberanze sono ammassi di materia luminosa di grande vivacità e possiedono una attività fotogenica molto elevata. Questa attività è così grande che parecchie protuberanze che abbiamo sulle nostre fotografie, e precisamente la protuberanza *E* (fig. 79), non sono state osservate direttamente, anche con validi strumenti: forse perché emettono solo raggi chimici, e pochi raggi luminosi.

3° Vi sono ammassi di materia che fuoriesce sospesa e isolata come nubi nell'atmosfera. Se la loro forma è variabile, le variazioni si susseguono molto lentamente rendendo impossibile constatarle in un intervallo di dieci minuti.

4° Oltre alle protuberanze, esista una zona della stessa materia, e che avvolge il Sole da tutte le parti. Le protuberanze provengono da questo strato; sono masse che si sollevano al di sopra della superficie generale, e a volte staccandosene. Alcune tra loro assomigliano ai fiumi che escono dai nostri camini o dai crateri dei vulcani, e che, arrivati ad una certa altezza, obbediscono ad una corrente d'aria inclinandosi orizzontalmente.

5° Questa conclusione risulta evidentemente dalla protuberanza C; essa era già stata messa in evidenza dalle numerose protuberanze osservate nel 1851 e soprattutto nel 1855.

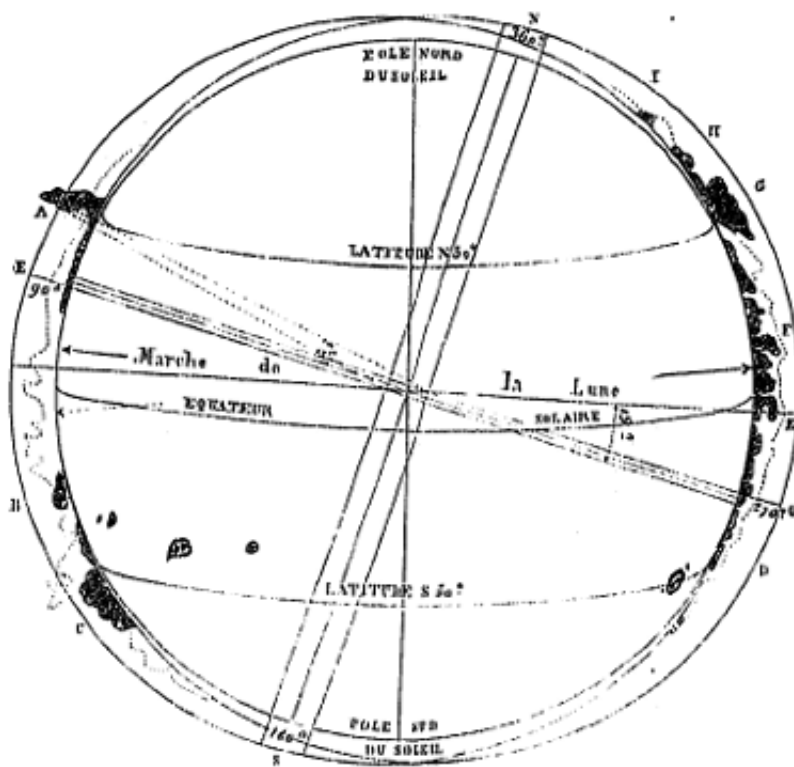
6° Il numero delle protuberanze è incalcolabile. Nell'osservazione diretta, il Sole ci appare completamente circondato da fiamme; esse erano talmente moltiplicate da apparirci impossibile contarle. L'osservazione fotografica ha pienamente giustificato questa prima impressione.

7° L'altezza delle protuberanze è notevole, soprattutto se si nota che per valutarla, bisogna tener conto della parte eclissata della Luna. Così la protuberanza E ha un'altezza di meno di 3 minuti, che corrisponde a dieci volte il diametro della Terra; le altre hanno, per la maggior parte, da 1 a 2 minuti di altezza.

Questi fenomeni non hanno caratterizzato solo l'eclissi del 1860. Per convincere il lettore, termineremo questa relazione riproducendo una figura tratta dalle fotografie del maggiore Tennant (fig. 83). Queste fotografie prese a Guntoor, nelle Indie, durante l'eclissi del 1868, sono state riprodotte a Londra da M. de la Rue. Si vede il percorso della Luna, così che il suo contorno all'inizio e alla fine della totalità. Si vede pure la posizione dell'equatore solare e quella dei poli¹. Nella incisione inglese era esagerata la grandezza delle macchie. Abbiamo loro restituito la posizione la grandezza reale, in base alle osservazioni fatte lo stesso giorno al Collegio Romano.

Questa figura parla da sola e mostra quali sono le dimensioni delle protuberanze. Dall'osservazione diretta, si era trovato per il corno A un'altezza di 3 minuti; risulta dall'osservazione fotografica che questa altezza è realmente di 3'22", più di dieci volte il diametro della Terra, circa 650000 km.

Fig. 83.



Nell'ultima eclissi, il numero delle protuberanze non era inferiore di quella del 1860. Inoltre, essendo gli osservatori distribuiti su una linea molto lunga, le loro osservazioni abbracciano un intervallo di tempi più considerevole. Si trova che la grande protuberanza fotografata ad Aden differisce un poco da quella fotografata a Guntoor. Si ha quindi la prova di un moto interno che si produce in modo evidente durante un intervallo di quaranta minuti. La realtà di questo movimento, e dei cambiamenti che ne sono la conseguenza, è d'altronde confermata dai disegni di diversi osservatori. Così, a Malacca, gli osservatori francesi rappresentano la protuberanza A inclinata verso destra. Due ore e quaranta minuti dopo, a Mantawalock, apparvero come una vite destrorsa con una punta diretta nel verso opposto (fig. 84). Ad Aden essa appariva inclinata a destra, mentre

¹ *Monthly Notices of Ast. Soc.*, vol. XXIX, n° 3.

a Labouan essa si dirigeva verso sinistra. Del resto le osservazioni ottiche sono in accordo con le fotografie per rappresentarla con una struttura a spirale, come indica la fig. 84 dovuta al maggiore Tennant.

Fig. 84.



Si sono pure evidenziate nelle fotografie le tracce dell'arco rosato e una nebulosità assai forte che si estendeva dall'equatore solare fino alla regione delle macchie, osservazione che giustifica quanto abbiamo detto nel 1860 della forma ellittica dell'atmosfera solare. Questa atmosfera è indicata nella fig. 83 da un tratto punteggiato. Nel 1867, il padre Cappelletti aveva osservato nella stessa regione una luce più forte, e aveva potuto fare questa osservazione malgrado un velo di nubi che copriva la corona. Le conclusioni finali di tutte queste osservazioni sono le seguenti:

■ Il Sole è circondato da una atmosfera molto elevata, la cui altezza è almeno uguale a un quarto del suo raggio. Essa è più estesa all'equatore che ai poli, e inoltre la sua altezza e la sua luminosità presentano due massimi da una parte e dall'altra dell'equatore tra 15 e 30 gradi di latitudine. In questa atmosfera fluttua uno strato continuo di materia rosa, che possiede una grande potere fotogenico, la cui altezza è variabile e il contorno irregolare. Questa materia si solleva a volte e forma sia colonne verticali sia nubi isolate; queste colonne e queste nubi sono trasportate in modo molto evidente dalle correnti atmosferiche. Lo strato rosa possiede un'altezza maggiore e una maggiore attività fotogenica nella regione delle macchie, la stessa in cui abbiamo già constatato il maggior rialzo di temperatura. ■

Queste sono le conclusioni alle quali siamo portati dalle osservazioni ottiche e fotografiche. Rimane da determinare la natura fisica e chimica dello strato rosa; è quanto è stato fatto alle Indie durante l'eclissi del 1868, e che noi esporremo.

7.3 Natura delle protuberanze solari visibili nelle eclissi

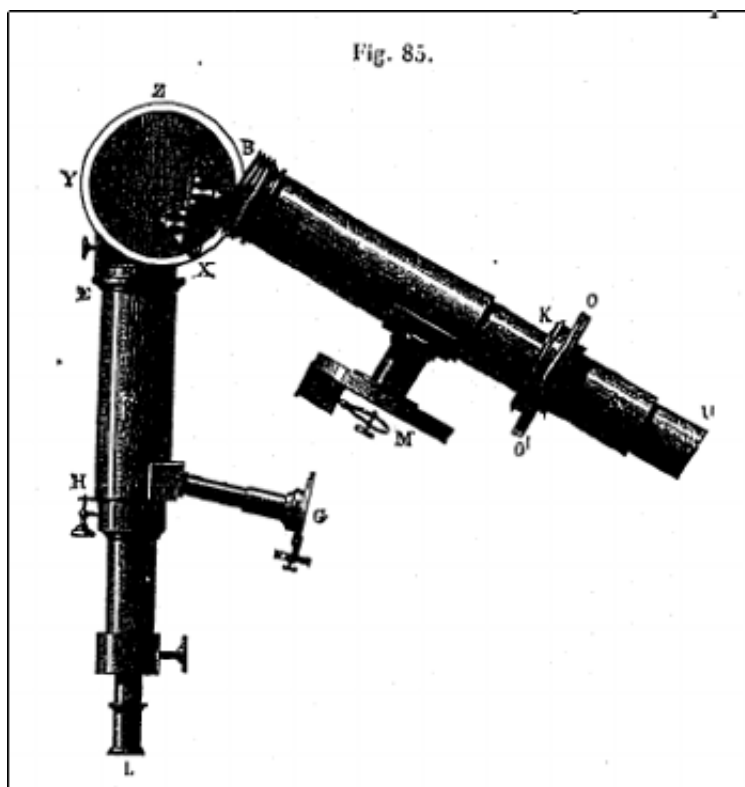
Prima del 1861, sarebbe stato impossibile determinare la natura chimica delle sostanze che si trovano nei corpi celesti. Ma dopo le scoperte di Bunsen e Kirchoff, dopo i progressi dell'analisi spettrale, questo problema è divenuto così semplice per l'astronomo quanto le analisi qualitative per il chimico nel suo laboratorio.

Da tempo si è imparato a riconoscere in certi casi la natura di queste sostanze attraverso i colori che presentano quando sono bruciate alla fiamma. Per esempio, si riconosce il rame, lo zinco, il ferro dalla loro fiamma verde, blu o gialla. Ma con l'aiuto dello spettroscopio si decompone la luce, che si distribuisce in uno spettro discontinuo nel quale si distinguono righe brillanti che occupano sempre la stessa posizione quando si opera su una stessa sostanza, in condizioni identiche. I trattati di Fisica e di Chimica espongono tutto ciò con molti dettagli; basterà quindi ricordare in poche parole i principi necessari, riservandoci di completare queste nozioni nel Capitolo VIII.

Lo spettroscopio è composto essenzialmente delle parti seguenti: una stretta fenditura a bordi paralleli, illuminata dalla luce che si vuole analizzare; un prisma o un sistema di più prismi, per disperdere la luce; infine un cannocchiale destinato a concentrare nell'occhio i raggi luminosi. Il prisma si trova tra la fenditura e il cannocchiale, e i suoi spigoli devono essere paralleli alla fenditura. Tra la fenditura e il prisma si interpone di solito una lente che, con la fenditura, costituisce ciò che è detto il *collimatore*, e che permette di diminuire le dimensioni dello strumento; la fenditura, sebbene assai ravvicinata, appare come posta ad una distanza infinita. Quando si guarda attraverso un simile sistema la fiamma di un metallo o la luce dei tubi di Geissler, si vede un numero più o meno considerevole di righe brillanti separate da spazi scuri, il cui colore e posizione sono diversi per le diverse sostanze, ma che rimangono invariate per ognuna di esse.

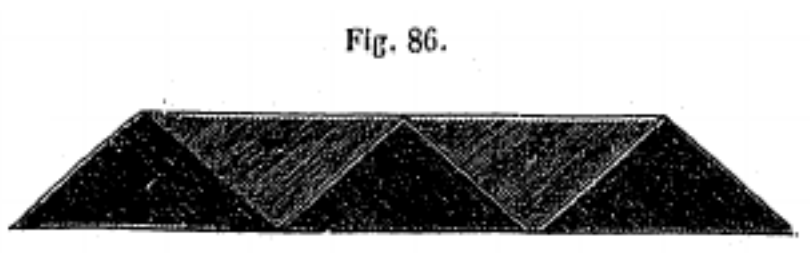
Descriveremo gli strumenti impiegati per lo studio delle fiamme terrestri; accontentiamoci, per ora, di spiegare quanto è stato adottato dagli astronomi, soprattutto per l'osservazione del Sole.

La fig. 85 rappresenta lo strumento che possediamo all'Osservatorio del Collegio Romano e che presenta particolari vantaggi di cui parleremo presto.



XYZ è un piatto circolare sul quale sono posti due prismi *C, D* e i supporti di due tubi *BU, EH*. Il tubo *BU* può essere adattato al cannocchiale come un oculare, mediante il dado *OO'*, e porta al suo interno il collimatore dello spettroscopio. In *F* si trova la fenditura davanti alla quale è adattato un piccolo prisma riflettore che serve ad introdurre luci ausiliarie da confrontare con quella che si analizza. Sul lato si vede un piccolo apparecchio *M* destinato a sostenere corpi luminosi artificiali, per esempio tubi di Geissler contenenti gas rarefatti, oppure due fili tra i quali si produce una serie di scintille, o infine una luce qualsiasi.

In *K* vi è una lente che forma sulla fenditura *F* un'immagine ingrandita del Sole. Sollevando l'apparecchio *M*, si può vedere questa immagine direttamente, e riconoscere i punti del disco solare, sui quali verte l'analisi. Si può ancora, nello stesso tempo, impiegare il cercatore del grande cannocchiale.



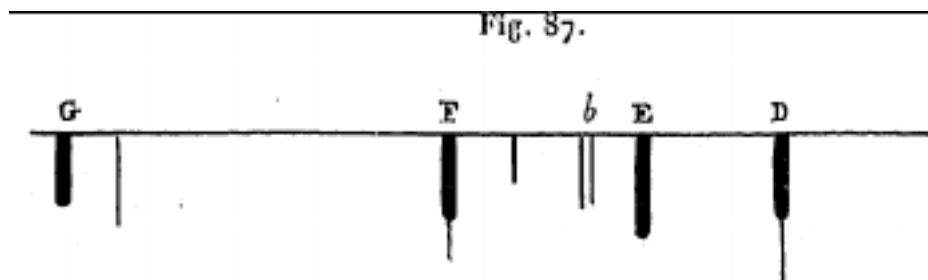
Il tubo *EH* contiene un prisma a visione diretta (fig. 86), ultima invenzione dell'ottico italiano Amici, composto di cinque prismi, il cui potere dispersivo è uguale a quello di altri due, e raddoppia quindi il valore dello strumento. *C, C, C* sono tre prismi crown, *F, F* due prismi flint; la luce passando attraverso i prismi così disposti si disperde e si decompone senza subire deviazioni, poi attraversa il cannocchiale *III*, il cui oculare è al bisogno fornito di un filo micrometrico. Questo cannocchiale porta inoltre un collimatore laterale *G* alla cui estremità è posta una fenditura molto stretta; questa fenditura è illuminata da una luce artificiale, allo scopo di fissare la posizione delle righe quando si osservano oggetti debolmente illuminati, per esempio le stelle e le nebulose. Questa luce è inviata verso l'occhio dell'osservatore con una riflessione su una delle facce del prisma a visione diretta. Si può al bisogno aumentare o diminuire il numero di prismi, secondo la natura degli oggetti da osservare.

È con un simile strumento che gli astronomi hanno analizzato la luce delle protuberanze. Le proprietà dello spettro devono far conoscere la loro natura fisica e chimica.

Infatti, tutta la materia incandescente produce uno spettro continuo; è quanto si osserva per il carbonio incandescente che si trova in sospensione nella fiamma. I gas stessi possono dare uno spettro continuo quando la loro temperatura è estremamente alta; ma tutte le volte che si ottiene uno spettro discontinuo composto di righe

isolate, si è certi di aver a che fare con un gas, e allora la natura chimica di questa materia può essere determinata dal numero e dalla posizione delle righe. Tutti coloro che hanno osservato con validi strumenti hanno trovato uno spettro discontinuo e ne dobbiamo concludere, in base ai principi enunciati, che le protuberanze sono di natura gassosa. È quanto ci hanno mostrato MM. Janssen, Rayet, Herschel, Weisse, Tennant, ecc.

Per riconoscere la natura delle sostanze delle protuberanze, bisogna fissare con esattezza la posizione delle righe; sfortunatamente gli osservatori non sono stati in perfetto accordo, sia a causa dell'insufficienza dei loro strumenti, sia per la mancanza di scale costruite in precedenza. L'analisi più dettagliata è quella di M. Rayet. Osservando la protuberanza *A* (fig. 83) osservò sette righe principali; alcune tra loro avevano una tale vivacità da produrre una specie di coda nel campo dello strumento; ne riproduciamo qui la figura come la si trova nei *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences* (fig. 87).



La posizione di queste righe coincide all'incirca con quelle delle righe nere che Fraunhofer ha indicato con le stesse lettere; ma vi devono essere alcune inesattezze: si è indicata con la lettera *B* quella che corrisponde alla *C*; la riga indicata con *D* non coincide rigorosamente con quella di Fraunhofer; la posizione di *F* è esatta, ma quella di *G* è solo approssimata. La posizione di *C* è stata segnalata da Janssen e Herschel; quest'ultimo tuttavia non ha potuto darla in modo preciso, a causa delle nubi che disturbavano le sue osservazioni. M. Rayet compì sei osservazioni mettendo la fenditura successivamente in due direzioni ad angolo retto tra loro; siamo così perfettamente certi che lo spettro osservato appartiene proprio alla protuberanza.

In una seconda osservazione, analizzò la luce di una seconda appendice, e trovò solo una riga posta nel violetto; da ciò bisognerebbe concludere che tutte le protuberanze non hanno la stessa composizione chimica.

L'esistenza della riga *F*, pienamente constatata, indicava che il gas idrogenato era uno dei componenti di questa protuberanza; ma bisognava determinare la natura dei gas ai quali corrispondevano le altre righe. La temperatura era evidentemente molto elevata, e confrontabile con quella che produce il passaggio della scintilla elettrica nei tubi di Geissler. Del resto questo confronto serve a spiegare il colore rosa delle protuberanze, poiché l'idrogeno si colora così quando, rarefatto, viene illuminato con una scarica elettrica.

Tuttavia, ci si doveva assicurare dell'identità delle diverse righe; questo studio sembrava richiedere una nuova eclissi, ma M. Janssen ci ha dispensato da una tale attesa con una scoperta della massima importanza. Questo fisico, colpito dallo splendore che presentavano le righe delle protuberanze, fu portato a credere che fossero visibili anche in pieno giorno. Sfortunatamente, il cielo si coprì di nubi poco tempo dopo l'eclissi, e gli fu impossibile verificare la sua ipotesi. Il giorno dopo si mise all'opera, e vide in pieno giorno le righe delle protuberanze. Dirigendo la fenditura dello spettroscopio esattamente lungo la tangente al bordo del Sole, nel posto in cui in precedenza aveva osservato una fiamma, vide apparire nel campo del cannocchiale una riga brillante colorata di rosso, corrispondente alla riga *C* di Fraunhofer, poi nel blu un'altra riga brillante corrispondente esattamente alla riga *F*. Queste due righe sono proprio quelle dell'idrogeno, da cui deriva che questo gas è la principale sostanza delle protuberanze.

Il giorno stesso questa notizia giunse in Europa (20 ottobre), M. Lockyer annunciò che, da parte sua, era giunto alla stessa conclusione. Aveva potuto vedere, sul bordo del Sole, le righe dell'idrogeno, accompagnate da una riga sconosciuta posta vicino alla riga *D*. Questa scoperta era troppo importante per non essere immediatamente verificata, e ci fu possibile riuscirci lo stesso giorno in cui giunse la notizia. Abbiamo studiato questo problema con cura, e siamo giunti, come altri osservatori, alle conclusioni che esponiamo nel paragrafo successivo.

7.4 Risultato degli studi spettrali fatti in pieno giorno sulle protuberanze

Sebbene parleremo nel seguente capitolo dell'analisi spettrali della luce solare, esponiamo ora i risultati ai quali ci hanno portato le scoperte di MM. Janssen e Lockyer, poiché questi risultati sono intimamente collegati con il problema di cui ci occupiamo. Per facilitare la comprensione dei dettagli, presentiamo qui una tavola colorata rappresentante lo spettro solare con le righe di Fraunhofer.

Operando come indicato, è molto facile osservare le protuberanze in pieno giorno con uno spettroscopio. Bisogna impiegare un cannocchiale la cui lunghezza focale sia abbastanza grande da fornire un'immagine notevolmente ingrandita. Si riesce molto bene con uno spettroscopio tascabile adattato a un cannocchiale di 10 cm

di apertura, con una lunghezza focale di 2 *m*. Tuttavia quando si vuole fare uno studio preciso e ottenere misure precise, ci si deve servire di uno strumento più potente. Noi abbiamo impiegato a questo scopo il nostro grande equatoriale di 25 *cm*, ponendo davanti al fuoco un oculare destinato ad amplificare l'immagine del Sole. In questo modo era molto più facile determinare la posizione precisa delle protuberanze e studiarne i dettagli. Essendo lo strumento disposto nel modo indicato, ed scegliendo la fenditura più stretta possibile, e senza mettere alcun vetro colorato all'oculare, si può con la massima facilità, e impiegando l'obiettivo con tutta la sua apertura, dirigere il cannocchiale verso uno qualunque dei punti del Sole o verso il bordo del suo disco. Lo spettroscopio è disposto in modo da poter far variare facilmente la posizione della fenditura per renderla tanto parallela quanto perpendicolare al bordo del Sole.

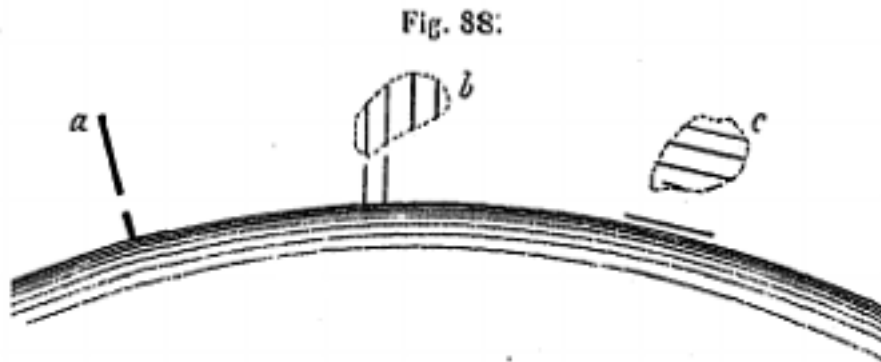
Osservando in tal modo, si sono ottenuti i seguenti risultati:

1° Supponiamo la fenditura perpendicolare al bordo diviso in due parti uguali dal contorno del disco. Qualunque sia il punto osservato, si nota sempre uno spettro composto da due zone diversamente illuminate, ma che possiedono tutte le due righe caratteristiche; la zona più brillante appartiene al Sole, l'altra allo spazio circostante. Vicino alla linea di separazione di queste due zone, un poco all'esterno del disco solare, si vede una porzione delle righe nere *C* e *F* brillare di vivo splendore. Inoltre, nel giallo, vicino al punto *d*, dalla parte del verde, si vede brillare una riga gialla. Infine si nota un'altra traccia brillante nelle vicinanze della riga *C*.

Eccetto quella che corrisponde al giallo, tutte le righe da noi segnalate appartengono all'idrogeno; da ciò segue che questo gas forma uno strato generale attorno al Sole.

2° Questo strato ha uno spessore da 10 a 15 secondi, ma è molto irregolare; lo si può constatare disponendo la fenditura perpendicolarmente al bordo e misurando l'estensione delle parti brillanti. Tuttavia, si evidenzia spesso che la linea nera scompare in modo completo senza dar luogo ad una riga brillante; è quanto avviene soprattutto vicino alle facole e alle macchie. Questo fatto dimostra che l'idrogeno esiste ben oltre le linee brillanti, ma solo in quantità sufficiente a neutralizzare la linea nera senza sostituire la riga brillante. Disponendo la fenditura tangenzialmente al bordo, si vedono le righe acquistare una lunghezza uguale alla larghezza dello spettro e divenire molto vive.

3° In numerosi punti del contorno solare si vedono linee brillanti acquistare e anche superare notevolmente la lunghezza che corrisponde a 15 secondi; esse si presentano a volte come frammenti di linee isolate staccate dal bordo, come si vede nella fig. 88 in *a* e *b* nel caso in cui la fenditura è perpendicolare al bordo, o come in *c*, quando gli è parallela. Si vede, da questo esempio, che, dalla forma e disposizione delle righe, si può tracciare la forma delle protuberanze spostando opportunamente lo spettroscopio.

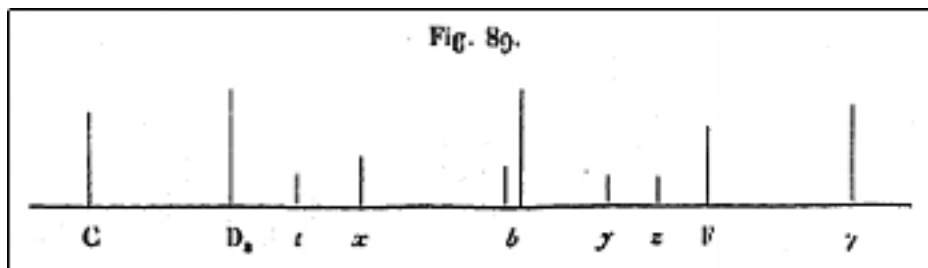


Si può quindi, in questo modo, studiare le protuberanze con la massima facilità anche al di fuori delle eclissi, segnalare la loro presenza, determinare la loro forma e disegnarle con altrettanta fedeltà come se fossero effettivamente visibili.

4° La riga brillante che si trova nelle vicinanze del punto *D* non corrisponde ad alcuna riga nera, né ad alcuna delle righe che si osservano nello spettro dell'idrogeno quando questo gas è reso luminoso a bassa pressione. La si ritroverà nello spettro di questo gas, osservandolo nelle condizioni di temperatura e pressioni diverse da quelle che possiamo produrre? È permesso dubitarne, poiché abbiamo osservato che essa non subisce le stesse variazioni delle righe *C* e *F*; essa è spesso molto debole nelle circostanze nelle quali le altri sono molto intense. Siamo pertanto portati a credere che essa non appartenga all'idrogeno. Oltre a queste righe, se ne notano a volte parecchie altre nel gruppo del verde, e soprattutto qualcuna di quelle che appartengono al magnesio; ma esse sono alquanto deboli. Abbiamo notato che la riga gialla sembra coincidere con una linea molto brillante che si osserva nello spettro ordinario del Sole, quando si impiega uno spettroscopio a nove prismi. La sua posizione è tale, che prendendo come unità la distanza tra due righe *D'* e *D''* del sodio, essa si allontana due volte e mezza questa larghezza.

5° Abbiamo detto che, durante l'eclissi del 1868, gli osservatori avevano evidenziato, nello spettro delle protuberanze, righe diverse da quelle dell'idrogeno; era necessaria verificare la loro visibilità anche in pieno

giorno. Abbiamo avuto la fortuna di vedere una di queste protuberanze il 20 maggio 1869. La fig. 89 mostra l'insieme delle righe da noi osservate. Oltre alle righe dell'idrogeno G , F , γ e la riga D_3 , altre due erano evidenti: una brillante tra le due righe più vicine del magnesio, l'altra era la terza riga del magnesio invertita; esse sono segnate con b . Inoltre, ne abbiamo pure notato due in y e z , tra b e F ; una in x tra D_3 e b ; un'altra più debole in t , vicino a D_3 .



È stato impossibile determinare in modo soddisfacente le sostanze chimiche corrispondenti a queste righe secondarie, ma la riga x sembra appartenere al ferro. L'aspetto più singolare è che, tra tutte le righe che caratterizzano il magnesio, una sola è invertita; le altre non lo sono, e la riga brillante si mostra nell'intervallo che le separa. Del resto, questo intervallo corrisponde a una riga brillante del Sole, e ciò consente di affermare che le righe delle protuberanze non tutte capovolte.

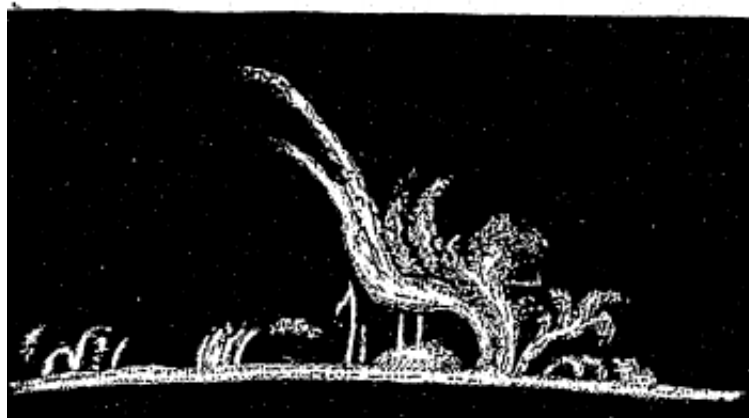
6° Lo spettroscopio impiegato in questo modo permette di studiare le protuberanze solo per parti. Ma impiegando un'immagine del Sole il cui diametro non supera 20 o 30 mm , e allargando un poco la fenditura, le si può vedere interamente. Si può dare alla fenditura una larghezza di mezzo millimetro, e anche di più: si vede allora l'immagine rossa della protuberanza. Si facilita l'osservazione impiegando un vetro rosso che la passare i raggi C . Allora si vede il contorno del Sole tutto circondato di protuberanze, soprattutto vicino alle macchie e alle facole, e l'intero contorno presenta un aspetto analogo a quello indicato nella fig. 90.

Fig. 90.



Il signor professor Respighi, che si è particolarmente occupato di questo studio, ci ha inviato il disegno di una protuberanza che ha osservato a Roma, il 26 febbraio 1870, alle 10^h 40^m. L'altezza di questa protuberanza (fig. 91) era di 2' 30". Queste masse presentano in genere la forma di getti gassosi che si inclinano e ricadono a partire da una certa altezza. I dettagli sono molto bizzarri e assumono spesso un aspetto simile alla vegetazione.

Fig. 91.



Questi sono i fatti principali che si sono osservati fino ad ora. Essi invitano a qualche riflessione e necessitano di spiegazioni.

1° Come è possibile, con l'aiuto di uno spettroscopio, studiare le protuberanze in assenza di eclissi? Gli astronomi avevano inutilmente utilizzato molti altri metodi; hanno tentato con piccoli diaframmi per eliminare dai loro cannocchiali tutta la luce estranea; hanno impiegato allo stesso scopo vetri colorati; ma non sono mai riusciti a intravedere nulla, mentre lo spettroscopio ha portato al primo colpo di successo insperato. Il motivo è molto semplice, ed è stato già presentato da Arago. Questo grande astronomo mostrò che per vedere le protuberanze, bastava diminuire la luce del cielo in modo da renderla più debole di quella delle protuberanze stesse. È così, disse, che si riesce a vedere le stelle in pieno giorno; i cannocchiali indeboliscono la luce dell'atmosfera, poiché amplificano la porzione di cielo che si trova nel campo, senza ingrandire le stelle che non hanno diametro apparente. Questo è il ruolo dello spettroscopio nella circostanza in questione. Disperde e allarga in una banda molto diffusa la luce dell'atmosfera terrestre e dell'atmosfera solare, senza poter disperdere il piccolo numero di raggi semplici che compongono lo spettro della protuberanza. Queste conservano quindi tutta la loro intensità, mentre le altre risultano indebolite. È quanto si osserva anche nello studio degli altri corpi celesti. Una stella di sesta o settima grandezza, il cui spettro è discontinuo, è assai più facile da osservare delle stelle gialle di terza o quarta grandezza. Analogamente, le righe delle nebulose planetarie brillano con vivacità nel campo dello spettroscopio, e il loro splendore è confrontabile a quello di una candela, sebbene queste nebulose non siano più visibili delle stelle di nona grandezza!

È sorprendente che gli astronomi non abbiano fatto prima una tale scoperta, poiché, con un buon spettroscopio, l'osservazione è molto facile, e per compierla con successo è necessario solo adattare lo strumento al cannocchiale. Ecco uno dei fatti che mostrano che, in fisica, non ci si deve lasciar sviare dalle proprie ricerche dagli insuccessi degli altri. Qualche astronomo, avendo usato strumenti alquanto imperfetti, come si è riconosciuto dopo, avevano ottenuto solo risultati negativi, ed è questo che ha impedito di fare questa scoperta così facile. Dobbiamo, tuttavia, aggiungere che, senza le osservazioni fatte durante l'eclissi, non si sarebbe ben compreso questo metodo i risultati che ne sono derivati.

2° Bisogna pure sottolineare che la scoperta attuale ci fa solo conoscere la natura delle protuberanze e dello strato rosato di cui fanno parte; ma l'esistenza di questo strato era perfettamente constatata dagli archi a forma di falce che si erano visti attorno alla Luna del 1842. Bessel, osservando un'eclissi anulare a Koenigsberg, aveva visto il bordo della Luna circondato da un cerchio rosso. Il colore stesso delle protuberanze e le relazioni numerose che esse hanno con gli archi rosati, provavano che questi due fenomeni dipendevano l'uno dall'altro, e che la loro natura era identica. Infine, le fotografie prese nel 1860 da M. de la Rue e da noi mostravano questa identità in modo irrefutabile.

3° Era naturale cercare le relazioni che esistono tra le protuberanze e le macchie; è quanto abbiamo fatto studiando le variazioni della riga *C*, variazioni che ci permettono di determinare tutti i punti del disco in cui si trovano le protuberanze. Abbiamo potuto constatare che esse sono assai numerose e molto intense nelle vicinanze delle macchie, e soprattutto nelle facole e nelle code che le seguono; non abbiamo esaminato alcuna facola sul bordo solare, senza trovarla accompagnata da protuberanze molto intense e molto alte. Le nostre osservazioni provano pure che i diversi punti del Sole sono lontani dall'aver spettri identici, come si era creduto sinora. Ma queste osservazioni sono molto complesse, tanto più che, per uno stesso punto del Sole, le variazioni dello spettro sono continue; tutto quello che si può fare è constatare queste differenze senza poterle studiare in modo preciso e dettagliato.

4° Studiando la corona durante l'eclissi del 1868, si era trovato uno spettro continuo. Forse gli osservatori non erano ben preparati a questa difficile osservazione. Durante l'eclissi del 7 agosto, gli Americani hanno constatato che la luce della corona, analizzata allo spettroscopio, mostra qualche riga isolata di cui la principale e più brillante coincide con quella delle nostre aurore boreali. Questo fatto richiede una conferma, ed è assai importante perché se ne faccia oggetto di studi speciali nelle prossime eclissi.

Sebbene si sia riusciti a vedere le protuberanze in pieno giorno, le eclissi saranno sempre molto utili, soprattutto per lo studio dettagliato delle loro forme. Ci si limita, infatti, a disegnare le loro immagini rosse, senza poter ottenere quelle gialle, blu e violette. Inoltre, il vetro rosso assorbe gli altri colori e modifica il contorno delle protuberanze. Sarà quindi interessante, nelle prossime eclissi, disegnarle simultaneamente con i due procedimenti, per farne uno studio comparato.

7.5 Conclusioni relative all'atmosfera solare

Abbiamo già formulato le principali conclusioni che derivano dalle osservazioni ottiche e fotografiche. Possiamo ora farci un'idea esatta dell'atmosfera che avvolge il Sole.

1° Oltre il limite apparente del disco solare, esiste un'atmosfera trasparente, ma che possiede un notevole potere di assorbimento in grado di fermare una parte dei raggi solari.

2° Questa atmosfera non ha dappertutto la stessa altezza; essa raggiunge il suo massimo all'equatore e nella regione delle macchie; diviene minima ai poli.

3° In questa atmosfera fluttua uno strato gassoso la cui temperatura è molto elevata e dalla quale fuoriescono le protuberanze. L'idrogeno è il principale elemento di queste appendici e dello strato rosato che si osserva durante le eclissi.

4° Questo strato circonda il Sole da tutte le parti, e il suo spessore è variabile. Essa non è esclusivamente composta di idrogeno; contiene ancora altre sostanze, e in particolare vapore di sodio e di magnesio. Osservazioni dettagliate fanno ancora constatare la presenza di vapore acqueo.

Queste sono le conclusioni riguardanti l'atmosfera solare. Vediamo che, contro ogni aspettativa, è stato possibile determinarne la composizione chimica. Ci resta ora da studiare la stessa fotosfera; i potenti mezzi a nostra disposizione ci permetteranno di ricercare con qualche speranza di successo la sua composizione e struttura.

Capitolo 8

Analisi spettrale della luce solare

L'ordine e la concatenazione delle idee ci hanno costretto a condensare, nel Capitolo precedente, un gran numero di fatti e scoperte; ci è stato impossibile sviluppare in modo soddisfacente alcuni dei temi che siamo stati costretti ad affrontare. Colmiamo questa lacuna e diamo al lettore tutti gli elementi necessari alla comprensione esatta di queste importanti e complesse questioni.

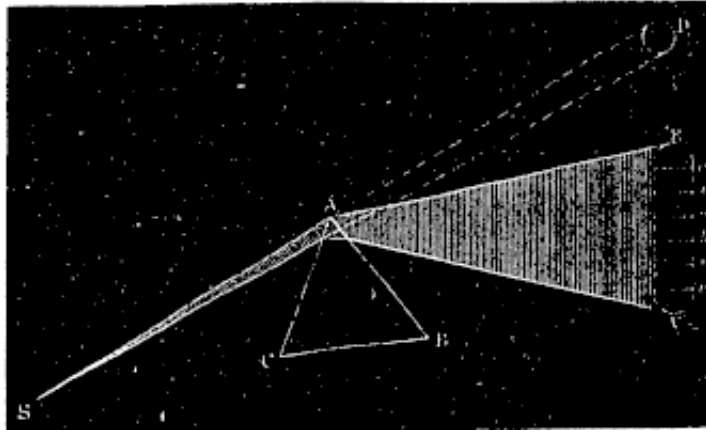
Abbiamo segnalato un fatto significativo, l'esatta coincidenza tra le linee brillanti che presenta lo spettro delle protuberanze con alcune delle righe nere dello spettro solare. Esponiamo in poche parole la teoria di questa inversione, e se ne coglierà molto presto l'importanza pratica; si vedrà come possiamo, grazie allo spettroscopio, valutare la presenza di diverse sostanze negli astri, e fare, per così dire, l'analisi chimica di questi corpi. Fino ai giorni nostri, le scoperte dell'Astronomia, per quanto meravigliose fossero, si limitavano sempre ai moti dei corpi celesti, alle loro masse o ai loro volumi; ora, l'analisi spettrale ci permette di determinare la natura intima della materia che la compone. La luce è il solo agente che ci mette in relazione con questi mondi lontani; è ad essa che domanderemo informazioni sulla loro costituzione fisica e sulla loro composizione chimica.

Esponiamo con ordine i risultati che la spettrometria ha così rapidamente ottenuto. Questa scienza, nata da poco, ha già compiuto progressi considerevoli; ma, in ragione anche della rapidità con la quale si è sviluppata, ha contribuito a diffondere idee inesatte, contro le quale bisogna premunirsi se non si vogliono compiere passi falsi nello studio dei corpi celesti. È per questo che crediamo di dover riprendere la questione, esponendo con precisione le reali principi della spettrometria. Ciò non costituirà una deviazione dal nostro scopo, poiché si può dire che la principale applicazione di questa scienza è quella che riguarda lo studio degli astri.

8.1 Analisi della luce solare con il prisma - Spettro solare

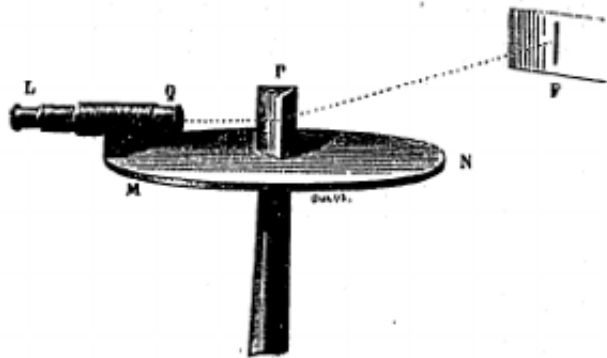
Sembra che offrendo ai nostri sguardi i brillanti colori dell'arco in cielo, la natura abbia voluto invitarci a studiare la composizione della luce e a riconoscerne la sua natura; tuttavia questo mistero fu svelato solo più tardi. Da lungo tempo si conosce il *vetro triangolare*, cioè detto prisma; la sua capacità di colorare gli oggetti più grossolani e di trasformarli in un ammasso di pietre preziose, facendone un volgare divertimento, ma poco degno dell'attenzione di un filosofo. Grimaldi fu tra quelli che lo studiarono con maggior attenzione e successo. Praticò un'apertura nell'imposta di una camera oscura, introdusse attraverso di esso un raggio luminoso e lo sottopose all'azione del prisma. Poté allora osservare attentamente lo spettro solare; ne diede una descrizione molto accurata e propose una spiegazione dell'arcobaleno (*Physico-mathesis de lumine*, prop. XXX e seg., p.235, ecc.). La fig. 92 mostra la disposizione dell'esperienza assai nota in fisica. Il raggio solare SD , ricevuto dal foro di un'imposta nella camera oscura, è spezzato dall'angolo A del prisma ACB , si spande riproducendo i colori dell'arcobaleno e disegnando lo spettro RV sulla parete opposta. Newton ripeté queste esperienze e riconobbe che i diversi raggi dello spettro possono subire, senza alterazione, l'azione di un secondo prisma. Andò oltre, ricompose la luce bianca, fissò i nomi dei diversi colori e le proporzioni nelle quali li si deve combinare per riprodurre una luce analoga a quella del Sole.

Fig. 92.



Dopo Newton, Wollaston è il primo che ha fatto progredire questo settore dell'ottica. Guardando una stretta fenditura attraverso un prisma, vide che lo spettro, invece di essere continuo, presentava lacune o righe nere che lo suddividevano in numerose parti. Questa scoperta passò inosservata; rimase sterile per la scienza, fino al momento in cui Fraunhofer, volendo determinare in modo preciso l'indice di rifrazione dei vetri da lui impiegati, scoprì di nuovo lo stesso fenomeno; immaginò dei metodi per studiare queste righe, disegnarle e fissarne la posizione con misure esatte.

Fig. 93.



L'esperienza fondamentale di Fraunhofer fu fatta nel modo seguente: Su un piatto orizzontale MN (fig. 93), pose un prisma triangolare P , di cristallo molto puro; ad una certa distanza si trova una fenditura F , molto stretta, a bordi paralleli, illuminata con un eliostato, da un raggio di luce solare. Questo raggio cade sul prisma, e, dopo essere stato deviato sotto l'angolo minimo, entra nell'obiettivo del cannocchiale QL , che serve a studiare le diverse parti dello spettro. Per ben distinguere le righe, bisogna dapprima mirare direttamente la fenditura, e disporre l'oculare in modo da vederla nettamente; poi, dopo aver fatto passare il raggio attraverso il prisma, lo si osserva con il cannocchiale, e, spostando leggermente l'oculare, si mette nel punto atto a vedere nettamente le righe. Se il prisma è di buona qualità e se il cannocchiale è acromatico, si osserverà un numero considerevole di righe molto sottili; un campione è mostrato nella fig. 1, Pl,I, dove sono evidenziati solo le principali. Questa figura è assai simile a quella di Fraunhofer; è stata disegnata da M. Van der Willigen.

Fig. 3. (V. der Willigen.)



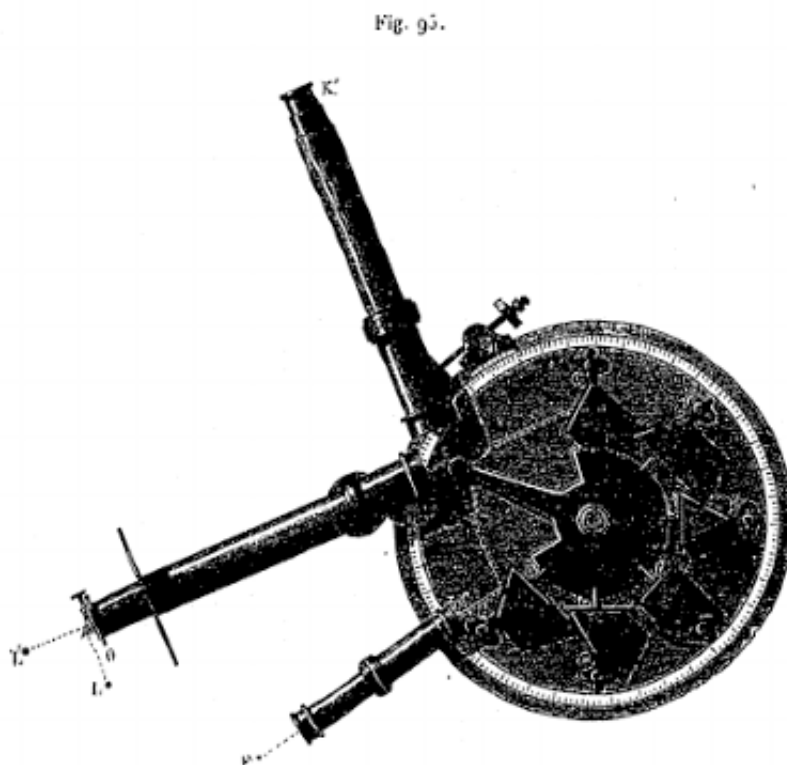
Le righe principali sono indicate con le lettere $A, B, C, D, E, b, F, G, H$. A queste lettere si uniscono dei numeri allo scopo di facilitare il confronto con la tabella delle lunghezze che mostriamo in seguito.

È stato perfezionato il metodo di osservazione di Fraunhofer aggiungendo al suo strumento un collimatore; è un cannocchiale disposto in modo che il fuoco principale del suo obiettivo coincida con la fenditura; i raggi che attraversano la fenditura escono da questo obiettivo paralleli tra loro, come se la fenditura stessa fosse posta ad una distanza infinitamente grande, di modo che l'oculare del cannocchiale si possa disporre come per l'osservazione di oggetti lontani. Questa disposizione costituisce lo spettroscopio comune che si adatta al cannocchiale al posto dell'oculare.

Aggiungendo numerosi prismi, si ottiene uno spettro molto allargato, anche con uno strumento di piccole dimensioni, come quello che abbiamo descritto nel precedente capitolo, e che impieghiamo per l'osservazione delle protuberanze. Uno spettro così allargato mostra righe più distanziate, e, di conseguenza, più distinte tra loro. Impiegando quattro prismi, M. Kirchoff ne ha distinte e disegnate circa duemila; con nove prismi, è possibile contarne più di cinquemila. Si ritrovano queste righe anche nella parte ultravioletta dello spettro, anche se invisibile; M. Rutherford ne ha individuate parecchie centinaia con la fotografia. Impiegando strumenti potenti, si può spesso sdoppiare righe che appaiono semplici. La riga D si sdoppia molto facilmente; ma, con uno spettroscopio potente, si riconosce che in realtà è quintupla; poiché tra le due righe principali D' e D'' , ve ne sono almeno altre tre, senza contare quelle che sono all'esterno.



È possibile confrontare queste osservazioni con quelle delle stelle multiple; nei due casi, il successo dipende dalla potenza degli strumenti impiegati. Per queste ricerche, si costruiscono strumenti che contengono nove prismi, e anche di più; questi prismi sono fatti di una sostanza fortemente dispersiva, come il flint pesante o il solfuro di carbonio. Uno è mostrato nella fig. 95, che è composta di sei prismi. OC è il collimatore, KK' il cannocchiale per l'osservazione, e p un piccolo cannocchiale collimatore con una scala graduata invece della fenditura. L'immagine di questa scala, riflessa dall'ultimo prisma, arriva all'occhio con i raggi dispersi e serve a fissarne la posizione.



Lo spettro solare è quindi lontano dall'essere continuo; le righe nere che abbiamo segnalato sono in verità lacune; esse occupano il posto di certe righe con indice di rifrazione determinato, e che mancano nella luce del Sole. Ciò che diciamo sulla luce diretta è vero anche per quella riflessa. Si ottiene lo stesso spettro, con le stesse righe, analizzando la luce della Luna, quella dei grandi pianeti, delle nubi e di tutti i corpi illuminati dal Sole. Indipendentemente da queste righe ben definite, si evidenziano ancora tratti che appaiono imprecisi; osservandoli con strumenti potenti, li si può spesso scomporre in linee nere molto sottili.

Le righe brillanti non hanno tutte la stessa intensità luminosa. Gli strumenti più dispersivi sono quelli che danno loro maggiore splendore, soprattutto nel giallo e nel verde. Analogamente, le linee nere non sono tutte scure allo stesso modo; vi sono diverse gradazioni; nella Tabella di M. Kirchoff, sono state indicate con numeri compresi tra 1 e 6. Si indica pure la loro larghezza con lettere comprese tra a e g . Terminiamo questo paragrafo con una tabella delle lunghezze d'onda relative a un certo numero di righe prese tra le più importanti, con le notazioni e i valori di M. Kirchoff. Aggiungiamo il nome delle sostanze che, quando sono incandescenti, danno righe brillanti corrispondenti identicamente alle righe nere che si vedono nello spettro solare.

Non pretendiamo di fornire una lista completa; la si troverà nei lavori originali di M. Kirchoff, Angström, Plücker, Thalen, Van der Villingen, ecc. La Tabella basta a informare il lettore sui lavori essenziali riguardanti tale argomento. Abbiamo preferito le misure di lunghezza d'onda di M. Van der Villingen, poiché hanno dato un buon accordo con quelle degli altri scienziati, Ditscheiner, Mascart, Fraunhofer, Angström; tale accordo è evidente tra i valori dati da Angström e quelli da noi riprodotti. Per quanto riguarda l'identificazione di queste righe con quelle della figura di Kirchoff, la cosa non è così facile, poiché la scala di questo fisico, oltre ad essere arbitraria, non è sempre costante con se stessa. M. Airy ha inutilmente tentato di trovare una formula che desse la lunghezza d'onda in funzione delle divisioni di questa scala. Quando a M. Angström, ha confrontato il maggior numero di righe alla loro lunghezza d'onda reale e ha fornito tabelle e figure in cui ogni riga occupa il posto che deve avere, in base alla lunghezza d'onda relativa. Ha chiamato questa figura *spettro normale* del Sole.

Tabella delle lunghezze d'onda relative alle righe principali dello spettro solare, dalle misure di M. Van der Villingen, confrontate con quelle di MM. Angström e Kirchoff.

Lettere di Fraunhofer	Valori e lettere di Van der Villingen	Lunghezze d'onda in $10^{-9} m$		Numeri della figura di Kirchoff	Intensità e larghezza secondo la	Sostanze corrispondenti
		secondo V. d. V	secondo Angström			
	1 α	763,36	"	"	stessa "	
A	1 β	760,92	761,2	404,1	6	Diffusa ai bordi
	3 α	728,13	"	"	"	
	3 β	724,38	"	"	"	
	3 α	718,97	"	"	"	
	3 β	718,86	"	"	"	
B	4 α	687,48	687,5	592,6	6 c	Diffusa ai bordi
	4 β	687,13	"	"	"	
C	5	656,56	656,8	694,1	6 c	Idrogeno
	6	651,94	"	711,5	"	
	7	649,77	"	719,5	"	
	8 α	628,11	"	"	"	
	8 β	628,00	"	"	"	
	...	625,90	"	"	"	Atmosferica. Molto forte. C ⁶ di Brewster
	9	619,45	619,2	849,7	3 c	Ferro
	10	616,49	616,3	863,9	5 b	Calcio
	...	"	614,3	874,3	4 b	Bario
	11	613,96	613,9	877,0	4 c	Ferro
	12	612,52	612,4	884,9	4 b	Calcio, cobalto
	13	610,52	610,5	894,9	2 c	Calcio
D ₁	14 α	589,86	590,0	1002,8	6 b	Sodio
D ₂	14 γ	589,26	589,4	1006,8	6 b	
	15	562,70	"	1200,4	"	
	16	561,80	561,80	1207,3	5 g	Ferro
	17	553,19	"	1280,0?	"	
	18	547,86	"	1324,0?	"	
	19	545,83	546,0	1343,5	6 c	Ferro
	20	537,38	537,4	1421,6?	5 b	Ferro
	21	533,05	533,2	1463,0	5 c	Ferro. Doppia
E	22 α	527,24	527,4	1522,7	6 c	Ferro, calcio
	22 β	527,04	527,3	1523,7	6 c	Ferro

Tabella delle lunghezze d'onda, ecc (seguito)

Lettere di Fraunhofer	Valori e lettere di Van der Villingen	Lunghezze d'onda in $10^{-9} m$		Numeri della figura di Kirchoff	Intensità e larghezza secondo la	Sostanze corrispondenti	
		secondo V. d. V	secondo Angström				
b	23	523, 50	523, 7	1569, 6	stessa 5 c	Ferro	
	24	522, 96	"	1577, 5	"		
	25	518, 63	518, 8	1634, 1	6 g	Magnesio	
	26	517, 51	517, 7	1648, 8	6 f	Magnesio	
	27 α	517, 14	517, 3	1653, 7	6 b	Ferro, nickel. Diffuso ai bordi	
	27 β	517, 07	517, 2	1655, 6	6 c	Ferro, magnesio. Diffuso ai bordi	
	27 γ	516, 96	"	"	"		
	28	510, 18	"	1760, 4?	"		
	29	508, 27	"	1777, 4?	"		
	30	504, 37	"	1834 ?	"		
	31	496, 01	496, 1	1961, 0	4	Ferro	
	32	489, 38	489, 5	2041, 4	6 b	Ferro. Doppio	
	33	487, 46	487, 4	2066, 6	5 c	Ferro. Doppio	
	F	34	486, 39	486, 5	2080, 0	6 g	Idrogeno
35		467, 00	"	2309	"		
36 α		453, 75	"	2489, 4?	"		
36 β		453, 39	"	"	"		
36 γ		453, 06	"	"	"		
37		438, 58	438, 6	2721, 2	6	Ferro. Molto largo	
38		434, 28	434, 3	2798, 6	6	Idrogeno. Diffuso, largo	
39		432, 74	432, 8	2821, 9	6	Ferro	
G		40	431, 12	431, 0	2854, 4	6	Ferro
		41	427, 52	427, 5	"	"	Ferro
	42	426, 27	426, 2	"	"	Ferro	
	43	422, 87	422, 9	"	"	Calcio. Doppio	
	44	414, 55	414, 7	"	"	Doppio	
	45	413, 51	"	"	"		
	46	410, 38	410, 4	"	"	Idrogeno. La 4 ^a nelle stelle del 1° tipo	
	47	407, 95	407, 5	"	"	Ferro. Forte	
48	406, 75	406, 6	"	"	Ferro. Forte		
49	404, 79	404, 8	"	"	Ferro. Forte		
50	403, 61	"	"	"			
H ₁	51 α	397, 13	397, 2	"	"	Calcio	
H ₂	56 β	393, 76	393, 6	"	"	Calcio	

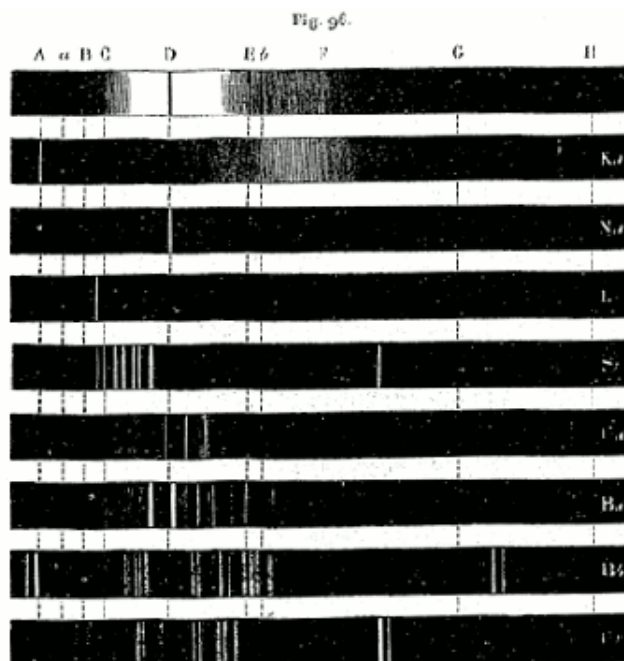
8.2 Confronto tra la luce solare e le altre luci. Inversione degli spettri

Il solo modo per arrivare a conoscere la natura e la causa delle righe nere che osserviamo nello spettro del Sole, è quello di studiare da questo punto di vista le altre luci, sia naturali, sia artificiali. Questo studio è facile e non richiede altri strumenti all'infuori dello spettroscopio di cui abbiamo già parlato; basta mettere la sorgente luminosa davanti alla fenditura attraverso i quali passano i raggi. Ma, affinché il confronto avvenga in modo pienamente esatto, si impiega la seguente modalità. Si dispone un piccolo prisma davanti alla fenditura in modo da coprirla per metà della sua lunghezza; le facce di questo prisma riflettono la luce da analizzare verso il tubo del cannocchiale parallelamente al suo asse; nello stesso tempo, un raggio di luce solare penetra dalla parte della fenditura rimasta libera. Si vedono allora nel campo dello strumento due spettri distinti, ma sovrapposti: uno prodotto dalla fiamma che si analizza, l'altro dal raggio solare. Siccome le due parti della fenditura compongono una sola linea retta, le righe che hanno lo stesso indice di rifrazione devono occupare posizioni identiche nei due spettri, e, di conseguenza, devono stare rigorosamente sul prolungamento l'uno dell'altra.

Seguendo questo metodo, si giunge alle seguenti conclusioni:

1° Supponiamo di esaminare corpi semplicemente incandescenti, come i carboni dell'arco voltaico, un filo di platino attraversato da corrente elettrica, la calce, il magnesio, lo zirconio riscaldato dalla fiamma del gas di idrogeno ossigenato, il carbonio in sospensione nella fiamma, ecc., si ottiene sempre uno spettro continuo, senza alcuna riga nera o brillante.

2° Tutte le volte che un corpo, bruciando a pressione normale, produce un composto gassoso, produce pure una fiamma il cui spettro è discontinuo. Così, la fiamma di una candela presenta sempre alla sua base una parte bluastra, nella quale avviene la combinazione di carbonio e ossigeno; questa parte dà uno spettro discontinuo, nel quale si distinguono tre gruppi di righe verdi e blu, nettamente separate tra loro e assai luminose. Si osserva lo stesso fenomeno nella combustione dei metalli. Il metodo più semplice di constatare tale fatto, è quello di bruciare del sodio infiammando una soluzione alcolica di sale marino; si ottiene così una riga molto intensa nel giallo, linea che si può dividere con strumenti più potenti. Il cloruro di rame, il nitrato di stronzio danno righe verdi e rosse che caratterizzano questo metallo. Le fiamme ordinarie danno una temperatura generalmente insufficiente; si impiegano pertanto lampade di Bunsen, o meglio ancora la scarica elettrica. Per utilizzare quest'ultima, si ricorre sia a una forte pila sia ad una bobina di induzione, e si fa scaturire la scintilla tra due reofori composti del metallo da studiare. In queste circostanze, mentre si effettua la combustione o la combinazione chimica, *una stessa sostanza dà sempre le stesse righe quando essa si trova alla stessa temperatura*. La fig. 96 mostra le righe principali che si sviluppano bruciando metalli alcalini: potassio (K), sodio (Na), litio (Li), stronzio (Sr), calcio (Ca), bario (Ba), rubidio (Rb), Cesio (Cs).



3° Se si fa variare la temperatura o il grado di combustione per i corpi composti, si ottengono spettri molto diversi tra loro. Quando si tratta di gas, la pressione alla quale si trovano al momento della combustione esercita una influenza molto grande: alcuni tra coloro che danno righe a bassa pressione forniscono spettri continui quando sono sottoposti ad una pressione molto alta, risultato che si attribuisce ad una temperatura più elevata. Si provano in genere i gas portandoli ad un grado sufficiente di rarefazione nei tubi chiusi noti sotto il nome di *tubi di Geisler*, nei quali si fa passare la scarica di una bobina di induzione. Si nota allora

che la maggior parte tra loro dà spettri diversi, secondo la tensione di scarica. Così, l'azoto dà un magnifico spettro scanalato quando si fa passare una scarica generata con una piccola tensione. Ma, quando si introduce un condensatore nel circuito, e la tensione della scarica diviene molto grande, allora lo spettro è discontinuo e composto di righe isolate, il cui aspetto è molto diverso dal precedente (Plücker). La stessa cosa si ha per l'ossigeno, il carbonio, lo zolfo, ecc. In queste esperienze, i gas si comportano circa come vapori metallici; ma, in genere, il loro spettro è molto complesso. L'idrogeno dà quattro righe principali, una nel rosso, la seconda nel blu, e altre due nel violetto; presente pure un grande numero di righe più deboli, la cui intensità varia con l'aumentare della tensione. Quando la pressione è più alta, le righe intense indicate sopra si dividono formando delle bande (Wüllner), e infine si finisce per avere spettri continui con forti tensioni (Frankland).

4° La maggior parte dei metalli dà spettri discontinui, composti da alcune righe brillanti e di larghe bande oscure; questi spettri sono quindi inversi di quelli del Sole, nel quale la parte luminosa è quella che prevale. Vi sono tuttavia alcune sostanze che fanno eccezione e che danno uno spettro composto da un gran numero di righe brillanti, come il ferro, per esempio. Alcuni metalli appaiono pure mostrare uno spettro continuo nel quale si notano alcune righe brillanti; è ciò che avviene per il magnesio bruciato in aria. Ma, in questo caso, lo spettro continuo proviene dall'ossido che si forma e che agisce alla maniera dei corpi incandescenti.

5° Il risultato più sorprendente è quello che si ottiene sovrapponendo, come da noi indicato, lo spettro del Sole a quello di un metallo. Si trova che, per un buon numero di sostanze, le righe brillanti corrispondono esattamente a certe righe nere dello spettro solare. Così, le righe caratteristiche del sodio coincidono in modo preciso con le righe *D* di Fraunhofer; le righe che l'idrogeno produce nel rosso, nel blu e nel violetto, coincidono con le righe *C* e *F*, e con la 38^a e la 46^a di Van der Villingen (si veda la tabella sopra); le righe principali del ferro corrispondono pure a righe ben determinate della luce solare. M. Kirchoff ha trovato più di sessante coincidenze, Angström ne ha trovate fino a 490. Nella tabella inserita alla fine della precedente sezione, abbiamo indicato il nome delle sostanze le cui righe corrispondono a quelle del Sole; ma la nostra tabella è incompleta, e avremmo potuto aggiungere un gran numero di metalli che non vi compaiono, se avessimo potuto tracciare tutte le righe. Attualmente, le righe la cui presenza è stata constatata nello spettro solare sono le seguenti, secondo M. Angström:

Idrogeno	4
Sodio	9
Bario	11
Calcio	75
Magnesio	4 + (3)?
Alluminio	2 (?)
Ferro	450
Manganese	57
Cromo	18
Cobalto	19
Nickel	33
Zinco	2
Rame	7
Titanio	200

Questo risultato, inatteso e contrario a tutte le previsioni, sollecitò fortemente la curiosità dei fisici; ne cercarono avidamente la spiegazione e non tardarono a trovarla. Foucault aveva notato una singolarità nella combustione del sodio. Questo metallo dà di solito una riga brillante corrispondente alla riga *D*; ma, quando lo si brucia in grande quantità, per esempio nell'arco voltaico, si vede, in alcune circostanze, apparire uno spettro molto esteso e quasi continuo, nel quale la linea gialla è sostituita da una riga nera. Ciò rimase isolato e inspiegato fino a quando Kirchoff lo ricondusse nella teoria generale. Questa riga nera era prodotta dall'assorbimento del vapore di sodio che circondava il punto luminoso.

Si conoscevano da lungo tempo esempi di assorbimento prodotti da vapori. Per esempio, quando la luce solare ha attraversato uno strato di acido ipoazotico o di vapore di iodio, mostra righe non presenti in precedenza. Questo fatto si osserva anche quando si guarda attraverso questo gas una fiamma a spettro continuo; le righe dovute all'assorbimento compaiono ancora e sono facilmente riconoscibili.

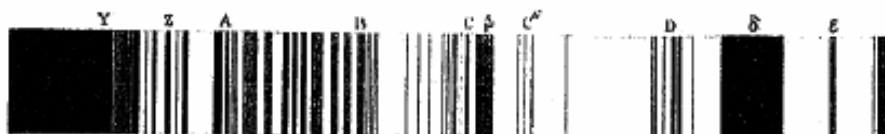
I gas che formano la nostra atmosfera hanno un potere di assorbimento molto alto; possono quindi, facendo scomparire alcune righe luminose, produrne alcune osservabili nello spettro. Questo assorbimento atmosferico è tanto maggiore quanto più spesso è lo strato attraversato dalla luce, e lo spettro deve variare con la posizione del Sole; le righe devono essere meno numerose quando è quasi allo zenit, più abbondanti quando è vicino all'orizzonte. È facile osservare questa differenza con un semplice prisma o con uno spettroscopio di Hoffmann. La fig. 1, Tavola 1, dovuta a M. Janssen, offre un'idea di queste variazioni per la parte meno rifrangibile dello spettro.

Fig. 1. (Janssen)



Nel rosso estremo, si manifestano larghe bande nere, non presenti quando il Sole era più alto. Nell'arancio soprattutto, tra C e D , vicino alla riga 8β di Van der Villingen, si vede la formazione di una linea chiamata C^6 da Brewster (fig. 2, Tavola 1), seguita da parecchi tratti paralleli tra loro.

Fig. 2. (Brewster.)



Tra C^6 e D , si forma di solito un gran numero di righe, e alcuni di quelle che esistevano già divengono notevolmente più larghe. Oltre D si forma anche una grande banda composta di righe molto sottili, ma divengono molto scure, e le diverse linee componenti sono molto poco spaziate tra loro. Infine, si nota un altro gruppo nel verde, circa a metà dell'intervallo che separa b e F ; il violetto ne contiene pure un certo numero.

Alcune di queste righe sono dovute, senza alcun dubbio, ai gas della nostra atmosfera; i gruppi del verde, in particolare, appartengono all'azoto. Quelli che si trovano nel giallo e nel rosso sono quasi esclusivamente dovuti al vapor acqueo. Lo abbiamo constatato esaminando questi spettri, in diverse circostanze atmosferiche, notando il momento in cui le righe apparivano con l'abbassarsi del Sole che si avvicinava all'orizzonte, e infine analizzando durante la notte la luce emessa dalle fiamme poste a grande distanza. Inoltre, abbiamo visto queste stesse righe manifestarsi nel momento in cui nubi leggere passavano davanti al disco del Sole, ciò che mostra il ruolo del vapor acqueo in esse contenuto. M. Janssen ha confermato la nostra spiegazione esaminando la fiamma di un gas attraverso un tubo riempito di vapore acqueo ad alta pressione. Alcune righe, tuttavia, potrebbero derivare da sostanza ancora sconosciute, che sono distribuite in numero assai grande nella nostra atmosfera.

Uno spettro può quindi essere discontinuo per due motivi ben diversi: 1° poiché, in realtà, le righe emesse dalla sorgente luminosa non sono continue: tale è la luce delle scariche elettriche e quella dei metalli volatilizzati; 2° lo spettro può divenire discontinuo per l'azione assorbente di una sostanza gassosa o di un vapore: i vapori metallici essendo molto assorbenti, come abbiamo osservato per il sodio, potrebbero produrre un risultato simile nella luce solare; Kirchoff lo ha verificato con semplici tubi, riempiti di vapore di sodio con la fiamma di qualche altro metallo.

Il risultato più importante di queste ricerche, è che a una bassa temperatura, un vapore assorbe precisamente i raggi luminosi che la stessa sostanza emetterebbe se fosse incandescente. Così il vapore di sodio produce, dal suo assorbimento, righe nere brillanti durante la sua combustione. Questo fatto generalizzato costituisce ciò che si chiama *l'inversione dello spettro*, e si può enunciare in forma generale il seguente principio: *Un vapore assorbe precisamente le righe che emette quando è incandescente; di modo che il potere emissivo e il potere assorbente sono complementari tra loro.* Questa regola suppone sempre, come condizione essenziale, che il vapore assorbente si trova ad una temperatura più bassa di quella del corpo irraggiante.

La teoria fisica di questi fenomeni è assai facile da stabilire con un semplice confronto tra l'ottica e l'acustica, confronto al quale ci portano naturalmente le ipotesi attuali, secondo le quali la luce risulta dalle ondulazioni di un fluido etereo. Un grande numero di corpi sonori, a causa delle loro forme irregolari, possono emettere solo dei rumori risultanti da una moltitudine di suoni confusi e corrispondenti a lunghezze d'onda diverse; ve ne sono altri, al contrario, che, trovandosi in condizioni migliori, producono suoni musicali perfettamente precisi e determinati; questi suoni musicali sono prodotti da vibrazioni tutte isocrone, e si propagano mediante ondulazioni tutte della stessa lunghezza d'onda; sono tutt'al più accompagnate da qualche armonica alla quinta, all'ottava, ecc.

Si ha qualcosa di analogo per i corpi luminosi. I corpi semplicemente incandescenti, trattenuti e bloccati da legami molecolari, emettono ondulazioni di tutti i tipi e di tutte le lunghezze, i cui indici di rifrazione assumono tutti i valori possibili entro due limiti estremi; da ciò risulta necessariamente uno spettro continuo. Le stesse sostanze ridotte sotto forma di vapore, perdono gran parte dei legami, vibrano con maggiore libertà, emettono onde luminose la cui lunghezza dipende unicamente dalla massa vibrante e dalla forza viva. Queste onde sono in piccolo numero e precisamente definite; tutt'al più sono accompagnate da qualche altra ondulazione che potremmo chiamare *armoniche* e le cui lunghezze hanno rapporti confrontabili con quella dell'onda principale.

Per esempio, le righe C e F dell'idrogeno sono dovute a raggi le cui lunghezze d'onda stanno quasi rigorosamente nel rapporto 4 a 3, rapporto che caratterizza in acustica l'intervallo tra do e fa ; la differenza è solo di $\frac{1}{81}$. La terza riga del violetto, confrontata con la riga C , dà il rapporto di $\frac{9}{8}$ a $\frac{5}{3}$, con una differenza pure molto piccola; trascurando tale differenza avremo il rapporto che caratterizza l'intervallo tra il re e il la . Secondo M. Ilinricks, se si studiano le differenti righe di una stessa sostanza, si trova che le loro lunghezze d'onda possono essere rappresentate dai termini di una progressione aritmetica; la ragione di tale progressione rimane costante per uno stesso gruppo; si può sempre esprimere con un numero molto semplice, che dipende dalla forma e dal volume degli atomi.

Queste teorie possono presentare a volte difficoltà di dettaglio, ma non è contestabile il principio generale che ne è il fondamento: le molecole perfettamente libere di un gas devono vibrare in modo semplice e ben definito, assolutamente come i corpi di forma e massa determinate che si utilizzano in acustica per produrre suoni musicali di grande purezza.

Si ha spesso che alcuni corpi sonori, capaci di restituire suoni musicali ben determinati, si mettano in vibrazione *per simpatia*. Basta in questo caso che, nelle vicinanze, uno strumento qualsiasi faccia produca il suono che questi corpi sono capaci di produrre, o anche una delle sue armoniche. È così che le corde di un'arpa o di un violino possono, senza essere state dirette pizzicate, mettersi a risuonare sotto la sola azione delle onde aeree di cui sembrano comprendere il linguaggio. Le molecole di un gas devono subire qualcosa di simile, relativamente alla luce. Quando sono colpite da onde eteree, queste molecole sono il più delle volte indifferenti, poiché non sono in grado di vibrare all'unisono. Ma, se si verifica un moto vibratorio corrispondente alla lunghezza d'onda che esse possono pure produrre, o avente con questa lunghezza un rapporto molto semplice, esse ne subiranno immediatamente l'influsso, come le corde sonore per le vibrazioni aeree. Ma allora, le molecole così mosse assorbono il lavoro dell'onda luminosa che le urta, e, essendo il moto pure intercettato dal mezzo attraversato, il raggio luminoso cesserà di propagarsi e sembrerà estinguersi. Uno strato di molecole gassose può quindi assorbire i raggi che gli sono simpatici, cioè quelli che corrispondono alla lunghezza d'onda che può produrre vibrando, cioè una sostanza ridotta allo stato gassoso o di vapore assorbe precisamente i raggi che questa stessa sostanza è in grado di emettere quando è incandescente. È ben vero che, per questo assorbimento, la massa gassosa aumenta la propria forza viva, la sua temperatura cresce, e che, di conseguenza, diviene essa stessa irraggiante, e tende a sostituire una riga luminosa alla riga nera che essa produce. Ma la linea nera non potrà scomparire se non nel momento in cui lo strato gassoso avrà acquisito uno splendore uguale a quello della sorgente, condizione difficile da ottenere quando la massa del gas presenta uno spessore molto grande.

Può succedere che l'assorbimento sia dovuto a un gas che, invece di generare onde della stessa lunghezza di quella che cercano di attraversarlo, sia solo in grado di produrre le *armoniche* di queste stesse ondulazioni.

Allora l'assorbimento non sarà completo, le righe non saranno perfettamente nere, ma il loro colore più o meno scuro contrasterà sempre sul resto dello spettro.

La teoria esposta è attualmente ammessa dai fisici, e si può dire che è confermata dalla differenza esistente tra l'assorbimento prodotto dai gas e quello dei corpi liquidi e solidi. Nel primo caso, le righe sono sempre nette, veramente terminate e perfettamente isolate tra loro. Nel secondo caso, al contrario, l'assorbimento produce grandi zone nebulose e mal determinate, che non si possono risolvere in righe semplici, distinte tra loro. Questo risultato è evidentemente dovuto a fatto che i legami molecolari, assai forti nei solidi e anche nei liquidi, sono molto deboli o quasi nulli nei gas.

I legami della coesione molecolare non sono i soli che contribuiscono a determinare la natura di questo assorbimento; i legami dell'affinità chimica e lo stato di combinazione esercitano anche un'influenza notevole. Così, una semplice miscela di idrogeno e azoto, compressa in modo da occupare lo stesso volume del gas di ammoniaca che potrebbero produrre, assorbe una quantità di calore molto piccola; assai diversamente dall'ammoniaca, che, nelle stesse circostanze, manifesta un potere assorbente sessanta volte maggiore. Si può dire altrettanto dell'ossigeno e dell'idrogeno: la loro miscela possiede un potere assorbente molto minore di quello del vapore acqueo che risulta dalla loro combinazione. In generale, i gas semplici hanno un potere assorbente molto piccolo, e, di conseguenza, emettono anche molto poca luce, anche quando la loro temperatura è molto elevata; è per questo che la miscela di ossigeno e di idrogeno dà una fiamma molto pallida, sebbene molto calda.

Oltre alle radiazioni luminose, il Sole emette anche radiazioni chimiche e termiche; ne parleremo in seguito. Applichiamo ora allo studio della fotosfera e della sua costituzione i principi esposti.

8.3 Applicazione dei principi precedenti alla costituzione della fotosfera solare

È ora molto facile spiegare la presenza di righe nere nello spettro solare. Queste lacune non sono diverse dalle righe di assorbimento prodotte da vapori metallici presenti nell'atmosfera solare.

Abbiamo visto, nel Capitolo precedente, che questo astro è circondato da una atmosfera la cui altezza è uguale a parecchi diametri terrestri; lo deriviamo da numerose osservazioni fotografiche fatte durante le eclissi, e la cui autorità è incontestabile, e possiamo affermare che l'altezza di questa atmosfera è compresa tra la metà e

un terzo del raggio solare. Vi abbiamo direttamente constatato la presenza dell'idrogeno come componente uno strato rosa che circonda il Sole da tutte le parti e produce le protuberanze. Se teniamo conto della temperatura estremamente elevata che regna in questa atmosfera, dobbiamo ammettere che essa contiene, allo stato di vapore, un gran numero di sostanze metalliche che vediamo comunemente allo stato solido, per esempio il sodio, il potassio, il magnesio, il calcio e anche il ferro e altri metalli poco fondibili. Partendo dalla legge del quadrato della distanza, siamo portati a concludere che la temperatura del Sole è di parecchie migliaia di gradi; vedremo che essa è in realtà di parecchi milioni. Ma, anche fermanosi a questo limite inferiore, possiamo dire con certezza che, in queste circostanze, tutti i metalli da noi nominati sono ridotti allo stato di vapore. Si conosce ovunque la fabbricazione dell'acciaio con il metodo di Bessener. Questo procedimento consiste nell'eliminare il carbonio dalla fonte inviando una corrente d'aria compressa attraverso la massa in fusione. Durante questa operazione, nel momento stesso in cui si inizia a soffiare, la fiamma produce uno spettro continuo presentando al massimo le righe del sodio dovute a frammenti di carbonio o a polveri atmosferiche. Ma, quando l'operazione giunge al termine, con il carbonio quasi completamente consumato, e con la temperatura particolarmente alta, si vedono nuovamente apparire le righe del sodio, poi lo spettro perde poco a poco la sua continuità, si vedono le righe brillanti del calcio, del magnesio, e soprattutto quelle del ferro. Lo spettro è allora magnifico; oltre alle righe indicate, ve ne sono ancora in gran numero, provenienti da sostanze che trovano nei minerali. La temperatura che si produce allora non supera tuttavia i 3000 gradi, e si può concludere che basta qualche migliaio di gradi per volatilizzare i metalli meno fondibili.

Si può quindi ammettere che l'atmosfera del Sole contiene vapori metallici, e che questi vapori, per il loro potere assorbente, producono lacune che costituiscono le righe di Fraunhofer. Questa induzione non è necessaria. Il solo fatto della coincidenza perfetta delle righe dello spettro solare con le righe brillanti dei metalli, se ci riferiamo ai principi esposti, prova direttamente e in modo sufficiente, l'azione e di conseguenza la presenza dei vapori metallici nel Sole. Se partiamo da questi dati, e se studiamo le relazioni che esistono tra le righe dello spettro solare e quelle brillanti che caratterizzano le diverse sostanze, ci convinceremo che il Sole contiene, allo stato di vapore, nella sua atmosfera, il sodio, il magnesio, l'idrogeno, il calcio, il bario, il ferro, il cromo, il manganese, il nickel, il cobalto, il rame, lo zinco. Malgrado le differenze estreme che esistono tra le loro densità, tendono a mescolarsi tra loro, come i comuni gas. Tuttavia, troveremo i vapori molto pesanti più abbondanti nelle parti più basse di questo involucro.

Questa teoria suppone l'introduzione di due ipotesi fondamentali: 1° al di sotto dell'atmosfera che produce l'assorbimento, esiste uno strato luminoso che, nelle sue radiazioni, emette raggi di ogni tipo, e produce, di conseguenza, uno spettro continuo; 2° l'involucro atmosferico, nel quale si trovano i metalli volatilizzati, si trova ad una temperatura inferiore a quella dello strato luminoso.

La prima ipotesi si può estendere in due modi. La fotosfera può essere composta, come le nostre nubi, da una specie di nebbia dovuta alla condensazione dei vapori metallici; sarebbe cioè un ammasso di goccioline liquide, o anche di polvere solida estremamente sottile, che possiede, in virtù della sua condensazione, un grande potere emissivo. Questa era l'idea di Wilson. Si può anche pensare che la fotosfera è gassosa come il resto del corpo solare, ma che la forte pressione alla quale è sottoposta le comunica il potere di emettere raggi di ogni tipo, e di produrre uno spettro continuo. La prima spiegazione si accorda meglio con le apparenze che presentano le macchie e con le osservazioni da noi esposte nei capitoli precedenti. La seconda si basa sull'ipotesi di una forte pressione la cui esistenza sembra lontana dall'essere dimostrata alla superficie visibile del Sole, sebbene debba essere considerevole a grande profondità. Infatti, risulta da tutti i lavori e da tutte le osservazioni che l'atmosfera trasparente del Sole produce solo una rifrazione molto piccola sui raggi che la attraversano; è alquanto difficile pensare che questo debole potere rifrangente si concili con una pressione molto grande. Inoltre, le righe dell'idrogeno rimangono sottili solo fino alla pressione di 440 *mm*, oltre la quale si allargano (Wullner); ne deduciamo che lo strato visibile del Sole non regge una pressione notevolmente più grande. È ben vero che, sul Sole, la gravità è ventotto volte maggiore di quella sulla superficie della Terra, ma è anche possibile che la forza espansiva del calore apporti una compensazione più che sufficiente. Questa questione richiede evidentemente di essere chiarita mediante ulteriori ricerche. Per il momento, ammetteremo come più probabile la spiegazione di Wilson.

Quanto alla inferiore temperatura di questo strato esterno, è facile da giustificare. Lo strato atmosferico, che è più lontano dal centro, è anche quello che più immediatamente esposto agli effetti dell'irraggiamento. È quindi naturale che si raffreddi più velocemente, e che la sua temperatura sia inferiore a quelle degli strati più interni. Rimane però ancora gassoso, vista la sua temperatura elevata e la natura delle sostanze che la compongono, e sebbene una parte dei vapori raggiunga la condizione di saturazione e si condensi, ne rimane, tuttavia, una certa quantità allo stato di fluido elastico, come succede nella nostra atmosfera per il vapore acqueo che si trova al di sopra delle nubi.

Da quanto detto, lo strato incandescente che produce uno spettro continuo non è altra cosa della stessa fotosfera; ma siccome i raggi che ce la fanno percepire devono attraversare l'atmosfera circostante, qualunque sia il punto verso il quale si dirige lo spettroscopio, si trova sempre uno spettro discontinuo, e se si esaminano le protuberanze, uno spettro a righe brillanti. Ma, studiando con maggiore attenzione il bordo del disco, siamo

riusciti a vedere uno strato molto sottile il cui spettro appare continuo. Dato l'interesse di questa scoperta, entreremo in qualche dettaglio.

Abbiamo impiegato un cannocchiale di 25 cm di apertura, avente un forte potere di ingrandimento, e montato equatorialmente. All'oculare, adattiamo uno spettroscopio con almeno tre prismi dispersivi. Con la fenditura parallela al bordo, regoliamo il movimento temporale del cannocchiale, in modo da permettere al disco solare di avvicinarsi poco alla volta al campo dello strumento. Allora abbiamo potuto constatare i seguenti fenomeni: 1° ad una piccola distanza dal bordo, la luce esterna è molto intensa per produrre uno spettro rigato di nero, nel quale si possono nettamente distinguere le righe più sottili; 2° riducendo ancora la distanza, si vedono apparire le righe brillanti delle protuberanze e dello strato rosato; 3° queste righe brillanti perdono la loro intensità e arriva un momento in cui tutte le righe nere scompaiono, tranne le più intense, come la *D* e la *b*; 4° lo strato che produce un tale spettro continuo è estremamente sottile; si vede ben presto apparire lo spettro rigato di nero che annuncia il reale bordo del disco solare.

Il fenomeno osservato nella terza fase si può spiegare solo in due modi: o lo strato che vediamo è quello che irraggia direttamente e fornisce uno spettro discontinuo, oppure è esso che inverte parzialmente le righe nere di certi metalli, così come lo strato rosa inverte quelle dell'idrogeno; in questa ultima ipotesi, questo stesso strato avente un potere troppo piccolo per rendere brillanti le righe sulle quali agisce, produrrà solo una inversione parziale, cioè un indebolimento apparente delle righe, come avviene per l'idrogeno al di là delle protuberanze. L'ultima ipotesi non sembra la più vicina alla verità.

Non ci si deve sorprendere di veder persistere le righe *D* e *b*, poiché questi vapori hanno una debole densità e un grande potere assorbente. Dopo l'idrogeno e i gas propriamente detti, questi corpi sono quelli che hanno il peso specifico più piccolo, e che, di conseguenza, allo stato di fluido elastico sono più leggeri. I loro vapori devono quindi innalzarsi a grandi altezze, e siccome sono molto assorbenti, dovranno, anche in piccole quantità, produrre righe molto scure e quasi nere. L'esperienza ci mostra, infatti, che sotto uno spessore di solo qualche metro, il vapore di sodio inverte lo spettro così brillante della luce elettrica. M. Lockyer ha osservato le righe dirette di questi vapori in alcune protuberanze, così come noi abbiamo osservato quelle del magnesio e del ferro.

L'osservazione descritta è molto delicata e difficile, richiede circostanze eccezionali e grandi precauzioni. L'immagine solare deve essere molto nitida e perfettamente tranquilla; è necessario impiegare un notevole ingrandimento e servirsi di uno spettroscopio molto potente.

Il fenomeno che segnaliamo qui è perfettamente in accordo con quanto da noi osservato durante l'eclissi del 1860. Dopo aver visto scomparire il bordo solare, segnalammo uno strato atmosferico molto bianco e brillante, poi apparve lo strato rosato e le protuberanze. Ora sembra che questo parte molto brillante dell'atmosfera solare, che abbiamo osservato tra lo strato rosa e il reale bordo del Sole, è quella stessa che produce lo spettro continuo.

Si potrebbe spiegare da ciò un fatto osservato da M. Rziha nell'eclissi del 1868. Questo fisico ha trovato che la corona o atmosfera solare, dà uno spettro continuo¹. Ora il sottile strato di cui parliamo è solo la parte più intensa della corona, quella nella quale fluttua lo strato di idrogeno. Questo elemento, a causa della sua piccola densità, si innalza al di sopra di tutti gli altri; ma è evidente che esso non forma, come si è preteso, il limite estremo dell'atmosfera solare. Le forme definite e nette che presentano le protuberanze provano che l'idrogeno che le costituisce fluttua in sospensione in un gas più leggero, ma che esercita tuttavia una pressione significativa. Le osservazioni della corona durante le eclissi provano d'altra parte che l'atmosfera si estende ben oltre le protuberanze.

Finora, non si è giunti a riconoscere la sostanza alla quale appartiene la riga gialla che brilla nelle vicinanze del punto *D*. Chi sa se essa non appartiene all'idrogeno dissociato, cioè agli elementi costitutivi di questo gas? Le osservazioni mostrano che questa riga non subisce sempre le stesse alternative delle altre righe dell'idrogeno. Essa è spesso debole, mentre, in numerose circostanze, essa è alquanto più intensa e più lunga della stessa riga *C*, e ciò fa supporre una sostanza differente dall'idrogeno, ma almeno leggero quanto lui.

L'atmosfera solare deve contenere tutti i tipi di vapori, come già detto, ma ciò non impedisce che essi si innalzino ad altezze tanto maggiori quanto sono più leggeri. È quanto si potrà riconoscere nella tabella seguente, nella quale le sostanze la cui presenza è stata segnalata nel Sole sono distribuite in ordine crescente del loro peso atomico. Abbiamo inserito in questa tabella l'alluminio, il silicio e il potassio, sebbene la loro presenza nel Sole non sia pienamente dimostrata:

Idrogeno	1	Cromo	52,0
Sodio	23	Manganese	52,5
Magnesio	24	Ferro	56,0
Alluminio	27	Rame	63,5
Silicio	28	Zinco	65,0
Potassio	30	Bario	137,0 o 2 × 68,5
Calcio	40		

¹ Il 7 agosto 1869, gli astronomi americani hanno visto, nel verde, una riga brillante su questo fondo uniforme. Questa osservazione non è in contraddizione con quella di M. Rziha.

Se un gran numero di corpi, visti come semplici dai chimici, e particolarmente i metalli preziosi, non sono ancora stati riconosciuti nel Sole, non è sufficiente ad escluderne la presenza; questo fatto, puramente negativo, può derivare dal fatto che questi metalli, a causa della densità considerevole dei loro vapori, si trovano rinchiusi in regioni profonde e inaccessibili all'analisi spettrale.

In tutto quanto detto, abbiamo sempre supposto che le sostanze che esistono in questa regione del Sole possono dare solo spettri continui. È tuttavia possibile che si abbiano anche corpi capaci di dare direttamente righe luminose che sfuggono del tutto all'assorbimento. Si può citare come prova di questa possibilità la riga gialla che brilla nello spettro delle protuberanze. Questa riga esiste, in realtà, nello spettro ordinario; il suo splendore è anche significativo, così come quello di altre poste nel verde e nel rosso. Non possiamo entrare in questo tema in maggiori dettagli; rinviamo il lettore alle numerose Comunicazioni che abbiamo inviato all'Istituto di Francia, e che sono state inserite nei *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences* del 1868 e 1869.

8.4 Analisi spettrale delle macchie. Conseguenze relative alla costituzione del Sole

I procedimenti consueti dell'analisi spettrale ci fanno conoscere l'insieme dei raggi che emanano dal Sole dopo aver attraversato la sua atmosfera; ma ci si può chiedere se tutte le parti del globo solare emettono raggi identici e danno origine a spettri perfettamente simili. Sembra ben difficile che, su una superficie di così grande dimensione, vi sia una omogeneità completa, e naturalmente il pensiero si riporta alle macchie; si è portati a chiedersi se queste regioni, così diverse dalle altre da tanti punti di vista, non debbano presentare particolarità significative per quanto riguarda le radiazioni che inviano.

Abbiamo tentato di risolvere questo problema, e abbiamo cercato di ottenere immagini delle macchie il più amplificate possibili. Abbiamo impiegato a tale scopo il nostro grande equatoriale di Merz. Ponendo a una piccola distanza del fuoco un obiettivo acromatico di un microscopio di Amicci, otteniamo una immagine del Sole, che, proiettata su uno schermo, avrà il diametro di 22 o 23 centimetri; l'immagine delle macchie si presentava allora con grande rilievo, e, per una coincidenza molto fortunata, il numero delle macchie era stato considerevole nei mesi di aprile e maggio 1869, e ci ha consentito di studiarle attentamente, e di seguire con successo le diverse fasi che presentano. L'immagine delle macchie raggiungeva talvolta un diametro superiore a 1 cm, di modo che limitando con diaframmi la lunghezza della fenditura a circa 2 mm, era possibile esplorare le diverse parti dell'ombra e della penombra. Abbiamo impiegato prismi molto potenti, il cui numero variava da 3 a 5. Le misure erano prese sia con una scala graduata sul vetro e adattata all'oculare, sia con fili micrometrici. Nel seguito del nostro lavoro, tutte le righe sono state confrontate con le figure di Kirchoff, ma qui le riferiremo a quelle di Van der Willigen che abbiamo già riprodotto.

Ecco i risultati ai quali siamo giunti, e che, siamo felici di dire, sono stati in larga parte confermati da M. Lockyer:

1° Dirigendo lo spettroscopio verso le diverse regioni del disco solare si trovano dappertutto le stesse righe principali. Quanto alle righe secondarie, non possiamo essere altrettanto affermativi; esse svaniscono in certi punti, ma la loro scomparsa può essere l'effetto di un maggiore splendore della luce in tali punti. Tuttavia, vicino al bordo, si notano variazioni considerevoli. Parecchi sistemi di linee molto sottili, che si notano difficilmente al centro, divengono più visibili; esse presentano nello stesso tempo un aspetto indeciso e come nebuloso, i loro bordi non sono nettamente definiti. Per fare con rigore uno studio comparativo, bisognerebbe giungere a sovrapporre gli spettri di due punti del disco lontani tra loro; ci si assicurerebbe se le differenze riguardano solamente l'intensità della luce o la posizione delle righe. Ci è stato impossibile impiegare uno strumento che desse tale risultato, ma abbiamo constatato che una semplice diminuzione dell'intensità luminosa non può produrre un simile effetto; questo risultato è quindi unicamente dovuto al maggiore spessore dello strato atmosferico che i raggi attraversano vicino al bordo. Soprattutto le righe *D* sono talmente diffuse che è impossibile non riconoscerle un effetto dovuto all'assorbimento.

2° Nelle vicinanze delle macchie, e principalmente sulle facole che le circondano, le righe dell'idrogeno sono sempre più deboli; qualche volta esse scompaiono completamente e finiscono pure per invertirsi. La riga *C* è quella che subisce le maggiori variazioni. La riga *F* non scompare mai del tutto; essa è accompagnata da un'altra riga nera che non appartiene all'idrogeno. Questi fenomeni si spiegano perfettamente ora. Abbiamo visto che, nelle vicinanze delle macchie, vi sono di solito enormi protuberanze composte di gas di idrogeno; queste protuberanze ci darebbero righe brillanti se fossero isolate, ma inondate come sono dalla clamorosa luce del Sole, esse producono appena un effetto uguale all'assorbimento dello strato circostante. Quando sono molto brillanti, possono produrre un effetto più considerevole e produrre realmente righe brillanti come spesso avviene.

Quando una macchia è vicino al bordo, si vedono molto spesso le righe brillanti dell'idrogeno sconfinare sullo stesso disco solare, e prolungarsi di parecchi secondi fino al nucleo oscuro; là si arrestano bruscamente. Tuttavia, quando un punto attraversa il nucleo, e soprattutto quando vi sono velature rosse nei nuclei, si ritrova la riga *C* capovolta o almeno molto ridotta.

3° Nell'interno delle macchie, lo spettro subisce una profonda modifica. Tutta l'armonia e il rapporto delle intensità luminose si trova modificato. Certe righe, che di solito sono appena visibili, divengono molto nere e molto larghe; altre divengono imprecise ai bordi; altre infine restano senza alcuna variazione. È evidente che simili modificazioni non potrebbero essere attribuite a una semplice diminuzione nell'intensità luminosa; siamo quindi in presenza di un assorbimento speciale e selettivo prodotto da certe sostanze presenti nell'interno delle macchie. Vi sono pertanto fenomeni ben delineati che analizziamo.

A. Nello spettro si distinguono parecchi sistemi di righe molto sottili, molto ravvicinate, equidistanziate tra loro; si è dato a questi gruppi il nome di *persiane*, a causa del loro aspetto. Nelle macchie, queste righe divengono diffuse e nebulose, come si può vedere per le righe 6, 7, 8, 9 della figura di Van der Willinge, e nelle vicinanze delle righe 14, 15. I gruppi di righe che si formano in questi posti hanno una intensità gradualmente crescente o decrescente; sono molto distinte, ma nebulose. Nella regione del verde, se ne trova un gran numero che divengono molto nere nelle macchie, mentre, per le parti più luminose del Sole, le si distingue con difficoltà. Questi gruppi non sembrano tuttavia essere nuove formazioni del tutto particolari per le macchie; essi corrispondono solitamente a righe molto deboli indicate da Kirchoff; ma queste righe hanno nelle macchie uno sviluppo straordinario, ed è questo un fenomeno distinto e caratteristico. Non si conoscono ancora le sostanze che producono queste persiane, ma sembra che siano gassose; il vapore acqueo ne produce di simili e a volte nella stessa posizione.

B. Parecchie righe metalliche si dilatano in modo considerevole, conservando i loro bordi nettamente distinti. È facile constatare questo allargamento nelle righe 10, 11, 12 di Van der Willingen. Nel verde, ve ne sono che divengono tre o quattro volte più larghe quando le macchie sono rotonde e profonde. Abbiamo constatato questo fenomeno su un gran numero di righe, che sarebbe troppo lungo indicare qui. Diremo solo che per quelle del calcio e del ferro, il fatto è più saliente.

C. Anche le righe del sodio si allargano, ma, contrariamente alle altre, esse divengono diffuse ai bordi e veramente nebulose. È tuttavia difficile vedere la presenza di modifiche propriamente dette della riga metallica stessa, o se invece deriva dall'azione di agenti esterni, come succede a queste stesse righe quando il Sole è vicino all'orizzonte, e, di conseguenza, l'atmosfera terrestre esercita un'influenza maggiore. Nel verde, abbiamo ancora righe che divengono diffuse, soprattutto tra *b* ed *E*.

D. Le righe metalliche si allargano gradualmente dopo il bordo esterno della penombra fino al nucleo, di modo che le loro estremità finiscono in punti affilati (fig. 97).

Fig. 97.



4° Oltre a queste modifiche caratteristiche presentate dalle righe, si vede variare anche l'intensità luminosa delle diverse parti dello spettro, soprattutto nel rosso, giallo e verde. Si vede la formazione di bande scure, soprattutto nei punti *B* e *C* e nelle vicinanze di *D*; se ne osserva una vicino alla riga 16, un'altra vicino al punto 8, e un grande numero tra 20 e 17. Queste variazioni nell'intensità sono facilmente osservabili, ma difficili da valutare, poiché non presentano nulla di ben definito; il fenomeno è tuttavia incontestabile, ed è indipendente dall'allargamento delle righe nere, poiché lo spazio compreso tra 9 e 13 risulta molto brillante, malgrado l'allargamento delle righe del calcio e del ferro.

5° Malgrado l'assorbimento molto significativo che si osserva all'interno delle macchie, vi sono righe che rimangono perfettamente brillanti, senza subire la minima variazione in intensità. Le loro posizioni corrispondono a intervalli indicati da Kirchoff come privi di righe. Queste posizioni, sulla figura da noi riprodotta, si trovano circa tra la 14 e 15, tra 16 e 17, 17 e 18, 19 e 20, 21 e 22.

6° Vi è una grande analogia tra l'assorbimento che si ha all'interno delle macchie e quello osservabile quando il Sole è vicino all'orizzonte; ma le nuove righe che si producono e quelle che si allargano non sono le stesse in entrambi i casi. Così, la riga C^6 di Brewster, che diviene molto larga quando il Sole si trova all'orizzonte, è invisibile nelle macchie. Tuttavia la banda che si trova oltre il punto *D*, e che Brewster ha indicato con la lettera δ , sebbene prodotta dall'atmosfera terrestre, esiste tuttavia indipendentemente da questa stessa atmosfera, poiché, quando il Sole si avvicina all'orizzonte, la si vede comparire sul nucleo delle macchie, quando è ancora invisibile su tutti gli altri punti del disco. Crediamo che le righe nebulose comprese tra 7 e 8 siano dovute al vapore

acqueo, poiché esse sono fortemente rafforzate quando il Sole è all'orizzonte; esse lo sono anche per un semplice circo passante davanti al disco solare.

I fenomeni analizzati provano quindi che le macchie sono regioni in cui l'assorbimento è maggiore, e il rinforzo delle righe che si manifesta al bordo del disco dipende evidentemente dalla stessa causa. Vi è tuttavia una differenza tra questi due assorbimenti, poiché, mentre vicino al bordo si nota soprattutto un assorbimento che appare dovuto proprio ai gas, si osserva nelle macchie l'assorbimento proprio dei metalli. Quando le macchie sono superficiali, si vede semplicemente rafforzarsi la riga *D*. Quando sono di media profondità, si rafforzano pure le righe del calcio, ma non si nota alcun cambiamento in quelle del ferro. Infine, quando le macchie sono molto profonde, le righe del ferro subiscono a loro volta una notevole dilatazione, ma inferiore a quella del calcio. Il fondo delle macchie sarà quindi occupato da vapori metallici assai densi, per esempio quelli del ferro e del calcio. Il sodio e il calcio, di piccolo peso atomico, sono quelli le cui righe si allargano di più. Gli altri metalli, il cobalto, il cromo, il piombo, non presentano cambiamenti notevoli, ciò che attribuiamo alla densità dei loro vapori. Riflettendo su tutti questi fenomeni, si è portati ad ammettere che, all'interno delle macchie, i vapori metallici sono disposti per ordine di densità, i più pesanti in fondo, i più leggeri nella parte superiore, e al di sopra di tutto l'idrogeno gassoso, che circonda interamente il globo solare, producendo getti luminosi che indicheremo con il nome di *protuberanze*.

Dall'insieme di questi fatti, deriva ancora una conclusione molto importante. Poiché, nelle macchie, lo spettro non presenta nuove righe, ma solo quelle dell'atmosfera solare più o meno rafforzate, dobbiamo credere che non siano presenti nuove sostanze, ma solo una maggiore densità in certi vapori. Sappiamo che, nelle macchie, vi è un discioglimento continuo di materia fotosferica; ne dovrà risultare un assorbimento selettivo particolare, se la fotosfera contiene altri elementi oltre a quelli che costituiscono l'atmosfera stessa. Bisogna quindi concludere che la fotosfera è composta di nubi o di nebbie dovute alla condensazione dei vapori atmosferici; è il solo modo di spiegare questo fatto fondamentale, che dissolvendosi nelle macchie, la fotosfera non produce alcuna nuova riga. Questa conclusione appoggia l'ipotesi fatta da Wilson e adottata da Herschel sulla natura della fotosfera.

Da quanto detto, possiamo ancora concludere che la profondità delle macchie non può servire da misura dello spessore della fotosfera, come si è creduto fino a questi ultimi tempi. Ciò che si misura è lo spessore dello strato assorbente e più denso che occupa le parti più basse delle macchie. Come sulla Terra vediamo gas più pesanti dell'aria, l'anidride carbonica per esempio, formare un'aria irrespirabile in certe cavità, in particolare nella grotta di Chien, vicino Napoli, così si ha nel Sole che i vapori metallici, malgrado la loro tendenza alla diffusione, occupano il fondo delle cavità che costituiscono le macchie. Ciò non impedisce che questi gas pesanti si mescolino un poco per *diffusione* al resto dell'atmosfera, come fanno, nella nostra atmosfera, l'anidride carbonica e il vapore acqueo.

Infine, la parte nera che occupa l'interno delle macchie non può essere costituita né dal nucleo centrale e oscuro del Sole, né dalle scorie o altri materiali solidi flottanti alla superficie di un liquido; questa oscurità è dovuta a masse *trasparenti*, ma fortemente *assorbenti* di vapori metallici, che, grazie alla loro notevole densità, occupano le parti più basse delle ineguaglianze presenti alla superficie della fotosfera, e riempiono i vuoti e gli interstizi che a volte le nubi brillanti che ci illuminano.

Si potrebbe, a rigore, assegnare il nome di *nubi* a queste masse assorbenti; ma da quanto esposto, questo nome si applica molto meglio alla materia fotosferica, poiché mi appare certo che è la fotosfera, non più trasparente, che emette raggi di ogni tipo, come i solidi incandescenti. È possibile tuttavia che al di sotto della fotosfera vi siano gas la cui luce presenta pure uno spettro continuo, a causa dell'enorme pressione che subiscono e della temperatura elevata alla quale sono sottoposti. Risulta infatti da recenti esperienze di M. Frankland che, in alcune circostanze, tutti i gas divengono brillanti e producono uno spettro continuo.

Secondo un'opinione esposta in precedenza, le macchie sarebbero cavità prodotte dalle emanazioni di gas provenienti dall'interno, con una temperatura elevata, e che dissolvono, in ragione di questa temperatura, una parte della fotosfera. Questa opinione, già sostenuta da seri motivi, acquista un maggiore grado di probabilità dalle osservazioni delle facole e delle protuberanze, poiché queste appendici possono essere prodotte solo da getti di gas che fuoriescono dalla massa interna del Sole. Si è pure cercato di valutare la velocità con la quale l'idrogeno è messo in movimento nelle vicinanze delle macchie e nelle protuberanze, e questa velocità sarà superiore a 30 km/s . Ma le osservazioni che portano a tale risultato si possono spiegare in un altro modo, ed è per questo necessario attendere altre ricerche.

Ora che abbiamo una conoscenza sufficiente dell'atmosfera solare, possiamo sperare di rispondere alle due domande seguenti.

1° Perché lo spettro solare non presenta le righe caratteristiche dei metalli preziosi, l'oro, il platino, ecc.?

La risposta è facile. Il peso specifico di questi vapori è talmente elevato che essi devono trovarsi sepolti a grande profondità. Abbiamo visto i metalli più leggeri venire a galla, per così dire; analogamente, i più pesanti devono cadere al fondo, ed essere, di conseguenza, a noi invisibili.

2° Perché non osserviamo nel Sole l'ossigeno, l'azoto e gli altri gas che esistono pure sulla Terra?

Questa questione è più difficile da risolvere rispetto alla precedente, e non pretendiamo di farlo in modo definitivo. Azzardiamo semplicemente una congettura. I gas hanno tutti numerosi spettri, differenti gli uni dagli altri in funzione della loro temperatura. Si prenda un tubo di Geissler, composto di due parti, una avente

un diametro notevole, l'altro avente una sezione capillare; si osservano in queste due parti due spettri diversi per uno stesso gas; Plücker li ha chiamati spettri del primo e secondo ordine. Si osserva questo fatto per il bromo, il cloro e l'idrogeno. L'azoto presenta tre spettri assai ben definiti. Si ha a volte che, per temperature intermedie, due spettri di diverso ordine si sovrappongono. Ma, in generale, gli spettri del primo ordine sono più brillanti, e di conseguenza non si distaccheranno in modo sufficiente sul fondo brillante del Sole. Inoltre, se si eccettua l'idrogeno, serve una temperatura molto elevata per ottenere lo spettro del secondo ordine, il solo che presenta righe molto intense analoghe a quelle dei vapori metallici; la scintilla elettrica, che basta a fornire lo spettro dei metalli, è raramente in grado di produrre lo spettro del secondo ordine. Di conseguenza, affinché si possa riconoscere la presenza di un gas nel Sole, è necessaria che sia portato ad una temperatura molto elevata; ma è pure possibile che, nell'involuppo esterno, la temperatura non sia sufficiente a produrre spettri del secondo ordine. Lo stesso idrogeno dà uno spettro che corrisponde a una temperatura moderatamente elevata; le righe che finiscono in un punto che si osserva in certi casi mostrano che subisce un raffreddamento nello strato più lontano dal centro e alla sommità delle protuberanze. In questo caso, l'assorbimento, ridotto a quello degli spettri del primo ordine, è troppo debole per essere valutabile; dà semplicemente luogo a bande più o meno diffuse, che è impossibile distinguere da un numero molto grande di righe dovute a sostanze sconosciute.

Non si può tuttavia dire che l'ossigeno manchi del tutto; abbiamo riconosciuto nelle macchie tracce di vapore acqueo; vi è dunque ossigeno. È possibile che nelle protuberanze, sempre più elevate vicino alle macchie, l'idrogeno si raffreddi sollevandosi a grandi altezze, e che raggiunga una temperatura alla quale può ricombinarsi con l'ossigeno; il vapore acqueo così formato ricadrebbe instaurando una reale circolazione. È possibile che anche l'azoto esista, e che produca righe scure che fiancheggiano la riga *C* all'esterno del Sole; poiché questa riga deve appartenere a lui, se non è dovuta al carbonio.

La spettrometria è una scienza ancora in fasce; bisogna quindi evitare di trarre dalle sue indicazioni conclusioni precipitose, ed è per questo che noi crediamo di dover porre un termine alle nostre congetture. Possiamo tuttavia sperare che lo spettroscopio ci permetterà un giorno di determinare con qualche esattezza non solo la composizione chimica, ma anche la temperatura del Sole, poiché ogni sostanza ha una temperatura determinata alla quale produce uno spettro con righe particolari.

Attendendo questo risultato, al quale non si può mancare di giungere, studiamo questa temperatura con i mezzi alla nostra portata.

Capitolo 9

Temperatura solare - Sua origine - Sua conservazione

Sembra al primo approccio che sia cosa facile da determinare la temperatura del Sole, ma per poco che vi si rifletta si riconoscerà che questa impresa presenta grandi difficoltà. Non basta, infatti, esporre un termometro al Sole, leggere il numero di gradi che indica, e aumentarlo proporzionalmente al quadrato della distanza; poiché: 1° questo valore è relativo al nostro zero convenzionale corrispondente alla temperatura del ghiaccio fondente: non vi è alcun rapporto con lo zero assoluto che i fisici hanno fissato a -273 gradi centigradi; 2° le radiazioni solari ci arrivano attraverso l'atmosfera, e subiscono in questo passaggio un assorbimento da tenere in considerazione; le ricerche fatte a tale riguardo portano a concludere che lungo la verticale la nostra atmosfera assorbe un quarto dei raggi calorifici che il Sole ci invia; per i raggi obliqui, questo assorbimento cresce proporzionalmente alla secante della distanza zenitale; 3° infine, oltre alla radiazione solare, un termometro così esposto riceve le radiazioni dei corpi circostanti, e questa situazione complica la questione.

Per determinare completamente la temperatura solare, è necessario conoscere: 1° l'intensità della radiazione; 2° la quantità assoluta della forza viva termica che il Sole comunica alla Terra in un tempo dato. Mostriamo come sia possibile valutare questi elementi; trarremo in seguito le conseguenze relative alla struttura fisica del Sole e alla conservazione della sua energia.

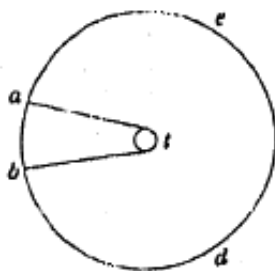
9.1 Misura dell'intensità della radiazione solare

La radiazione di un corpo è proporzionale alla sua temperatura, o alla forza viva molecolare delle sue radiazioni termiche. La si misura determinando la temperatura alla quale giunge un corpo esposto al Sole, e confrontando questa radiazione con quelle che provengono da altri corpi posti ad una temperatura nota.

Quando un corpo è esposto al Sole, riceve l'irraggiamento anche dai corpi circostanti; si stabilisce in tal modo uno scambio di radiazioni tra il termometro e il contenitore nel quale si trova racchiuso, irraggiando tutti i corpi gli uni verso gli altri. Quando si stabilisce l'equilibrio, l'intensità relativa delle temperature che possiedono le parti irraggianti è in ragione inversa della superficie delle diverse parti del contenitore, essendo tale superficie stimata in funzione della sua grandezza angolare vista dal corpo che riceve le radiazioni. Sia $aedb$ (fig. 98) un contenitore di superficie Σ avente un eccesso di temperatura θ sul corpo del termometro t ; sia S una porzione ab di questa superficie avente un eccesso T ; si avrà la relazione

$$TS = \Sigma\theta \quad \text{da cui} \quad T = \theta \frac{\Sigma}{S}$$

Fig. 98.

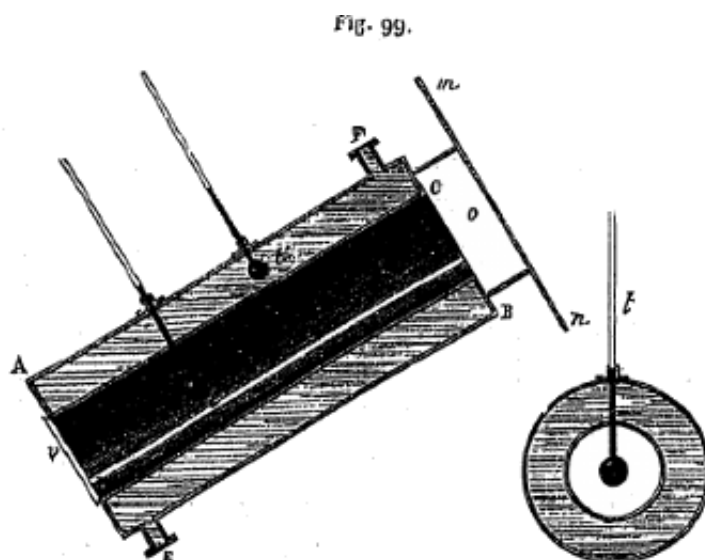


Questa equazione è sempre vera, purché tuttavia la superficie $S = ab$ sia una porzione molto piccola del contenitore, e che, di conseguenza, sia trascurabile rispetto all'intero contenitore.

Una volta ammessa questa teoria, si potrà facilmente determinare la temperatura del Sole, ed esprimerla prendendo come unità i gradi convenzionali del termometro. Per questo, si esporrà un termometro al Sole in un contenitore di temperatura nota, si leggerà l'indicazione θ° data dalla colonna del mercurio, e si moltiplicherà questo numero per il rapporto che esiste tra superficie della sfera e quella apparente del Sole. Ora per il disco solare avente un diametro medio di $31'3''{,}6$, si trova il rapporto di $\frac{\Sigma}{s} = 183960$, e si può ben trascurare l'estensione del disco rispetto alla intera superficie della sfera. Si avrà quindi $T = 183960 \theta$.

La fig. 99 rappresenta lo strumento che abbiamo impiegato a Roma per determinare il valore di θ . È simile a quello che M. Waterson ha utilizzato alle Indie, e a quello di M. Soret sul Monte Bianco.

AB e CD (fig. 99) sono due cilindri concentrici saldati l'uno all'altro; essi formano una specie di caldaia la cui capacità anulare può essere riempita di acqua o olio ad una temperatura qualsiasi. Si può pure scaldare lo strumento con una corrente di vapore entrante dal tubo E , uscente dal tubo F . Al posto del vapore si può impiegare un gas, per esempio l'aria calda che fuoriesce dal camino di una lampada. Un termometro t passa per un tubo attraverso lo spazio anulare e penetra fino all'asse del cilindro; riceve i raggi solari che sono introdotti da un diaframma mn la cui apertura o è appena più grande del bulbo del termometro. Un vetro spesso v chiude la parte posteriore dello strumento e permette di assicurarsi che il termometro è ben posizionato sulla direzione del fascio dei raggi. Il cilindro interno e il termometro t sono ricoperti di nero fumo. Un secondo termometro t' dà la temperatura dello spazio anulare, e di conseguenza quella del contenitore. Tutto lo strumento è montato su un supporto avente un moto parallattico, onde seguire con più facilità il moto diurno del Sole.



Esponendo lo strumento al Sole, come detto, si osservano i due termometri; la loro differenza di temperatura aumenta gradualmente, e dopo qualche tempo finisce per divenire costante. Allora si annotano le due temperature, e se ne calcola la differenza $t - t' = \theta$. È questo il valore che si introduce nell'equazione citata prima. Si è giunti così ai due risultati seguenti:

1° In un gran numero di osservazioni fatte a Roma ad una pressione media di 758 mm , ad un'altezza di 52 m sopra il livello del mare, la differenza tra le due temperature è stata di $12^\circ,06$; nei due giorni in cui il cielo è stato puro, si è innalzata di 14 gradi.

2° La differenza rimane costante, qualunque sia la temperatura del contenitore, di modo che, per $t' = 0$, si ha $t = 12^\circ,06$; per $t' = 60^\circ$, $t = 72^\circ,06$. Questo risultato può apparire sorprendente, ma l'abbiamo verificato con cura da zero a 64 gradi; M. Waterston è giunto fino a 220 gradi facendo circolare aria calda nello strumento. La conclusione teorica che ne deriva, è che la superficie del disco solare può essere trascurata rispetto alla superficie della sfera.

3° Quando si osserva in differenti stagioni, vicino al meridiano, si ottengono risultati meno variabili di quanto ci si aspetterebbe; la media oscilla, durante l'inverno, tra $11^\circ,5$ e 12 gradi; durante l'estate tra $12^\circ,5$ e 14 gradi. Questa variazione è molto piccola soprattutto se si nota che, da una stagione all'altra, l'altezza del Sole varia di 47 gradi. Ma in una stessa stagione l'altezza del Sole esercita un'influenza più significativa; quando è da 27 a 30 gradi durante l'estate, la differenza tra le due temperature si innalza appena di 6 gradi. Vi è quindi una causa che modifica da una stagione all'altra la trasmissione dei raggi calorifici, poiché questa altezza è precisamente quella che il Sole raggiunge al meridiano durante l'inverno. Questa causa consiste soprattutto nel vapore acqueo, che è molto più abbondante in estate, e che produce da solo un assorbimento all'incirca uguale

a quella che l'atmosfera produce durante l'inverno. Del resto, questa spiegazione è perfettamente confermata dalle esperienze di Tyndall e da quelle del professor Garibaldi, di Ginevra, sulla forza assorbente del vapore acqueo.

4° Operando ad una altezza maggiore al di sopra del livello del mare, si ottengono le differenze maggiori. Così, a Ginevra, M. Soret ha trovato, per un'altezza di 400 *m*, il valore medio $\theta = 15^{\circ},5$; all'altezza di 2500 *m*, si trova $18^{\circ},6$; in cima al monte Bianco, all'altezza di 4800 *m*, si trovò $21^{\circ},13$. Sotto il cielo più puro delle Indie, il Sole si trovava ad un'altezza di 70 gradi, M. Waterson ha trovato $27^{\circ},8$.

Come si vede, i fisici cercando di risolvere questo problema così curioso della temperatura Sole, trovano sul loro cammino difficoltà assai grandi. Non pretendiamo di esprimere questa temperatura con un valore preciso; fisseremo solo il più piccolo valore che le si può attribuire, e la questione sarà così risolta in modo sufficiente.

Supponiamo quindi esatto il valore trovato da Soret in cima al monte Bianco; avremo allora $T = 21,13 \times 183960 = 3\,987\,075$ gradi centigradi, cioè circa 4 milioni di gradi. Ma questo valore è evidentemente troppo piccolo, poiché bisogna tener conto dell'assorbimento atmosferico. Applicando, quindi, le leggi note, si deve aggiungere alla differenza data dalle esperienze di Soret, il numero $7^{\circ},89$. Allora $\theta = 29^{\circ},02$, e $T = 5\,334\,840$ gradi, o, in numeri tondi, cinque milioni e un terzo.

Tale sarà la temperatura di un corpo posto sul Sole. È pur vero che questo risultato non soltanto dovuto alle radiazioni della superficie; gli strati sovrapposti hanno una notevole trasparenza, aggiungendosi la loro azione una all'altra; ma non è men vero che questa sarà l'indicazione di un termometro posto nello strato superficiale, indicazione che esprime evidentemente la temperatura di questo stesso strato.

Se si volesse partire dallo zero assoluto, bisognerebbe aggiungere 273 al numero trovato; questa modifica, come si vede, sarà insignificante.

Si troverebbe una temperatura ancora più elevata, se si partisse dal valore $\theta = 27$ gradi trovato da M. Waterston prima di applicare la correzione relativa all'assorbimento atmosferico; conosciamo la temperatura del Sole intorno a qualche milione di gradi, e M. Waterston pensa che si possa valutarla a 9 o 10 milioni di gradi.

Notiamo, infine, che le radiazioni così valutate sono quelle che hanno attraversato l'atmosfera solare il cui assorbimento totale riguarda la metà dei raggi emessi dalla massa incandescente; fissando, quindi, come limite inferiore 5 o 6 milioni di gradi, siamo certi che non ci si possa accusare di esagerazione; ma, in realtà, il suo valore non può essere inferiore a 10 milioni di gradi.

Per dare un'idea di questa temperatura, faremo una sola osservazione. Tenendo semplicemente conto della distanza, questa temperatura è 46215 volte più alta di quella alla quale può giungere un corpo posto alla superficie della Terra, per la sua esposizione ai raggi del Sole. Per produrre lo stesso effetto, bisognerebbe concentrare su uno spazio di 1 *cm* quadrato i raggi che cadono su una superficie di $4^m,6$. Le lenti a campione, che non hanno un metro e assorbono molti raggi, sono tuttavia in grado di volatilizzare la maggior parte delle sostanze note. Si valuti dagli effetti che può produrre la temperatura del corpo solare.

Quantità assoluta di calore emessa dal Sole

Nella sezione precedente, abbiamo espresso la temperatura del Sole in gradi convenzionali. Per valutare la radiazione di questo astro, bisogna esprimere una quantità assoluta di calore, riferendo tale quantità ad una unità determinata di lavoro termico. Questo lavoro è misurato dal riscaldamento prodotto durante l'unità di tempo in una massa avente un peso determinato e una capacità calorifica nota. Lo strumento che si impiega è stato pensato da M. Pouillet. Consiste (fig. 100) di un cilindro di rame molto sottile *A*, annerito alla sua superficie o base anteriore che è diretta perpendicolarmente ai raggi solari. Il cilindro è riempito d'acqua, e se ne determina la temperatura per mezzo di un termometro *T*.



Esponendolo al Sole, si nota l'aumento di temperatura che si produce in un minuto, e si introduce questo dato nel calcolo. Si deve tenere conto del contenitore; perciò si moltiplica il suo peso per il suo calore specifico, e si aggiunge al valore ottenuto il peso dell'acqua sulla quale si opera. Inoltre, si deve ben osservare che, riscaldando completamente, lo strumento perde calore per irraggiamento. Per tener conto di questa causa di errore, si compie una seconda esperienza, nella quale si determina la quantità di cui la temperatura del cilindro si abbassa in un minuto, riparandolo contro l'irraggiamento diretto; si aggiunge il numero così determinato a quello trovato nella prima esperienza, e la somma rappresenta il riscaldamento effettivo della massa. Questa compensazione non è del tutto esatta, ma, se si vuole una precisione estrema, gli scienziati dispongono di mezzi di correzione più perfezionati per giungere al risultato.

Dalle esperienze, 1 *gr* di acqua esposta all'irraggiamento solare su una superficie di 1 cm^2 , si scalda in un minuto di $1^{\circ},763$. Si può dedurre la quantità totale di calore che cade sull'emisfero terrestre. Essa è uguale alla radiazione compresa nella sezione di un cono circoscritto alla Terra e al Sole, essendo tale sezione tutta vicina alla Terra; è circa la superficie di un grande cerchio, e di conseguenza il quarto della superficie terrestre. Di conseguenza, la radiazione solare potrebbe in un minuto scaldare di $\frac{1^{\circ},763}{4}$ o di $0^{\circ},4403$ uno strato di acqua avente 1 cm di spessore, e uniformemente distribuito su tutta la superficie della Terra. In un anno, questo stesso strato si riscalderebbe di

$$0^{\circ},4403 \times 60 \times 24 \times 365,25 = 231\,580^{\circ}$$

supponendo nulle le perdite dovute all'evaporazione e alla radiazione. Se lo spessore fosse di 1 m , la temperatura si innalzerebbe in un anno di $2315^{\circ},80$.

I fisici amano esprimere questa quantità di calore tramite lo spessore dello strato di ghiaccio che si fonderebbe nello stesso tempo; lo si determina dividendo il valore trovato per il calore latente di fusione del ghiaccio. Si trova così che la radiazione solare sarà in grado di fondere in un anno uno strato di ghiaccio di $30^m,89$, o circa 31 m di spessore.

Possiamo ora valutare la quantità di calore emessa dalla superficie del Sole, moltiplicando il valore precedente per il quadrato della sua distanza dalla Terra espressa in raggi del globo solare. Si trova così che questa quantità di calore può in un minuto innalzare di $816^{\circ},71$ la temperatura di uno strato di acqua spesso 1 m , o di fondere nello stesso tempo uno strato di ghiaccio di $10,17\text{ m}$.

La teoria moderna del calore interpreta l'attività termica come un lavoro meccanico; essa ci fornisce il modo di valutare in forza la radiazione solare e anche di risalire alla sua sorgente originaria.

Vediamo che il Sole può, in un minuto, scaldare di $816^{\circ},71$ uno strato di acqua spesso 1 m , o, in modo equivalente, scaldare di 1° uno spessore di $816,71\text{ m}$ o ancora uno strato di $13,61\text{ m}$ in un secondo. Questa forza è la stessa su tutta la superficie solare, ma per maggiore semplicità considereremo solo gli effetti che essa produce su una superficie di 1 m^2 . Il peso dell'acqua così riscaldata di 1° in un secondo sarà di 13610 kg . La forza meccanica in grado di innalzare di 1° la temperatura di 1 kg di acqua equivale a 424 kgmetri , essendo ogni kilogrammetro il lavoro necessario per innalzare un peso di 1 kg a 1 m di altezza. Quindi, per ottenere in kilogrammetri l'espressione della potenza termica del Sole, bisogna moltiplicare 13610 per 424 e il prodotto $5\,791\,840$ esprime il numero di kilogrammetri cercati: questo lavoro equivale a quello di $77\,232$ cavalli-vapore, essendo il cavallo vapore la forza in grado di produrre in un secondo un lavoro di 75 kgmetri .

Si vede quindi che basterebbe il calore dispensato su qualche metro quadrato preso alla superficie del Sole per far funzionare tutte le macchine a vapore che esistono sul nostro globo. Una delle più grandi macchine che sono state costruite, quella della fregata Friedland, presentata nel 1867 all'Esposizione universale di Parigi, aveva una forza di 4000 cavalli, e richiedeva, per produrre il vapore necessario, otto caldaie che bruciavano circa cinque tonnellate di carbone all'ora.

Si potrebbe così valutare la potenza meccanica alla quale equivale la radiazione totale della superficie solare. Si troverebbe un numero di cavalli vapore uguale a 470 trilioni, cioè 470×10^{12} . Questa è l'immensa potenza che emana il Sole e di cui è impossibile farci un'idea esatta. Possiamo allineare un numero sufficiente di cifre per rappresentarla, ma questo numero non dice nulla alla nostra immaginazione, che è impotente a concepirlo.

9.2 Perdite di forza viva subite dal Sole

Cerchiamo di valutare l'immensa quantità di calore che il Sole emana in ogni istante, e i valori che abbiamo determinato misurano le perdite di energia che subisce ogni secondo questa massa incandescente. Si è naturalmente portati a chiedersi se è possibile che, malgrado un irraggiamento così consistente, il Sole abbia una temperatura costante, e quali siano le fonti di calore che possono compensare perdite di questo ordine.

Bisogna dapprima notare che la radiazione si produce solo alla superficie; è quindi possibile che all'interno la temperatura sia ancora più alta. Ma le masse raffreddate dall'irraggiamento si mescolano senza posa tra loro, e il globo solare preso nel suo insieme perde realmente calore, e il problema della costanza di temperatura rimane sempre da risolvere.

Per valutare esattamente l'abbassamento della temperatura solare, bisognerebbe conoscere ciò che, nel linguaggio dei fisici, si chiama *capacità calorifica*, o almeno avanzare un'ipotesi plausibile. Si sa, infatti, che per

una stessa quantità di calore o di forza viva, i corpi non si riscaldano allo stesso modo. Per esempio, la quantità di calore che innalzerà solo di 1 grado la temperatura di 1 *kg* di acqua basterà a riscaldare di 9 gradi un uguale peso di ferro. Da questa proprietà risulta quindi che, per due masse uguali, ma natura diversa, la durata del raffreddamento sarà proporzionale alle loro capacità calorifiche. Così quindi, a parità di massa, e partendo da una stessa temperatura, il ferro si raffredderà nove volte più rapidamente dell'acqua.

Per il Sole, ci è impossibile assegnare rigorosamente la sua capacità per il calore, poiché non conosciamo esattamente i materiali di cui è composto. Ma sappiamo che è composto di idrogeno e di vapori metallici. A parte l'idrogeno il cui calore specifico è 3,41, essendo 1 quello dell'acqua, tutti gli altri vapori hanno una capacità inferiore a 0,5. Potremo al massimo ammettere, come capacità media, un numero maggiore dell'unità, e possiamo prendere questo valore come limite superiore.

Si può conoscere con maggiore precisione la superficie del Sole, il suo volume, la sua massa, la sua densità media.

La superficie, espressa in metri quadrati, è presentata dal numero

$$6\,032\,900\,000\,000\,000\,000 = 60329 \times 10^{14}$$

Il volume, espresso in metri cubi, è rappresentato dal numero

$$1\,393\,350\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 139355 \times 10^{22}$$

Prendendo la densità dell'acqua distillata come unità di misura, quella del Sole è 1,42, e il suo peso, espresso in *kg*, è rappresentato dal numero

$$M = 1\,946\,600\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 19466 \times 10^{26}$$

o, arrotondato, due quintilioni di kilogrammi.

Abbiamo visto che in un minuto, su 1 *m*², emette una quantità di calore in grado di innalzare di 816,71° la temperatura di 1 *m*³ o di 1000 *kg* di acqua, cioè pari a 816710 calorie¹. Ne deriva che, in un anno, ogni metro quadrato perde un numero di calorie uguale a 429 552 000 000, e per l'intera superficie una quantità $C = 25914 \times 10^{26}$.

Supponiamo che la capacità media della massa solare per il calore sia uguale a quella dell'acqua: il numero *M* esprimerà le calorie che deve perdere il Sole affinché la sua temperatura si abbassi di 1°: essendo *C* il numero di calorie che perde in un anno, la diminuzione annuale di temperatura sarà $\frac{C}{M} = 1,33^\circ$. Il risultato diverrà 2,8° se il Sole avrà una capacità calorifica uguale a quella del vapore acqueo, e, di conseguenza, un poco superiore a quella dei vapori metallici.

Si vede di già che l'interno del Sole non potrà essere né oscuro né solido. Se lo pensiamo incandescente come il ferro fuso, a una temperatura di 2000 o 3000 gradi, basterà per abbassare la temperatura a zero un periodo ben più breve delle epoche storiche meglio conosciute.

Dovremo pertanto ammettere che è composto di una materia combustibile in grado di produrre bruciando tanto calore quanto il carbone. Con questa ipotesi, dai calcoli di M. Thomson, si spegnerà dopo 8000 anni, anche supponendo che i prodotti della combustione non debbano arrestarne l'attività.

È incontestabile che per tutta la durata dei tempi storici l'azione del Sole è stata praticamente uguale a quella attuale; non è diminuita in modo apprezzabile. Gli esseri viventi, sia animali, sia vegetali, che si trovano sulla superficie del globo sono da tempo gli stessi, e le loro variazioni sono state poco significative; questo fatto è incompatibile con un abbassamento notevole della temperatura solare. È quindi impossibile ammettere che il calore del Sole è dovuto ad una combustione, o alla radiazione di una massa semplicemente incandescente.

Del resto, per spiegare la costanza della temperatura solare, si possono avanzare due ipotesi, quella di una attività interna, e quella di una azione esterna, completamente differente dalla combustione propriamente detta. Herschel aveva supposto la presenza di correnti elettriche in grado di produrre luce, come nelle aurore boreali; ma sappiamo ora che queste correnti elettriche deve pure avere una causa; non possono nascere spontaneamente; devono essere prodotte da una forza che non può essere generata dal nulla; la loro esistenza deve essere spiegata dalle leggi fisiche.

Esponiamo le più importanti ipotesi che sono state pensate finora, e cercheremo di assegnare la causa reale che produce il calore del Sole e che mantiene costante la sua temperatura. Non pretendiamo tuttavia che questa costanza sia assoluta; poiché anche trascurando le variazioni periodiche registrate dagli osservatori, i nostri mezzi di osservazione sono troppo imperfetti, e soprattutto abbiamo dati troppo incompleti sui periodi già trascorsi per poter emettere una opinione definita con nettezza. Supponiamo, infatti, che la temperatura solare sia di 6 milioni di gradi, e che diminuisca ogni anno di 2,8°; dopo 4000 anni la diminuzione sarà di 11200 gradi, cioè $\frac{1}{536}$. La radiazione alla superficie della Terra, al livello del mare, essendo come visto al più 15°, diminuirà nello stesso rapporto, cioè di 0,028°, quantità evidentemente non valutabile con le nostre osservazioni. Esamineremo quindi il fenomeno in se stesso e nei suoi elementi fisici in attesa che la teoria o l'osservazione ci diano informazioni più precise.

¹Si chiama *caloria*, in Fisica, la quantità di calore necessaria ad innalzare da 0 a 1 grado centigrado la temperatura di 1 *kg* di acqua.

9.3 Sorgenti di calore esterne al Sole

Il problema di cui cerchiamo la soluzione non è nuovo. Già Newton, considerando le immense perdite di materia che il Sole deve subire per emissione continua di particelle luminose e calorifiche, cercò una sorgente la cui azione fosse in grado di compensare la radiazione solare. Suppose che le comete potessero essere destinate a questo scopo; cadendo sul Sole alimenterebbero la sua combustione e impedirebbero alla sua massa di diminuire. In questo periodo si attribuiscono alle comete masse considerevoli, e inoltre la radiazione luminosa era considerata come una emissione di particelle materiali; l'ipotesi di Newton era quindi ammissibile, poiché spiegava i fenomeni in base ai principi noti e le teorie ammesse. Non è più così al giorno d'oggi. Sappiamo che le comete possiedono masse molto piccole, e vediamo luce e calore, non come una emissione propriamente detta, ma come un moto vibratorio che si comunica tramite un mezzo imponderabile.

Ciò che Newton disse della massa del Sole, possiamo dirlo della forza viva che possiede; la sua massa non diminuisce con la radiazione, ma il movimento di cui le sue particelle sono animate deve diminuire incessantemente, se non vi sono sorgenti abbondanti per riparare le perdite che subisce. È il dottor Mayer, di Heilbronn, che per primo ha formulato questo problema dal punto di vista meccanico, e che per primo ne ha cercato la soluzione, soluzione che ha cambiato completamente la teoria accettata. L'ipotesi di Mayer è stata sviluppata da Waterston, Thomson, Joule; ne daremo qui i risultati, almeno per quanto riguarda questo aspetto.

Il dottor Mayer, considerando la quantità di materia che cade annualmente sulla Terra, sotto forma di aeroliti, o stelle filanti, e la quantità di calore dovuta alla trasformazione della loro forza viva, si è chiesto se un simile fenomeno non potesse avvenire anche sul Sole, e si chiese quale massa dovesse essere impiegata per compensare la diminuzione di forza viva prodotta dalla radiazione.

Il problema così posto può essere risolto con le nozioni della Meccanica. È facile calcolare la velocità che deve acquisire un corpo a partire dai limiti dello spazio, o da una distanza infinita, per cadere sul Sole; si può quindi conoscere la forza viva che possiederà arrivando sulla superficie di questo astro. Si trova così che la sua velocità è quella che acquisterebbe cadendo di moto uniformemente accelerato da una distanza uguale al raggio solare; questa velocità è di 915 km/s . Un kilogrammo di acqua, cadendo sul Sole, produrrà con il suo urto una quantità di calore in grado di innalzare la sua temperatura di 1000 milioni di gradi. Se la Terra cadesse sul Sole, si produrrebbe una quantità di calore pari a quella che questi perde in sessantanove anni per irraggiamento. Una massa di ferro che cadesse dalle profondità dello spazio sulla Terra svilupperebbe una quantità di calore sufficiente per innalzare la sua temperatura di 350000° , e potrebbe in tal modo volatilizzarsi completamente.

Bisogna notare che le cose non avvengono del tutto come le supponiamo qui. Il calore prodotto dall'urto non è completamente concentrato nel corpo che cade; la Terra ne assorbe necessariamente una parte; un'altra parte è impiegata per riscaldare l'aria e metterla in movimento. Si comprende tuttavia come gli aeroliti diventano incandescenti a causa del loro attrito contro l'aria atmosferica e della compressione che esercitano su di essa, e giungono a terra ricoperti da uno strato di materia fusa e vetrificata; è per la stessa ragione che una parte di questi corpuscoli si volatilizzano completamente assumendo l'aspetto di stelle filanti.

Si può valutare anche in forza dinamica il calore che la Terra riceve dal Sole, e si arriva al risultato seguente: supponiamo che la Terra, divenuta immobile nella sua orbita e sottoposta alla sola forza di gravità, cada verso il Sole. Supponiamo, inoltre, che l'attrazione del Sole sia costante, e che di conseguenza si muova di moto uniformemente accelerato, analogo a quello che osserviamo nella caduta dei corpi pesanti. Dopo un giorno, la Terra avrà percorso uno spazio uguale a tre volte e mezza il suo raggio, e la sua velocità sarà rappresentata da sette raggi terrestri. Supponiamo che allora un urto la arresti bruscamente. La forza viva che possiede sarà trasformata in moto vibratorio, e la quantità di calore così prodotto sarà cento volte inferiore a quello che riceve giornalmente dalla radiazione solare.

Il principio della conversione dell'energia in calore costituisce una delle più belle scoperte della scienza moderna; rimane da vedere fino a qual punto la si può applicare al Sole. È facile ammettere che meteoriti cadano sul Sole come sulla Terra; è anche più probabile che si tratti di una massa molto considerevole e molto più in grado della Terra di far deviare i corpi dalla loro direzione iniziale. È pure certo che se un corpo simile cade sulla superficie del Sole deve produrre tremila volte più calore di quanto se ne produce bruciando una uguale massa di carbone. Si potrebbe anche appoggiare questa teoria con fatti che sembrano confermarla. Così, in Inghilterra, M. Hodginson e M. Carrington, in due diversi osservatori, videro allo stesso istante una luce molto intensa svilupparsi in un punto del Sole molto vicino ad una macchia; essi attribuirono questo fenomeno alla caduta di una meteora e al calore che ne era conseguito. La cometa del 1843 attraversò, senza dubbio, l'atmosfera solare e si infiammò producendo una coda prodigiosa di 63 gradi! Sappiamo ora che le comete e le stelle filanti sono meteore della stessa natura.

Ma, in realtà, ecco come la questione deve essere posta. Questi fatti, che sono assolutamente possibili, esistono realmente? Si può spiegare così la costanza della temperatura solare? Se così fosse, dovrebbe in media cadere ogni ora un kilogrammo di materia su ogni metro quadrato. Supponiamo che questa sostanza abbia una densità semplicemente uguale a quella dell'acqua; dopo un anno, fornirebbe alla superficie del Sole uno strato spesso 10 *m*, cosa non del tutto impossibile ma non misurabile da noi, poiché secondo questa proporzione servirebbero quattro mila anni per produrre un aumento di un secondo, nel diametro solare, aumento che sarà

passato inosservato, vista la scarsa precisione delle misure più antiche. Ma non faremmo lo stesso ragionamento per l'aumento della massa; nello stesso intervallo di quattro mila anni esse aumenterebbe di $\frac{1}{5000}$ e, dai calcoli di M. Thomson, in duemila anni il moto della Terra si troverebbe ritardato di $\frac{1}{8}$ di anno, risultato inconciliabile con i dati più sicuri dell'Astronomia. Per rispondere a questa difficoltà, si potrebbe ammettere che la materia che cade sul Sole si trova all'interno dell'orbita terrestre, e che essa produce la luce zodiacale. Ma questa ipotesi è inammissibile, poiché conosciamo un gran numero di comete periodiche aventi una parte della loro orbita in questa regione interna, le quali dovrebbero subire una grande resistenza della parte della materia meteorica; la forma della loro traiettoria e la velocità del loro moto si dovrebbero trovare completamente modificate. Ma le osservazioni non segnalano alcuna di queste perturbazioni, e bisogna concludere che queste comete non incontrano nel loro moto alcuna massa significativa in grado di farle deviare dalle loro orbite.

Le considerazioni esposte bastano a distruggere l'ipotesi meteorica; anche questa teoria è attualmente abbandonata dai suoi sostenitori e anche dai più ardenti promotori. Tuttavia, se essa non spiega in modo completo la costanza della temperatura solare, non è priva di valore. Un certo numero di meteore devono necessariamente cadere sul Sole e produrvi una data quantità di calore. Applicata alla Terra, questa stessa teoria potrebbe spiegare alcuni fenomeni ancora oscuri, per esempio rendere conto dell'accelerazione secolare della Luna. Infatti, se la massa della Terra aumenta costantemente per gli aeroliti che cadono sulla sua superficie, il suo moto di rotazione deve rallentare, e quello della Luna deve di contro accelerare. Affinché tale spiegazione fosse plausibile, basterebbe che ogni anno cadesse una quantità di materia in grado di ricoprire la superficie della Terra di uno spessore di un decimo di millimetro. Questa condizione non è del tutto impossibile, poiché il numero di stelle filanti è molto alto, e spesso cadono aeroliti pesanti parecchie migliaia di kilogrammi. D'altra parte la massa del Sole non è nota con grande precisione. Solo alcuni anni fa la si considerava uguale a 354936 volte la massa della Terra; ma la necessità di aumentare la parallasse di $\frac{1}{28}$ del valore precedente, ha avuto come conseguenza un rapporto di 326800.

Il merito incontestabile dell'ipotesi di Mayer è di spiegare l'origine del calore solare, riuscendolo ad essere un effetto della gravitazione considerata come semplice forza meccanica. Gli astronomi ammettono ora che il nostro sistema solare deriva dalla condensazione di una nebulosa. Tutta la materia che compone attualmente il Sole e i pianeti si trovava già allo stato di materia cosmica distribuita negli spazi immensi che circondano il sistema solare; costituiva quindi una nebulosa analoga a quelle che vediamo ancora in numerose parti del cielo. Herschel, che ha studiato queste nebulose, ha riconosciuto che esse si presentano a diversi livelli di condensazione; le loro forme sono molto diverse, irregolari, globulari, ellittiche, anulari; la materia che le compone è in un completo stato di dissociazione, e dallo spettroscopio apprendiamo che esse sono, per la maggior parte, completamente gassose. La massa che costituisce il nostro sistema solare, supponendola diffusa solo fino all'orbita di Nettuno, si presenterebbe in uno stato di rarefazione confrontabile con quello ottenibile dalle nostre migliori macchine pneumatiche.

Se supponiamo che una simile massa si condensi precipitando verso un punto centrale, potremo perfettamente applicare la teoria di Mayer. L'urto reciproco delle molecole metterà tutta la massa in vibrazione termica, e svilupperà al centro una quantità molto grande di calore. Tenendo conto della massa e del modo in cui essa si è inizialmente distribuita a varie distanze dal Sole, si è calcolato che la quantità di calore sviluppata ha innalzato la temperatura a 500 milioni di gradi. Tale sarebbe dunque stata la temperatura iniziale del globo solare; anche quella che osserviamo oggi sarebbe solo un debole residuo dell'enorme quantità di calore dovuto alla sola gravità.

Bisogna sottolineare che questa teoria prevede nulla riguardo al modo di condensazione, né sulla rapidità con la quale è avvenuta. Non è necessario, per spiegare l'innalzamento di temperatura, ammettere che l'urto avviene in un tempo molto breve. La condensazione poteva essere molto lenta e sviluppare tuttavia una grande quantità di calore. Supponendo che il Sole sia in contrazione, questa contrazione, producendo una effettiva caduta verso il centro, deve compensare una parte della forza viva che è persa per irraggiamento.

Si deve, senza dubbio, riferire alla stessa origine il calore centrale dei pianeti, e molto probabilmente anche la loro energia di traslazione. Questa energia è solo $\frac{2}{3}$ di quella che essa acquisterebbe cadendo sul Sole, e basterebbe a compensare le perdite prodotte in quarantacinquemila anni dalla radiazione.

Tali sono le conclusioni alle quali porta la teoria di Mayer, conclusioni attualmente ammesse dai fisici. La teoria meteorica è stata incapace di rendere conto dei fenomeni che pretendeva di spiegare, ma ha avuto tuttavia un risultato molto vantaggioso: ci ha fatto conoscere l'origine del calore solare, sorgente universale della vita nel nostro sistema planetario. Ci rimane da spiegare con qualche dettaglio le conseguenze dell'alta temperatura che possedeva inizialmente il Sole, e mostrare come questo astro possa autosostenersi per un lungo intervallo di tempo senza che si evidenzino variazioni apprezzabili nel suo stato calorifico.

9.4 Costanza della radiazione solare; sua spiegazione

Quando il Sole, all'epoca della sua formazione, raggiunse un volume del tutto simile a quello attuale, la sua temperatura, come abbiamo spiegato nel paragrafo precedente, sarebbe stata almeno uguale a 500 milioni di gradi. Inoltre, l'esperienza ci insegna che sulla sua superficie la temperatura è, ancora oggi, di parecchi milioni

di gradi; è molto probabile che all'interno sia ancora maggiore. Se ne deve concludere che il Sole non può essere composto di una massa solida; e anche, qualunque sia l'enorme pressione esistente in questa massa, non è, propriamente parlando, allo stato liquido; siamo necessariamente portati ad immaginarla come gassosa, malgrado il suo stato di condensazione estremo. Già siamo stati portati a questa conclusione allorché, senza discussione, si ammette l'esistenza di un nucleo solido e oscuro.

All'interno del globo solare, l'effetto dovuto alla gravitazione è molto elevato, e ne deve risultare uno stato gassoso assai diverso da tutti quelli che conosciamo sulla Terra. Da un lato una pressione enorme deve favorire l'affinità; ma dall'altro, la temperatura è talmente elevata, che qualunque combinazione sussista, se questa non è alla superficie o la radiazione può abbassare la temperatura in modo sufficiente. I diversi corpi semplici possono, infatti, restare uno in presenza dell'altro senza combinarsi, malgrado la loro reciproca affinità: si dice allora che sono *dissociati*.

Secondo le belle scoperte di M. H. Sainte-Claire Deville, sappiamo che le fiamme contengono una certa quantità di gas che, grazie al calore, sfuggono a qualsiasi combinazione; i chimici sono riusciti, con processi molto ingegnosi, a isolare questi gas misurandone i volumi. Si è così dimostrato che, nella combustione della miscela di ossigeno e idrogeno, una metà del gas è mantenuta allo stato di dissociazione dalla grande quantità di calore che l'altra metà produce bruciando. Questi fenomeni sono confrontabili con quelli della condensazione dei vapori. La parte della massa gassosa che si condensa sviluppa una quantità notevole di calore che era latente e che diviene osservabile; questo calore serve a mantenere ad una temperatura sufficientemente alta la parte che sfugge alla condensazione. È così che una massa di vapore acqueo, condensandosi allo stato liquido, perde una quantità di calore uguale a 540 calorie; per solidificarsi ne perderà nuovamente 79; di modo che il vapore, per passare allo stato liquido, potrà emettere 540 unità di calore senza che la sua temperatura si abbassi, malgrado le perdite di calorico. È così anche per una massa liquida che si solidifica. È evidente che il raffreddamento è singolarmente rallentato da queste proprietà.

Vi è la più grande analogia tra i fatti ricordati e quelli che accompagnano le combinazioni chimiche. Allo stato della dissociazione, i gas contengono una certa quantità di calore latente che diviene osservabile nel momento in cui si ha la combinazione. Tutto il calore che scompare nella dissociazione riappare nella combinazione, senza alcuna perdita, e, dalle ultime determinazioni, questa quantità di calore è uguale, per l'acqua, a 3830 calorie. Supponendo che questi due gas si combinino completamente, senza che alcuna parte rimanga dissociata, ne risulterà una quantità di calore uguale a 3830 calorie. Una bella esperienza di fisica ci dà un esempio molto significativo di questo assorbimento di calore nelle decomposizioni. Si immerge in un bicchiere di acqua due fili di platino molto sottili che si collegano con i poli di una pila potente; se i fili pescano a una piccola profondità, l'acqua si scalda rapidamente senza scomporsi; ma se li si affonda di più, la scomposizione inizia, e la temperatura cessa di crescere.

Supponiamo che una massa di gas dissociato passi allo stato di combinazione, tutto il calore latente della dissociazione diverrà misurabile, e di conseguenza il raffreddamento sarà molto più lento. Supponiamo che l'irraggiamento faccia perdere ai corpi una quantità di calore in grado di raffreddare in un anno di 1°; siccome la dissociazione fornisce 3830 calorie, questo stesso raffreddamento di 1° si produrrà in 3830 anni.

Si obietterà senza dubbio che il Sole non essendo unicamente composto di ossigeno e idrogeno, il calcolo precedente non ha alcuna applicazione. Ma le osservazioni spettrali provano che l'idrogeno si trova in quantità molto grande nel Sole. Inoltre, vi sono sostanze per le quali la dissociazione richiede una temperatura talmente elevata, che non potremmo studiarla. In tutti i casi, non è necessario conoscere esattamente il calore latente di dissociazione di tutti i corpi per comprendere il ruolo importante che esso svolge nel fenomeno che vogliamo spiegare. Supponendo che la massa solare abbia un calore di dissociazione medio uguale a quello dell'acqua, servirebbero quaranta secoli per un raffreddamento di 1 grado. È quindi impossibile per noi cogliere questi cambiamenti, poiché sono molto meno considerevoli di quelli che si producono nei periodi di massimo e di minimo delle macchie, e queste ultime sfuggono completamente alle nostre valutazioni.

Come si vede, sebbene la temperatura del Sole non sia assolutamente costante, le sue variazioni sono tuttavia così poco significative, che non è possibile osservarle se non dopo numerosi millenni. Dopo un lasso di tempo molto ampio, dopo parecchi milioni di secoli per esempio, il Sole si sarà notevolmente raffreddato; verrà senza dubbio un'epoca in cui non sarà più in grado di sostenere la vita sulla superficie dei pianeti; è possibile che l'Autore della natura abbia disposto le cose dall'inizio in modo da riparare la sua attività con qualche fenomeno straordinario, per esempio con la caduta di una nebulosa. Ma queste sono questioni oziose sulle quali sbaglieremmo a soffermarci. Chi sa se l'ordine che regna attualmente nel nostro sistema solare deve regnare indefinitamente? La condizione attuale non è sempre stata la stessa, come ci insegna la geologia, e poiché ha dovuto iniziare, perché non dovrebbe avere una fine?

Se si ammettono le idee indicate sull'attuale splendore del Sole e sulla sua formazione, bisogna trarre le due seguenti conclusioni: 1° in virtù della legge delle aree, gli strati interni devono possedere un moto di rotazione più rapido di quelli esterni, e l'attrito non ha forse ancora generato in tutta la massa un movimento identico; 2° i punti posti all'equatore devono essere dotati di una velocità maggiore dei punti più vicini ai poli. Abbiamo visto che questo fatto è evidente col moto delle macchie. Tuttavia, dobbiamo ammettere che la teoria esatta

della circolazione nella massa solare non è ancora data, e quanto abbiamo detto deve essere considerato come una semplice ipotesi.

Si presenta tuttavia una obiezione che può di primo acchito apparire imbarazzante, ma che non è seria. Il Sole è un centro potente di attrazione: come ammettere che si trova allo stato gassoso? L'attrazione è proporzionale alle masse: come una massa gassosa avente un volume limitato è in grado di produrre effetti così grandi? Per rispondere a questa obiezione, sottolineiamo che lo stato gassoso non è incompatibile con una densità molto elevata. Comprimendo un gas per diminuirne il volume e aumentare il suo peso specifico, si finisce prima o dopo per liquefarlo; ma per impedire questa liquefazione basta innalzare la temperatura. Queste due circostanze si trovano riunite nel Sole: la temperatura è molto elevata, e la pressione, almeno negli strati interni, diviene enorme. D'altronde, la densità media del Sole, rapportata a quella dell'acqua, è solo di 1,42; essa non è quindi molto elevata, soprattutto se notiamo che, in questa massa, vi sono molti metalli il cui peso atomico è molto alto rispetto ai gas propriamente detti. La teoria termodinamica aveva già indicato che lo stato gassoso e lo stato liquido non sono separati da una reale discontinuità: le belle esperienze di Andrews sull'acido carbonico hanno provato che tra i due stati vi è una legge di continuità. Una parte considerevole della massa solare potrebbe trovarsi sul limite, viste le condizioni di temperatura e pressione.

Da quanto detto in questo Capitolo possiamo trarre le seguenti conclusioni che così riassumeremo:

1° La temperatura del Sole si innalza a parecchi milioni di gradi anche se non possiamo determinarla con precisione.

2° Questa temperatura è molto probabilmente il risultato della gravitazione; sarebbe stata prodotta dalla caduta della materia che costituiva la nebulosa primitiva, e che compone attualmente il Sole e i pianeti.

3° In questo periodo di formazione, la temperatura doveva essere molto più alta dell'attuale: il sole è quindi in un periodo di raffreddamento.

4° Sebbene il Sole perda continuamente quantità enormi di calore, l'abbassamento di temperatura è estremamente piccolo; non supera 1° in quattromila anni. Questo risultato è dovuto allo stato di dissociazione nel quale si trova la materia sotto l'azione del calore.

5° Sebbene la temperatura del Sole non sia assolutamente invariabile, le sue variazioni secolari sono tuttavia più piccole delle fluttuazioni a corto periodo di cui constatiamo l'esistenza senza poterle studiare in forma completa; dobbiamo pensare che il nostro pianeta rimarrà abitabile per una lunga sequenza di secoli.

Parte II

Attività esterna del Sole

Capitolo 10

Le Radiazioni

Finora, abbiamo considerato il Sole come corpo celeste, e abbiamo cercato di determinare la sua natura, per quanto ci hanno consentito le osservazioni ottiche. Studiamo ora la sua attività esterna, ciò che ci consentirà di conoscere un poco la potenza incalcolabile di questa sorgente di forza e di vita. La sua attività esterna si esercita in due modi nello spazio che lo circonda: radiazioni e gravitazione. Studiamo la prima di queste due forme di azione, riservando la seconda ad un altro capitolo.

10.1 Effetti della radiazione nell'universo

Abbiamo molto parlato di radiazioni luminose e calorifiche, ma le abbiamo esaminate solo dal punto di vista delle informazioni che ci potevano fornire sulla struttura del Sole; dobbiamo ora esaminarle in dettaglio e studiare l'influsso che esercitano sui pianeti.

Il Sole è, per così dire, il primo motore dal quale dipendono tutti i moti del sistema planetario, non solo per la regolarità delle orbite che descrivono i diversi astri, ma anche per i fenomeni fisici o fisiologici che avvengono sulla loro superficie. Sulla Terra, in particolare, i movimenti atmosferici, il moto delle acque, lo sviluppo della vegetazione, la produzione della forza che deriva dalle combustioni e dal nutrimento degli animali, tutti fenomeni dovuti all'influsso delle radiazioni solari.

L'atmosfera è una effettiva macchina, anche se non vi sono né binari né ingranaggi né pistoni; masse considerevoli di aria e di vapore sono mantenuti in circolazione per effetto del calore solare. È la forza del Sole che, dilatando l'aria in alcune regioni, la solleva in grandi masse e produce così un vuoto che viene rapidamente colmato da altre masse gassose; ne derivano quindi correnti atmosferiche e venti potenti che sospingono i nostri vascelli e le nostre navi sui mari. È la forza emanata dal Sole che solleva le acque sotto forma di vapore, e le lascia poi ricadere come pioggia destinata a fecondare le nostre campagne. È ancora al Sole che dobbiamo questi ruscelli che ci dissetano, questi fiumi le cui acque muovono le nostre macchine; con il vapore sollevato dall'Oceano, si alimentano le nubi, che, dalle vette delle montagne, distribuiscono il movimento, la fecondità e la vita.

Ma, qualcosa di ancora più ammirevole, è il modo in cui la forza del Sole si trova, per così dire, immagazzinata nei vegetali, non solo in quelli che, ancora viventi, usiamo come alimentazione, o come ornamento e abbellimento delle nostre dimore; ma anche in quelli che, sepolti da parecchie migliaia di anni nelle profondità della Terra, escono ora per riscaldarci e per produrre la forza motrice necessaria alle nostre macchine. I raggi solari, cadendo sulle piante, non sono riflessi o dispersi come avviene quando cadono sulle pietre nude o sulle sabbie del deserto; vi sono in larga parte trattenuti, e la forza meccanica delle loro vibrazioni è impiegata per distruggere le combinazioni che l'ossigeno forma con il carbonio e l'idrogeno, combinazioni stabili note sotto il nome di acqua e anidride carbonica, due elementi essenziali dell'aria atmosferica. Le piante assimilano allora idrogeno e carbonio formando composti meno stabili che, più tardi, sia nei nostri focolari, sia negli organi respiratori degli animali, si distruggono per ricostituire di nuovo l'acqua e l'anidride carbonica, restituendo la forza viva che il Sole aveva speso nel lavoro precedente. Ogni pianta è quindi una macchina effettiva nella quale si elaborano queste sostanze eminentemente combustibili che servono a fornirci, in assenza del Sole, il calore e la luce, o a produrre, come alimento, la forza e il calore vitale di cui abbiamo bisogno. È quindi dal Sole in ultima analisi, che, in modo più o meno diretto, dipendono tutti i fenomeni della natura e la nostra stessa esistenza.

Il modo in cui si compiono queste meravigliose operazioni ci è ancora sconosciuto; sappiamo solo che questi fenomeni avvengono tramite vibrazioni luminose, calorifiche e chimiche; l'energia solare si propaga fino a noi sotto forma di vibrazioni, ed esegue queste opere sorprendenti che sappiamo mettere a profitto. Quando due molecole sono unite dai legami di affinità chimica, serve una forza per distruggere questa combinazione, e la forza così impiegata produce un lavoro che si può confrontare con un lavoro meccanico qualsiasi. Per esempio, per innalzare un corpo ad una certa altezza, cioè per separare un corpo dalla Terra, bisogna impiegare una certa

forza e compiere un certo lavoro; ricadendo, il corpo restituisce la forza che era stata impiegata per sollevarlo. Il Sole produce qualcosa di simile tra le molecole dei corpi posti sulla superficie della Terra; si può dire che la forza è immagazzinata nei vegetali, come quella della Terra è immagazzinata in una massa sollevata ad una grande altezza, come quella di una macchina nel volano che ruota con essa.

Ciò che il Sole compie ai nostri giorni, lo ha pure prodotto per i secoli innumerevoli che hanno preceduto la creazione dell'uomo; i vegetali che si sono sviluppati in certi periodi geologici sono stati, per l'azione del tempo, trasformati in carbone e lignite, e quando bruciamo ora queste sostanze nelle caldaie delle nostre macchine a vapore, ne liberiamo la forza che il Sole aveva loro trasferito.

Queste nozioni, che la scienza ha reso così popolari, mostrano quale immenso potere possiedono le radiazioni solari, che ci proponiamo ora di studiare in dettaglio.

Distinzione delle radiazioni

Ciò che dapprima ci colpisce, nell'irraggiamento solare, è la luce che ci illumina e il calore che l'accompagna; ma, oltre a questi due tipi di fenomeni, ve ne è un terzo che è molto importante, le reazioni chimiche che accompagnano le prime due. Si devono distinguere tre ordini di azioni che emanano dal Sole, e che si confondono comunemente sotto il nome unico di *luce*. Queste sono: 1° l'azione illuminante, che produce solo effetti fisiologici, agendo sull'organo della vista; 2° l'azione termica, che agisce indistintamente su tutti i corpi riscaldandoli; 3° l'azione chimica, che produce certi fenomeni di disgregazione molecolare.

Queste attività non sono tra loro distinte; sono effetti diversi di una stessa azione, consistente semplicemente in una serie di ondulazioni che differiscono tra loro solo per la lunghezza e la rapidità con la quale si producono. Le onde la cui lunghezza è compresa tra 768 e 369 milionesimi di millimetro sono in grado di far vibrare il nostro nervo ottico; la diversità dei colori dipende solo dalla lunghezza delle onde: le maggiori si trovano nel rosso e vanno decrescendo verso il violetto.

A partire dal verde, andando verso il violetto, le onde luminose possiedono, inoltre, il potere di disgregare i gruppi molecolari e di produrre reazioni chimiche, nello stesso in cui esse eccitano sulla superficie di alcune sostanze vibrazioni luminose molto evidenti. Queste onde si estendono ben oltre lo spettro visibile, in una regione non accessibile all'occhio; le si riconosce impiegando preparazioni fotogeniche o sostanze di natura particolare dette *fluorescenti*, dal nome di una sostanza che presenta questo fenomeno, lo spato fluoro.

A partire dal verde, andando verso il rosso, le onde divengono più lunghe, e possiedono la proprietà di compromettere i gruppi molecolari con una azione semplicemente fisica, senza decomporli, almeno nei casi ordinari; queste onde si estendono pure oltre il rosso e formano così una seconda parte invisibile dello spettro.

In realtà, tuttavia, esiste in natura una sola e unica serie di onde la cui lunghezza va costantemente decrescendo a partire dall'estremità dello spettro calorifico oscuro fino all'estremità dello spettro chimico nella sua parte invisibile. Tra questi due estremi, vi è solo una parte molto limitata che gode della proprietà di far vibrare il nostro nervo ottico.

La fig. 101 ci mostra l'estensione e l'intensità relativa di queste diverse azioni separate l'una dall'altra, come ce le presenta l'azione dispersiva dei prismi. La zona *PW*, che forma la base di questa figura, ci mostra, nella parte visibile, le principali righe di Fraunhofer, e, oltre il violetto, quelle rivelate dall'azione chimica. Al di qua del rosso e nella zona *APαBA* si trova la regione che corrisponde alla parte scura dei raggi termici. Le curve che si trovano al di sopra fanno conoscere, dalle loro ordinate, le intensità relative di ogni radiazione nelle diverse parti dello spettro. L'intensità della luce è rappresentata dalla curva *AMH*, quella dell'azione chimica da *IKL*, quelle delle radiazioni calorifiche da *BDN*. La curva *PRN* rappresenta l'intensità dei raggi calorifici dell'arco voltaico, secondo M. Tyndall.

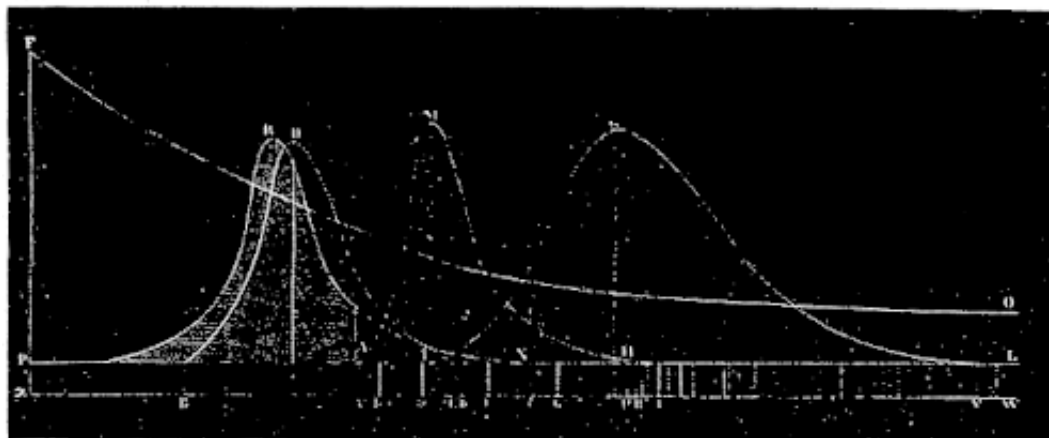


Fig. 101.

La curva superiore *FO* rappresenta la lunghezza relativa delle onde appartenenti ad ogni regione dello spettro. Le onde estreme dello spettro hanno lunghezze che stanno nel rapporto di 1 a 4,3; se prendiamo le

due parti scure, per lo spettro calorifico da un lato e per lo spettro chimico dall'altro, troviamo che le lunghezze delle onde estreme stanno nel rapporto 1 a 24: vi è tuttavia qualche incertezza per le onde meno rifrangibili. Riportiamo qui la tabella delle lunghezze d'onda che corrispondono ai punti principali, aggiungendo il numero delle vibrazioni al secondo:

	Lunghezza in milionesimi di <i>mm</i>	Numero di vibrazioni al secondo (in milioni)
Limite estremo dei raggi calorifici (prisma in salgemma)	4800	63
Limite del rosso	1445	155
Riga gialla <i>D</i>	589	509
Violetto estremo <i>H</i>	396	758
Estremità dello spettro chimico	317	946
Estremità dello spettro del cadmio	210	1364

Il primo numero di vibrazioni è stato dato da M. Miller, l'ultimo da M. Mascart.

È interessante confrontare la lunghezza di queste vibrazioni con quelle delle onde sonore. I suoni più gravi che il nostro orecchio è in grado di percepire corrispondono a 31 vibrazioni al secondo; i più acuti a 36000 vibrazioni al secondo; forse un orecchio esercitato può giungere fino ai suoni corrispondenti a 40000 vibrazioni; di conseguenza i valori estremi stanno tra loro nel rapporto di 1 a 130 circa. I limiti sono quindi ben più distanti tra loro rispetto alle vibrazioni rapide conosciute e misurate, e, in particolare, le vibrazioni sonore sono ben più estese di quelle luminose, poiché queste ultime comprendono appena un'ottava. Se si adottano certi risultati del professore P.M. Garibaldi, di Genova, si avrà per limite inferiore delle onde termiche, alla temperatura di 73°, un numero di vibrazioni che non supera i 40 000 000 al secondo, di modo che la lacuna che esiste tra la serie acustica e quella termica sarà rappresentata dal rapporto di 1 a 1000. È tuttavia certo che le vibrazioni intermedie esistono nei solidi, poiché, colpendo con verghe molto corte, come ha mostrato Koenig, si ottiene un suono la cui durata è molto breve, rendendolo difficilmente distinguibile da un semplice rumore. Questa stessa percussione produce un sensibile rialzo della temperatura, e fa, di conseguenza, vibrare l'etere. Ma non abbiamo mezzi per riconoscere la presenza di queste onde intermedie tra quelle che producono il suono e quelle che producono la luce.

Fermiamoci a queste considerazioni generali e studiamo ora ogni radiazione in particolare.

10.2 Radiazione luminosa

Ci occupiamo dapprima della radiazione luminosa, poiché è quella che conosciamo prima, quella che possiamo più facilmente studiare, e alla quale sono state consacrate le diverse espressioni che costituiscono la terminologia adottata in seguito per le altre. Non ripeteremo qui i dettagli già dati riguardanti lo spettro luminoso e l'origine delle righe nere che vi si notano. Esporremo solo ciò che è connesso con la luce.

La curva *AMH* (fig. 101) è stata tracciata da Fraunhofer con un procedimento alquanto imperfetto; ma è il solo che si possa impiegare, poiché è molto difficile confrontare rigorosamente il potere illuminante dei diversi colori; possiamo solo confrontare da questo punto di vista le sensazioni che un occhio senza imperfezioni prova sotto l'azione di diverse onde luminose. La buona struttura dell'occhio è una condizione molto essenziale, poiché vi sono individui affetti dalla malattia nota come *daltonismo*, per i quali le sensazioni del rosso e del verde si confondono. In realtà, non si può essere certi che la stessa onda luminosa faccia provare la stessa sensazione a tutti gli individui, poiché un colore non è, dopo tutto, che una denominazione puramente convenzionale, che rimane costante nei casi simili, circostanza che rende impossibile la scoperta di una differenza, salvo il caso molto raro in cui uno stesso individuo dà lo stesso nome a due colori diversi.

Il potere illuminante di diversi raggi consiste quindi, per i fisici, nell'attitudine più o meno grande che possiedono di influire sul nervo ottico dell'uomo. È probabile che la facoltà di percepire i fenomeni luminosi non sia la stessa per tutti, e che sia molto più estesa in certi animali sia dalla parte del rosso, ed abbia il suo massimo nel giallo. Gli umori dentro l'occhio differiscono poco dall'acqua pura, ed è ciò che rende l'organo della vista insensibile ai raggi calorifici.

L'estensione delle onde luminose sensibili all'occhio corrisponde di solito a ciò che si chiama in acustica una ottava, di modo che l'uomo non è messo in relazione con il mondo lontano se non tramite una piccola parte delle radiazioni solari. E tuttavia quale immensa varietà di sensazioni e quale bellezza di contrasti! Noi non vogliamo entrare in questo ordine di considerazioni, ma ci è impossibile non fare qui una osservazione importante. Si è creduto a lungo che la radiazione luminosa fosse il solo modo di azione del Sole sul mondo. Tuttavia essa è molto secondaria, e la sua importanza è assai piccola se la confrontiamo alle altre radiazioni. Cosa sono quindi le impressioni prodotte sulla materia delicata della nostra retina, se le confrontiamo con le modifiche che il calore produce a tutti i corpi e con le azioni molecolari che producono i raggi chimici?

Si sono fatte molte ricerche allo scopo di sapere se vi fossero semplici relazioni tra le lunghezze d'onda e le sensazioni dei colori principali. Si ammette, dopo Newton, una gamma nota di tutti i fisici, ma nella quale, in realtà, molte cose sono arbitrarie. Dopo la scoperta di Fraunhofer, si è cercato se la posizione delle righe principali corrispondeva a intervalli musicali, ma non si è giunti ad alcun risultato certo. Così, si è trovato che le righe C, D, H, I corrispondono alle note musicali re, mi, ut_2 , e, inoltre, la riga A sarà poco lontana dalla posizione che corrisponde a ut_1 . Se si prende la lettera C come corrispondente al re , F sarà un sol , con una differenza di $\frac{1}{81}$, cioè di una *virgola*. Ma tutti questi rapporti non hanno alcun influsso sulla visione, poiché sappiamo che non vi sono somiglianze tra l'armonia musicale e ciò che possiamo chiamare l'armonia cromatica. Questa esiste senza dubbio, ma la si deve studiare a *posteriori*, con metodi che sono del tutto al di fuori del nostro argomento.

La curva delle intensità luminose, così come delle altre radiazioni, non è simmetrica rispetto all'ordinata del vertice: essa mostra più rapidamente che ne discende. È un effetto dovuto alla rifrazione del prisma. I corpi rifrangenti non deviano i raggi luminosi proporzionalmente alle lunghezze d'onda, ma la deviazione è più sensibile per le più piccole; così la dispersione è maggiore nel violetto. Negli spettri prodotti dalla diffrazione tramite reticoli, questa causa non sussiste, e la curva delle intensità luminose è simmetrica rispetto al massimo che si trova nel giallo. Mossotti ha verificato con il calcolo la spiegazione che abbiamo dato.

I limiti dello spettro visibile non sono gli stessi per tutti gli individui, soprattutto dalla parte del violetto: vi sono coloro che vedono una parte considerevole dei raggi chimici, che sono oscuri alla maggior parte degli osservatori. Questo risultato può dipendere in parte dalla fluorescenza che questi raggi sviluppano sulla sostanza che li riceve o nel mezzo dell'occhio stesso, mezzo di cui si è constatata la fluorescenza.

Si è cercato di confrontare l'intensità della luce solare con quella delle stelle e delle altre luci note, ma tutte queste misure sono lontane dall'essere precise. Bond ha trovato che il Sole ha un potere illuminante rappresentato da 470 000 se lo si confronta con quello della Luna piena, a 622 000 000 se lo si confronta con quello di Venere preso in tutto il suo splendore, a 5 980 000 000 se lo confronta a quello di Sirio. Ma crediamo che tutti questi numeri sono molto piccoli, poiché, durante un'eclissi totale, la piccola quantità di luce che illumina l'atmosfera è più grande di quella della Luna piena, e sarà certamente difficile determinare numericamente il rapporto tra questa debole luce e quella dell'astro radioso.

La difficoltà che si incontra nel confrontare la luce del Sole con una unità determinata rende quasi impossibile constatare se il suo splendore è costante. Gli astronomi sono generalmente d'accordo nel collocare questo astro tra le stelle variabili, ma non si sono ancora potute osservare le sue variazioni in modo certo. Se si riuscisse, ciò sarà, senza dubbio, per mezzo di uno strumento più preciso della sensazione della vista; si farà probabilmente ricorso agli effetti termici o chimici, o a qualche altro fenomeno passibile di misurazione esatta e precisa. Sappiamo ora che le macchie presentano variazioni periodiche; ma non ne possiamo concludere che il potere illuminante del Sole presenti analoghe variazioni, poiché è possibile che la diminuzione di splendore proveniente dalla presenza delle macchie sia compensata dall'aumento della luce da parte delle facole.

10.3 Radiazioni termiche

Abbiamo già esposto quanto attiene all'intensità di queste radiazioni; ci resta da esaminare quanto riguarda la loro natura e le loro proprietà.

Dopo aver fatto passare un fascio di raggi solari attraverso un prisma, se lo si invia su un termoscopio molto sensibile, o meglio su una pila termoelettrica, si trova che il massimo del calore corrisponde ad una diversa regione, secondo la natura del prisma. Con un prisma di vetro comune, lo si trova nel rosso; corrisponde al giallo con un prisma cavo riempito d'acqua; il flint lo presenta un poco oltre il rosso; infine, con un prisma di salgemma, questo massimo si trova ben oltre il rosso, ad una distanza dalla riga A uguale a quella che separa le due righe A e C .

Queste differenze misero in fisici in grande imbarazzo, fino alle esperienze del Melloni. Questo scienziato ha mostrato che le diverse sostanze possiedono un potere assorbente selettivo e particolare, ognuna di esse agisce sui diversi raggi calorifici, assorbendo gli uni e lasciando passare gli altri, all'incirca come i mezzi colorati agiscono sulla luce bianca. Chiamò questa proprietà *termocromatismo*. Se si analizza la luce del Sole con un prisma rosso, giallo o verde, si troverà che il massimo del potere illuminante corrisponde a regioni diverse a seconda dei casi; è circa quanto succede per il calore nelle esperienze citate. Il salgemma è la sostanza più diaterma che possiamo impiegare per l'analisi dei raggi solari, ma essa non è del tutto priva di potere assorbente.

Gli stessi gas possiedono la capacità di assorbire i raggi calorifici, e, di conseguenza, la nostra atmosfera assorbe una parte alquanto considerevole di questi raggi. Le onde più lunghe sono quelle più facilmente assorbite; così un gran numero di raggi meno rifrangenti che cadono sulla nostra atmosfera sono fermati e non giungono fino a noi.

L'assorbimento prodotto dai gas semplici, ossigeno e azoto, è estremamente piccolo; se si fa variare la pressione da 5 a 760 *mm*, questo stesso assorbimento varia circa nel rapporto di 1 a 1,5. Non è così per i gas composti che si trovano nella nostra atmosfera, come l'anidride carbonica, il vapore acqueo, l'ammoniaca

e alcuni altri. Il professor P. M. Garibaldi, di Genova, ha dimostrato con esperienze perentorie che, per una pressione di 760 *mm*, questi gas hanno poteri assorbenti rappresentati dai seguenti valori:

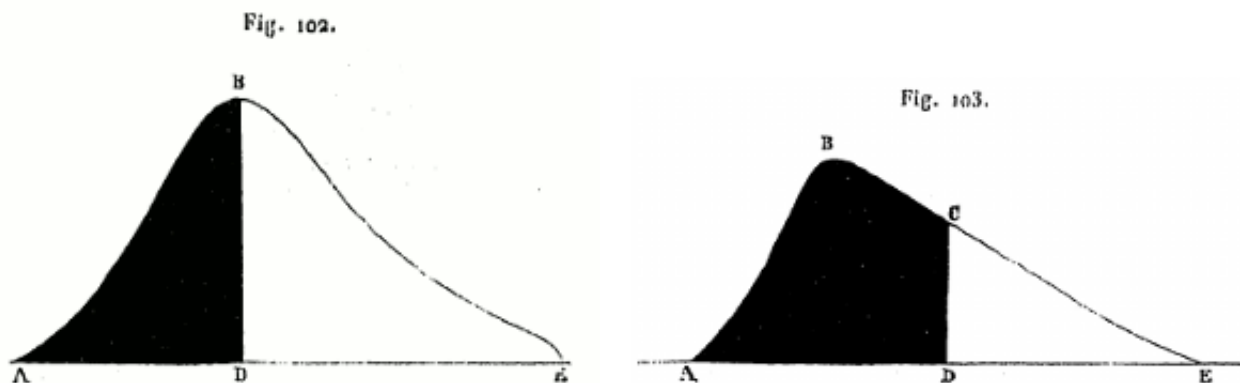
Aria atmosferica	1
Anidride carbonica	92
Ammoniaca	546
Vapore acqueo	7937

Una quantità di vapore acqueo in grado di produrre una pressione da 9 a 10 *mm* esercita già un assorbimento cento volte maggiore di quello dell'aria atmosferica.

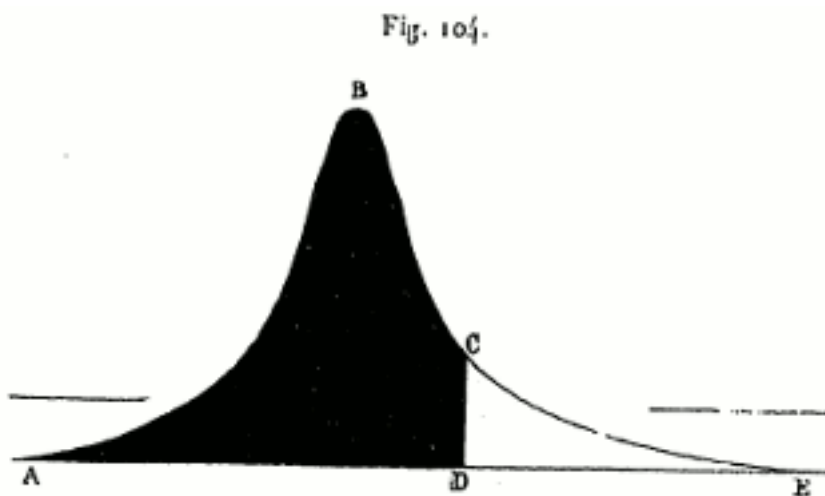
Da queste proprietà risulta che ci è impossibile ricevere, e, di conseguenza, analizzare tutte le radiazioni calorifiche del Sole; la curva *BDN* tracciata nella fig. 101 rappresenta solo quelle che hanno già attraversato la nostra atmosfera subendo un significativo assorbimento.

Per riconoscere le altre radiazioni, i fisici hanno fatto ricorso a sorgenti artificiali di calore. M. Tyndall, in particolare, ha analizzato con molta precisione la sorgente più attiva che conosciamo, cioè l'arco voltaico. Per stabilire più facilmente un confronto tra i diversi risultati, riproduciamo qui tre curve. La fig. 102 è dovuta a W. Herschel; rappresenta la variazione dell'intensità calorifica nello spettro ottenuto da un prisma flint; la parte scura è relativa ai raggi del calore oscuro.

La fig. 103 rappresenta lo spettro ottenuto da M. Müller con un prisma di salgemma.



La fig. 104 mostra lo spettro dell'arco voltaico ottenuto da M. Tyndall, e che, per maggiore chiarezza, abbiamo pure riprodotto nella fig. 101.



Si vede da queste curve quanto sia piccola la parte luminosa confrontata con quella oscura; inoltre, confrontandole con la curva delle intensità calorifiche del Sole (fig. 101), si vede quanto la nostra atmosfera assorba i raggi oscuri.

Malgrado tutta la cura di M. Tyndall, i mezzi impiegati nelle esperienze non potevano essere del tutto diatermi; l'aria del suo laboratorio non poteva avere una purezza perfetta, poiché conteneva necessariamente

vapore acqueo, che possiede un notevole potere assorbente. Il professor Garibaldi ha sperimentato nel vuoto sul calore oscuro del platino, portato dapprima ad una temperatura di 78° , e scaldato progressivamente fino al rosso bianco. Ha così trovato che l'estensione delle radiazioni oscure è almeno quattro volte e mezza più considerevole di quella delle radiazioni luminose. Ma bisogna osservare che queste esperienze essendo state fatte senza prisma, hanno evitato il restringimento della parte oscura dello spettro che si è visto nelle esperienze di Tyndall, producendo un campionamento maggiore di quello ottenibile con i procedimenti ordinari.

Qualunque cosa rappresentino questi dettagli, è certo che una parte considerevole dei raggi oscuri emessi dal Sole è intercettata dall'atmosfera che ne impedisce l'arrivo sulla superficie della Terra; questo assorbimento è più considerevole per i raggi calorifici che per quelli luminosi, poiché le onde, al diminuire della loro lunghezza, acquistano una proprietà sempre crescente di attraversare i mezzi trasparenti.

Lo studio di questi fenomeni ha fatto scoprire un fatto molto interessante, che prova la potenza e l'energia considerevole dei raggi solari: l'intensità delle radiazioni oscure aumenta più rapidamente di quella della radiazioni luminose; dobbiamo concluderne che, essendo la luce del Sole estremamente intensa, le radiazioni termiche che emanano dalla sua superficie devono avere una intensità molto più grande di quanto possiamo supporre. Si può evidenziare questa conclusione togliendo ai raggi solari tutto il potere illuminante, in modo da lasciare intatta la loro potenza calorifica, e ciò permette di valutare il rapporto tra le due radiazioni. Per ottenere questo risultato, si fa passare un fascio di raggi solari attraverso uno strato di solfuro di carbonio contenente iodio in soluzione. I raggi divengono invisibili, e se il contenitore di questa soluzione ha la forma di una lente convergente, al fuoco invisibile di questa lente si sviluppa una temperatura assai elevata che determina la combustione dei corpi combustibili. Il professor Garibaldi ha mostrato, con simili esperienze, che, per il platino incandescente, il rapporto tra le radiazioni luminose e quelle oscure è circa uguale a $\frac{13}{320}$. Per il Sole, M. Tyndall ha mostrato che il calore che accompagna la parte luminosa è solo $\frac{1}{9}$ di quello che si trova nella parte oscura.

Dal verde fino al violetto, i nostri termoscopi più sensibili non misurano alcuna specie di calore. Non bisogna concluderne che le ondulazioni corrispondenti siano inattive; inizia là una nuova attività, quella che ha come effetto la messa in movimento dei gruppi atomici e di distruggere le combinazioni risultanti dell'affinità.

L'atmosfera terrestre, assorbendo una parte così considerevole dei raggi solari, non le distruggono; sono tenute di riserva per impiegarle in seguito a nostro vantaggio. Dapprima, la parte che giunge fino a noi riscalda i corpi e si trova, per la loro azione molecolare, trasformata in calore di bassa temperatura a onde troppo lunghe; questi raggi, così trasformati, non sono più in grado di attraversare l'atmosfera, e ciò produce un accumulo di calore negli strati più bassi. Si può anche, prendendo certe precauzioni, portare l'acqua alla temperatura di ebollizione. Basta, per questo, far cadere i raggi solari su una scatola annerita, foderata di sostanze non conduttrici e la cui apertura, ruotata dalla parte del Sole, è ricoperta da parecchie lamine di vetro trasparente. Un termometro esposto in questa scatola indica presto una temperatura superiore a 100° , poiché i raggi di bassa temperatura che si originano nel contenitore, non possono attraversare il vetro, rimanendo all'interno della scatola e riscaldandola sempre più; e siccome, dalla legge della radiazione solare, il termometro deve sempre indicare 13 o 14 gradi al di sopra della temperatura del mezzo nel quale si trova immerso, si giunge a un limite che può superare i 100 gradi. Si è pure proposto di utilizzare questo calore per riscaldare l'acqua e risparmiare combustibile.

Il calore immagazzinato nell'atmosfera ci rende ancora un altro servizio. La radiazione notturna è considerevolmente diminuita dalla presenza dell'aria atmosferica, e in tal modo risulta rallentato e ridotto il raffreddamento del globo e delle piante che nutre. Il vapore acqueo agisce con una grandissima efficacia, e uno strato umido dello spessore di soli alcuni metri ferma il raffreddamento notturno tanto quanto l'atmosfera intera.

Ma la circostanza più importante, è l'assorbimento del calorico che accompagna la trasformazione dell'acqua in vapore. L'acqua evapora in masse considerevoli, soprattutto nelle regioni equatoriali, ed assorbe così una grande quantità di calore di vaporizzazione che rimane latente. Questo calore viene trasportato verso le latitudini più lontane, e stabilisce, nell'involupto atmosferico che circonda il globo, una uguaglianza di temperatura che la radiazione diretta sarebbe lontana dal produrre. La quantità di calore che passa così dall'equatore ai poli è estremamente elevata, come si comprenderà con una valutazione anche solo grossolana.

Numerose osservazioni anche precise ci hanno insegnato che, nelle regioni equatoriali, l'evaporazione fa scomparire ogni anno uno strato di acqua di almeno 5 *m* di spessore. Supponiamo che, nelle stesse regioni, cada annualmente uno strato di pioggia di 2 *m*; rimane ancora una quantità d'acqua rappresentata da uno strato di 3 *m* e che deve passare allo stato di vapore nelle zone più vicine ai poli. Si può valutare a 70 milioni di miglia geografiche la superficie sulla quale si produce l'evaporazione, e, partendo da questo dato, si trova che lo strato di 3 *m* rappresenta un volume di acqua uguale a 721 trilioni di metri cubi (721×10^{12}). La quantità di calore contenuta in questa massa di vapore è in grado di fondere una massa di ferro il cui volume è almeno uguale a 6 milioni di miglia cubiche¹!

Questa massa enorme di calore passa per così dire in *incognito* dall'equatore ai poli, trasportata dal vapore, e questo vapore, trasformandosi in acqua e ghiaccio, lascia sfuggire tutto il calore che aveva assorbito, contribuendo così ad addolcire il clima di queste regioni desolate. Il capitano Maury, al quale dobbiamo queste considerazioni,

¹Impieghiamo qui le miglia marine di 1852 *m*.

evidenza che non si sarebbe mai ottenuto un simile risultato con un gas propriamente detto, poiché, per trasportare la stessa quantità di calore, sarebbe stato necessario riscaldarlo fino alla temperatura di fornace.

È quindi impossibile non vedere nell'insieme della Creazione una Saggezza infinita, che, imponendo certe leggi elementari alla materia, le ha determinate in modo che anche le conseguenze più remote siano in armonia con la conservazione della vita organica, e con la bellezza degli esseri ragionevoli che, dopo molti secoli, dovevano popolare la superficie dei pianeti. È soprattutto in questi risultati inattesi che brilla la Saggezza eterna, meravigliandoci per l'estensione delle sue concezioni e per la precisione con la quale raggiunge i propri scopi.

Le più esatte osservazioni ci provano che l'atmosfera terrestre assorbe, lungo la verticale, il 28% del calore che cade sulla superficie, e l'assorbimento totale, nell'emisfero illuminato, è circa uguale ai $\frac{3}{5}$ del calore incidente, di modo che alle diverse altezze, la parte trasmessa è rappresentata nel modo seguente:

Altezza	Quantità trasmessa
90°	0,72
70	0,70
50	0,64
30	0,51
10	0,16
0	0,00

Quanto detto sui movimenti atmosferici si può applicare alla circolazione delle masse liquide che compongono l'Oceano. È il calore solare che mette in movimento queste notevoli masse e determina le correnti interne, il cui ruolo è così importante. Accontentiamoci di indicare questa idea; il suo sviluppo non troverebbe spazio nei limiti che ci siamo imposti.

10.4 Azione chimica dei raggi solari

Grazie alla fotografia, tutto il mondo conosce l'azione che i raggi luminosi esercitano sui sali di argento; essi si decompongono e anneriscono. Ma i raggi solari producono un gran numero di fenomeni simili, che passano comunemente inosservati o che non si manifestano se non dopo una lunga esposizione alla luce, come sono la colorazione o la decolorazione di alcune sostanze, e soprattutto la respirazione dei vegetali di cui abbiamo già parlato.

L'azione chimica è, come il calore, una azione meccanica, e può essere valutata meccanicamente. Ma la determinazione del suo equivalente presenta una particolare difficoltà, poiché l'azione del Sole mette in gioco l'attività interna delle molecole, e nel risultato finale è impossibile fare la parte di due cause.

MM. Bunsen e Roscoe hanno valutato l'azione chimica prendendo come punto di partenza la combinazione del calore con l'idrogeno. L'americano Draper aveva già sottolineato che quando un raggio di luce diffusa agisce su questi due gas per determinare la loro combinazione, vi è indebolimento della sua intensità e del suo potere di illuminazione. È su questo fatto fondamentale della trasformazione dell'energia luminosa delle onde eterie in energia chimica, che MM. Bunsen e Roscoe hanno stabilito la loro valutazione. Hanno così ottenuto risultati che indichiamo:

1° L'intensità della radiazione chimica cadendo sulla nostra atmosfera è molto grande per produrre in un minuto la combinazione di una miscela di cloro e idrogeno formando uno strato di 35 m di altezza.

2° Sulla Terra giungono solo i $\frac{2}{5}$ di queste radiazioni.

3° L'atmosfera possiede un grande potere diffusivo per i raggi chimici; questo fa sì che nelle regioni polari, queste radiazioni sono proporzionalmente più energiche della radiazione termica.

4° Fino ad una latitudine di 50°, i raggi chimici diretti sono più intensi di quelli diffusi, ma al di là avviene il contrario. A San Pietroburgo, a Roma e all'equatore, i raggi diretti stanno tra loro come i numeri 1, 2, 4.

5° Tutta l'energia chimica che il Sole emette sarebbe sufficiente a combinare in un minuto 25 milioni di migliaia cubiche di una miscela di cloro e idrogeno. Se si conoscesse l'equivalente in forza meccanica, ma è attualmente impossibile farlo a causa delle difficoltà già da noi esposte. Tali sono le conclusioni interessanti del lavoro di MM. Bunsen e Roscoe.

L'azione dei raggi chimici non produce solo combinazioni e decomposizioni. Non è impossibile che questi raggi, penetrando all'interno dei corpi, si trasformino in onde più lunghe, in modo da produrre un riscaldamento. Alcuni corpi, che sono indicati con il nome di fluorescenti, producono un effetto simile alla loro superficie: per esempio, la soluzione di solfato di chinino, l'infusione di corteccia di ippocastano d'India, il vetro di uranio, la soluzione alcolica di clorofilla, ecc. Queste sostanze riflettono raggi corrispondenti a onde più lunghe di quelle dei raggi incidenti; inoltre, anche se illuminate dalla luce monocromatica, riflettono luce composta.

I raggi chimici eccitano la fosforescenza nei corpi che ne sono soggetti, per esempio nel celebre fosforo di Canton. Allora anche la loro rifrangibilità è modificata, come si può vedere nel grande lavoro di M. Becquerel sulla luce, poiché i corpi fosforescenti producono spettri molto diversi tra loro.

L'azione molecolare, che aumenta la lunghezza delle onde più corte, può anche diminuire quella della onde più lunghe. Se ne trova un esempio sorprendente in una esperienza curiosa immaginata da M. Tyndall. I raggi solari colpiscono un vaso contenente una soluzione di iodio in solfuro di carbonio; i raggi oscuri sono i soli ad attraversarla, e subiscono poi l'azione di una lente convergente; il fuoco resta invisibile, ma se si pone una lamina di platino, essa non tarda a divenire incandescente, essendo i raggi oscuri divenuti luminosi.

Il Sole non è il solo corpo illuminante che invia nello stesso tempo raggi chimici. Alcune sorgenti artificiali, come la luce elettrica e quella del magnesio, sono anche più ricche, fatte salve le proporzioni. Ma è alquanto probabile che, senza l'azione assorbente della nostra atmosfera, il Sole le importerebbe in questo rapporto come con il rapporto del potere illuminante. Tuttavia regna ancora molta incertezza su tutte queste questioni. Bisognerebbe eseguire esperienze su un piatto molto elevato, quello di Quito per esempio, allo scopo di riconoscere con maggiore precisione l'influenza della nostra atmosfera: in regioni così poco elevate come le nostre al di sopra del livello del mare, ci è possibile valutare solo in modo indiretto e molto imperfetto.

10.5 Attività magnetica del Sole

Il titolo di questo paragrafo sorprenderà senza dubbio più di un lettore, poiché sembra impossibile che la forza magnetica risieda in un corpo la cui temperatura è così elevata. Ma prima di tutto, non pretendiamo che esista nel Sole un'azione magnetica diretta, come quella che osserviamo sulla Terra; diciamo solo, è ciò è un fatto incontestabile, che il Sole esercita un'azione sui fenomeni magnetici che si manifestano sul nostro globo. Se questa azione è diretta o indiretta, è una questione puramente speculativa; per il momento, ci accontenteremo di esporre i fatti. Aggiungeremo solo che, siccome il globo terrestre non deve tutta la sua forza magnetica ai minerali ferromagnetici, ma ad un altro principio ancora poco noto, può essere la stessa cosa per il Sole. Non c'è nulla che ci debba sorprendere, poiché sappiamo che tutti i corpi circondati di correnti elettriche possono agire come una calamita.

Gli inglesi hanno particolarmente contribuito negli ultimi anni, a mettere in evidenza le leggi che reggono i misteriosi fenomeni del magnetismo terrestre. Hanno eretto numerosi osservatori magnetici nei due emisferi, e i lavori che hanno eseguito hanno portato alle seguenti conclusioni:

1° Quando una barra magnetica è liberamente sospesa, la sua posizione rispetto alla Terra non è assolutamente fissa, ma varia continuamente, e queste variazioni presentano un periodo diurno e un periodo annuale. Consideriamo, nella bussola di declinazione, l'estremità che è diretta verso il Sole, cioè il polo sud nel nostro emisfero, e il polo nord nell'altro. Questa estremità sembra sottrarsi al Sole a partire dal momento in cui sorge, e il movimento cessa un'ora e mezza dopo che questo astro è passato per il meridiano magnetico; a partire da questo istante, l'ago ritorna indietro fino al tramontare del Sole. Durante la notte questo movimento si ripete, ma la sua ampiezza è molto minore.

2° Si riconosce ancora nel moto dell'ago calamitato un periodo annuale. L'oscillazione diurna della bussola di declinazione risulta di due elementi, uno costante, l'altro dipendente dalla declinazione del Sole. Questi due movimenti si sommano o si sottraggono a seconda che il Sole si trova nello stesso emisfero dell'ago o in quello opposto.

3° La forza orizzontale, che si misura con una barra disposta perpendicolarmente al meridiano magnetico, è soggetta ad oscillazioni simili, ma i massimi e i minimi si trovano a tre ore di distanza da quelli della declinazioni.

4° Vi è un massimo e un minimo annuali, indipendenti dall'emisfero in cui si trova il Sole, ma dipendenti dalla sua posizione, apogea o perigea.

5° Oltre alle variazioni regolari e normali, le barre magnetiche sono soggette a variazioni straordinarie che dipendono dalle aurore boreali e dalle burrasche elettriche della nostra atmosfera.

6° Infine l'ampiezza dell'oscillazione diurna è molto variabile, e, in un periodo di circa dieci anni, può assumere valori doppi uno dell'altro. Ma la circostanza più straordinaria, è che i massimi e minimi coincidono con le aurore boreali, e con i massimi e minimi delle macchie visibili sul Sole. La stessa variazione nelle oscillazioni periodiche si ritrova ancora nel periodo delle perturbazioni straordinarie alle quali si assegna il nome di *tempeste magnetiche*.

Siccome quest'ultima relazione è molto importante, dobbiamo metterla in evidenza, confrontando un estratto della tabella comparativa di questi fenomeni. Lo ricaviamo dai lavori di MM. Wolf e Fritz, già prima ricordati.

Massimi delle macchie	Massimi delle aurore boreali	Oscillazioni diurne della bussola (media)
1706	1707	”
1718	1721	”
1728	1728	”
1739	1738	”
1750	1749	”
1761	1760	”
1770	1769	”
1770	1779	”
1788	1788	”
1804	1804	”
1817	1826	”
1830	1830	13, 07 Parigi
1837	1839	11, 47 Monaco
1848	1848	11, 55
1860	1859	11, 17

Minimi delle macchie	Minimi delle aurore boreali	Variazioni diurne della bussola (media)
1608	1700	”
1712	1714	”
1723	1724	”
1733	1733	”
1745	1745	”
1758	1755	”
1766	1766	”
1776	1776	”
1785	1785	”
1799	1799	”
1811	1811	”
1823	1823	8, 18 Gottinga
1834	1834	7, 79 Monaco
1844	1844	5, 24
1856	1856	5, 02
1867	1867	5, 05

Sfortunatamente le osservazioni magnetiche ci difettano per la prima parte di questa tabella; ma gli ultimi periodo bastano a impedirci di prendere una delusione.

Discutendo più seriamente questi risultati, sembra che si evidenzi la traccia di un secondo periodo semi secolare di cinquantacinque anni e mezzo; ma poiché non è certo, per le erronee osservazioni antiche, ci accontenteremo di indicarlo senza trattarne più a lungo.

L'esistenza del periodo decennale è stata confermata dalle osservazioni fatte al Collegio Romano durante gli ultimi dieci anni. Abbiamo, proprio a questo scopo, costruito un osservatorio magnetico, e, a partire dal 1858, facciamo un calcolo esatto di tutte le macchie solari.

Gli astronomi ammettono quindi unanimemente il fatto di un periodo decennale nelle variazioni del magnetismo terrestre coincidente con un periodo simile nelle variazioni delle macchie solari.

Per quanto inattesa sia tale conclusione, essa non è però meno certa; sfortunatamente questa relazione è più difficile da spiegare che da constatare. L'influenza del Sole sull'ago calamitato può essere diretta o indiretta; è diretta se, per una azione magnetica che gli è propria o a causa di correnti elettriche di cui è sede, il Sole esercita da sé un'azione sulla bussola o sul magnetismo terrestre; essa è indiretta se produce nello stato del globo cambiamenti fisici in grado di modificare il magnetismo terrestre o le correnti telluriche.

La prima opinione è stata sostenuta da M. Sabine, e l'abbiamo altre volte condivisa. È senza dubbio difficile ammettere che la materia che compone il Sole abbia un effettivo potere magnetico; ma può forse avvenire che questo astro sia circondato da correnti elettriche intense che agiscono a distanza come effettivi magneti. Il Sole non sarebbe il solo corpo celeste che manifesta una simile azione, poiché la Luna esercita una influenza, anche se debole, ma incontestabile, sull'ago magnetico.

Tuttavia la seconda opinione non sembra più probabile. Vediamo infatti che il periodo decennale delle variazioni diurne ha una certa relazione con le aurore boreali, e il valore assoluto delle variazioni dipende in

modo inconfutabile dal numero delle aurore. Le aurore polari sono certamente fenomeni meteorologici prodotti dall'elettricità che è trasportata dall'equatore ai poli attraverso le regioni superiori dell'atmosfera. Questa elettricità produce sul globo terrestre reali correnti che agiscono sull'ago della bussola. L'esistenza di queste correnti telluriche è oggi perfettamente verificata; esse producono, nei fili del telegrafo, correnti indotte, in grado a volte di produrre scariche. Durante i quattro anni nei quali abbiamo avuto a disposizione un filo telegrafico di 50 km, abbiamo trovato che queste correnti esistono *sempre* e che, durante le perturbazioni, hanno una grande intensità. Ultimamente, M. Airy ha tratto, dalle osservazioni di Greenwich, la conclusione che tutti i movimenti magnetici sono dovuti a correnti circolanti nella Terra.

Essendo l'elettricità la causa immediata di tutte queste straordinarie perturbazioni, si potrebbe associare la stessa causa alle variazioni periodiche di ogni giorno; è facile comprendere che esiste ogni giorno, nell'atmosfera, una variazione periodica in grado di produrre questo risultato. Questa variazione si collega principalmente alle diverse fasi che presenta lo stato del vapore acqueo. Si era cercato di spiegare questa variazione unicamente con l'andamento del termometro; ma l'influenza della temperatura basterebbe al massimo a rendere conto delle oscillazioni della declinazione, le sole che si conoscono; ora che si conoscono anche le variazioni dell'inclinazione e della forza orizzontale, basta fare ricorso a un altro tipo di spiegazione. Il solo possibile, secondo noi, consiste nell'ammettere che le variazioni della temperatura agiscono solo in modo indiretto sul magnetismo, modificando lo stato elettrico del globo tramite i vapori.

Sebbene questa teoria appaia la più seducente, e da noi sia considerata come la più probabile, presenta tuttavia alcune difficoltà. Allo stato attuale della scienza, non si sa trovare con certezza il legame che collega queste variazioni elettriche a quelle delle macchie. Senza dubbio la formazione di una macchia deve essere accompagnata da fenomeni elettrici. Ma non sappiamo immaginare come questi fenomeni possano influire sui nostri aghi magnetici. Quanto alle aurore boreali che si vedono a volte comparire simultaneamente nei due emisferi, esse non coincidono quasi mai in modo rigoroso con la comparsa individuale delle macchie, e se questa coincidenza si presenta a volte, non gli si deve attribuire grande importanza, poiché non possiamo constatare il momento in cui si formano le macchie che si originano nell'emisfero del Sole opposto a quello che vediamo. Non si può quindi stabilire tra questi due ordini di fenomeni una relazione di causa-effetto.

Nel secolo scorso, Mairan cercò di associare le aurore boreali all'atmosfera solare. Ma la sua teoria suppone che l'atmosfera del Sole si estenda fino alla Terra, ipotesi insostenibile.

Tutto ciò che ora si può affermare, è che la periodicità delle macchie presuppone una periodicità nell'attività solare; ancora che le regioni polari del Sole non presentano mai macchie, forse perché in questi punti l'attività è molto grande, come l'intero corpo solare nei periodi di minimo, è in uno stato di tranquillità e di riposo generale. Le variazioni di questa attività potrebbero comunicarsi alla Terra, sia per mezzo del calore, sia tramite qualche altro mezzo ancora sconosciuto, per esempio con l'induzione elettromagnetica, producendo in tal modo sul nostro globo fenomeni meteorologici o elettrici.

Tutto ciò che abbiamo detto, beninteso, è solo una semplice congettura, poiché questa questione è una di quelle la cui soluzione va lasciata in eredità alle generazioni successive. Per risolverla, bisognerà trovare un metodo più preciso si misura della radiazione solare; inoltre, bisognerà misurare queste radiazioni per lunghi periodi, allo scopo di constatare le loro variazioni e i limiti entro i quali sono comprese; queste misure dovranno farsi in diversi luoghi dei due emisferi terrestri, allo scopo di evitare le influenze locali. È solo dopo aver esaurito questo programma che ci si potrà formare una opinione ed ammettere una teoria con cognizione di causa. Il lettore può giudicare quanti siamo ancora lontani.

Capitolo 11

Il Sole centro di forza - La Gravitazione

Il Sole è il centro attorno al quale tutti i pianeti descrivono le loro orbite. Deve questa prerogativa alla sua enorme massa, che è circa mille volte maggiore di quella di tutti gli astri che lo circondano. Esporremo qui i fenomeni planetari che sono intimamente collegati alla formazione del Sole, senza tuttavia entrare nei dettagli che contraddistinguono un trattato di Cosmografia o di Astronomia. Per questi dettagli, si può consultare una quantità di opere dedicate, tra le quali ci permettiamo di indicare la nostra *Tavola fisica del sistema solare*; Roma, 1859.

11.1 Formazione del sistema planetario

Gli scienziati odierni sono unanimi nell'ammettere che il nostro sistema solare è dovuto alla condensazione di una nebulosa che si estendeva al di là dei limiti occupati attualmente dai pianeti più lontani. Questa nebulosa era originariamente dotata di un moto di rotazione molto lento, che subì in seguito una accelerazione. Secondo una nota legge meccanica detta *legge delle aree*, ogni particella libera deve muoversi in modo che il suo raggio vettore descrive aree uguali in tempi uguali; da ciò deriva che, diminuendo il raggio costantemente per la progressiva contrazione, l'arco descritto nell'unità di tempo aumenta, affinché l'area rimanga costante. Da questo aumento di velocità risulta un aumento della forza centrifuga, e quando questa è divenuta uguale alla forza di gravitazione, si sono formati anelli che si trovano liberamente sospesi attorno alla massa centrale. Col crescere della velocità, questi anelli si sono spezzati, e i diversi frammenti, obbedendo individualmente alle leggi dell'attrazione, hanno a loro volta formato nuove masse isolate tra loro, che sono divenute centri d'attrazione secondari simili al centro principale. Queste masse, a loro volta, si sono circondate di anelli del secondo ordine, alcuni dei quali sono rimasti fino ai nostri giorni, mentre gli altri, rompendosi, hanno formato satelliti.

Questa teoria, proposta da Kant, Herschel e Laplace, è stata confermata dagli ingegnosi esperimenti di M. Plateau. Messa una massa d'olio in sospensione in un liquido della stessa densità, composto da una miscela di acqua e alcool, assume spontaneamente la forma sferica che tende a darle l'attrazione molecolare. Se la si fa ruotare attorno al suo diametro verticale con una velocità crescente, si vede dapprima la sfera appiattirsi; in seguito l'anello si stacca un anello simile a quello di Saturno; infine, crescendo sempre la velocità, si formano piccole sfere che ruotano su se stesse attorno alla massa principale.

La materia che componeva la nebulosa primitiva doveva essere in un stato di rarefazione molto più considerevole di quello che otteniamo con le migliori macchine pneumatiche; essa si enormemente contratta e condensata, lasciando a diverse distanze pianeti e satelliti; il Sole è il residuo ancora incandescente e gassoso di questa massa primitiva. Ritroviamo nel mondo siderale le vestigia di questa formazione; nel nostro mondo planetario, questi sono gli anelli che circondano Saturno, e nel mondo stellare, sono le nebulose a spirale e anulari. Queste masse sono composte di una materia ancora gassosa, e sembrano costituire mondi in via di formazione.

È impossibile assegnare attualmente le circostanze che hanno determinato la formazione di ogni pianeta; ma la legge che regola le loro distanze sembra imprimere all'intero sistema solare l'impronta di una formazione graduale, nella quale questi astri hanno dovuto, ognuno a loro volta, distaccarsi dalla massa principale.

Kepler è il primo che scopre una certa regolarità nella distribuzione dei pianeti; aveva tuttavia una anomalia nella distanza che separa Marte e Giove; così, basandosi su questa sola considerazione, osò annunciare che si sarebbe scoperto più tardi in questa regione un astro fino ad allora sconosciuto. Sono serviti circa due secoli perché la sua previsione venisse confermata; sappiamo ora che invece di un solo pianeta che Kepler aveva previsto, ne esiste un centinaio. Il 108° è stato scoperto il 29 aprile 1869. Tutti questi astri, tuttavia, occupano semplicemente il posto di un solo pianeta, la cui massa, secondo i calcoli di M. Le Verrier, è circa uguale a quella della Terra. Questo stato di divisione ci mostra che all'epoca in cui si sono formati i pianeti, doveva esistere una grande perturbazione nella massa solare.

Dopo Kepler, Titius trovò una legge più esatta per esprimere le relazioni esistenti tra le distanze dei pianeti dal Sole. Se indichiamo con n il numero d'ordine del pianeta considerato, a partire da Venere, la legge di Titius è contenuta nella seguente formula:

$$D = 4 + 3 \times 2^{n-1}$$

Riproduciamo una tabella comparativa delle distanze reali, dedotte dall'osservazione, e delle distanze approssimate, calcolate con la formula precedente; il lettore potrà apprezzare l'accordo significativo che esiste tra le due serie di numeri.

Pianeti	Distanze reali	Distanze approssimate secondo la legge di Titius
Mercurio	3,871	4
Venere	7,233	7
Terra	10,000	10
Marte	15,237	15
Piccoli pianeti	22,0 – 31,6	28
Giove	52,028	52
Saturno	95,388	95
Urano	191,826	196
Nettuno	300,369	338

M. Hinrichs, combinando le leggi di Kepler con l'ipotesi della rotazione iniziale, ha mostrato che la formula di Titius è la conseguenza della condensazione progressiva della nebulosa solare, condensazione che doveva essere regolare e proporzionale al tempo, di modo che i valori che misurano le distanze dei pianeti misurassero anche i tempi che hanno separato la loro formazione. Le differenze, molto piccole, del resto, che si trovano tra i valori calcolati secondo la teoria e quelli dedotti dall'osservazione, si possono facilmente spiegare con la resistenza dell'etere e con le influenze perturbatrici che i pianeti hanno esercitato gli uni sugli altri dalla loro formazione. La resistenza dell'etere deve essere stata più importante sui pianeti più antichi: è per questi, infatti, che si osservano le maggiori differenze. Le distanze dei satelliti, nei sistemi secondari, sono pure soggetti ad una legge simile; ma qui gli scarti sono ancora più grandi per i pianeti più antichi.

M. Hinrichs giunge a una conclusione molto importante: la legge della condensazione progressiva si trova collegata alla terza legge di Kepler. Tale legge è essa stessa una conseguenza della gravitazione universale che agisce in ragione diretta delle masse e in ragione inversa del quadrato delle distanze. Questo grande principio dovuto al genio di Newton è in realtà un riassunto delle tre leggi di Kepler di cui richiamiamo qui l'enunciato: 1° le aree descritte dai raggi vettori sono proporzionali ai tempi; 2° le orbite sono ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi; 3° i quadrati dei periodi di rivoluzione stanno tra loro come i cubi degli assi maggiori. Si vede quindi che la legge di formazione del sistema planetario sarà una semplice conseguenza della gravitazione universale.

È utile esaminare con qualche dettaglio le circostanze principali di questa grande formazione. Abbiamo già detto che l'esistenza di piccole pianeti sembra corrispondere a un periodo di perturbazione. Questa ipotesi sembra confermata da un certo numero di fatti che servono a spiegarla.

1° Tutti i pianeti esterni a questa zona hanno una densità molto piccola, in genere inferiore a quella dell'acqua; gli altri, al contrario, hanno un peso specifico cinque volte superiore a quello dell'acqua.

2° Lo spazio occupato dai piccoli pianeti è maggiore di quello che separa la Terra dal Sole; alcuni tra loro si avvicinano talmente all'orbita di Marte, che questo pianeta sembra, per così dire, far seguito alla serie di asteroidi, di modo che la sua formazione sarebbe stata influenzata da questa grande causa di discontinuità.

3° Tutti i pianeti esterni hanno una numerosa corte di satelliti; Giove ne ha quattro, Saturno otto, Urano quattro, Nettuno ne possiede almeno uno; tra i pianeti più vicini al Sole, la Terra è il solo ad avere un satellite.

4° Le masse dei pianeti esterni sono enormemente maggiori; la più piccola è da sola maggiore di tutti i pianeti interni messi insieme. Questo fatto è dovuto, almeno in parte, all'immensa estensione nella quale era inizialmente ripartita la massa che compone questi pianeti.

5° Si è scoperto un fatto molto importante studiando allo spettroscopio la luce riflessa dalle loro atmosfere. I pianeti esterni mostrano tutti per la luce solare un potere di assorbimento selettivo notevole. Giove presenta nel rosso una banda nera che non ritroviamo nelle nostre righe atmosferiche. Saturno possiede la stessa banda, ma ancora più scura. Lo spettro di Urano ha due righe speciali molto intense nel verde e nel blu, e il giallo manca completamente. Lo spettro di Nettuno è ancora più singolare. Presenta tre bande nere principali, la prima tra il giallo e il verde, a uguale distanza dalle righe D e b del Sole; la seconda coincide con la riga b ; la terza è situata nel blu. Il giallo è assai brillante, ma il rosso manca completamente; il verde è assai abbondante, ciò che spiega il colore verde che presenta questo pianeta.

Questi pianeti sono quindi circondati da atmosfere molto dense e molto estese. L'esistenza di queste atmosfere si manifesta ancora per bande da cui sono solcate parallelamente all'equatore. Giove presenta nel suo aspetto variazioni molto grandi e fenomeni che sembrano avere molte analogie con le nostre nubi e i nostri uragani. Al

contrario, i pianeti interni hanno atmosfere al confronto sottili e trasparenti, ciò che permette di distinguere i rilievi che presenta la loro superficie: le variazioni che presentano sono senza dubbio dovute a nubi, ma si riconoscono solo sostanze analoghe, per il loro potere assorbente, a quelle del nostro globo terrestre. Si può quindi supporre che i pianeti esterni si trovano in una condizione molto vicina a quella delle nebulose.

6° I pianeti esterni hanno una velocità di rotazione che è, in media, due volte e mezza più considerevole di quella dei pianeti interni: una differenza così grande, e che non presenta alcuna transizione, non può essere opera del caso.

M. Kirkwood ha cercato una legge empirica che collegasse la massa dei pianeti, la durata della loro rotazione e quella della loro rivoluzione, ed è pervenuto al seguente risultato: Consideriamo un pianeta qualsiasi; supponiamolo in congiunzione con il pianeta interno più vicino; determiniamo con il calcolo il punto in cui questi due astri esercitano attrazioni uguali, e chiamiamo r la distanza di questo punto dal pianeta considerato. Facciamo lo stesso calcolo relativamente al pianeta esterno, e chiamiamo r' la distanza del nuovo punto di uguale attrazione. Poniamo $r + r' = D$. Vi saranno così, per i diversi pianeti, quantità $D, D', D'',$ ecc., precise e determinate. Chiamiamo n il numero di rivoluzioni siderali che il pianeta considerato compie attorno al suo asse, mentre esegue una rivoluzione siderale attorno al Sole. Si trova, secondo Kirkwood, $n^2 : n'^2 :: D^2 : d'^2$, oppure:

$$n = n' \left(\frac{D}{D'} \right)^{\frac{3}{2}}$$

relazione simile a quella della terza legge di Kepler, che collega le distanze alle durate delle rivoluzioni. Questa relazione suppone che esista un unico pianeta tra Marte e Giove, con una massa circa uguale a quella che risulta dai calcoli di M. Le Verrier. L'astronomo americano S. Ch. Walker ha mostrato che questa relazione è una conseguenza dell'ipotesi nebulare. Essa dipende da tanti elementi poco certi e ciò fa sì che, finora, non sia considerata una legge della natura; costituisce tuttavia un fatto importante che mostra sempre più che tutte le masse che compongono il sistema solare hanno un'origine comune.

Questa origine comune è del resto provata da un gran numero di fatti; accontentiamoci di citare i più salienti:

7° A. In tutti i pianeti, e in tutti i satelliti, il moto di traslazione e di rotazione hanno luogo nello stesso verso, che è anche quello della rotazione del Sole. Questa direzione deve essere quella della nebulosa originaria.

B. I pianeti descrivono orbite poco inclinate tra loro, così che si può dire che sono all'incirca comprese nello stesso piano. Le sole eccezioni si trovano tra i piccoli pianeti tra Marte e Giove: cioè nella regione precisa della grande perturbazione.

C. Le orbite dei principali pianeti sono molto poco allungate. Alcuni asteroidi fanno eccezione a questa legge, ma la loro massa è così piccola che si può anche trascurare.

D. La massa centrale è preponderante, e supera di molto quelle di tutti i satelliti. Queste differenti circostanze non sono accidentali, poiché è da esse che dipende la stabilità dell'intero sistema.

E. Le orbite sono molto poco inclinate su questo piano fondamentale del sistema solare scoperto da Laplace, e che si chiama il piano *invariabile*, poiché rimane costantemente lo stesso malgrado le perturbazioni che risultano dalle azioni reciproche. Questo piano non può forse essere che quello della rotazione iniziale della nebulosa solare.

Questa ipotesi non spiega quindi una serie di circostanze che sono intimamente connesse tra loro, e che non si potrebbe spiegare altrimenti. La teoria di Newton collega tra loro i fenomeni principali del sistema solare, e li riduce al solo principio della gravitazione; anche l'ipotesi nebulare ci spiega l'impulsione tangenziale e le circostanze fisiche del secondo ordine che cogliamo nell'insieme del sistema.

Per meglio conoscere il meccanismo del mondo planetario, dovremmo sapere quali sono l'origine e la natura intima di questa forza che spinge i corpi gli uni verso gli altri, e che si chiama attrazione o gravitazione, poiché la caduta dei corpi gravi sulla superficie della Terra è solo un caso particolare di questa forza; ma non possiamo dire nulla di certo su questo argomento. I matematici e gli astronomi ammettono questa gravitazione come un fatto primitivo in grado di spiegare i movimenti dei corpi celesti, e vi applicano le formula della Meccanica senza preoccuparsi della sua origine. I fisici fanno lo stesso e non pensano che lo stato delle nostre conoscenze ci permetta di andare oltre.

Tuttavia, l'opinione più probabile, quella che tende ad espandersi ogni giorno sempre di più, attribuisce i fenomeni di attrazione all'etere, questo fluido universale che riempie il mondo intero e concorre con la materia ponderale alla costituzione di tutti i corpi. Ma in cosa consiste l'azione dell'etere? Si è lontani dall'essere d'accordo su tale questione. Ciò che è certo, è che vi deve essere, tra il Sole e i pianeti, un mezzo di comunicazione della forza e di trasmissione del movimento; e siccome l'esistenza del mezzo etere è perfettamente provata dai fenomeni luminosi, non si vede la necessità di immaginare un altro intermediario per la trasmissione dei movimenti.

D'altro canto, le esperienze relative all'elettricità ci mostrano che tutti i cambiamenti di densità in questo fluido rendono i corpi che lo contengono capaci di esercitare attrazioni; si sarà quindi portati a credere che la gravitazione stessa potrebbe essere dovuta a una simile differenza di densità nel mezzo etere che circonda il Sole

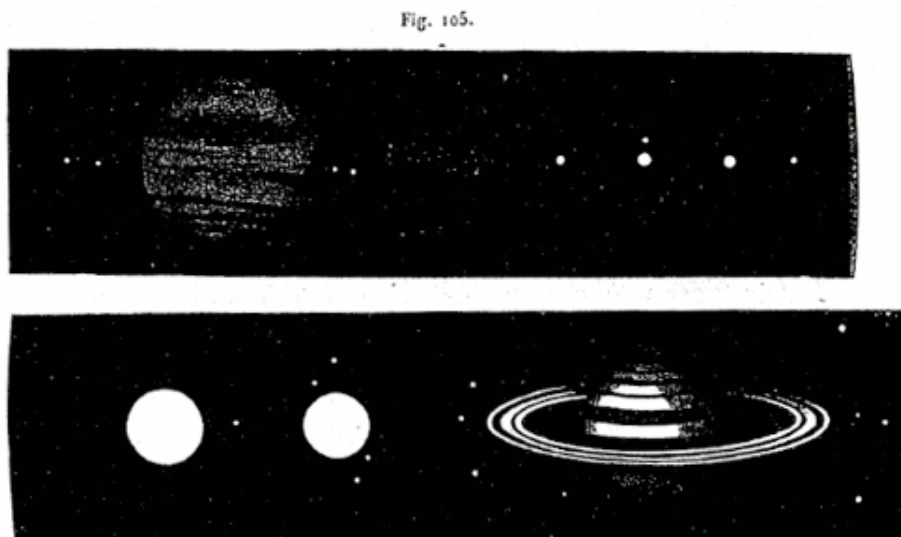
o tutte le altre masse pesanti. Qui indichiamo soltanto queste congetture che abbiamo esposto altrove¹. Del resto, l'azione di questo mezzo si presenterà ben presto alla nostra attenzione come causa di fenomeni di un altro ordine diverso dall'attrazione. Così lo dobbiamo pensare come uno degli agenti più importanti della creazione.

Passiamo ora rapidamente in rivista i corpi che compongono il corteo del Sole.

11.2 I Pianeti

Il volume relativo dei pianeti e del Sole è ben espresso nella fig. 105.

La banda nera sulla quale si è disegnato rappresenta il diametro del Sole, per rappresentare la grandezza proporzionale di questo astro, bisognerebbe tracciare un cerchio avente per diametro le due bande messe di fianco. I pianeti sono raffigurati all'interno con cerchi proporzionali alla loro grandezza effettiva.



Abbiamo già parlato delle relazioni che esistono tra le loro distanze; ci accontenteremo di indicare qui, per ognuno di essi, i dettagli più importanti della loro struttura fisica, per quanto può essere utile a chiarire la loro formazione.

MERCURIO. Questo pianeta è il più vicino al Sole, e il più piccolo di quelli noti sin dall'antichità. Ha la maggiore densità, (6,84, prendendo quella dell'acqua come unitaria). Presenta macchie molto evidenti, soprattutto vicino al bordo interno della falce dove la luce è più debole, e ciò prova che è circondato da una atmosfera, e che questa atmosfera sembra più densa di quella dei pianeti vicini. Vi sono variazioni assai considerevoli dovute senza dubbio a nubi. È difficile da osservare.

La durata della rotazione di Mercurio è di $24^h 5^m 28^s$. L'intensità della radiazione solare è di 6,69 volte più forte che sulla Terra, ma l'eccentricità della sua orbita deve produrre alla sua superficie grandi variazioni di temperatura. Siccome è quasi sempre immerso nei raggi solari lo si è potuto esaminare allo spettroscopio solo vicino all'orizzonte, posizione molto sfavorevole, e non si è osservato nulla di particolare nella sua atmosfera. La durata della sua rivoluzione è quasi uguale a 88^g (87,97). La sua massa è 0,05 quella della Terra presa come unitaria.

VENERE. Questo pianeta si trova in condizione più vicine a quelle della Terra; il suo volume è quasi lo stesso; la sua massa è 0,87; la sua densità 5,10; l'intensità della radiazione solare è doppia di quella che colpisce la Terra. Ma in compenso, essendo l'asse di rotazione, secondo il P. de Vico, inclinato di $53^\circ 12'$ sul piano orbitale, l'arco diurno deve essere molto variabile, e di conseguenza i climi devono presentare estremi ben più netti che da noi. L'anno di Venere è di 224^g , 7, e il tempo della sua rotazione di $24^h 21^m 21^s$, 9. L'atmosfera di questo pianeta è molto grande per produrre un crepuscolo significativo; abbiamo anche potuto osservare che la parte illuminata da questo crepuscolo corrisponde a un arco di 18° ; ecco in quali condizioni abbiamo potuto questa osservazione. Il pianeta si trovava in congiunzione inferiore, e di conseguenza la sua falce era molto sottile. Malgrado la sottigliezza dei punti, abbiamo potuto riconoscere che questa falce abbracciava più di una semicirconferenza, e che, da una parte all'altra, superava di 18° l'estensione che avrebbe dovuto presentare senza il fenomeno del crepuscolo. A volte si è pure creduto di vedere il disco illuminato in tutta la sua estensione, e si sono notate altri bagliori che potrebbero essere prodotti da aurore boreali.

¹Vedere *l'Unità delle forze fisiche*, Parigi, 1869, presso Savy.

Lo spettroscopio ci mostra che l'atmosfera di Venere ha una composizione analoga a quella della Terra; essa contiene in particolare vapore acqueo che produce nubi, e, infatti, oltre alla macchie fisse, se ne vedono altre che sono alquanto variabili.

TERRA. Diciamo qui qualche parola della Terra considerata come corpo celeste. La sua densità è uguale a 5,5. Il suo raggio equatoriale è di 6377^{km} , 398. Vista dal Sole, sottende un angolo di $17''$, 8; il suo diametro apparente è quindi, a questa distanza, uguale a quello che ci offre Venere alla sua distanza media. Per uno spettatore posto al di fuori di essa, presenterebbe macchie costanti e zone variabili, le prime dovute ai mari e ai continenti, le seconde alle nubi. Vi sarebbero due zone scure posto da una parte e dell'altra dell'equatore, formate dalle regioni serene e trasparenti dei venti alisei; al di là si troverebbero zone brillanti, più o meno interrotte, corrispondenti alle regioni piovose dei tropici. Nelle vicinanze dei poli, l'aspetto sarà molto variabile secondo le stagioni.

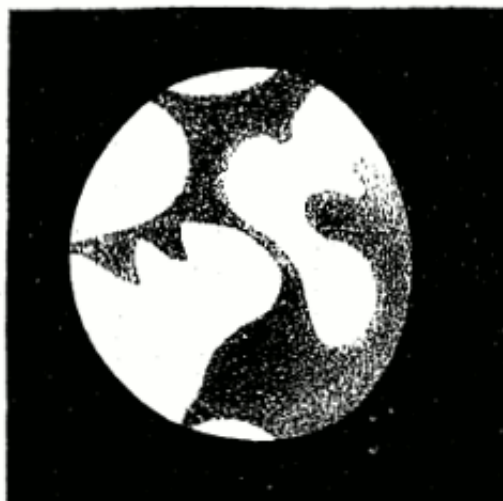
I fenomeni geologici e vulcanici ci dimostrano che l'interno della Terra si trova ad una temperatura molto elevata, residuo del calore primitivo. Questa temperatura è tale che, in base alle valutazioni più moderate, ad una profondità di qualche centinaia di chilometri, tutte le sostanze devono essere in fusione. La sua superficie è composta di materiali solidi con un peso specifico meno grande; i più pesanti si trovano ad una maggiore profondità, e spesso nelle miniere, li troviamo in una condizione che prova che sono stati volatilizzati. Sotto questo aspetto, troviamo qualcosa di analogo con la disposizione delle sostanze che compongono il Sole. Del resto, la densità media del globo è molto più grande di quella dei materiali che formano il sua parte superficiale; è necessario quindi che l'interno contenga sostanze aventi una maggiore densità.

MARTE. Questo pianeta possiede pure un'atmosfera, ma così sottile che permette di vedere i continenti molto meglio ancora che su Venere (figg. 106 e 107).

Fig. 106.



Fig. 107.



Vicino ai poli, si vedono macchie bianche che vanno crescendo e decrescendo, secondo le stagioni, ciò che prova che sono ammassi di neve o nuvole. Nella stagione invernale, queste macchie si sviluppano notevolmente; ma in estate, si riducono ad una calotta poco estesa. Le macchie più lontane dai poli ci offrono un doppio colore, rosso e blu, con la presenza a volte di giallo o bianco. Le macchie blu, presentando tinte più scure, corrispondono ai mari, le rose ai continenti, le gialle alle nubi, non essendo questo giallo che il risultato del contrasto dovuto alla sovrapposizione del bianco e degli altri colori. Una parte del rosso è pure dovuta ad effetti di contrasto; ma questo colore deve anche dipendere dai materiali che compongono la superficie del pianeta. In queste vaste distese, si vedono a volte apparire macchie bianche: sono nubi. A volte si notano anche vortici ben delineati a forma di spirale; sono senza dubbio burrasche. La rivoluzione è di 1^a 321^g, 7; la rotazione avviene in 24^h 37^m 23^s. Essendo l'anno più lungo di quello terrestre, l'asse più inclinato sul piano dell'orbita (30° , 18), l'eccentricità maggiore, le stagioni devono presentare differenze più marcate. La radiazione solare è pari a 0,43 della nostra; la massa totale è 0,13 quella della Terra.

PICCOLI PIANETI. Sappiamo ancora poco sulla costituzione fisica di questi asteroidi. Il loro volume è molto piccolo, nessuno di loro è più grosso della Luna. A giudicare dallo splendore di cui brillano, i più grandi devono avere dimensioni che permettono di confrontarli con la Sicilia; ma quelli scoperti più recentemente sono talmente piccoli che sembrano essere una transizione tra i pianeti e gli aeroliti. Le loro masse sono pure molto piccole. Sono numerosi, le loro orbite si incrociano in così tanti punti da rendere possibile urti, come ha ben mostrato M. Littrow di Vienna. Questi urti li spezzano sicuramente dando origine ad aeroliti. Abbiamo già detto che le loro masse riunite formano solo un terzo della massa terrestre.

GIOVE. È il più grosso di tutti i pianeti. La sua massa è $\frac{1}{1000}$ di quella del Sole, o 334 volte quella della Terra; è tre volte maggiore di quella di tutti gli altri pianeti messi insieme. È incontestabile che ha esercitato un'azione molto grande sulla formazione dei pianeti più vicini, in particolare su quella dei pianeti più piccoli. Giove è circondato da una magnifica corte di quattro satelliti, il più piccolo dei quali supera di poco la Luna, e il più grande presenta dimensioni che permettono di confrontarlo con Marte. La fig. 108 rappresenta la loro grandezza relativa.

Fig. 108.



Il volume di Giove è 1500 volte più grande di quello della Terra, ma la sua densità è molto più piccola; è uguale a 1,29, minore di quella del Sole e appena più grande di quella dell'acqua. La gravità alla sua superficie è due volte e mezza quella sulla superficie terrestre; ne deve derivare una pressione molto elevata, circostanza che, unita alla piccola densità, non consente di credere che questo pianeta sia allo stato solido. Il suo aspetto mostra pure agitazioni molto grandi, e le zone che vi si osservano sono ben lontane dall'offrire un sistema semplice e stabile. Abbiamo già parlato delle loro variazioni nella sezione precedente. La fig. 109 rappresenta l'aspetto che offriva Giove il 10 ottobre 1856; vi si nota una grande macchia nera che non è l'ombra di un satellite, e che potrebbe essere solo un'apertura fatta in uno strato di nubi, senza dubbio da parte di un uragano. La fig. 110 (6 dicembre 1857) mostra quali profonde modifiche possono subire le sue zone in un breve tempo.

Fig. 109.



Fig. 110.



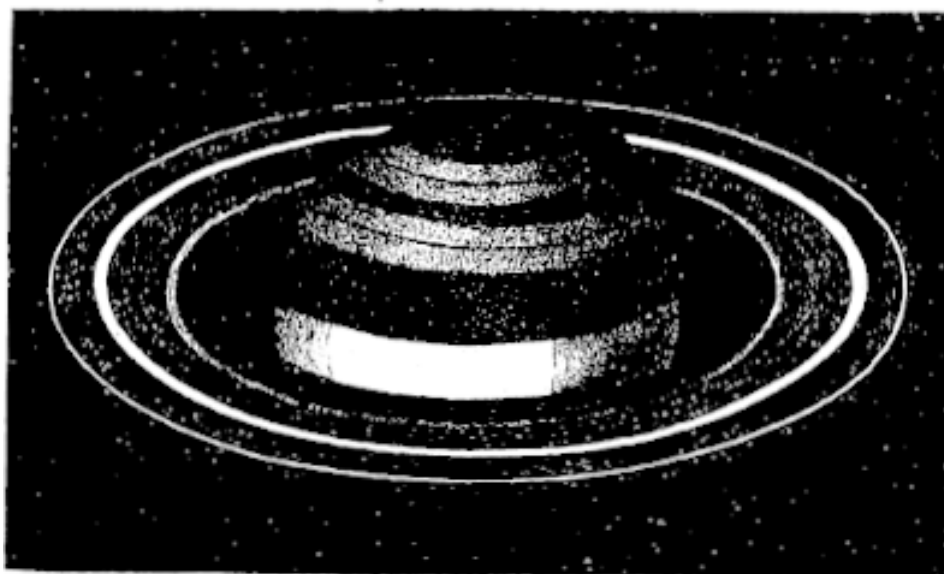
Qui la macchia è l'ombra di un satellite. L'asse di rotazione è poco inclinato sul piano dell'orbita, e queste variazioni non possono essere attribuite al Sole, poiché le stagioni devono avere poche differenze. L'atmosfera molto densa deve ancora essere sede di rivoluzioni analoghe a quelle che la Terra ha subito nelle ere geologiche; abbiamo già fatto notare che la sua composizione è diversa da quella dell'atmosfera terrestre.

L'anno di Giove dura $11^a 314^g, 834$; la sua rotazione dura $9^h 55^m 26^s, 5$. Questa rotazione, così rapida in un corpo di così grande volume, sviluppa una forza centrifuga molto elevata che determina un appiattimento molto grande e facilmente osservabile.

SATURNO. Questo pianeta è il più grande dopo Giove. La sua massa è $\frac{1}{3510}$ di quella del Sole, 102 volte quella della Terra. Il suo volume è proporzionalmente molto grande, poiché la sua densità è uguale solo a 0,73, di modo che si deve supporre a maggior ragione quanto già detto dello stato nebuloso di Giove. Questa opinione si è rafforzata per le numerose bande che presenta la sua superficie, e per le zone di assorbimento che presenta il suo spettro, e che sono ancora più intense di quelle di Giove. I suoi poli hanno un colore che tende al blu, mentre l'equatore è di un bianco brillante.

Saturno possiede la più bella corte che esiste nel nostro sistema solare: oltre agli otto satelliti, il più grande dei quali è confrontabile con il pianeta Marte, è circondato da questo meraviglioso anello che testimonia l'origine di tutto il sistema solare, e l'esattezza delle ipotesi che abbiamo precedentemente esposto. Questo anello è molto sottile, proporzionalmente alla sua larghezza. Si compone, in realtà, di tre anelli distinti e separati; il più esterno (fig. 111) è un poco scuro, il secondo è più brillante, il terzo è del tutto nebuloso e trasparente. I contorni dell'ombra del pianeta sull'anello ci provano che le superfici di questi anelli sono curve, e che le loro generatrici sono ellissi. Si notano grandi differenze di intensità luminosa con irregolarità molto marcate nella densità e composizione delle diverse parti.

Fig. 111.



L'anno di Saturno è di $29^a 166^g, 97$, ed essendo inclinato sulla nostra eclittica di $28^\circ 10' 44''$, la Terra si trova per quindici anni nel suo piano, dal momento in cui passa ai suoi nodi che sono posti a $166^\circ 53'$ e $346^\circ 53'$ di longitudine. Allora l'anello è visibile solo per la sua parte, e lo si vede come un sottile filetto che passa il pianeta da una parte all'altra. La figura, al contrario, lo rappresenta nella sua posizione più favorevole, la più distante tra quelle descritte.

L'equatore del pianeta coincide con l'anello, ed è inclinato di $26^\circ 48' 40''$ sul piano dell'orbita. Il calore del Sole è solo lo 0,011 di quello che riceviamo noi. Visto dal pianeta, l'anello presenta fenomeni singolari, e produce delle occultazioni diurne del Sole molto variabile secondo le latitudini; ma a parte qualche zona poco estesa, non produce un'eclissi permanente. Non è forse del tutto opaco, e la sua costituzione potrebbe essere confrontabile con quella delle nubi. Abbiamo constatato che è leggermente ellittico, e che compie la sua rivoluzione in $14^h 12^m$ circa; è il tempo necessario, secondo la teoria, per la rivoluzione di un satellite la cui distanza dal pianeta fosse uguale alla distanza media dell'anello. Quanto al pianeta, la sua rivoluzione si compie in $10^h 20^m 17^s$.

I satelliti, nel numero di otto, sono tutti esterni all'anello. I più vicini sono molto piccoli, i più grandi sono più lontani. Rimandiamo per maggiori dettagli alla nostra opera intitolata: *Tabella fisica del sistema solare*.

URANO. Sappiamo poco su questo pianeta. Come tutti i pianeti esterni agli asteroidi, ha una densità molto bassa (0,82), e la sua atmosfera ha un potere assorbente notevole. Abbiamo studiato il suo spettro, e l'abbiamo trovato molto diverso da quello del Sole e analogo a quello delle comete. La fig. 112 rappresenta l'intensità della luce nelle sue diverse parti. Il giallo manca completamente. Nel verde e nel blu vi sono due righe molto larghe e nere che non esistono nello spettro solare; saremmo tentati di credere che è di per sé poco luminoso.

Fig. 112.



La massa di Urano è solo uguale a 22 volte quella della Terra. Questo pianeta possiede quattro satelliti la cui esistenza è confermata; il piano della loro orbita è molto inclinato su quello del pianeta. Ignoriamo la durata della sua rotazione, e non conosciamo la direzione del suo asse. La sua rivoluzione è di $84^a 5^g, 83$.

NETTUNO. Questo pianeta è celebre perché la sua scoperta è stata un vero trionfo per il principio di gravitazione. Il suo diametro è 6 volte più grande di quello della Terra. La sua densità non è ben nota, ma è molto piccola, e il suo volume è maggiore di quello di Urano. Il suo colore verde, analogo a quello dell'acqua di mare, mostra che la sua atmosfera esercita un forte assorbimento sui raggi solari; questo fatto è confermato dalle osservazioni fatte allo spettroscopio. Il vivo splendore di cui brilla questo pianeta, malgrado l'enorme distanza dal Sole, potrebbe anche far credere che è un poco luminoso. Non abbiamo mai visto il suo contorno in modo netto, ciò che si accorderebbe perfettamente con l'ipotesi di uno stato nebuloso. La sua massa è $\frac{1}{15000}$ di quella del Sole. Possiede un satellite che compie la sua rivoluzione in $5^g, 877$, e il cui moto è retrogrado. Non conosciamo la durata della sua rotazione; la sua rivoluzione avviene in $164^a 225^g, 7$.

Questi sono i principali corpi celesti che fanno parte del sistema solare; sono i soli che conosciamo, ma non potremmo affermare che non ne esistano altri. Si è sospettata l'esistenza di un pianeta la cui orbita sarebbe all'interno di quella di Mercurio; ha suscitato molto scalpore una osservazione dovuta a M. Lescaubaut, non confermata, sebbene, a più riprese, abbia visto sul disco del Sole punti neri animati di un moto molto rapido. Sono state fatte molte ricerche al riguardo, soprattutto durante l'eclissi del 1869, ma non si è giunti ad alcun risultato. Se vi è qualche altro pianeta oltre Nettuno, la sua esistenza ci potrà essere rivelata dalle perturbazioni che esso deve produrre; lo si potrà scoprire con una osservazione scrupolosa delle piccole stelle, ma questa scoperta richiederà molto tempo, poiché, dovendo il suo moto essere molto lento, lo si confonderà per lungo tempo con le stelle fisse, come è avvenuto per Nettuno.

SATELLITI. Tra questi oggetti di terzo ordine del nostro sistema, conosciamo bene solo quello che accompagna la Terra, cioè la Luna. Le imperfezioni della sua superficie sono ben conosciute, e non ci soffermeremo a darne una descrizione². La forma dei crateri che sono distribuiti sulla sua superficie prova in modo evidente che un tempo l'azione espansiva delle masse incandescenti che conteneva al suo interno hanno prodotto forti convulsioni. Ignoriamo se questa attività duri ancora, poiché non vi è alcuna prova certa di cambiamento nella forma dei suoi crateri, né alcun altro segno di esplosione o di eruzione. Attualmente, il nostro satellite è privo di atmosfera e

²Ecco due disegni che danno un'idea del cratere noto sotto il nome di *Copernico*. La fig. 113 lo rappresenta come si vede il decimo giorno delle Luna.

Fig. 113.



La fig. 114 è una sezione verticale di questo stesso cratere; per meglio indicare il rilievo, se ne è esagerata l'altezza, ma è esattamente indicata dalla linea nera.

di acqua allo stato liquido sulla sua superficie; ma non si è sicuri che sia sempre stato così. Si vedono corrosioni manifeste in certi crateri vicini alle pianure che si indicano con il nome di *mari*. Questi mari non sono riempiti di acqua liquida; poiché sono alquanto scuri e polarizzano fortemente la luce, potrebbero essere pieni di ghiacci.

È quindi evidente che la Luna è passata nel tempo per periodi geologici che la Terra sta ora attraversando, ma poiché la sua massa è piccola, si è raffreddata più rapidamente. Si può dedurre dall'aspetto crateriforme presente su tutta la superficie, all'epoca delle sue ultime rivoluzioni, che deve essere ricoperta da una crosta solida di piccolo spessore, che cede facilmente a tutte le espansioni locali che provengono dall'interno, senza produrre vaste deformazioni analoghe a quelle che, sulla superficie della Terra, hanno prodotto catene montuose così lunghe. Inoltre, sulla Terra, le montagne sono in gran parte sottoposte a erosioni dovute agli agenti atmosferici. Nella Luna, questa causa manca o la sua azione è alquanto modesta, e, di conseguenza, l'aspetto deve essere molto diverso. La debole resistenza di questa crosta è dovuta in parte alla ridotta gravità (0,16 soltanto della gravità terrestre), e in parte alla piccola densità dei materiali che la compongono: questa densità è di 3,40.

La Luna espone sempre lo stesso emisfero verso la Terra, di modo che la sua rivoluzione e il suo moto di rotazione avvengono nello stesso tempo. Questa particolarità mostra che il centro di gravità del nostro satellite è posto al di fuori del centro della figura, o che la sua figura è un ellissoide a tre assi disuguali. Le osservazioni hanno confermato questa conclusione, e hanno mostrato che il maggiore dei tre assi è quello diretto verso la Terra.

Il diametro della Luna è grande, uguale a 0,27 di quello della Terra; la sua massa è uguale a $\frac{1}{77}$. Per tutti gli altri satelliti, queste proporzioni sono molto inferiori. In compenso la sua distanza dalla Terra è grande, quasi 60 raggi terrestri, e ad eccezione dell'ultimo satellite di Saturno, non vi sono esempi di una distanza così grande tra un pianeta e il suo satellite.

Si è creduto che tutti i satelliti, come la Luna, mostrino sempre la stessa faccia al loro pianeta; ma finora nulla autorizza a pensare tale legge come generale. Abbiamo potuto constatare la rotazione dei satelliti di Giove, grazie alle macchie che si trovano sulla loro superficie, e M. Dawes ha confermato i risultati delle nostre osservazioni. Sebbene non possiamo fissare esattamente la durata della loro rotazione, possiamo tuttavia affermare che non è uguale alla durata della loro rivoluzione. La legge non si applica quindi a Giove; si verifica probabilmente per qualche satellite di Saturno. Ma è difficile dire qualcosa sulla costituzione fisica di questi astri di terzo ordine oltre alla Luna. Si è tuttavia osservata una particolarità molto significativa, cioè le durate dei loro moti sono commensurabili, soprattutto per il sistema di Giove, e che vi è un rapporto molto semplice tra il valore che misura la loro rivoluzione e quello che misura la loro rotazione; rapporto che, per la Luna, è il più semplice possibile, poiché è uguale all'unità. Alcuni satelliti possiedono velocità enormi. Il primo satellite di Saturno, per esempio, percorre in 22 ore un'orbita quasi uguale a quella che la Luna percorre in un mese.

11.3 Le comete

Le comete formano una parte importante della corte solare; ma provengono dalla stessa nebulosa, o da una fonte estranea? Questa questione, posta da lungo tempo, sembra ora assai facile da risolvere. Le loro forme diverse, la loro traiettoria in qualsiasi direzione, e spesso in senso contrario a quello dei pianeti, le loro orbite troppo inclinate sull'eclittica e spesso perpendicolari a quel piano fondamentale sono altrettante prove che tendono ad assegnare loro un'origine esterna. Se, pertanto, le studiamo, è perché ci presentano particolarità istruttive, e perché possono darci la spiegazione di fenomeni importanti.

Le comete si dividono di solito in due categorie, basate sull'estensione delle loro orbite. Le comete periodiche sono quelle la cui rivoluzione si compie nei limiti del sistema solare; esse hanno tutte orbite ellittiche molto allungate. Se ne conoscono sei o sette. La più celebre è quella di Halley, che compie la sua rivoluzione in 75 anni; le altre hanno periodi di 5 o 6 soltanto; quella di Encke, dal periodo più breve, compie la sua rivoluzione in circa 3 anni.

La seconda categoria, la più numerosa, contiene le comete le cui orbite sono paraboliche. A dire il vero, non è probabile che questi astri descrivano rigorosamente delle parabole; essi tracciano senza dubbio ellissi così allungate o iperbole talmente definite che le confondiamo con parabole nella piccola parte della loro traiettoria da noi osservabile. Se, entrando nella sfera di attrazione del Sole, possiedono velocità molto elevate, devono descrivere delle iperbole; se al contrario la loro velocità fosse nulla o molto piccola, devono percorrere parabole o ellissi molto allungate. Bisogna osservare che se l'orbita di una cometa si estendesse fino a queste regioni dello spazio in cui l'attrazione del Sole è uguale a quella di qualche altra stella, per quanto vicina la si possa supporre,

Fig. 114.



la sua rivoluzione avrebbe una durata di almeno un milione di anni! Sarà quindi impossibile distinguere se la sua orbita è parabolica o ellittica. Tuttavia, una volta entrata nel dominio del Sole, potrà essere trattenuta dall'azione perturbatrice dei grandi pianeti; la loro attrazione potrebbe modificare completamente la forma e la natura stessa della sua orbita, e ridurre la durata della sua rivoluzione facendole descrivere un'ellisse a corto periodo. È quanto ha dimostrato M. Le Verrier per la cometa detta di Lexell, per quella di Vico e per numerose altre.

La forma delle comete eccita soprattutto la meraviglia delle persone e attira l'attenzione degli scienziati. La loro comparsa spesso improvvisa è solo un effetto della posizione della loro orbita sull'orizzonte; esse possono, a causa della rapidità del loro moto, passare in molto poco tempo da un emisfero all'altro. Così, la cometa del 1861 apparve in Europa in modo improvviso; ma era visibile da qualche settimana nell'altro emisfero. Quella del 1842 uscì all'improvviso dai raggi solari, ma pochi giorni dopo la si vide molto vicina a questo astro.

In generale, quando una cometa appare dapprima sul fondo del cielo, dirigendosi verso il Sole, somiglia ad una piccola nebulosa rotonda o ovale. Avvicinandosi al Sole appare ingrossarsi, e sviluppare una parte interna più brillante che si chiama *nucleo*. Questo nucleo è circondato da una atmosfera vaporosa, di solito allungata e asimmetrica, la cui parte più stretta è ruotata verso il Sole. Tale è la forma definitiva delle piccole comete; ma, avvicinandosi al perielio, le più grandi producono getti luminosi che sembrano slanciarsi dal nucleo verso il Sole, per poi ricurvarsi formando nella parte posteriore, opposta al Sole, una traccia luminosa che si chiama la *coda* della cometa. Il massimo splendore si presenta qualche giorno dopo il perielio; a partire da questo momento l'astro diviene meno luminoso, i getti scompaiono, la cosa si dissipa e la cometa riprende nuovamente l'aspetto di una semplice nebulosità che presentava nel momento della sua comparsa. Questa è la storia di tutte le grandi comete, quella del 1858 (fig. 115 e 117), quella del 1861 (fig. 116) e quella del 1862.

Fig. 115.



Grande cometa del 1858 disegnata da Bond

fig. 116



Grande cometa del 1861

Arriviamo ora a particolarità di estrema importanza. La densità delle comete è molto piccola; anche attraverso le parti più brillanti, si possono facilmente osservare stelle di nona e decima grandezza. Il nucleo luminoso non è solido; è composto di una massa vaporosa; poiché, nel 1861, lo si è visto aumentare e diminuire con una prodigiosa rapidità tale da non consentire una spiegazione di queste modifiche mediante la variazione della distanza. La sua figura costantemente rotonda prova che era trasparente, poiché nelle posizioni che occupava, avrebbe dovuto presentare delle fasi; ora non è mai stato osservato con sicurezza qualcosa di simile; le fasi di cui parlano alcuni osservatori antichi sono solo i getti luminosi che abbiamo prima descritto, che costituiscono come un ventaglio simile a uno spicchio.

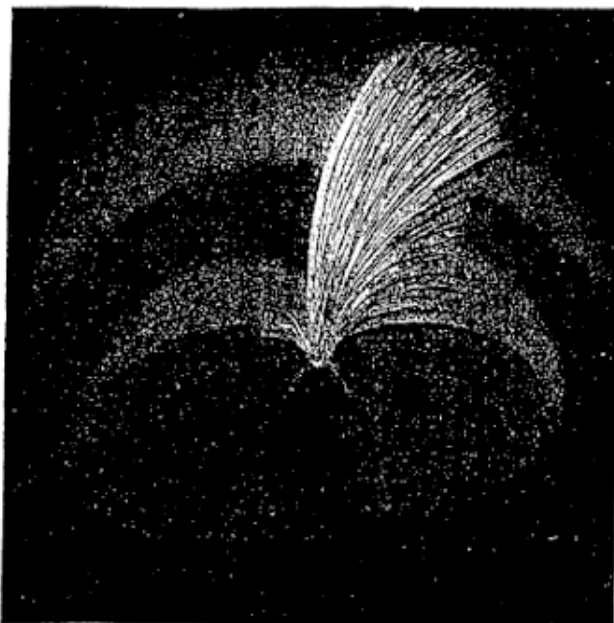
Fig. 117.



Testa della cometa del 1838 osservata da Bond

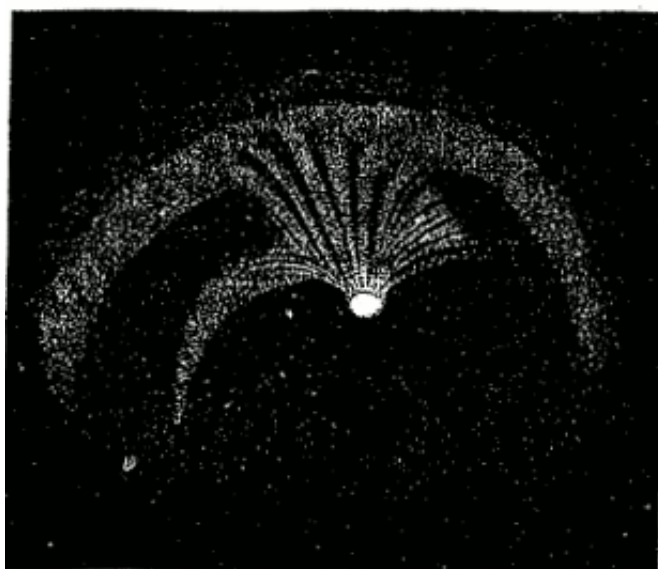
I getti luminosi sono più o meno irregolari; a volte ricompaiono periodicamente, come si è notato nel 1862; in questa cometa, un getto luminoso si formava al momento in cui il primo scompariva, e quando il secondo sembrava esaurirsi, il primo ricompariva di nuovo. Nel 1858 e nel 1861, vi fu un gran numero di questi getti che, giunti ad una certa altezza, formavano un alone o un arco brillante che si prolungava all'indietro fino alla coda (figg. 118 e 119). La luce di questi astri, sempre pallida e smorta, prova che non sono molto densi per riflettere la luce come i pianeti.

Fig. 118.



Testa della cometa del 1861 osservata da Auster il 1° luglio

Fig. 119.



Testa della cometa del 1861 osservata da Auster il 29 giugno

Le ultime comete sono state esaminate allo spettroscopio, e hanno evidenziato uno spettro discontinuo: la loro luce si riduce in genere a qualche banda verde, gialla e rossa separate da lacune. In quella di Winnecke, giugno 1868, il massimo potere illuminante si trovava nelle tre regioni che, dalle nostre osservazioni, coincidevano con le righe del carbonio. Come questa sostanza, rinominata per la sua fissità, potrebbe trovarsi allo stato di vapore nelle comete? Noi l'ignoriamo completamente. Si è pensato che la discontinuità dello spettro delle comete fosse un semplice fenomeno di assorbimento; la scoperta dello spettro di Urano è giunto a confermare questa opinione; non sapremmo tuttavia ammetterlo senza verifiche particolari.

Osservazioni positive provano che i nuclei potrebbero essere luminosi da se stessi; poiché la loro luce differisce da quella della chioma per il fatto che quest'ultima è polarizzata. Si può paragonare questa polarizzazione con il fenomeno che avviene quando un fascio di raggi solari penetra in una camera oscura: i raggi si polarizzano riflettendosi sulle numerose facce dei granelli di polvere che volteggiano nell'aria. Si sono paragonate le comete ad ammassi di materia pesante molto suddivisi. M. Tyndall ha trovato gas che, trovandosi in uno stato di estrema rarefazione, riflettevano la luce con un tipo di speciale fosforescenza che li rendeva luminosi e faceva loro emettere luce polarizzata. Ma non si ha una semplice riflessione; si tratterebbe di un fenomeno di fluorescenza?

Essendo composte di materia molto fluida, gas o polvere cosmica, le comete destano meraviglia solo avvicinandosi al Sole, subendo l'azione diretta dei suoi raggi che le penetrano e le riscaldano, essi si dilatano tanto più facilmente quanto questa dilatazione trova una resistenza molto piccola da parte della gravità. Infatti, si è calcolato che ad una distanza molto piccola dalla superficie cometaria, il nucleo esercita una attrazione minore di quella del Sole, di modo che nell'interno stesso della chioma, la prima di queste due forze è trascurabile rispetto alla seconda. Questa espansione, una volta prodotta dal calore, fa sì che la massa si disperda nello spazio, senza che l'attrazione del nucleo sia in grado di riportarla. È quanto si è osservato nella cometa del 1868 la cui coda lasciava sfuggire zone luminose (fig. 115). Si sono viste anche comete dividersi in due; quella di Biéla, nel 1846, ci presentò questo fenomeno che era già stato osservato ai tempi di Kepler.

Questi astri erranti non presentano quindi alcuna fissità nella loro forma. Quanto alla loro massa, non la si può considerare completamente nulla. La cometa del 1861 aveva una massa almeno uguale a quella di $58 m^3$ di acqua, e al massimo equivalente a quella dell'atmosfera terrestre. Se una massa simile cadesse su un pianeta, lascerebbe solo qualche cattivo influsso; ma, visto il volume considerevole della cometa, il pianeta la attraverserebbe facilmente, e il suo influsso non potrebbe essere molto grande; al massimo vi vedrebbe nell'atmosfera una pioggia di polvere o di stelle cadenti³.

Gli astronomi si sono scontrati per spiegare la forma delle comete. È certo che queste forme bizzarre sono in parte l'effetto dell'attrazione combinata con il calore solare. La massa della cometa è molto piccola, ne segue che ad una distanza molto piccola dal nucleo la forza dominante è l'attrazione del Sole e non quella della stessa cometa. La radiazione solare scalda la massa, la dilata e porta le molecole al di fuori della sfera attrattiva del nucleo, e allora esse divengono come masse distinte e senza legame tra loro, dovendo seguire la loro traiettoria indipendentemente dall'astro di cui facevano prima parte. Ora il calcolo ci mostra che le particelle che sono spinte dalla dilatazione verso la parte esterna modificano la loro orbita parabolica in una iperbolica poco diversa dalla precedente; quelle che sono spinte verso il Sole la trasformeranno in una ellisse; la massa si troverà così dispersa molto più all'interno che all'esterno, e di conseguenza una delle due parti potrà restare visibile mentre l'altra scomparirà in virtù stessa del suo sviluppo.

Questa teoria non spiega tuttavia certe emissioni violente, né le inversioni dei getti luminosi osservate nelle ultime comete. Sembrerebbe che il Sole agisca in queste circostanze in un modo sconosciuto; sembra esercitare un'azione repulsiva di cui è difficile rendere conto, ma che non è priva di esempi in natura. Se il Sole agisse alla maniera delle calamite, potrebbe, con una azione diamagnetica, respingere sostanze; è così che la fiamma di una candela e l'idrogeno puro sono respinti nella sfera magnetica di una forte calamita. Si è anche invocata la presenza dell'etere che potrebbe, in effetti, agire in un modo a noi sconosciuto su questa massa riscaldata e ridotta ad uno stato di estrema frammentazione, e siamo ben lontani dal conoscere il ruolo di questo mezzo nell'universo.

La conclusione generale di tutte queste osservazioni è che le comete sono molto probabilmente semplici ammassi di una materia nebulosa diversa da quella che ha formato il nostro sistema, e che, una volta entrate nei limiti dell'attrazione solare, vi sono state trattenute dall'azione perturbatrice dei pianeti, fino a che questa azione diffusiva del calore solare non le ha disperse nello spazio. Questa teoria riceverà una conferma sorprendente da quanto diremo sul fenomeno delle stelle cadenti, in base alle recenti scoperte di M. Schiaparelli.

11.4 Le stelle cadenti

1° Non c'è uno solo dei nostri lettori che non abbia osservato, in una bella sera d'estate, alcune di queste brillanti meteore, che si illuminano istantaneamente nel cielo, e sembrano distaccarsi dalla volta del firmamento per precipitare verso la Terra, lasciando una traccia luminosa che svanisce rapidamente. Questo fenomeno, benché si presenti quasi tutte le notti, assume tuttavia proporzioni più considerevoli in certi giorni, il cui ritorno periodico ha fortemente attirato l'attenzione degli scienziati. I periodi più significativi sono la notte del 10 agosto e il mattino del 14 novembre. Queste date fisse ci vanificano tutta la teoria che cercava di attribuire questo fenomeno a una origine meteorologica. La comparsa del mese di agosto dura parecchi giorni, e ha il suo massimo il 10; quella di novembre si manifesta solo nella mattinata del 14. In quest'ultima, le meteore sono così numerose che si possono paragonare ad una pioggia di fuoco. Dal 1833, si sono analizzati i racconti degli antichi cronisti, e si è riconosciuto che le piogge di fuoco che hanno, in certi periodi, che hanno creato spavento tra le popolazioni, non erano diverse dall'apparizione delle stelle cadenti di novembre. Questa comparsa non è così evidente ogni anno, ma il suo splendore varia periodicamente; il massimo si ha circa ogni trentatré anni; si rinnova poi per parecchi anni, poi si interrompe per un lungo periodo, per riprendere più tardi e ripassare nuovamente per il massimo alla fine dei trentatré anni. Il fenomeno nel mese di agosto è più costante, ma non è mai così brillante.

2° Si è notato che le traiettorie delle diverse meteore divergono da uno stesso punto del cielo che si chiama il *punto irraggiante*. Questo punto si trova tra le costellazioni di Perseo e di Cassiopea per le meteore del mese di

³Scrivemmo queste parole nel 1861, e ci siamo lontani dal supporre che esse dovessero essere subito dopo giustificate come lo sono state per la scoperta di M. Schiaparelli di cui parleremo.

agosto, e per quelle di novembre si trova in quella del Leone, vicino alla stella ζ . Non bisogna credere che tutte le stelle cadenti partano, in realtà, dallo stesso punto del cielo, ma le loro traiettorie prolungate si incontrano tutte in uno stesso punto, tranne un piccolo numero che si indica con il nome di *sporadiche*. Questa convergenza è un effetto di prospettiva; le traiettorie reali sono quasi parallele, ma appaiono convergenti in base alla legge che ci mostra come divergenti i raggi del Sole che passano tra le nubi.

3° Si è notato che, anche nei fenomeni meno importanti e meno noti, vi è spesso un punto del cielo da cui sembrano divergere le meteore. M. Heis, MM. Grey e Al. Herschel ne hanno fissato un grande numero.

Questi fenomeni sono certamente dovuti alla combustione di qualche materiale nelle regioni superiori della nostra atmosfera. Nel fenomeno di novembre, si sono spesso notate piccole nubi che persistono per un certo tempo dopo la scomparsa delle meteore e che sono trascinate dalle correnti atmosferiche. Queste masse sono molto leggere, e il calore sviluppato dalla resistenza che l'aria oppone al loro moto basta a generare la loro combustione in modo completo. Questa produzione di calore non è sorprendente, se si pensa alla velocità prodigiosa che possiedono. In una frazione di secondo percorrono spazi molto grandi; si stima che la loro velocità sia uguale a 30 o 40 kilometro per secondo.

In Inghilterra e in Germania sono state effettuate numerose osservazioni per determinare l'altezza alla quale si producono queste meteore. Abbiamo anche noi eseguito osservazioni simili tra Roma e Civitavecchia, stazioni distanti 60 *km* e collegate con un filo telegrafico. La massima altezza osservata è di 200 *km*, la minima di 50 *km*. Le più belle meteore appaiono ad un'altezza compresa tra 90 e 100 *km*; si estendono ad un'altezza compresa tra 30 e 50 *km*.

4° In tutti i fenomeni si trova un periodo diurno e uno annuale. Nel periodo diurno, il massimo si ha dalle 3 alle 6 del mattino. Il periodo annuale consiste nel fatto che le meteore sono più numerose nella seconda parte dell'anno. Secondo una teoria avanzata da M. Schiaparelli, queste due circostanze derivano dal fatto che la Terra incontra lo sciame della materia meteorica più direttamente il mattino che la sera, e il secondo semestre. Possiamo, infatti, paragonare la Terra passante attraverso uno sciame di questi corpuscoli a una palla di cannone che attraversa uno sciame di moscerini; ne incontrerà un gran numero nella sua parte anteriore, e lascerà un vuoto dietro di sé. E se la palla ruota su se stessa, siccome la normale alla superficie che è diretta nel verso del moto varia in modo continuo, i punti situati in avanti, e che si trovano quindi più esposti agli urti, varieranno allo stesso modo. Il numero orario di stelle cadenti dipenderà quindi dal punto verso il quale la Terra si dirige ad ogni istante, rispetto alla verticale dell'osservatore: sarà massimo quando questo punto sarà il più vicino allo zenit. Tutto quanto abbiamo detto presuppone una distribuzione uniforme dei corpuscoli meteorici; per le stelle sistematiche, servirà introdurre altre considerazioni. Le osservazioni e i calcoli confermano questa teoria. Ma, siccome il massimo teorico si ha alle 6, cioè dopo il levar del Sole in estate, non è possibile osservarlo esattamente.

Se si vedono stelle nella parte della Terra che è opposta a quella in cui si ha il massimo, è perché la loro velocità è più grande di quella del globo terrestre. Era già stato segnalato questo moto rapido delle meteore, e, partendo dai fatti osservati, M. Schiaparelli ha provato che la loro velocità è circa una volta e mezzo (1,414) quella della Terra, ciò che presuppone un'orbita parabolica. Ne deriva un forte attrito e una condensazione notevole quando questi oggetti penetrano nell'atmosfera; innalzamento di temperatura, incandescenza, volatilizzazione e combustione. Analizzati allo spettroscopio, la loro luce mostra di solito la presenza di magnesio, sodio e ferro. Il calcolo attribuisce loro una velocità massima di 71,5 *km/s* e una minima di 16,5 *km/s*. La media tra questi due valori differisce di poco dalle velocità osservate.

Le stelle cadenti sono quindi della stessa natura degli aeroliti; questi, avendo una massa maggiore e una maggiore compattezza, non bruciano completamente mentre sono in aria; si fondono soltanto e vetrificano in superficie, mentre le masse inferiori delle stelle cadenti sono completamente volatilizzate. Sembra verificato che la velocità delle stelle cadenti è maggiore di quella degli aeroliti, e ciò determina un notevole riscaldamento. Infatti, secondo M. Schiaparelli, la velocità relativa degli aeroliti è uguale alla differenza tra la loro velocità assoluta e quella della Terra, mentre, per le stelle cadenti, questa sarebbe la somma delle due velocità. Si sono riconosciute le stesse sostanze nelle stelle cadenti e nelle meteoriti. Uno dei più recenti conteneva carbonio, la cui presenza, come detto, è stata riconosciuta nelle comete. Queste pietre meteoriche si associano quindi alle stelle cadenti; è certo che sono masse estranee al globo terrestre, e probabilmente anche al nostro sistema planetario.

Rimane da spiegare come e perché questi fenomeni ritornano periodicamente a date fisse, come possono essere visibili per parecchi anni e subire le intermittenze descritte.

Finora, gli astronomi interpretano le stelle cadenti come aventi un'origine planetaria; si suppone che formino anelli circolanti attorno al Sole su curve ellittiche quasi circolari, con una velocità confrontabile a quella della Terra. Il professor Schiaparelli, colpito dalla loro velocità che suppone una curva parabolica, suppone che esse abbiano, come le comete, un'origine esterna al nostro sistema solare. Esponiamo brevemente la sua teoria.

Supponiamo una massa nebulosa posta al limite della sfera d'azione del nostro Sole, e che, dotata di un piccolo moto relativo, inizi a risentire l'attrazione solare; essendo il suo volume molto grande, i suoi punti sono posti a distanze molto diversi. Da ciò risulta che quando inizierà a cadere sul Sole, i punti diversamente distanti acquisteranno col tempo diverse velocità. Malgrado questo ritardo, il calcolo prova che le distanze perielio dei diversi corpuscoli sarebbero molto poco modificate, e le orbite talmente simili, che le diverse molecole si

succederanno l'una all'altra, formando una specie di catena o di corrente che impiegherà un tempo estremamente lungo per passare attorno al Sole. Una massa, il cui diametro sarebbe solo uguale a quello del Sole, impiegherebbe parecchi secoli per compiere questo moto. Questa corrente rappresenterà fisicamente e visibilmente l'orbita dei corpuscoli meteorici, come un getto di acqua rappresenta la traiettoria parabolica dei proiettili.

Se, nel suo moto di traslazione, la Terra incontra questa specie di processione di piccoli corpuscoli, vi passerà attraverso, e un certo numero di loro la incontrerà, combinandosi la loro velocità propria con quella del globo terrestre. Se la catena è molto lunga, la Terra la attraverserà ogni anno nello stesso punto, incontrando ad ogni passaggio corpuscoli diversi da quelli dell'anno precedente. È allora facile calcolare la posizione di questa corrente, poiché il suo raggio vettore è dato dalla distanza esistente tra la Terra e il Sole al momento dell'incontro; la longitudine della Terra nello stesso periodo fornisce la longitudine di uno dei nodi, e poiché l'orbita è parabolica, se ne potranno determinare gli elementi con le procedure utilizzate per l'orbita delle comete.

M. Schiaparelli ha fatto questi calcoli per le due correnti d'agosto e novembre, e, cosa sorprendente, ha trovato che due comete molto note hanno orbite coincidenti precisamente con questa catena di meteore. La prima è la grande cometa II del 1862, che passa al perielio il 23 agosto dello stesso anno, e la cui rivoluzione è di centotrentadue anni. La sua orbita coincide con quella di Tempel, che apparve nel 1866, il cui periodo è di trentatré anni, e che fa parte delle meteore di novembre.

Questo risultato inatteso ha gettato una grande luce sulla natura delle comete stesse. Abbiamo riconosciuto da ciò che questi astri non sono grandi stelle cadenti, o piuttosto ammassi di meteore derivate da masse nebuloze esterne al nostro sistema planetario; è quindi ben vero, come abbiamo già detto, che una cometa, incontrando la Terra, assumerà semplicemente l'aspetto di una pioggia di stelle cadenti-

Le correnti di materia meteorica possono essere discontinue, o occupare un arco limitato; così si spiegherebbero facilmente le interruzioni che caratterizzano alcuni fenomeni, quello di novembre, per esempio. Correnti esterne, una volta introdotte nel nostro sistema solare, potrebbero essere trattenute dall'azione perturbatrice dei pianeti, che farà loro percorrere una curva chiusa; così si spiegherebbero i fenomeni che rinnovano ogni anno senza interruzione.

Affinché uno di questi corpuscoli meteorici produca una stella cadente, non è necessario che la sua massa sia molto grande: si calcola che 1 grammo di materia combustibile sia più che sufficiente. Tuttavia un gran numero di stelle cadenti deve avere una massa notevole, poiché le loro scie lasciano a volte nubi di grande estensione. Di conseguenza, la massa che costituisce una cometa sarà molto più grande. Si sono osservate comete a nucleo multiplo, e, in questo caso, potrebbe avvenire che ogni nucleo sia in grado di produrre una stella cadente. Il volume delle comete è a volte così grande che la Terra, attraversandolo, farà nella loro massa solo un piccolo foro.

La teoria di Schiaparelli spiega ancora alcuni fenomeni curiosi segnalati negli annali della scienza, per esempio alcune scie luminose viste durante una sola notte, e che passano dall'oriente all'occidente, così che luci straordinarie, somiglianti a comete, ma di breve durata. Sarebbero piccole comete o grandi stelle cadenti passanti molto vicine alla Terra, senza penetrare nella sua atmosfera, e, di conseguenza, senza infiammarsi. (Vedere su queste questioni le Memorie di M. Schiaparelli nel *Bollettino meteorologico del Collegio Romano*, 1866).

Ci si potrebbe chiedere se gli aeroliti stessi non siano agglomerati di stelle cadenti. La costituzione di certe pietre meteoriche sembra favorevole a tale ipotesi, poiché esse presentano di solito un insieme di numerosi piccoli nuclei di metalli puro (miscela di ferro e nickel), circondati da altri materiali ossidati. Ogni grano pesa meno di 1 grammo, e potrebbe comporre una stella cadente. Tuttavia sarà difficile ammettere la stessa ipotesi per le masse meteoriche di ferro quasi puro e di ferro ossidato, che racchiudono nei loro pori idrogeno condensato. Si vede in ciò una prova dell'alta temperatura alla quale queste masse sono state sottoposte; è probabile che esse abbiano fatto parte di corpi più grandi e che siano frammenti di piccoli pianeti.

Si pensa facilmente che la stessa massa possa, secondo le circostanze, produrre una stella cadente o un aerolite. Se il suo moto è diretto in senso opposto a quello della Terra, la velocità relativa, uguale alla somma delle altre due, sarà di circa 70 km/s , e la resistenza dell'aria produrrà una forte emissione di calore. Se la stessa massa cade sulla Terra spostandosi nel suo stesso verso, la velocità relativa sarà la differenza tra le due velocità assolute, e sarà molto più piccola, al massimo 16 km/s , e il calore sviluppato sarà minore, e la combustione potrà non essere completa. Questa ipotesi è confermata dalla direzione lungo la quale cadono in genere gli aeroliti.

Oltre alle due comete prima indicate, se ne trovano altre, le cui orbite coincidono con correnti di meteore segnalate dagli astronomi: per esempio, la cometa di Biéla accompagna le meteore del 20 aprile. Ma non bisogna aspirare a trovare una cometa per ogni fenomeno di stelle cadenti. Le perturbazioni di grossi pianeti sono molto grandi sui corpi leggeri, e, dopo tanti secoli che le correnti meteoriche sono entrate nel nostro sistema solare, ne hanno modificato lo stato iniziale.

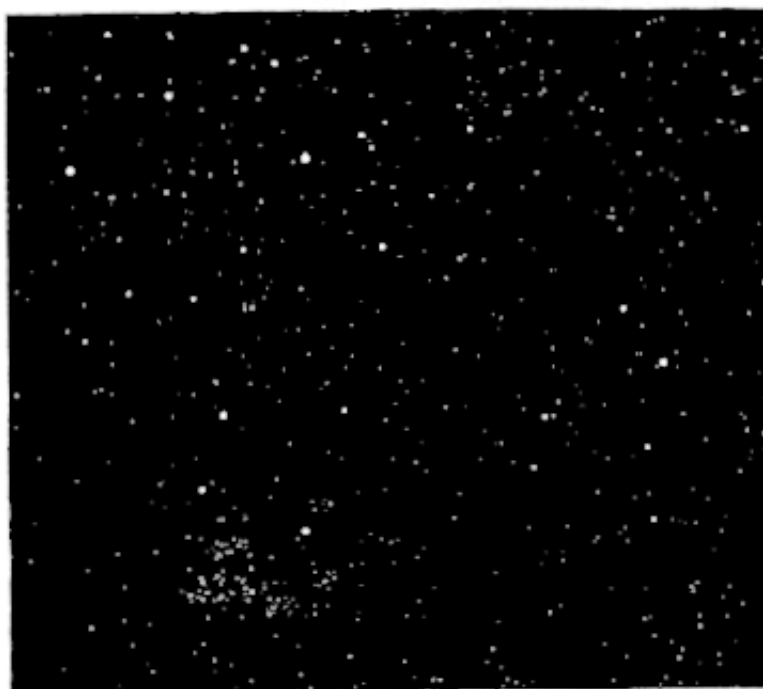
Ci troviamo qui in presenza di una nuova conferma della teoria nebulare dei sistemi solari, e se qualcuno ritenesse gratuita l'ipotesi di masse così grandi che possono impiegare parecchi secoli per passare vicino a noi, gli risponderemo che vi sono nei vasti spazi del cielo nebuloze la cui estensione è parecchi milioni di volte maggiore di quella del nostro intero sistema planetario. Non vi è quindi alcuna difficoltà nell'immaginare che queste masse di materia cosmica circolino attorno al Sole per un tempo estremamente lungo. Per farci un'idea del numero delle meteore, notiamo che ogni osservatore, dalla stazione che occupa, può vedere solo quelle che cadono su una

parte molto limitata del globo. Questo spazio sarà rappresentato da una pezza di 1 franco su un globo avente 1 m di diametro. E tuttavia, nelle notti del 10 agosto e del 13 novembre, se ne contano parecchie centinaia in un'ora ad ogni stazione.

11.5 La luce zodiacale

Si chiama *luce zodiacale* un debole chiarore avente la forma di un ferro di lancia, che si osserva lungo lo zodiaco, quando il tempo è limpido, la sera, al termine del crepuscolo, e la mattina prima dell'aurora (fig. 120).

Fig. 120.



Nelle regioni meridionali, questa luce raggiunge a volte una grande altezza, ma raramente arriva fino allo zenit. La sua intensità e la sua estensione non sono costanti: sembra più intensa al tramonto tra febbraio e marzo, ad oriente tra settembre e ottobre. All'equatore, la si vede tutto l'anno, e le variazioni annuali che subisce alla nostra latitudine dipendono evidentemente dalla posizione dell'eclittica rispetto all'orizzonte. Numerosi osservatori assicurano che, anche a mezzanotte, la vedono ancora nella parte di cielo che è opposta al Sole; M. Heis ce lo ha assicurato. Noi non siamo mai stati nelle condizioni favorevoli per fare questa osservazione, poiché la luce della città di Roma la rende estremamente difficile.

Questa luce è dipendente dal Sole; lo precede e lo segue costantemente, racchiude le orbite di Mercurio e di Venere; racchiude anche la Terra, se si deve dare fede alle osservazioni secondo le quali supera lo zenit. Ha la forma di un ellissoide molto appiattito, visto di taglio. Sembra che sia una estensione molto attenuata dell'atmosfera solare; ma la sua materia deve essere in una condizione di estrema rarefazione, poiché, malgrado il suo spessore di circa 100 milioni di leghe, è assai trasparente per lasciarci vedere stelle molto piccole, e non produce resistenza al moto di Venere e Marte.

Quale è la sua origine? Questa questione è difficile da risolvere. È forse un resto dell'atmosfera solare, una continuazione di quella che, durante le eclissi, produce il fenomeno della Corona. Ma perché non la si vede durante le eclissi? Si può rispondere a questa obiezione che la luce atmosferica avente allora uno splendore superiore a quello della Luna piena, la luce zodiacale deve essere completamente offuscata per contrasto. Alcuni scienziati pensano, e questa opinione sembra la più probabile, che questo fenomeno è dovuto ad una materia meteorica, stelle cadenti e materia cometaria, che si dirige lentamente verso il Sole. Noi abbiamo visto, infatti, che la materia delle comete si disperde lentamente nello spazio, e deve, senza dubbio, dirigersi poco a poco verso il centro generale di attrazione.

Non possediamo ancora dati positivi che ci permettono di optare tra queste due ipotesi. Mairan, nell'ultimo secolo, credeva che l'atmosfera del Sole, mescolandosi a quella della Terra, producesse la luce zodiacale e le aurore boreali. Ma non si può più sostenere una tale teoria, poiché si sa ora che le aurore boreali sono fenomeni elettrici. Vi sarebbe tuttavia modo di vedere se la luce zodiacale non abbia relazione con il magnetismo terrestre o con il periodo decennale delle macchie solari. Se il Sole avesse un'azione immediata e notevole su questo fenomeno, si

avrebbe un dato preciso per collegarlo ai fenomeni magnetici che si manifestano negli spazi celesti. Ma M. Heis, a chi ha posto tale quesito, mi assicura che non ha, finora, osservato nulla che giustifichi un tale approccio.

Ecco quindi un campo di ricerche assai vasto, e lo esauriremo solo dopo lunghe e pazienti osservazioni. Questi lavori non offrono difficoltà particolari, ma richiedono solo attenzione e perseveranza.

Per concludere questo Capitolo, vediamo che la formazione del nostro sistema solare è legata con lo stato attuale del Sole, che i pianeti facevano parte della stessa massa nebulosa, che le comete sono ospiti estranei a questa formazione, e formano una stessa famiglia con le meteore o stelle cadenti. Tutte le parti del nostro mondo planetario avrebbero quindi un'origine comune, e il sistema intero sarebbe in comunicazione con i sistemi esterni per mezzo delle comete e delle meteore.

Avremmo altre cose da aggiungere su questo tema importante, se non temessimo di uscire dal nostro ambito; accontentiamoci di rinviare ancora una volta alla nostra *Tavola del sistema solare*, così come alle importanti Memorie di M. Schiaparelli.

Parte III

I Soli o le Stelle

Capitolo 12

Capitolo Unico

12.1 Rapporto del nostro Sole con le stelle

Il Sole che ci illumina è una delle numerose stelle che popolano gli spazi celesti, in nulla diverso da queste, se non per la distanza, relativamente insignificante che lo separa dalla Terra. Se si trovasse trasportato alla distanza delle stelle più vicine a noi, ad occhio nudo, lo percepiremmo come una stella di quinta o sesta grandezza; il suo diametro sarebbe non misurabile, poiché già Nettuno sottende solo un angolo di $64''$, e le stelle più vicine a noi, anche supponendo la loro parallasse annuale uguale a $1''$, sarebbero ad una distanza almeno uguale a 206265 volte il semiasse dell'orbita terrestre. Questa distanza è ancora troppo piccola, poiché le parallasse annuali meglio conosciute sono lontane dal raggiungere $1''$; e tuttavia, a questa distanza, la luce impiegherebbe tre anni e ottantatré giorni per raggiungerci; essa impiega dodici anni a percorrere lo spazio che ci separa dalla stella 61 del Cigno, la cui parallasse è $0''$, 34; e tuttavia, per arrivare dal Sole alla Terra, basta mezzo quarto d'ora (otto minuti e quindici secondi).

Questi elementi ci possono dare un'idea dell'immensità dello spazio siderale, e mostrare come gli astri sono molto lontani tra loro e i diversi sistemi siano indipendenti nella loro azione. La stella che si considera la più vicina a noi non potrebbe agire in modo apprezzabile sul pianeta più lontano dal centro d'azione, cioè su Nettuno, poiché si trova 6876 volte più lontano dal Sole, e siccome l'azione varia in ragione dell'inverso del quadrato della distanza, supponendo che i due centri di attrazione abbiano masse uguali, la stella agirà su Nettuno con una forza 42 279 376 volte minore di quella del Sole. Finora la stella che è ritenuta più vicina al nostro sistema è α del Centauro, stella doppia dell'emisfero australe, la cui parallasse sarebbe $0''$, 88¹, e la distanza 234 400 volte la distanza Terra-Sole, e 7813 volte quella di Nettuno.

Le stelle che si chiamano comunemente *fisse* non sono assolutamente immobili. Le osservazioni hanno provato che esse possiedono tutte moti propri, sempre molto piccoli ai nostri occhi, ma molto rilevanti per gli astronomi; descrivono archi di solo qualche secondo in un secolo, e tuttavia ne servirebbe di più per cambiare con il tempo l'aspetto del cielo e la forma attuale delle costellazioni. Si è trovato in questo moto una legge sistematica che si spiega perfettamente supponendo che il nostro Sole, con la sua corte di pianeti e satelliti, è animato da un moto di traslazione che lo porta verso un punto della costellazione di Ercole avente per ascensione retta $259^{\circ}30'$ e per declinazione nord 32° circa. Questo moto è senza dubbio curvilineo, ma ci è impossibile verificarlo, studiarne la traiettoria che descrive e determinare il centro in cui risiede la forza che determina tale moto.

Sembra ad una prima analisi che le grandi stelle siano distribuite sulla volta celeste a caso e senza alcuna legge. Tuttavia un esame attento mostra molto facilmente che esse occupano una zona attraversata nella sua parte centrale da un grande cerchio avente uno dei suoi poli vicino alla stella Formalhaut dei Pesci australi. Ci si può convincere disponendo un globo celeste in modo che questa stella corrisponda allo zenit; l'orizzonte passerà allora per le Iadi, per la cintura di Orione, tra Sirio e Canopo; dividerà in due la Croce del Sud, passerà vicino al lucente Centauro e per il corpo dello Scorpione. Risalendo verso l'emisfero boreale, al di sopra dell'eclittica, questo cerchio passerà tra le lucenti del Serpentario, attraverserà la costellazione della Lira toccando quasi la Vega; poi, dopo aver passato Cassiopea e assai vicino a α di Perseo, lascerà la Capra ad una piccola distanza. Attraversa la costellazione di Ercole vicino al punto verso il quale il nostro Sole è trascinato con la sua corte di pianeti.

Questo grande cerchio taglia l'equatore a 4^h45^m di ascensione retta, nella costellazione del Toro vicino ad Aldebaran, e nello Scorpione vicino ad Antares, a 16^h45^m . Questa zona contiene quasi tutte le stelle delle prime quattro grandezze. Esso non coincide con la via lattea, ma ne è molto vicino; segue per qualche tempo la biforcazione, cioè quel ramo divergente che si dirige verso lo Scorpione.

Sebbene sia assurdo pretendere di fissare il centro dell'universo, dobbiamo tuttavia ricercare quali sono i rapporti che esistono tra il nostro Sole e i numerosi soli che brillano a così grandi distanze. Analizzeremo perciò

¹Questo valore è dedotto dalle osservazioni di Maclear, Moesta e altri astronomi.

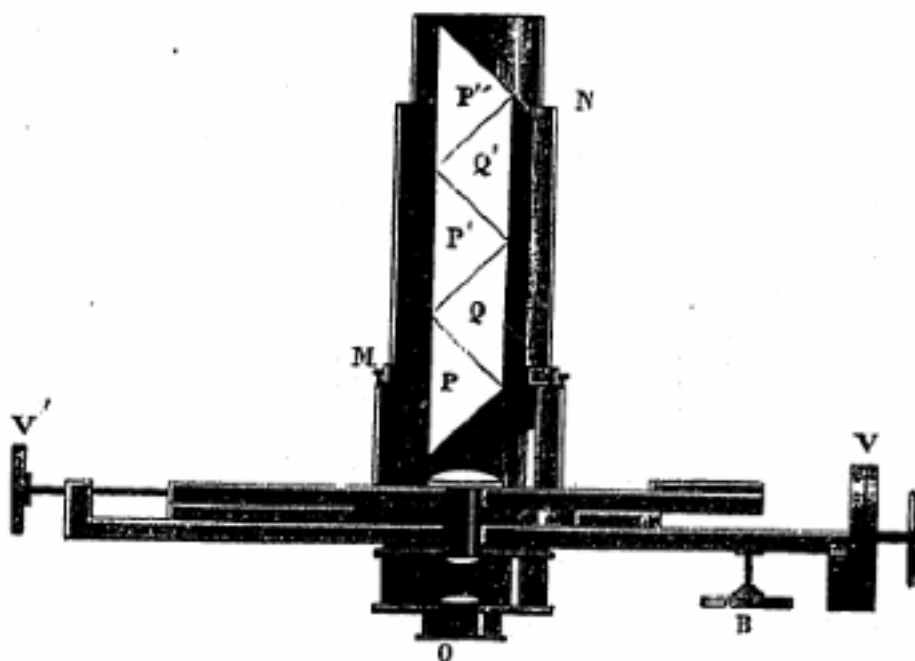
brevemente ciò che riguarda le stelle, la loro composizione e i loro sistemi, allo scopo di chiarire sempre più la costituzione del nostro Sole e la posizione che esso occupa nell'universo. Studieremo pure queste masse di materia cosmica, queste nebulose che sono mondi in via di formazione, e che passano attualmente per le stesse fasi che il nostro Sole ha percorso in altri tempi.

12.2 Relazione sulla composizione tra i soli. Spettri stellari

L'analisi spettrale ci può far conoscere la composizione chimica di un corpo in due modi, come abbiamo detto parlando del Sole: attraverso i raggi che emette direttamente, e l'assorbimento che produce sulle onde luminose. Si impiegano questi due processi nello studio del cielo: il primo si applica alla maggior parte delle stelle; il secondo si applica alle nebulose e a un piccolo numero di stelle. Entriamo in qualche dettaglio.

Per analizzare la luce delle stelle, ci si può servire dello spettroscopio che abbiamo già descritto parlando del Sole; ma questo strumento assorbe una grande quantità di luce, a causa della stretta fenditura e delle numerose lenti che i raggi sono costretti ad attraversare; così ne abbiamo adottato un altro. Si compone di un prisma a visione diretta PP' (fig. 121) dietro al quale vi è una lente cilindrica acromatica C che forma un'immagine lineare della stella. Si guarda questa immagine con un oculare ordinario O formato da una doppia lente sferica, o meglio da una doppia lente cilindrica il cui asse è perpendicolare al piano di dispersione. Si conserva in tal modo una grande intensità luminosa, e con un cannocchiale di 25 cm di apertura abbiamo potuto ottenere spettri molto precisi delle stelle di settima e anche di ottava grandezza. Le stelle di prima grandezza danno spettri estremamente brillanti che permettono di delineare facilmente le loro righe, e di misurarne la posizione con esattezza. Facciamo notare che si può perfettamente impiegare un prisma comune al posto di quello a visione diretta.

Fig. 121.



È con uno strumento simile che abbiamo esaminato le stelle principali del cielo e anche un grande numero di piccole. Questo studio ci ha portato a risultati interessanti che riassumeremo il più brevemente possibile.

Considerate dal punto di vista dello spettro che producono, le stelle sono classificabili in quattro tipi perfettamente distinti; alcuni spettri, poco numerosi, invece di essere assimilabili ad una di queste categorie, sembrano fungere da intermedi tra di esse.

Il primo tipo è quello delle stelle bianche, come Sirio, Vega, Altair, Regulus, Rigel, quella dell'Orsa Maggiore, ad eccezione di α , quelle del Serpentario, ecc. Tutte queste stelle che si chiamano comunemente *bianche*, anche se in realtà sono leggermente blu, offrono lo spettro che è rappresentato nella Tavola II, fig. 2. È formato dall'insieme dei sette colori, interrotto da quattro grandi righe nere, una nel rosso, l'altra nel verde-blu, le ultime due nel violetto. Queste quattro righe appartengono all'idrogeno; esse coincidono con le quattro righe più brillanti che si distinguono nello spettro di questo gas quando è portato ad una temperatura alta, per esempio nei tubi di Geisler. Oltre a queste righe fondamentali e molto larghe, si vede nelle stelle più brillanti, come Sirio, una

riga nera molto sottile nel giallo che sembra coincidere con quella del sodio, e nel verde righe più deboli che appartengono al magnesio e al ferro.

Fig. 2. 1° tipo - Sirius, Vega, etc.



La particolarità più sorprendente di questo tipo, è la larghezza di alcune righe, larghezza che tende a provare che lo strato assorbente possiede un grande spessore e che è sottoposto ad una pressione notevole.

Nelle stelle piccole, la riga del rosso è difficile da osservare, poiché manca la luce, ma in compenso la riga del blu diviene a volte molto larga. In realtà, come abbiamo già fatto osservare, queste stelle hanno un colore blu; e, infatti, i loro spettri contengono poco rosso e giallo; il blu e il violetto sono dominanti.

Circa la metà delle stelle del cielo si riferisce a questo tipo, così è facile da studiare, anche un cannocchiale molto modesto.

Il secondo tipo è quello delle stelle gialle, come la Capra, Polluce, ecc. Lo spettro di queste stelle è perfettamente simile a quello del nostro Sole, cioè è formato da righe molto sottili, molto ravvicinate, e occupano la stessa posizione di quelle dello spettro solare (Tavola II, fig.1). Tutte queste stelle non sono sempre facili da studiare. Le righe nere sono estremamente sottili nello spettro di Polluce e della Capra; sono più larghe e più facili da riconoscere in Arturo e Aldebaran. Quest'ultima stella potrebbe anche essere considerata come elemento di transizione tra il secondo e terzo tipo, mentre Procione sarebbe intermedio tra il primo e il secondo.

Fig. 4. 2° tipo - Sol, Pollux, etc.



Abbiamo detto che il secondo tipo presenta le stesse righe del Sole: studiando Arturo, abbiamo constatato l'identità di trenta tra esse scelte tra le principali. Questa identità è tale che, in assenza del Sole, non esitiamo a impiegare le righe di queste stelle per controllare i punti di riferimento dei nostri strumenti. Le stelle del secondo tipo hanno quindi la stessa composizione del nostro Sole, e sono nelle sue stesse condizioni fisiche. Parecchie tra loro appaiono dare uno spettro continuo, ma ciò riguarda la sottigliezza delle righe e alla difficoltà di distinguerle; quando l'aria è calma, le si nota facilmente con buoni strumenti.

Abbiamo detto che il primo tipo contiene circa la metà delle stelle osservate finora; i due terzi di quanto resta devono essere distribuite nella categoria delle stelle gialle di cui parleremo.

Lo spettro del terzo tipo è alquanto straordinario; è composto da un doppio sistema di bande nebulose e di righe nere. Si può prendere come esempio quella di α Ercole. (Tavole II, fig. 3).

Fig. 5. 3° tipo - α Hercule, β Pégase, etc.



In realtà, le righe nere fondamentali sono le stesse di quelle del secondo tipo, come si riconosce soprattutto in Aldebaran e Arturo; ma, inoltre, il terzo tipo contiene un grande numero di bande nebulose che dividono tutto lo spettro e ne fanno uno specie di colonnato. Queste bande, la cui larghezza e intensità sono alquanto variabili, formano per le stelle di queste categorie differenze notevoli. Abbiamo scelto come tipo fondamentale α Ercole, poiché questa stella offre lo spettro più regolare. Possiamo ancora citare β di Pegaso, σ della Balena, α di Orione, Antares, ecc. Queste stelle sono significative perché tutte variabili, e di un colore che tende più o meno sul rosso o arancio; α di Orione (Tavola III, fig.1) presenta variazioni molto grandi nelle sue bande,

secondo il suo colore; α della Balena, questa celebre stella che è stata chiamata la *meravigliosa*, mostra effettive lacune che sono molto variabili in grandezza.

In alcune stelle più piccole, invece dei colonnati, si vedono gruppi di righe brillanti separate da spazi scuri. Le zone spettrali dipendono quindi da variazioni delle stelle, e queste stesse variazioni dipendono dall'azione più meno assorbente delle loro atmosfere. L'analisi spettrale delle diverse parti del Sole ci ha mostrato che nel fondo delle macchie si ottiene uno spettro più profondamente rigato, e attraversato da bande nere analoghe a quelle che si vedono in α di Orione. Possiamo concludere da queste note che le stelle di cui parliamo devono il loro spettro a un assorbimento analogo a quello delle macchie solari. Se quindi il nostro Sole si trovasse spogliato della sua brillante fotosfera e delle foglie o grani luminosi che ricoprono la sua superficie, ci presenterebbe lo stesso aspetto di α Orione e delle altre stelle della stessa categoria.

Fig. 1. 3^o tipo α Orione, Intero, α .



Le belle stelle di questo tipo non sono numerose; le più significative sono nel numero di circa trenta, e contando quelle del secondo ordine, ne abbiamo trovato un centinaio. Riproduciamo qui il Catalogo più importante per guidare gli amatori che vorrebbero osservarle. Quando tutte le altre denominazioni vengono meno, il numero d'ordine è quello del Catalogo di stelle rosse di M. Schjellerup.

Stelle del 3° tipo	Ascensione retta	Declinazione	Grandezza
	h ,m	° ,'	
α Balena	2.12, 6	+ 3.37	Variabile
α Balena	2.54, 8	+ 3.32	Id.
ρ Perseo	2.55, 7	+ 38.15	Id.
Selv. 44	4.44, 6	+ 14.1	5
Selv. 46	4.46, 5	+ 2.15	5, 5
Selv. 59	5.24, 1	+ 18.29	5, 5
α Orione	5.47, 6	+ 7.23	1 variabile
67	5.49, 6	+ 45.55	5, 6
120	9.2, 2	+ 31.32	6
nova	9.17, 0	- 21.42	1
137	10.52, 6	- 15.36	6
160	13.22, 4	- 22.33	variabile
161	13.42, 8	+ 16.29	4
Arturo	14.9, 1	+ 19.55	1
178	15.30, 0	+ 15.34	7, 5
Antarès	16.20, 1	- 26.7	1
α Ercole	17.8, 3	+ 14.33	2 variabile
nova	18.14, 6	+ 25.2, 5	6
234	19.58, 3	- 27.37	7, 5
254	21.39, 3	- 2.51	6, 5
β Pegaso	22.56, 1	+ 27.15	α
266	23.00, 0	+ 8.39	5, 5
267	23.11, 3	+ 48.15	
α Idra			
δ Vergine			

È molto importante sottolineare, per questo terzo tipo, che le righe principali che separano i colonnati si ritrovano nello stesso posto in tutte le stelle. Ciò è stato confermato da un gran numero di misure. Le righe più salienti sono quelle del magnesio, del sodio e del ferro che spesso sono nebulose come nelle macchie solari. Si sono trovate anche quelle dell'idrogeno, ma non sono così dominanti come nei primi due tipi. Questo gas esiste quindi certamente nelle stelle della terza categoria, si era sbagliato negandolo; ma le sue righe sono parzialmente

invertite, come avviene nello spettro delle macchie. La maggior parte delle righe dominanti appartengono a metalli che si trovano nel Sole.

Lo spettro del terzo tipo appare essere lo stesso di quello del Sole, o piuttosto di Arturo, ma profondamente diviso da bande nebulose. Noi diciamo: *piuttosto di Arturo*, poiché le sue righe sono più larghe di quelle del Sole; se esaminiamo in dettaglio le righe secondarie, vediamo che Arturo, per la parte verde del suo spettro, si separa dal Sole e dalle stelle del secondo tipo, per avvicinarsi a quelle del terzo; per questo motivo l'abbiamo inserito nel Catalogo precedente. Notiamo ancora che queste differenze sono precisamente quelle osservate nei nuclei; gli spettri che studiamo ora ci richiamano in tutto lo spettro delle macchie solari; così siamo sempre più autorizzati a pensare che le stelle del terzo tipo e quelle del secondo differiscono unicamente per lo spessore delle loro atmosfere, e per la mancanza di continuità nelle loro fotosfere; avrebbero quindi macchie variabili come quelle del Sole, ma di dimensioni enormemente maggiori.

Il quarto tipo è ancora più straordinario, e l'abbiamo prima tralasciato, poiché si riferisce a piccole stelle di colore rosso sangue che sono molto poco numerose. Il loro spettro (Tavola II, fig.2) contiene tra zone fondamentali, rosso, verde, blu. Queste zone non possono ridursi a quelle del tipo precedente mediante la soppressione alternativa di una banda nebulosa, poiché sebbene parecchie righe nere coincidono molto bene, la distribuzione della luce è completamente diversa.

Fig. 2 - 3^{mo} tipo - 112 di Schjellerup



Nel terzo tipo, la luce è intensa nelle colonne dalla parte del rosso, mentre qui è più intensa dalla parte opposta, cioè dal lato del violetto. Questa differenza è fondamentale, e sembra che uno dei due spettri sia il *negativo* dell'altro. Si notano ancora talvolta righe brillanti molto intense (Tavola III, fig. 2,3). Questi spettri possono presentare differenze molto grandi nei loro dettagli; danno come esempio lo spettro di una stella assai significativa per le lacune che presenta nel rosso e nel giallo (Tavola III, fig.3), e ci risulterà facile moltiplicare queste figure.

Fig. 3 - 4^{mo} tipo - 78 di Schjellerup



Le stelle di questo tipo non sono numerose; ne abbiamo trovate una trentina, e forniamo il Catalogo delle principali. Siccome sono molto piccole, è probabile che se scoprirà un maggior numero impiegando strumenti più potenti. rosse di M. Schjellerup.

Numero di Catalogo	Ascensione retta	Declinazione	Grandezza
	h ,m	° '	
41	4.36,2	+67.54	6 bella
43	4.42,8	+28.16	8
51	4.58,1	+0.59	6
78	6.26,9	+38.33	6,5 bella
89	7.11,5	-11.43	7,5
124	9.44,6	-22.22	6,5
128	10.5,8	-34.38	7
132	10.30,7	-12.39	6 bella
136	10.44,8	-20.30	6,5
152	12.38,5	+46.13	6 superba
159	13.19,3	-11.59	7,5
163	13.47,3	+41.2	7
229	19.26,5	+76.17	6,5
238	20.8,6	-21.45	6
249	21.25,8	+50.58	9
252	21.38,6	+37.13	8,5
273	23.39,2	+2.42	6 bella

Alcune delle righe nere, e più importanti, coincidono all'incirca con quelle del terzo tipo; tuttavia lo spettro, nel suo insieme, si presenta come uno spettro diretto appartenente a un corpo gassoso, piuttosto che come uno spettro di assorbimento. Se lo si considera come uno spettro di assorbimento, noi abbiamo riconosciuto che presenta il carattere dei composti del carbonio, come si ottengono producendo una serie di scintille elettriche in una miscela di vapori di benzina e di aria atmosferica.

Comunque sia, misure e studi posteriori potranno far conoscere la natura effettiva di queste stelle; noi abbiamo fatto finora solo la classificazione in parecchi tipi secondo le differenze che presentano le righe luminose che ci inviano.

Oltre a questi quattro tipi principali, vi sono gruppi di stelle che meritano un'attenzione particolare. Per esempio quella della costellazione di Orione; appartiene al secondo tipo per l'estrema sottigliezza delle sue righe, ma nello stesso tempo particolare la mancanza quasi completa del rosso e del giallo, di modo che tutte le stelle di questa regione presentano un doppio carattere: 1° hanno tutte un colore verde molto pronunciato; 2° le righe dei loro spettri sono così sottili, che è spesso difficile separarle. Al contrario, la regione della Balena e dell'Eridano racchiudono un gran numero di stelle gialle. Questa distribuzione non è certamente opera del caso; dipende senza dubbio dalla natura e dallo stato delle sostanze che riempiono le diverse parti dell'universo.

Vi è un'eccezione alquanto singolare formato da una quinta classe di stelle molto poco numerose, che ci danno lo spettro *diretto* dell'idrogeno. La più significativa è γ di Cassiopea, che possiede due righe brillanti al posto delle righe F e C ; quelle del violetto sono troppo deboli perché le si possa distinguere. Si vede anche nel giallo una riga brillante che occupa probabilmente la stessa posizione della riga brillante delle protuberanze solari; ma queste misure sono molto difficili da eseguire in modo preciso.

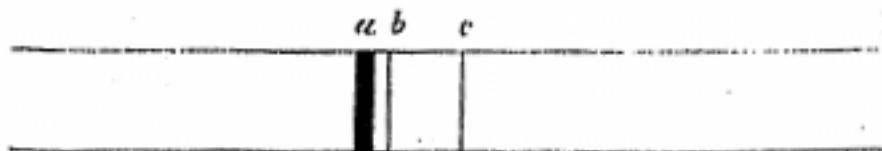
Ritroviamo ancora la stessa caratteristica nelle β della Lira, stella variabile, molto difficile da studiare. Infine due stelle variabili e temporanee hanno presentato pure uno spettro diretto ma discontinuo che le distingue dalle precedenti; una di esse apparve nel 1866 nella Corona ($\alpha = 15^h 53^m, 9$; $\delta = +26^\circ, 18'$), l'altra è R dei Gemelli ($\alpha = 6^h 58^m, 5$; $\delta = 22^\circ, 55'$). Queste due stelle hanno presentato lo spettro dell'idrogeno disposto in zone, mescolate con quelle di qualche altra sostanza tra le quali si distingueva il magnesio. Il loro splendore era molto debole, ed è stato troppo passeggero per poter essere studiato in modo da ottenere risultati più completi. Questi spettri evidenziano una combustione rapida che ebbe luogo senza dubbio in un'epoca molto lontana, ma che si manifesta tardivamente a causa dell'immensa distanza che la luce ha dovuto percorrere per giungere fino alla Terra.

Ci si è chiesti se Algol appartiene allo stesso tipo delle altre stelle variabili, che sono di solito colorate. Le abbiamo studiate con attenzione, e abbiamo trovato che essa dà costantemente uno spettro del primo tipo, di modo che le sue variazioni non dipendono da un assorbimento più o meno grande, né da macchie più o meno sviluppate, ma probabilmente da un corpo opaco circolante attorno ad essa e in grado di produrre eclissi parziali.

Lo spettro delle ultime stelle ci mostra qualche analogia con quello delle nebulose. Le nebulose risolvibili, composte da una grande quantità di stelle sovrapposte, hanno uno spettro stellare continuo. Le nebulose propriamente dette formano due categorie: alcune, come quella di Andromeda, hanno uno spettro continuo; ma la maggior parte presenta solo un piccolo numero di righe brillanti; tali sono le nebulose di Orione, del Sagittario, della Lira, e tutte quelle che sono note con il nome di *planetarie*. Lo spettro della nebulosa di Orione si riduce a tre righe: una a (fig. 122), nel verde, è larga e brillante; la seconda b , più sottile, è molto vicina alla prima; la terza c è un poco più lontana. Confrontando queste righe con quelle dei gas, si trova che c

corrisponde a F dell'idrogeno, e che a appartiene all'azoto. Siccome quest'ultimo gas presenta parecchi spettri, abbiamo verificato che per ottenere la coincidenza è necessario illuminare il tubo di Geissler con l'elettricità ad alta tensione, ottenibile introducendo una batteria nel circuito di induzione.

Fig. 122.



Tutte le nebulose planetarie hanno lo stesso spettro; la riga principale è molto intensa, le righe secondarie lo sono meno. Una circostanza merita di attirare la nostra attenzione. Alcune nebulose planetarie sembrano offrire punti luminosi: tali sono quelle dell'Idra (fig. 123)

$$(\alpha = 10^h 17^m; \delta = -17^\circ 47')$$

e quella del Sagittario (fig. 124)

$$(\alpha = 19^h 34^m; \delta = -14^\circ 32')$$

e tuttavia danno spettri monocromatici, provando che la materia gassosa le compone si può condensare fino ad assumere l'aspetto di una stella, senza formare un corpo solido e incandescente. Tuttavia la nebulosa planetaria di Andromeda, che è realmente una stella nebulosa, presenta i due spettri sovrapposti. La nebulosa anulare della Lira (fig. 125) dà pure uno spettro lineare.

Fig. 123.



Fig. 124.



La teoria esposta riguardante la formazione del Sole, che attribuiamo alla condensazione in successione di una nebulosa, era stata ammessa solo per semplici induzioni; è stata ben confermata e per così dire dimostrata dalla scoperta delle nebulose gassose; e tutto ci porta attualmente a credere che queste nebulose si trasformeranno un giorno in stelle, e che tutte le altre che brillano ora nel firmamento hanno avuto un'origine simile. Abbiamo sottolineato che, per ottenere artificialmente spettri analoghi a quelli di alcuni di questi ammassi di materia cosmica, dobbiamo ricorrere ai modi di dissociazione più efficaci che conosciamo, per esempio le scintille di induzione rese più energiche mediante l'introduzione di un condensatore; bisogna concludere che questa materia è in uno stato estremo di dissociazione. Non possiamo tuttavia essere certi di conoscere completamente il loro spettro; la loro distanza è troppo grande, la loro luce troppo debole e i nostri strumenti imperfetti.

Fig. 145.



Se una nebulosa si condensa per l'attrazione che le sue diverse parti esercitano le une sulle altre, si comprende che questo moto produrrà una quantità di calore paragonabile a quello di cui abbiamo riconosciuto l'esistenza nel Sole. Queste masse cosmiche occupano spazi immensi. La nebulosa di Orione, nella sua parte più densa, sottende un arco di 1° , ma la sua intera estensione è di ben 4° . La nebulosa di Argo è molto grande. Dall'altro lato del Sagittario, troviamo larghe superfici bianche che devono essere nebulose non risolubili. Non è pertanto sorprendente che alcune di queste masse si spostino e finiscano per entrare nella nostra atmosfera per produrvi comete e stelle cadenti. Questa ipotesi è perfettamente confermata dallo spettro così discontinuo che presentano le comete.

Il mondo si allarga quindi sotto i nostri occhi; il sistema solare non ci appare più che un punto nello spazio. Quale differenza tra queste idee così ampie e quelle che limitavano il mondo al nostro globo. Ma spostando in là i limiti del mondo, non diminuiamo la nostra reale grandezza. Senza dubbio sembriamo poca cosa in questa immensità dell'universo, ma più il mondo è grande rispetto a noi, più serve intelligenza per comprendere queste meraviglie, più è servito il genio per scoprirle. Dio solo può comprendere perfettamente la sua opera: felice il mortale che può averne un'idea abbastanza esatta per ammirarne la grandezza e la bellezza!

12.3 Colpo d'occhio sulla distribuzione delle stelle nello spazio

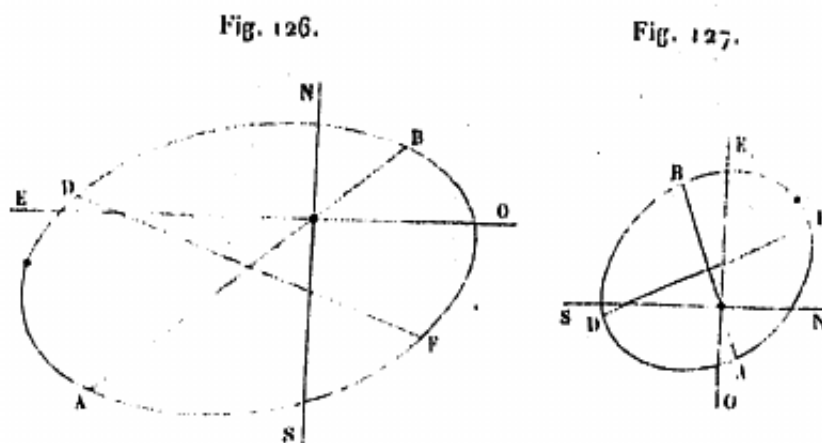
Le stelle sono distribuite in gruppi formanti sistemi simili a quelli ai quali apparteniamo. Le legge dell'attrazione producono e regolano il moto di questi astri lontani, così come la circolazione dei pianeti attorno al Sole. I sistemi più semplici costituiscono le stelle doppie o triple: queste sono altrettanti Soli aventi la loro corte di pianeti che descrivono attorno ad essi orbite ellittiche. Questi pianeti non differiscono dai nostri se non per un solo aspetto: sono ancora incandescenti, e di conseguenza emettono luce; essi ci illuminano con una luce che gli è propria, e non tramite una luce ricevuta e riflessa dalla loro superficie. È questa circostanza che ci permette di distinguerli a una così grande distanza, di osservare le posizioni che occupano e di calcolare le orbite che descrivono.

Hanno satelliti scuri? È naturale supporlo. Le irregolarità osservate nel movimento proprio di Sirio ci ha fatto supporre per lungo tempo l'esistenza di un astro simile ruotante attorno a questa magnifica stella. Ultimamente si è scoperto questo satellite; ma è anch'esso luminoso, e il suo splendore eguaglia almeno quello di una stella di sesta grandezza. Ciò che ha ritardato la sua scoperta e che rende molto difficile osservarlo, è lo splendore della stelle principale i cui raggi mascherano la poca luce che invia.

Un'altra stella, Algol (β di Perseo), ci prova direttamente l'esistenza di questi satelliti scuri, per le variazioni regolari che subisce, e che possono essere solo occultazioni prodotte da un corpo opaco che passa davanti all'astro. Il periodo di queste variazioni è di $2^g 20^h 48^m 58^s$. Per 2^g e 13^h lo splendore è costante, e dispone questa stella tra quelle di seconda grandezza; poi comincia a sbiadire e dopo $3^h 30^m$, si trova ridotta al di sotto della quarta grandezza; permane in queste condizioni per 5 o 6 minuti al massimo, e tende a recuperare il suo splendore iniziale in un tempo uguale al precedente, $3^h 30^m$. Queste variazioni sono fenomeni in tutto simili alle nostre eclissi; le si suppose per lungo tempo, ma le ultime scoperte spettroscopiche l'hanno pienamente confermato, poiché le variazioni di questa stella non possono, come quelle di molte altre, essere attribuite a cambiamenti sopraggiunti nel potere assorbente della sua atmosfera.

Non basta che due stelle appaiano molto vicine per costituire ciò che si indica con il nome di *stella doppia*; serve che siano realmente molto vicine per influenzarsi reciprocamente per gravitazione e formare un sistema a sé. Finora vi sono solo quindici di tali sistemi ben conosciuti dei quali si è potuto determinare completamente le rivoluzioni e calcolare i parametri delle loro orbite; ma ve ne è un numero assai più grande di cui si può con certezza affermare il legame fisico. Delle 1321 stelle doppie osservate da Struve e riviste all'Osservatorio del Collegio Romano, un terzo hanno mostrato un moto relativo certo e molto evidente. Il numero dei sistemi binari e ternari crescerà nel tempo, il solo elemento che manca per ora agli astronomi, e di cui non possono disporre a loro piacimento. È solo da mezzo secolo che si è iniziato a fare su questo aspetto buone osservazioni, e già si sono visti parecchi Soli compiere un'intera rivoluzione: (ζ di Ercole, 36 anni; η della Corona Boreale, 43 anni; ξ del Cancro, 59 anni; ξ dell'Orsa Maggiore, 63 anni). Vi sono altre stelle che hanno periodi di rivoluzione più lunghi. La compagna di α Centauri ha un'orbita circa simile a quella della cometa di Halley. Siccome si conosce la distanza di questa stella, si è calcolato che la massa di tale sistema non è molto diversa da quella del nostro sistema solare.

Le figg. 126 e 127 rappresentano le orbite apparenti di ξ dell'Orsa Maggiore e di ζ di Ercole.



I sistemi binari presentano due particolarità significative: 1° le loro orbite sono di solito molto allungate, ciò che può portare a ipotesi teoriche sulle loro modalità di formazione; 2° le due stelle hanno quasi sempre colori complementari, e ciò indica una differenza di temperatura e uno stato diverso di condensazione.

Oltre a questi sistemi più semplici, vi sono ammassi globulari, noti in inglese con il nome di *clusters*, composti di una moltitudine di piccole stelle la cui densità cresce vicino al centro in modo prodigioso, senza che tuttavia questi astri cessino di essere distinti, cosa di cui ci si è assicurati con le osservazioni fatte con lo spettroscopio. La fig. 128 rappresenta quello che si trova nell'Acquario. Si noti che i più belli ammassi globulari si trovano nella zona delle grandi stelle; sembra che la loro formazione occupi il posto di una di queste stelle più vicine a noi.

Fig. 128.



Infine, vi sono nel cielo gruppi di stelle che è impossibile non riconoscere come formanti sistemi di astri fisicamente tra loro collegati, per esempio le Pleiadi, il gruppo del Cancro, quello di Perseo (fig. 129); certi spazi nebulari molto vasti, come la chioma di Berenice, le nubi di Magellano, e soprattutto la via lattea.

Fig. 129.



Non possiamo conoscere in dettaglio il modo di raggruppamento di questi ammassi, né determinare il centro attorno al quale avvengono i loro moti, poiché servirebbero lunghe osservazioni che ci mancano. Quanto alla regione più vicina a noi che forma la via lattea, possiamo sondare la sua profondità nelle diverse direzioni, e farci un'idea assai esatta del modo in cui le stelle si sono raggruppate. Impossibile, è vero, risolvere questo problema direttamente, né valutare la distanza delle stelle con unità note; ma possiamo raggiungere il risultato con una certa approssimazione con il calcolo di medie basate sulla teoria delle probabilità.

Le stelle, tranne due o tre eccezioni, non hanno parallassi misurabili, da cui si deve concludere che, vista la distanza alla quale si trovano, la loro luce impiega in media una trentina di anni per giungere fino a noi. Dobbiamo quindi rinunciare a misurare le loro distanze assolute e accontentarci di valutare quelle relative.

Sono possibili due metodi per misurare queste distanze relative: si può dapprima misurare l'intensità della luce che ci inviano, il cosiddetto metodo *fotometrico*; si può, in secondo luogo, studiare il rapporto esistente tra i loro moti propri. Questi due metodi sono indipendenti tra loro e basati su leggi geometriche diverse, e portano a risultati simili; questa concordanza ci dà una ragione molto importante per credere all'esattezza delle conclusioni.

La stima delle distanze con la fotometria riposa su due principi: 1° le stelle non possono essere poste tutte alla stessa distanza da noi; 2° le più lontane, devono, solo per questo, apparirci più piccole. Questi principi ci condurranno anche all'applicazione diretta e certa delle loro distanze relative, se possiamo affermare che tutte le stelle hanno una luce intrinseca uguale; ma questa terza affermazione non è né provata né probabile. Dobbiamo quindi trattare il problema con i metodi basti sul calcolo delle probabilità. I risultati ai quali giungeremo saranno veri per l'immensa maggioranza delle stelle, sebbene possano trovarsi in difetto per alcune di loro; poiché, nella media, le eccezioni si eliminano tra loro. Supponiamo, per esempio, che due stelle appaiano essere della stessa grandezza, mentre in realtà sono diverse; si attribuisce alla più grande una distanza troppo piccola, e una distanza troppo grande a quella che ha meno splendore; vi sarà quindi compensazione.

Prima di affrontare la questione, gli astronomi hanno dovuto risolvere un problema preliminare: *Data una stella di una grandezza determinata, di quanto dovrà aumentare la sua distanza perché il suo splendore diminuisca di una unità nell'ordine di grandezza?*

La classificazione che si trova in tutti i Cataloghi è del tutto arbitraria e puramente convenzionale; non si potrà dedurre nulla fintanto che non si sarà misurato il potere luminoso di ogni ordine, fintanto che non si sarà determinata la legge fisica contenuta in questa classificazione arbitraria, ed espresso numericamente l'intensità relativa della luce che caratterizza ogni grandezza. Impiegando metodi fotometrici molto ingegnosi, gli astronomi sono giunti a questa conclusione: In media, due stelle prese in due ordini di grandezza consecutivi hanno intensità luminose il cui rapporto è uguale a 2,42. Le stelle della prima e della seconda grandezza fanno eccezione, poiché, per esse, il rapporto è di 3,75. Prendendo il valore medio 2,42, si sono potuto calcolare le distanze alle quali dovrebbe essere posta una stella di prima grandezza per avere lo stesso splendore delle stelle di seconda grandezza, di terza grandezza, ecc. I risultati di questo calcolo sono contenuti nella tabella seguente:

Grandezza	Distanza	Grandezza	Distanza
1	1,00	9	34,30
2	1,55	10	53,36
3	2,42	11	83,00
4	3,76	12	129,12
5	5,86	13	200,90
6	9,11	14	312,50
7	14,17	15	486,10
8	22,01	16	736,20

La sesta grandezza contiene le più piccole stelle visibili nel grande telescopio di Herschel, che, con la sua apertura di 18 pollici, equivale in forza penetrante a un rifrattore di 25 *cm*.

Proviamo a farci un'idea delle distanze assolute di queste stelle. Supponendo una stella assai lontana perché la sua luce impieghi dieci anni ad arrivare a noi, la sua parallasse sarà rappresentata da un terzo di secondo, quantità senza dubbio esagerata per le stelle di prima grandezza. Allora, le più piccole stelle visibili nel nostro rifrattore saranno poste ad una così grande distanza, che la loro luce impiegherebbe 7560 anni per giungere a noi. Ne segue che, nel riflettore di lord Ross, il limite delle distanze sarà rappresentato da 2090 unità, e, per percorrere questa distanza, la luce impiegherà 20900 anni.

Si è cercato di determinare la distanza relativa delle stelle di diverse grandezze, in base all'ampiezza dei loro moti propri. Struve ha svolto a tale riguardo un lavoro molto importante dal quale ricaviamo i seguenti risultati:

Grandezza delle stelle	Moti propri in 100 anni			
	Stelle semplici		Stelle doppie	
	In ascensione retta	In declinazione	In ascensione retta	In declinazione
1	34",2	29",0	55",5	47",9
2	18,2	16,1	30,8	26,1
3	12,2	10,5	20,1	17,0
4	8,7	7,4	14,4	12,0
5	6,3	5,3	10,2	8,6
6	3,7	3,1	6,0	5,1
7	2,2	2,8	3,5	3,0
8	1,4	1,2	2,3	2,0
9	1,0	0,9	1,7	1,5

Questa tabella rivela una circostanza singolare, cioè che le stelle doppie hanno moti più pronunciati. La causa di questa singolarità risiede nell'impulso maggiore che questi sistemi hanno ricevuto all'origine e che le ha forzate a dividersi in numerose parti.

Siccome i moti apparenti sono in ragione inversa delle distanze, si potrà calcolare la distanza relativa delle stelle, prendendo quella della prima grandezza per unità. La tabella seguente contiene il confronto dei risultati ottenuti con lo studio dei moti propri e con il metodo fotometrico.

Grandezza delle stelle	Distanze concluse		
	Con i moti propri		Con fotometria
	Stelle semplici	Stelle doppie	
1	1,0	1,0	1,0
2	1,3	1,4	1,5
3	2,1	2,0	2,4
4	3,6	3,2	3,7
5	6,1	5,9	5,8
6	8,5	8,2	9,1
7	12,0	11,6	14,2
8	17,9	17,8	22,0
9	33,3	31,8	34,3

Da questa tabella risulta che la progressione è estremamente simili da una parte all'altra, e non ci si può attendere un accordo migliore tra elementi così disparati. Vi è qualche incertezza per i moti propri delle stelle di nona grandezza, ed è ciò che spiega la differenza notevole che si trova tra i risultati.

Quando vogliamo, dalla disposizione apparente, stabilire la distribuzione reale delle stelle nello spazio, abbandoniamo il campo dell'osservazione e entriamo forzatamente in quello delle ipotesi. Si presentano due modi

di spiegare i risultati osservati: 1° si può supporre che, se si osservano più stelle in una direzione che in un'altra, ciò riguarda unicamente la loro condensazione, la profondità dello strato rimane però lo stesso in tutti i casi; 2° si può ammettere, al contrario, che lo strato è più profondo in una direzione rispetto all'altra, essendo la densità la stessa da tutte le parti.

La soluzione di questa questione richiede la conoscenza preliminare del modo in cui le piccole stelle sono distribuite nel cielo. Questo lavoro è stato fatto dai due Herschel, William per l'emisfero nord, e sir John per il sud. È assolutamente impossibile che un uomo esegua da solo una simile enumerazione: sarebbe necessario quasi un secolo di lavoro. Per giungere al risultato, W. Herschel ha sostituito all'enumerazione continua il procedimento delle *sonde* (*star gauges*) distribuite nel cielo in modo uniforme. Queste operazioni consistevano nel contare le stelle visibili in un riflettore di 18 pollici, al quale era adattato un oculare che gli dava un campo visivo di 15 minuti. Queste sonde hanno dato risultati straordinariamente diversi. In qualche luogo, vicino al polo della via lattea, si contano 3 o 4 stelle ad ogni osservazione, mentre, nella stessa via lattea, questo numero è elevato fino a 588.

Discutendo queste osservazioni, si è giunti a qualche conclusione generale che esponiamo brevemente:

1° Le stelle sono tanto più numerose quanto sono più vicine alla via lattea; il massimo si ha nel piano di questa nebulosa, il minimo ai suoi poli.

2° Nella stessa via lattea, l'accumulo è più grande per i punti vicini all'Aquila (18^h di ascensione retta) che nelle vicinanze del toro (6 ore). Da una parte il massimo è di 557, dall'altra è solo di 204.

3° La densità apparente decresce molto rapidamente allontanandosi dalla via lattea. Ad una distanza di 2° è ancora molto considerevole; a 15°, il numero di stelle corrispondente a una sonda diminuisce a 56; a 30° è di 17; a 45° è di 10; tra 60 e 70°, se ne trovano solo 6 o 4.

4° Calcolando con queste sonde il numero delle stelle visibili nel telescopio di Herschel, si trova il valore 20 374 034.

Questi risultati, confermati dai lavori di numerosi astronomi, permettono di stabilire con notevole probabilità la legge di distribuzione effettiva delle stelle nello spazio. Abbiamo detto che vi sono due ipotesi possibili. Per riconoscere quale delle due sia quella vera, si è calcolato con due metodi diversi il raggio della sfera nella quale devono essere racchiuse le stelle di ogni grandezza. Nel primo calcolo, si è supposta la distribuzione uniforme; nell'altro, al contrario, si è supposta la densità variabile. Confrontando i valori così ottenuti con le distanze calcolate con i due metodi precedenti, si sceglierà l'ipotesi i cui risultati si accordano meglio con i valori già trovati. Ecco la tabella in cui si trovano riassunti questi calcoli:

Grandezza delle stelle	Distanze concluse		
	1° Distribuzione uniforme	2° Densità variabile	Metodi precedenti
1	1, 0	1, 0	1, 00
2	1, 46	1, 80	1, 55
3	2, 13	2, 76	2, 42
4	2, 91	3, 90	3, 76
5	3, 98	5, 45	5, 86
6	5, 46	9, 28	9, 11
7	8, 58	15, 78	14, 17
8	13, 44	23, 86	22, 04
9	20, 38	33, 40	34, 30
14 (Herschel)	98, 00	180, 40	312, 00

Vediamo che, per le stelle più grandi, i risultati ottenuti supponendo la distribuzione uniforme non sono irragionevoli; ma, a partire dalla quarta grandezza, le divergenze divengono molto grandi, e oltre sono enormi. È completamente diverso per i valori calcolati con l'altra ipotesi, come si può verificare confrontando le due ultime colonne. La conclusione che dobbiamo legittimamente trarre da queste osservazioni, è che lo strato stellare non solo sembra possedere, ma possiede realmente una densità maggiore nella via lattea che nel resto del cielo.

Il nostro Sole non è posto nel mezzo dello strato che forma la via lattea; la sua posizione è anche molto eccentrica. Noi ci troviamo a circa 4° dal piano che la contiene. Oltre a ciò, la proiezione del Sole su questo piano medio è lungi dall'occupare il centro della via lattea; da ciò segue che, nel Sagittario e nell'Aquila, la densità apparente dello strato stellare è molto maggiore che all'altra estremità del diametro. Dal lato del Sagittario, la via lattea è assolutamente insondabile, il fondo del cielo è formato da un reale polvere stellare, e, nel campo di strumenti più potenti, questa polvere rimane proiettata su uno sfondo bianco. Questo sfondo bianco può essere in parte formato di materia nebulare, ma siccome questa materia possiede necessariamente un certo potere assorbente, deve sicuramente arrestare molti raggi luminosi, e impedirci di vedere un gran numero di stelle più lontane.

Bisogna concludere da tutte queste considerazioni che la profondità dei cieli è realmente insondabile e che non ne conosceremo mai i confini. È probabile che l'unione di grandi stelle che circondano il nostro Sole non siano altro che ammassi che formano la via lattea, e che, visti da una certa distanza, ci appaiano come una macchia più bianca nella via lattea stessa.

Arrivando a questo limite, sentiamo la nostra immaginazione confusa. Invano cercheremo di accumulare confronti su confronti per dare un'idea di questa immensità. Possiamo ammassare numeri, moltiplicare gli zero, e, per abbreviare, esprimere queste distanze con numeri dotati di esponenti; l'abisso non ci resta meno impenetrabile. Che dire di questi spazi immensi e degli astro che li riempiono? Cosa pensare di queste stelle che sono, senza dubbio, come il nostro Sole, centri di luce, di calore e di attività, destinate, come lui, a sostenere la vita di una serie di creature di tutte le specie? A noi sembra assurdo immaginare queste vaste regioni come deserti inabitabili; esse devono essere popolate di esseri intelligenti e ragionevoli, capaci di conoscere, di onorare e amare il loro Creatore; e forse questi abitanti degli astri sono più fedeli di noi ai doveri che loro impone la riconoscenza verso Colui che li ha tratti dal nulla; vogliamo sperare che non vi sia tra di loro chi mette il proprio orgoglio a negare l'esistenza e l'intelligenza di Colui al quale essi devono loro stessi e la loro esistenza e la facoltà di conoscere tante meraviglie.

Conclusioni

Il lungo cammino che abbiamo percorso giunge ormai al suo termine. Studiando i fenomeni che ci presenta il Sole, abbiamo riconosciuto la costituzione fisica di questo astro radioso, e la natura chimica delle sostanze che lo compongono; abbiamo anche riconosciuto tracce del suo modo di formazione, abbiamo potuto fino a un certo punto intravedere il posto che occupa nell'universo.

Questo globo infiammato, fonte della vita e causa del moto dei pianeti, è stato un tempo una massa nebulosa simile a quelle che vediamo nelle profondità del cielo. Questa massa, raffreddandosi, ha dato origine ai pianeti e ai loro satelliti. Essa conserva ancora dentro di sé tutto il calore derivato dalla sua condensazione e dalla caduta delle sue diverse particelle, che, provenendo dagli estremi più lontani del suo dominio, hanno obbedito all'attrazione cadendo verso il centro.

Questa massa enorme, sottoposta alle fasi di raffreddamento per le quali sono passati i pianeti che la circondano, potrà un giorno trovarsi completamente spogliata dello splendore di cui dispone oggi; ma trascorreranno ancora milioni e milioni di anni prima che divenga incapace di agire efficacemente per mantenere la forza e la vita attorno ad essa. Vi sarà una causa qualsiasi la cui azione deve allora ristabilire le cose nel loro stato primitivo? Non lo sapremo dire. Il mondo non è sempre esistito e nulla ci prova che deve esistere sempre.

La costituzione gassosa del Sole ci spiega i fenomeni che osserviamo alla sua superficie. La parte che rimane all'esterno esposta alla radiazione verso gli spazi celesti perde lo stato gassoso raffreddandosi; rimane condensata sotto forma di masse vaporose, ma incandescenti, nell'atmosfera gassosa e trasparente di cui il globo è circondato, formando uno strato brillante che chiamiamo la *fotosfera*. Questo strato, così come l'interno del corpo solare stesso, è la sede di vaste reazioni chimiche e di moti fisici molto complessi. Cause ancora sconosciute, trasportanti masse considerevoli dall'interno verso l'esterno, producono immense lacune nello strato luminoso, e danno così origine alle macchie; il centro di queste lacune, più oscure e più assorbenti, intercetta la maggior parte dei raggi luminosi che emanano dal nucleo centrale, composto da una materia gassosa e completamente dissociata.

Al di sopra dello strato luminoso si espande l'atmosfera formata da vapori trasparenti che si innalzano, secondo il loro peso specifico, a differenti altezze. Di tutte queste sostanze l'idrogeno è la meno densa; così fluttua a una grande altezza, formando colonne e nubi che costituiscono le protuberanze rosate osservate attorno al Sole durante le eclissi. Il ferro e il calcio sono gli elementi più abbondanti nel fondo delle macchie e negli strappi della fotosfera.

L'atmosfera del sole è molto vasta; si estende a una distanza che è uguale a un quarto del raggio solare; essa ha una forma ellittica, essendo la sua elevazione minore ai poli che all'equatore. Nelle regioni equatoriali, e soprattutto in quelle in cui si presentano le macchie, si osserva un'attività più grande che ai poli, attività che si manifesta con uno splendore maggiore, e con un'altezza più considerevole dello strato atmosferico stesso.

Lo spettroscopio, che ci rivela la composizione chimica del Sole, ci ha mostrato che le sostanze di cui è composto sono identiche a quelle che formano i corpi terrestri. E tuttavia, siamo ancora ben lontani dal conoscere la natura di tutte queste sostanze.

Queste sono, riassunto in un sommario quadro generale, le conoscenze che possediamo sull'astro del giorno. Queste conoscenze sono alquanto incomplete, è vero; e tuttavia, se consideriamo la rapidità con la quale si succedono le grandi scoperte relative al Sole, saremo fieri di appartenere a una generazione che, da sola, ha progredito su questa strada più di tutte le generazioni che l'hanno preceduta. L'ultima parola non è detta, ma si può ben sperare che le scoperte future, lontane dal distruggere alcune parti dell'opera sinora compiuta, continueranno il lavoro già iniziato, lo completeranno, e risolveranno i numerosi problemi che abbiamo enunciato in questo libro. Il lavoro paziente di osservazione, le esperienze abilmente dirette per controllare le teorie e le ipotesi finiranno per chiarire ciò che ancora è dubbio o incerto.

Ci rimangono molte cose da comprendere, poiché la natura è inesauribile nelle sue meraviglie; quando si crede di arrivare alla fine, si è solo all'inizio, e la storia stessa del Sole ci fornisce una prova evidente di questa verità.

Il campo sarà ben più vasto e più inesauribile se vogliamo occuparci delle influenze meravigliose che questo astro esercita sulla Terra, poiché i suoi raggi, dotati di potere illuminante, riscaldante e in grado di agire sulle molecole dei corpi, sono la causa prima da cui derivano, su tutti i pianeti, sia la forza sia la vita. Quando ci si limita a considerare il Sole come il centro geometrico delle orbite che descrivono i pianeti, ci si fa una povera idea dell'azione che esercita nel mondo e della sua importanza nella creazione. Ma, quando si considera la sua influenza fisica, chimica e fisiologica, ci si trova in presenza di una serie di questioni misteriose e di problemi non risolti, il cui studio basterà, senza dubbio, a impegnare l'attività di parecchie generazioni. Le forze che mette in gioco sono di un ordine più elevato dell'attrazione stessa, e la loro natura intima è altrettanto sconosciuta della gravitazione. Non abbiamo potuto entrare nello studio speciale di queste relazioni, ma non dobbiamo lasciarle completamente da parte. La natura di questa Opera ci ha permesso appena di dire qualche parola; forse un giorno potremo trattare queste questioni in modo più serio e più approfondito.