

Perturbazioni geomagnetiche, aurorali, ionosferiche e dei raggi cosmici: interdipendenze e relazioni con l'attività solare

F. MARIANI (*)-F. MOLINA (**)

Introduzione.

In questo lavoro ci proponiamo di esporre criticamente gli aspetti fenomenologici e teorici di quel complesso di fenomeni che comprende le perturbazioni magnetiche e ionosferiche, le aurore polari e le variazioni nella intensità della radiazione cosmica, originati o influenzati da eventi solari. Tali fenomeni, tra loro strettamente connessi, vanno considerati come elementi di una più generale perturbazione di natura elettromagnetica, interessante la Terra ma la cui causa prima va ricercata sul Sole.

Trattandosi di materia in continua rapida evoluzione, ci siamo proposti di raccogliere in modo il più possibile organico la grande mole di risultati parziali a tutt'oggi ottenuti e solo in parte organizzati da vari ricercatori. Il panorama che questo lavoro intende presentare andrà nei prossimi anni probabilmente riveduto ed in certe parti anche radicalmente modificato in dipendenza di nuovi risultati, in particolare di quelli acquisiti durante l'Anno Geofisico Internazionale.

Il lavoro è costituito di due parti. Nella prima parte si descrivono e si discutono i dati di osservazione relativi alle perturbazioni magnetiche e ionosferiche, alle aurore polari ed ai raggi cosmici, la interdipendenza tra questi fenomeni e la loro correlazione con l'attività solare. Nella seconda parte si considerano le ipotesi avanzate e le teorie costruite nell'intento di spiegare i risultati delle osservazioni.

La bibliografia, sebbene necessariamente incompleta data la vastità dell'argomento, è stata tuttavia raccolta con molta larghezza, e, salvo pochi casi, sono stati ampiamente consultati i lavori originali.

(*) Istituto Nazionale di Geofisica, Roma — Istituto di Fisica dell'Università, Perugia.

(**) Istituto Nazionale di Geofisica, Roma.

P A R T E I

1. TEMPESTE MAGNETICHE

1.1. Considerazioni generali.

Tra le variazioni temporali del campo magnetico terrestre la S_q , variazione diurna solare dei giorni calmi, e la L , variazione diurna lunare, vengono considerate come variazioni regolari. Ciò è giustificato sia dal punto di vista morfologico, per la regolarità della loro occorrenza e della loro forma, sia dal punto di vista del meccanismo di produzione, per la connessione a fenomeni regolari, quali la variazione tra giorno e notte della ionizzazione dell'alta atmosfera da parte della radiazione solare e i moti sistematici dell'alta atmosfera stessa.

Se si vuole definire un *campo di perturbazione*, occorre astrarre da queste variazioni regolari (nonchè, naturalmente, dalle variazioni secolari); la più semplice definizione del campo di perturbazione istantaneo D può perciò essere data (1) mediante l'espressione

$$D = F - \bar{F} - S_q - L,$$

dove F è il valore istantaneo del campo, e \bar{F} il suo valore medio in un intervallo di sufficiente lunghezza (un mese o più).

Il campo di perturbazione si presenta assai complesso e apparentemente molto irregolare; tuttavia, nelle sue manifestazioni più importanti, le tempeste magnetiche, si riscontrano caratteristiche sistematiche, a cui si sovrappongono, talvolta mascherandole, fluttuazioni irregolari più o meno intense. Tali caratteristiche risultano evidenti analizzando l'andamento temporale di un gran numero di tempeste magnetiche, sia secondo un tempo la cui origine coincida con l'inizio della tempesta, simultaneo in tutto il globo (*storm-time*), sia secondo il tempo locale (1, 2, 3). Secondo le notazioni di Chapman, universalmente adottate, il primo andamento verrà indicato con D_{st} , il secondo con S_D o, come vedremo in 1. 3. 4, con notazione più appropriata D_S .

1.2. La variazione D_{st} .

1.2.1. *Comportamento alle basse e medie latitudini.* — È innanzi tutto evidente che l'andamento D_{st} può computarsi solo quando l'inizio della tempesta è riconoscibile con chiarezza. In realtà in molti casi ciò non avviene, e le tempeste vengono generalmente classificate in due cate-

gorie: tempeste a *inizio brusco* (o a *sudden commencement* o *s. c.*), il cui inizio è caratterizzato da un netto impulso nella componente orizzontale H e molto spesso in tutte e tre le componenti, e tempeste a *inizio graduale*, in cui è difficile, e talvolta impossibile, individuare con una certa precisione l'inizio della perturbazione. Vedremo in 1.5 che tale distinzione rispecchia probabilmente qualche cosa di più sostanziale che una semplice differenza morfologica nel modo di inizio. Tuttavia non si tratta di una distinzione sempre chiara e priva di ambiguità: vi sono infatti molti casi di tempesta che presentano inizio brusco in alcuni Osservatori e in altri no, per cui è incerto a quale categoria esse debbano essere assegnate, soprattutto se sono pochi gli Osservatori in cui viene registrato l'inizio brusco. In tali casi, però, anche là dove l'inizio non è dato dal caratteristico impulso esso è spesso ugualmente individuabile con facilità, e ciò è sufficiente ai fini dello studio della variazione D_{st} .

Prendendo dunque in esame le sole tempeste a inizio chiaramente riconoscibile, è sufficiente talvolta un semplice sguardo ai magnetogrammi delle singole tempeste per riconoscere un andamento caratteristico nella componente H : un periodo più o meno lungo in cui H è maggiore del normale, seguito da una diminuzione spesso molto rapida al di sotto del valore precedente l'inizio della perturbazione, in misura generalmente maggiore dell'aumento iniziale nonchè di maggior durata; infine un ritorno graduale della componente al suo valore normale. A questo semplice andamento sono invariabilmente sovrapposte fluttuazioni irregolari più o meno ampie e rapide.

Una prima analisi quantitativa estesa a una decina di Osservatori in varie latitudini (medie e basse), e a tutte e tre le componenti, è stata eseguita da Chapman (^{1,2}), mediante il computo dell'andamento medio di 40 tempeste di moderata intensità, scelte in modo da avere gli inizi distribuiti piuttosto uniformemente nelle 24 ore; con tale modo di procedere risulta eliminata la eventuale variazione diurna del campo di perturbazione. I risultati per tre gruppi di Osservatori, di latitudine geomagnetica media rispettivamente 22°, 40°, 53°, e relativi a un intervallo di 48 ore dall'inizio della tempesta, sono presentati nella fig. 1.1. Oltre a quanto si è già detto, risulta evidente dalla figura che l'intensità della perturbazione, definita dalla differenza tra il valore massimo e il valore minimo di H , diminuisce all'aumentare della latitudine, nell'intervallo di latitudine considerato.

Il modulo della componente verticale Z presenta un andamento opposto a quello di H e di ampiezza molto minore: una diminuzione iniziale e un successivo aumento al di sopra del valore normale. Consi-

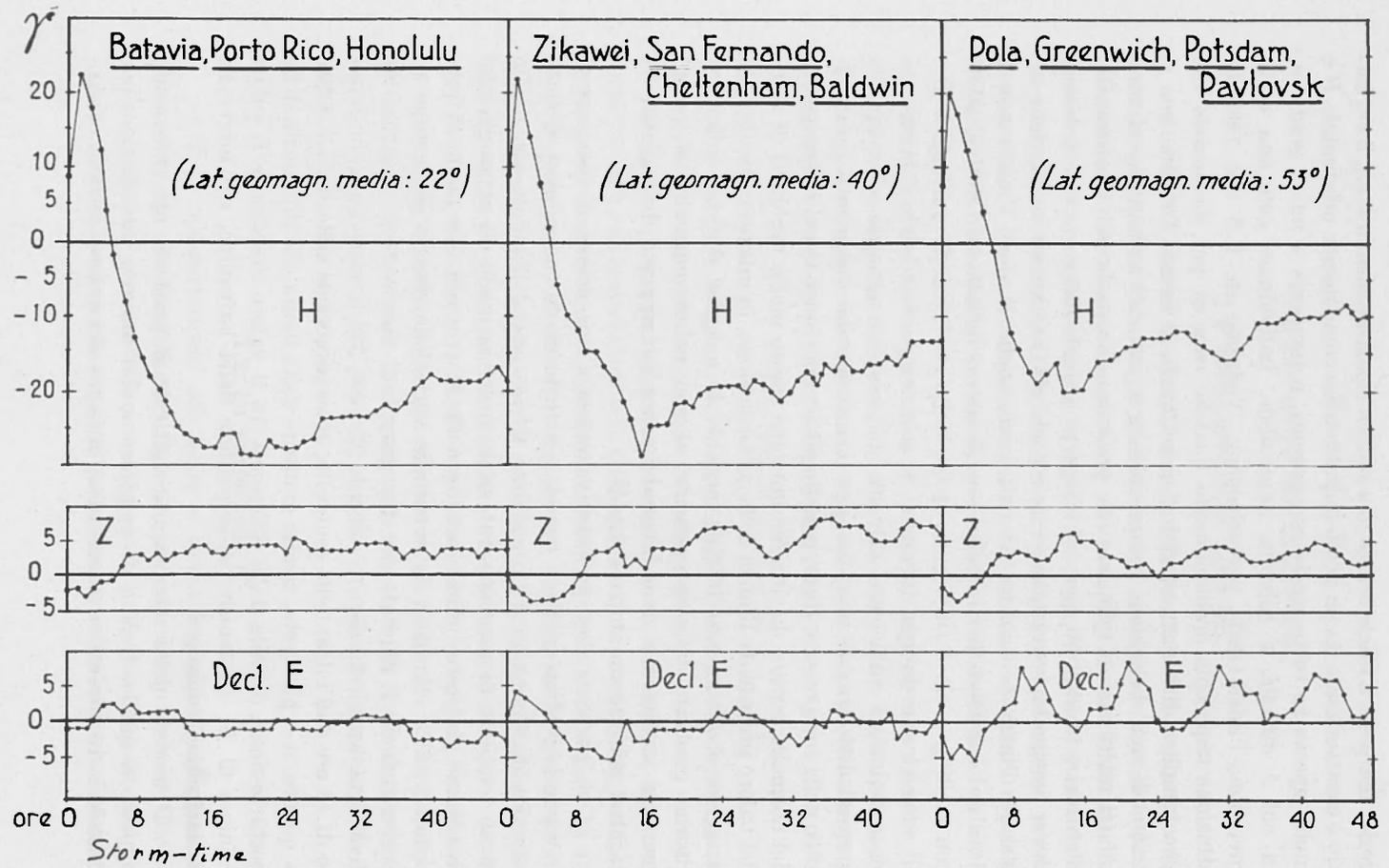


Fig. 1.1. - Variazione D_{st} media a varie latitudini (secondo Chapman).

derato invece Z come vettore, assunto, secondo le convenzioni usuali, positivo verso il basso, risulta per le componenti H e Z un andamento opposto a quello di H nell'emisfero nord, concorde in quello sud (*).

Quanto infine all'andamento D_{st} della declinazione, secondo Chapman esso è praticamente inesistente; su questo punto torneremo più avanti.

La prima parte della tempesta, corrispondente all'aumento in H , viene indicata col nome di *fase iniziale* (*initial phase*), mentre l'intervallo comprendente la diminuzione e il minimo di H viene chiamata *fase principale* (*main phase*).

Questi risultati hanno un valore essenzialmente statistico; esaminando le singole tempeste si trova una notevole varietà di andamenti, in cui però quasi invariabilmente si presenta la diminuzione della componente H . Vi sono perturbazioni in cui l'andamento di H è strettamente conforme all'andamento medio, e sono perfettamente individuabili le varie fasi e cioè l'inizio brusco, la fase iniziale, di breve durata, e la fase principale; in altri casi tra l'inizio brusco e l'inizio della fase principale trascorrono parecchie ore, nelle quali l'attività magnetica può anche essere piuttosto scarsa; infine può accadere che l'inizio brusco sia seguito da variazioni irregolari di periodo piuttosto lungo, che mascherano l'andamento tipico della tempesta (*). In qualche caso manca addirittura la fase principale, e la perturbazione è costituita da un inizio brusco, che può essere anche molto netto e intenso, seguito da un periodo di qualche ora in cui H è maggiore del normale, con o senza attività irregolare.

Chapman ha anche cercato se le caratteristiche della variazione D_{st} dipendano dalla intensità della perturbazione, ed è giunto alla conclusione che durante le tempeste molto intense tale variazione, pur non variando di tipo, risulta più rapida, in altri termini il minimo di H viene raggiunto in un tempo minore che durante le tempeste meno intense. Per le perturbazioni di intensità molto bassa una variazione D_{st} non è computabile, perchè risulta praticamente impossibile riconoscere l'istante dell'inizio della perturbazione. Tuttavia, se anche per queste piccole perturbazioni l'andamento D_{st} fosse dello stesso tipo di quello delle tempeste di maggiore intensità, ciò sarebbe parzialmente controllabile. Infatti nella variazione D_{st} la fase principale (diminuzione in H e aumento in Z) è generalmente di maggiore durata e intensità della fase iniziale; il valore medio diurno di H computato per i giorni perturbati dovrebbe

(*) Nella letteratura si considera molto spesso solo il modulo della variazione di Z ; nel seguito noi ci atterremo a questo uso.

quindi essere minore di quello computato per i giorni magneticamente calmi (e viceversa per Z), a condizione di mediare su di un numero di giorni sufficientemente grande. Per la declinazione, stando alla conclusione di Chapman sulla variazione D_{st} di tale elemento, non vi dovrebbero essere differenze. Chapman, esaminando la differenza tra il valore medio diurno delle tre componenti dedotto da *tutti* i giorni e il corrispondente valore dedotto dai soli giorni calmi per i cinque Osservatori di Sitka (latitudine geomagnetica 60° N), Pavlovsk (58° N), Greenwich (55° N), Cheltenham (50° N) e Honolulu (21° N), ha trovato, secondo le previsioni, che tale differenza è negativa in H , positiva in Z e praticamente nulla in declinazione; egli ha trovato inoltre un aumento dell'effetto nella componente H al diminuire della latitudine. Ciò porta a concludere che per le piccole perturbazioni la variazione D_{st} è probabilmente analoga a quella delle tempeste propriamente dette, anche per quanto riguarda il suo andamento in latitudine. È da notare tuttavia che la differenza tra i valori medi diurni così calcolata ammonta a pochi gamma; il massimo valore risulta -10 gamma in H a Honolulu.

Riprendendo quest'ultimo aspetto della analisi di Chapman, Cynk⁽⁵⁾ ha esaminato la differenza tra il valore medio diurno di H nei giorni perturbati e quello nei giorni calmi (grandezza generalmente indicata con D_m) durante l'intervallo 1922-33, per un notevole numero di Osservatori, sia dell'emisfero nord che dell'emisfero sud. Per distinguere perturbazioni di intensità diversa, Cynk ha considerato separatamente due diversi gruppi di anni, 1925-30, di forte attività, 1922-23 e 1931-33, di bassa attività (corrispondenti i primi a un massimo, gli altri a minimi dell'attività solare), nella ipotesi, sufficientemente attendibile, che nel primo gruppo di anni le perturbazioni, oltre che più numerose, fossero in media anche più intense che nel secondo gruppo.

Le conclusioni principali cui Cynk perviene sono: *a*) le due curve di D_m in funzione della latitudine per i due gruppi di anni sono estremamente somiglianti, e possono essere trasformate l'una nell'altra moltiplicando i singoli valori per una costante, e ciò confermerebbe i risultati di Chapman sulle analogie di tipo tra perturbazioni di intensità diversa; *b*) i valori di D_m presentano un massimo all'equatore geomagnetico e vanno diminuendo regolarmente verso le latitudini più elevate fino a circa 60° , in misura approssimativamente proporzionale al coseno della latitudine geomagnetica.

Per quanto riguarda la declinazione, è da notare che, in contrasto con le conclusioni di Chapman, in singoli Osservatori si nota in modo piuttosto evidente un andamento D_{st} . Per esempio, Yokouchi⁽⁴⁾ trova

che a Kakioka (Giappone) l'andamento della declinazione è molto simile a quello di H (fig. 1.2), a parte l'ampiezza molto minore (si rammenti che le variazioni in declinazione sono considerate positive verso l'est).

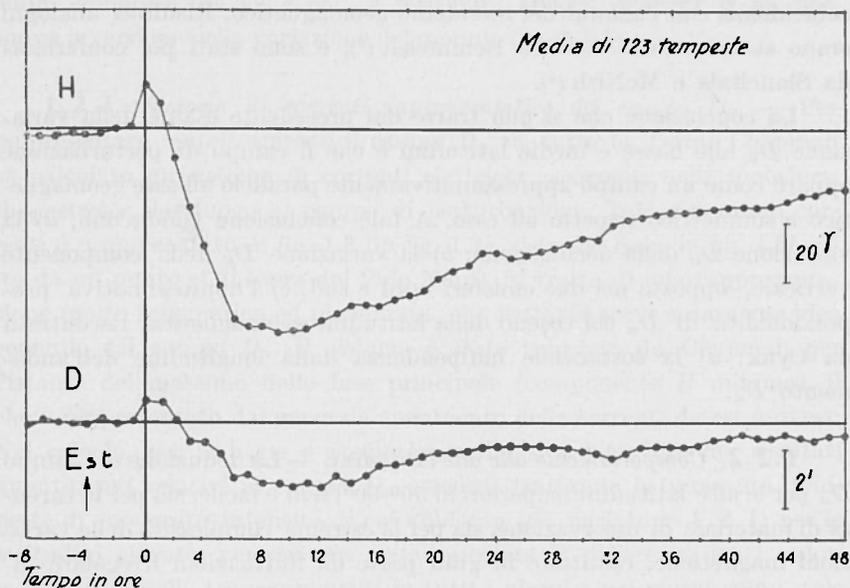


Fig. 1.2. - Andamento D_{st} in H e D a Kakioka (secondo Yokouchi).

Inoltre, considerando la fig. 1.1 si potrebbe anche concludere che, almeno per gli Osservatori a latitudine media 53° (Pavlovsk, Potsdam, Greenwich e Pola), pur tra le fluttuazioni irregolari, è riconoscibile un andamento D_{st} in declinazione di verso opposto a quello di H , e quindi a quello di Kakioka. Ora, per questi Osservatori l'angolo ψ tra il meridiano geografico e il meridiano *geomagnetico* (cioè il cerchio massimo contenente l'asse del dipolo geomagnetico) è nettamente più occidentale della declinazione locale; per Kakioka invece avviene il contrario. Si è portati quindi a pensare che la componente orizzontale del campo di perturbazione presentante l'andamento D_{st} sia diretta lungo il meridiano *geomagnetico*.

A una conclusione simile era del resto giunto anche Schmidt⁽⁶⁾, studiando l'andamento delle medie mensili dei valori delle componenti X e Y (secondo il meridiano e il parallelo geografici rispettivamente). Tali medie mensili sono influenzate dall'effetto del campo di perturbazione, e nei mesi più perturbati si nota una diminuzione della X . Le fluttuazioni

da mese a mese in X sono sempre accompagnate da contemporanee fluttuazioni in Y . Dalle simultanee fluttuazioni in X e Y per ognuno dei 13 Osservatori da lui presi in esame, Schmidt ha determinato l'azimut del vettore di perturbazione in ciascuno di essi, trovando una stretta coincidenza con l'azimut del meridiano geomagnetico. Risultati analoghi erano stati ottenuti da Van Bemmelen (⁷), e sono stati poi confermati da Slaucitajs e McNish (⁸).

La conclusione che si può trarre dal precedente esame della variazione D_{st} alle basse e medie latitudini è che il campo di perturbazione appare come un campo approssimativamente parallelo all'asse geomagnetico e simmetrico rispetto ad esso. A tale conclusione conducono: *a*) la variazione D_{st} della declinazione; *b*) la variazione D_{st} della componente verticale, opposta nei due emisferi nord e sud; *c*) l'approssimativa proporzionalità di D_m col coseno della latitudine geomagnetica, riscontrata da Cynk; *d*) la sostanziale indipendenza dalla longitudine dell'andamento D_{st} .

1.2.2. Comportamento alle alte latitudini. — La deduzione del campo D_{st} per le alte latitudini (superiori ai 50°-60°) non è facile, sia per la carenza di materiale di osservazione, sia per la estrema complessità delle variazioni magnetiche, costituite in gran parte da fluttuazioni irregolari, intense e frequentissime, che spesso mascherano l'inizio delle tempeste vere e proprie.

Per ovviare a tale inconveniente Chapman ha applicato alle zone polari dell'emisfero nord lo stesso metodo usato alle basse e medie latitudini per le perturbazioni di debole intensità: egli ha studiato cioè la differenza tra il valore medio diurno delle tre componenti computato per tutti i giorni e quello computato per i giorni tranquilli. I risultati si possono così riassumere: il vettore di perturbazione è ovunque diretto secondo il meridiano geomagnetico; la sua componente orizzontale è orientata verso Sud e ha una intensità nettamente maggiore che alle basse latitudini (circa 20 gamma); la sua componente verticale è diretta verso l'alto e di bassa intensità (circa 4 gamma) nelle stazioni comprese tra 55° e 65°, mentre alle latitudini più elevate essa cambia di segno e aumenta fortemente di intensità, raggiungendo quasi i 20 gamma.

Nell'emisfero sud la scarsità dei dati di osservazione non ha consentito finora di condurre ricerche sistematiche come nell'emisfero nord. Tuttavia appare che la componente orizzontale del vettore di perturbazione è ancora diretta verso sud; la componente verticale è diretta verso il basso a latitudini inferiori a circa 65° S, verso l'alto a latitudini più

elevate. Tenendo conto del fatto che la componente verticale del campo geomagnetico generale è orientata verso il basso nell'emisfero nord e verso l'alto nell'emisfero sud, si può concludere che il suo modulo cresce alle latitudini superiori a circa 65° Nord e Sud, mentre diminuisce alle latitudini comprese fra 55° e 65° . A latitudini ancora inferiori si ha una nuova inversione nella variazione del modulo (v. 1.2.1).

1.2.3. *Sistema di correnti rappresentativo del campo D_{st} .* — Per rappresentare sinteticamente il campo D_{st} su tutta la Terra, Chapman ha calcolato un sistema di correnti elettriche, scorrenti nella ionosfera, che *potrebbe* dar luogo al campo di perturbazione. Tale sistema di correnti è rappresentato in fig. 1.3 (in fig. 1.3a visto dal Sole, in fig. 1.3b visto da un punto al di sopra del Polo Nord). Si tratta di una rappresentazione molto schematica ed idealizzata, che tuttavia serve a dare una idea generale del campo D_{st} . Il sistema è stato tracciato da Chapman per l'istante del massimo della fase principale (componente H minima), il che è rappresentato dal generale andamento delle correnti da est a ovest. Nel calcolo, per le basse e medie latitudini si è fatto uso dei risultati quantitativi relativi al campo D_{st} ottenuti trattando le quaranta tempeste di moderata intensità di cui abbiamo già parlato in 1.2.1; per le latitudini elevate, per cui era stata calcolata la differenza tra i valori medi diurni delle tre componenti in tutti i giorni e nei giorni calmi, tale differenza è stata moltiplicata per 5 per riportarsi alla presumibile intensità della perturbazione nell'istante del massimo di una tempesta moderata.

Il fatto più notevole di questa rappresentazione è la concentrazione delle linee di corrente alle alte latitudini; tale corrente concentrata che, con Chapman (*), chiameremo *elettrogetto* (*electrojet*) illustra bene, oltre all'aumentata intensità alle alte latitudini del vettore orizzontale di perturbazione, anche l'andamento del vettore verticale che, come si è visto, tende a essere diretto verso l'alto attorno ai 60° N e verso il basso a latitudini superiori. È molto probabile che un elettrogetto esista effettivamente e non sia semplicemente un mezzo di rappresentazione, come invece si ritiene sia la parte del sistema di correnti alle basse e medie latitudini. Per chiarire le idee su tale elettrogetto è necessario tuttavia ricordare che il campo D_{st} alle latitudini elevate è stato ottenuto con un metodo indiretto, e cioè a partire dalla differenza tra i valori medi diurni delle tre componenti in giorni perturbati e in giorni tranquilli. Ora, i valori medi diurni potrebbero, in linea di principio, essere influenzati non solo dal campo D_{st} , ma anche da un eventuale andamento diurno

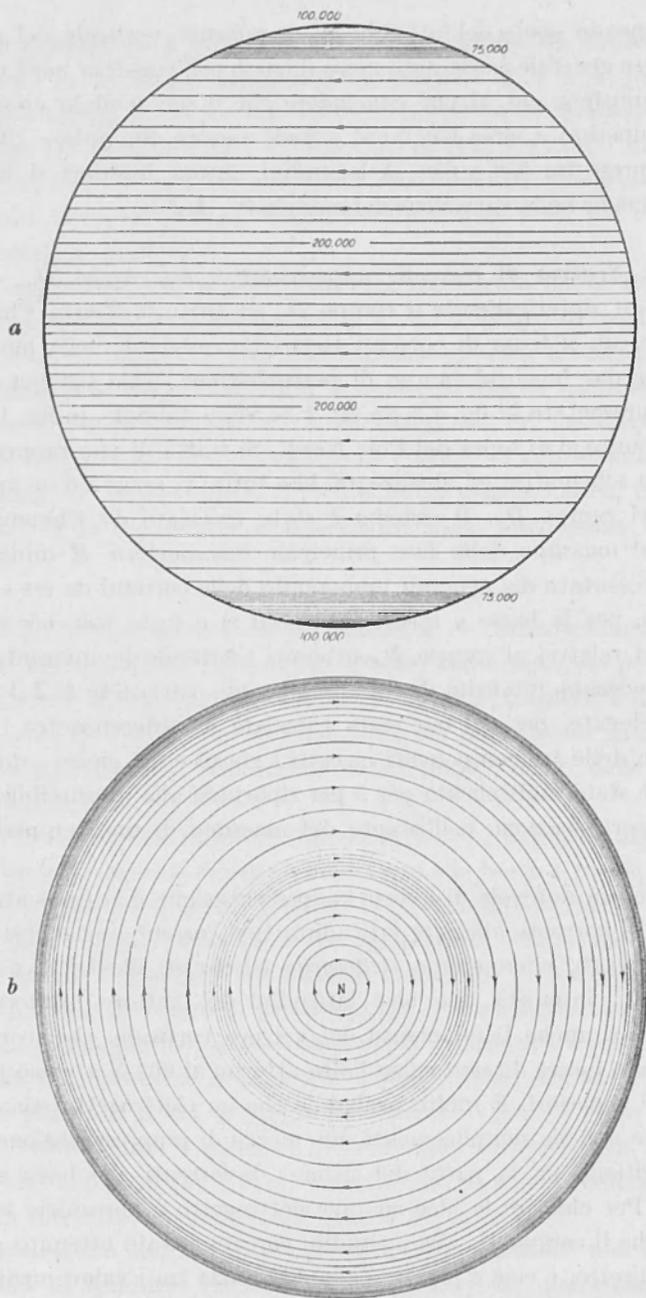


Fig. 1.3. - Sistema di correnti rappresentativo del campo D_{st} . Fra la zona aurorale nord e la zona aurorale sud scorrono complessivamente 400.000 A; su ognuna delle zone aurorali 75.000 A; su ogni calotta polare 100.000 A. *a*: visto dal Sole; *b*: visto da sopra il Polo Nord (secondo Chapman).

dei giorni perturbati, non simmetrico rispetto al valore del campo in condizioni imperturbate, e peraltro assente o molto ridotto nei giorni

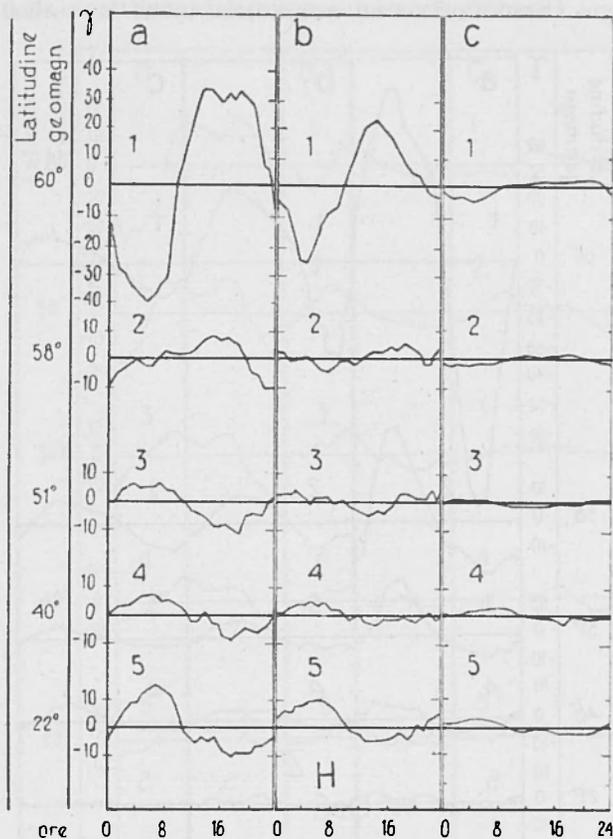


Fig. 1.4. - Variazione S_D della componente orizzontale H a varie latitudini. Colonne a e b : primo e secondo giorno della tempesta; colonna c : differenza fra la variazione diurna in tutti i giorni e nei giorni calmi (secondo Chapman).

tranquilli. È opportuno perciò studiare le caratteristiche dell'andamento diurno S_D , specialmente alle alte latitudini.

1.3. La variazione S_D

1.3.1. *Comportamento alle basse e medie latitudini.* — Per analizzare il campo di perturbazione secondo il tempo locale, si può usare il metodo illustrato da Chapman (^{1, 10}): riferendosi sempre alle quaranta

tempeste già considerate, egli sottrae dall'andamento effettivo per ogni Osservatorio l'andamento D_{st} , riordina poi i residui secondo il tempo locale di ogni Osservatorio e ad essi sottrae infine la variazione S_q . I

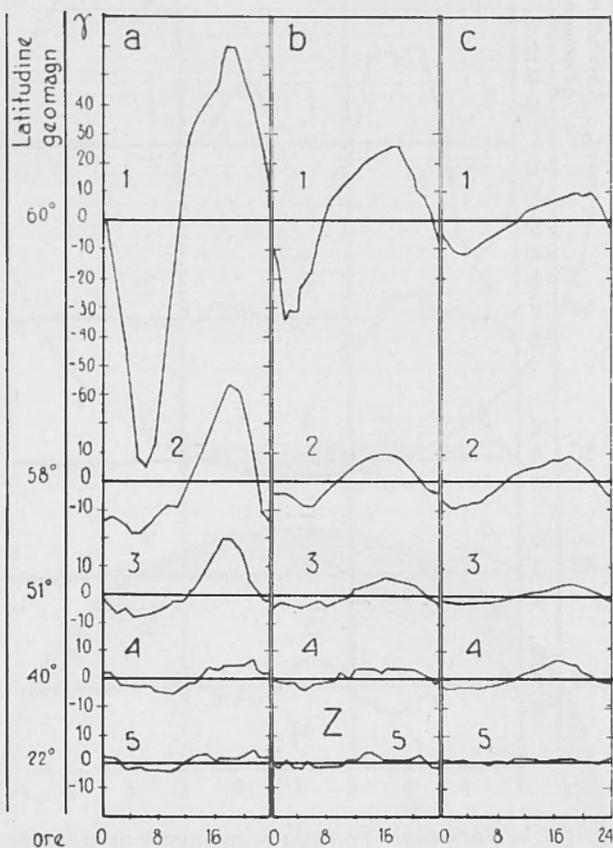


Fig. 1.5. - Variazione S_D della componente verticale Z a varie latitudini. Colonne a e b : primo e secondo giorno della tempesta; colonna c : differenza tra la variazione diurna in tutti i giorni e nei giorni calmi (secondo Chapman).

risultati ottenuti per il primo e secondo giorno della tempesta separatamente sono dati nelle fig. 1.4, 1.5, 1.6, colonne a , b , per le tre componenti. Le conclusioni più importanti che si possono dedurre sono: a) forte aumento dell'ampiezza della variazione all'aumentare della latitudine; fa eccezione, almeno parzialmente, la variazione di H , che diminuisce gradualmente dall'equatore fino ad una certa latitudine tra 51° e 58° ,

in corrispondenza della quale si ha una inversione di fase, per poi aumentare rapidamente col crescere della latitudine; b) diminuzione della intensità della variazione dal primo al secondo giorno.

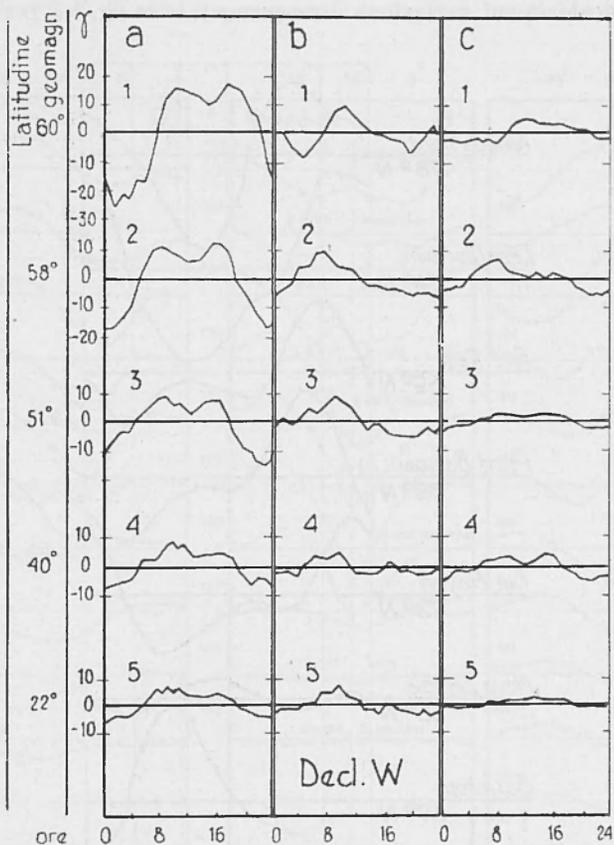


Fig. 1.6. - Variazione S_D della declinazione a varie latitudini. Colonne *a* e *b*: primo e secondo giorno della tempesta; colonna *c*: differenza tra la variazione diurna in tutti i giorni e nei giorni calmi (secondo Chapman).

È interessante notare che analogo andamento presenta la differenza tra la variazione diurna media computata dai giorni perturbati e quella (S_q) computata dai giorni tranquilli e, con minore ampiezza, la differenza tra tutti i giorni e i giorni tranquilli; quest'ultima è rappresentata nelle fig. 1.4, 1.5, 1.6, colonna *c*. Questo fatto dimostra che il tipo di andamento rimane praticamente uguale entro un largo intervallo di intensità delle perturbazioni.

1.3.2. *Comportamento alle alte latitudini.* — La differenza tra tutti i giorni e i giorni tranquilli è stata usata da Chapman anche per studiare la S_D alle alte latitudini; assai interessante è il risultato per la componente verticale, la cui variazione è rappresentata in fig. 1.7 per latitudini

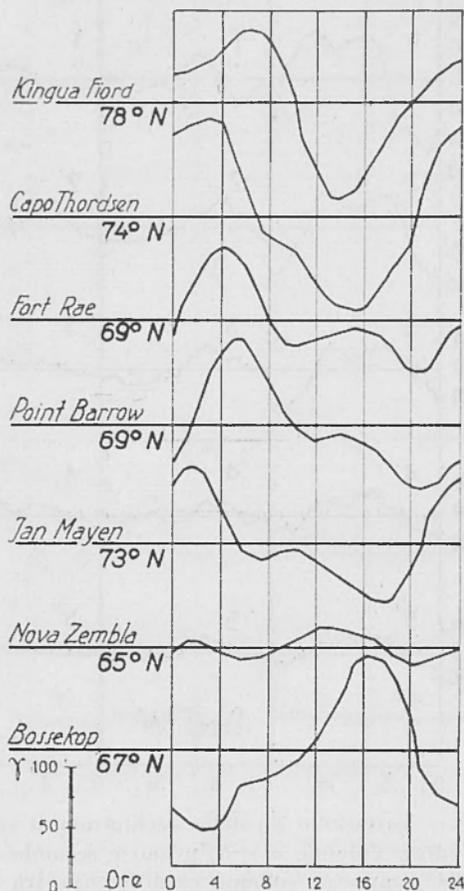


Fig. 1.7. — Variazione S_D della componente verticale nelle regioni polari a diverse latitudini geomagnetiche (secondo Chapman).

crescenti. L'aumento dell'ampiezza della variazione continua decisamente, tanto da fare apparire completamente trascurabile, in paragone, la variazione D_{st} , finchè a circa 70° , appare una inversione di fase. Tali risultati sono stati successivamente confermati da Harang⁽¹¹⁾ in uno studio analogo, utilizzando però la differenza tra giorni perturbati e

giorni tranquilli, condotto sui dati dell'Anno Polare 1932-33 per una serie di stazioni situate approssimativamente sul meridiano 120° di longitudine geomagnetica (regione scandinava). I risultati di Harang per le tre componenti D (*), H , Z sono rappresentati in fig. 1.8, la quale mostra la va-

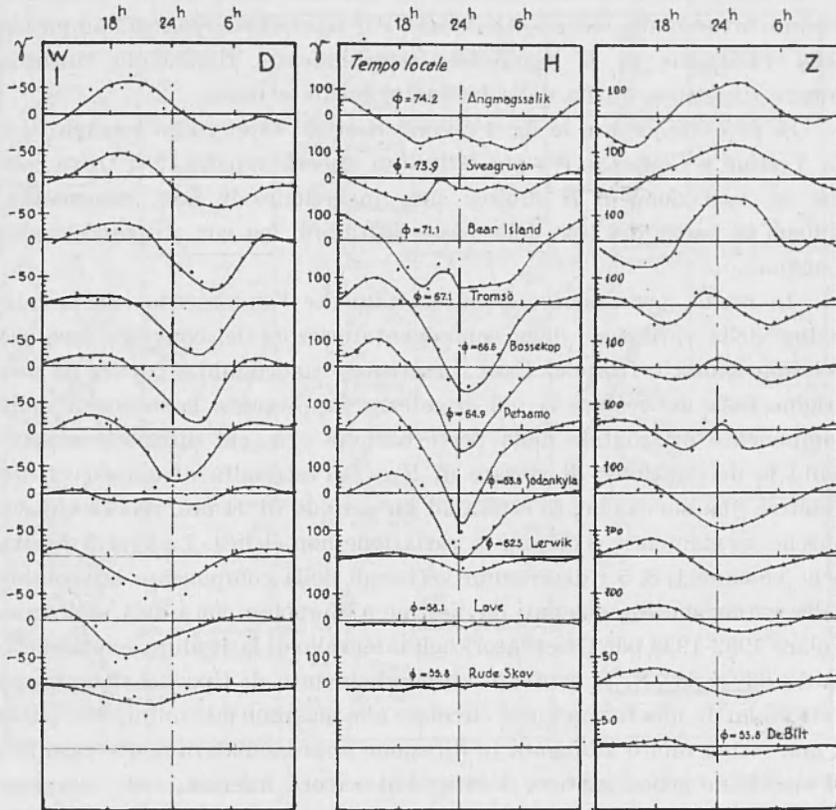


Fig. 1.8. - Variazione S_D nelle regioni polari (secondo Harang).

riazione S_D in giorni *fortemente* perturbati. Per valutare la figura e confrontarla, almeno per la componente Z , con la fig. 1.7, si noti che in essa l'intervallo diurno non è stato scelto tra le 0^h e le 24^h locali, come di consueto, ma tra le 12^h di un giorno e le 12^h del giorno successivo.

La fig. 1.8 mostra con chiarezza la inversione di fase della componente Z nell'intervallo di latitudine geomagnetica compreso tra i 65° e

(*) Indichiamo con D la declinazione. Con la stessa notazione abbiamo indicato anche il campo di perturbazione generico (1.1): sarà tuttavia chiaro dal contesto, caso per caso, il significato del simbolo D .

i 70° ; in tale zona di transizione la variazione S_D in Z è caratterizzata da un'onda semidiurna. Sempre in corrispondenza di tale intervallo di latitudine, la variazione della componente H presenta un rapido aumento di ampiezza, con un massimo attorno ai 67° di latitudine geomagnetica; la curva S_D per H è caratterizzata, a tali latitudini, da un fortissimo minimo attorno alla mezzanotte locale. Per latitudini superiori l'ampiezza della variazione di H diminuisce sensibilmente, rimanendo tuttavia grande rispetto a quella delle latitudini medie e basse.

Si può completare la fig. 1.8 con i risultati ottenuti da Vestine⁽¹²⁾ e da Vestine e Chapman⁽¹³⁾ per latitudini ancora superiori; si trova così che la variazione di H subisce una inversione di fase, ritornando, almeno in parte, del tipo delle basse latitudini, ma con ampiezza molto maggiore.

In realtà, per descrivere più esattamente l'andamento con la latitudine della variazione della componente orizzontale, conviene fare uso del diagramma vettoriale. Esso si costruisce riportando a partire da una origine fissa un vettore la cui grandezza rappresenta la intensità della componente orizzontale della perturbazione e la cui direzione rappresenta la declinazione; al variare di H e D l'estremità di questo vettore descrive una curva che, se estesa ad un periodo di 24 ore, risulta chiusa, purchè, ovviamente, si elimini la variazione non ciclica. La fig. 1.9 mostra nelle colonne 1, 3, 5 i diagrammi vettoriali della componente orizzontale della variazione S_D , ottenuti da Vestine e Chapman con i dati dell'Anno Polare 1932-1933 per Osservatori nell'intervallo di latitudine geomagnetica da 62° a 88° N. È evidente un cambiamento di tipo del diagramma vettoriale: da una forma quasi circolare alle massime latitudini, esso passa a una forma molto allungata in direzione approssimativamente parallela al meridiano geomagnetico. A latitudini ancora inferiori, non comprese in figura, i diagrammi riprendono una forma più ovale. Il vettore applicato all'origine del diagramma per ogni stazione rappresenta, in scala, la componente orizzontale del vettore di perturbazione D_m , definito in 1.2.1. Come si vede, esso è molto piccolo rispetto alla intensità della S_D . Nelle colonne 2, 4, 6 della stessa figura è riportata la variazione S_D per Z , sempre dai dati dell'Anno Polare 1932-33; la linea tratteggiata rappresenta, in grandezza e segno, la componente verticale del vettore D_m ; anch'essa è piccola rispetto all'ampiezza della S_D .

Secondo Vestine⁽¹²⁾, l'andamento dell'ampiezza della S_D in funzione della latitudine (vedi figure 1.4-1.8) è praticamente indipendente dalla longitudine geografica. Non così avviene invece per la fase della variazione S_D alle alte latitudini: partendo dalla longitudine di 0° , si ha

un progressivo ritardo di fase all'aumentare della longitudine, pressappoco simile in ciascuna delle componenti ed ammontante ad un massimo di circa 4 ore verso i 180° di longitudine. La differenza che si nota tra le curve della S_D in H ottenute da Harang per latitudine di circa 60° N e

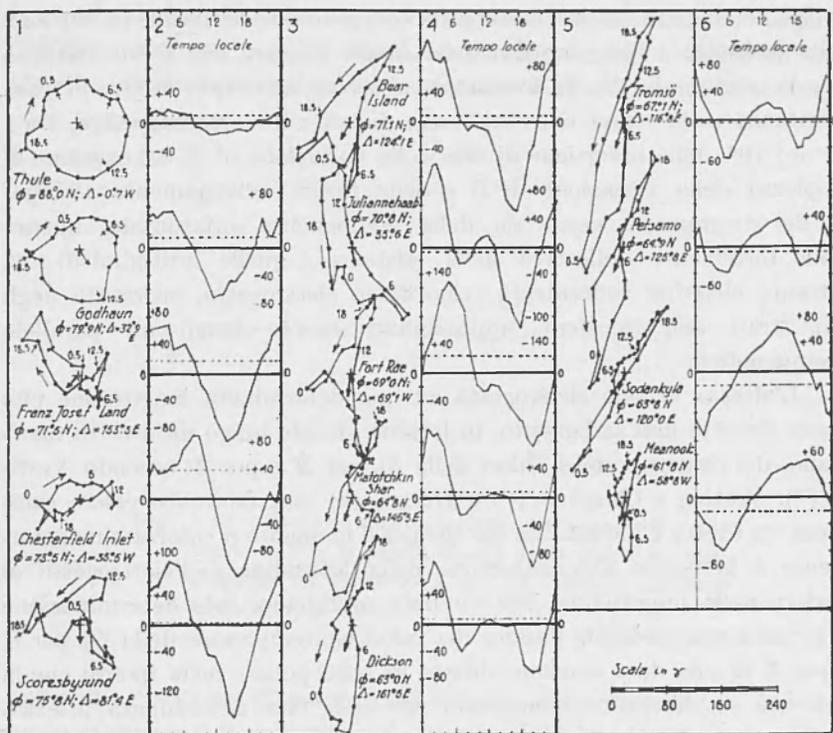


Fig. 1.9. - Variazione S_D nelle regioni polari (secondo Vestine e Chapman).

longitudine fra i 10° e i 20° (fig. 1.8) e la curva di S_D in H per Sitka, cioè per una longitudine di 225° (fig. 1.4 n. 1), è da attribuirsi evidentemente a tale diversità di fase: infatti mentre per le stazioni scandinave il minimo di H è attorno alla mezzanotte locale, per Sitka esso si ha verso le 05^h di tempo locale. Vestine ha trovato che tali diversità di fase si riducono sensibilmente se, anziché il tempo locale, si usa il *tempo geomagnetico*. Questo viene definito come l'angolo tra il meridiano geomagnetico per il punto di osservazione e il meridiano geomagnetico per l'Antisole. Mentre per le basse latitudini la differenza tra il tempo locale e il tempo geomagnetico è piccola, essa può essere notevole alle latitudini elevate.

1.3.3. *Sistema di correnti S_D .* — Le caratteristiche fondamentali della variazione S_D sono, dunque, oltre alla dipendenza dal tempo locale (o meglio dal tempo geomagnetico), il fortissimo aumento di intensità alle alte latitudini, la inversione di fase della componente Z alla latitudine a cui la variazione di H ha la massima ampiezza, e la variazione di tipo del diagramma vettoriale della componente orizzontale in funzione della latitudine. Tali caratteristiche fanno pensare che il meccanismo che dà origine alla S_D sia localizzato alle alte latitudini; inoltre la concomitanza nella stessa ristretta fascia di latitudine geomagnetica, tra i 65° e i 70° , della inversione di fase della variazione di Z , del massimo di ampiezza della variazione di H e della forma estremamente allungata del diagramma vettoriale della componente orizzontale, appare come fortemente indicativa della esistenza a quelle latitudini di una corrente elettrica concentrata, cioè di un elettrogetto, scorrente negli alti strati dell'atmosfera approssimativamente lungo un parallelo geomagnetico.

L'altezza di tale elettrogetto ad una determinata longitudine può essere dedotta dall'andamento, in località situate lungo un arco di meridiano, dei contemporanei valori della S_D per H e per Z ; secondo Vestine⁽¹²⁾, Vestine e Chapman⁽¹³⁾ e Harang⁽¹¹⁾ essa dovrebbe essere compresa tra i 150 e i 300 km. Ma ciò che per il momento ci interessa maggiormente è la esatta determinazione della latitudine dell'elettrogetto al variare della longitudine. Per un dato meridiano, tale determinazione si fa anch'essa mediante l'esame dei valori contemporanei della S_D per H e per Z in una data stazione situata in zona polare, nella ipotesi che la corrente sia lineare e assumendo per essa una determinata altezza. Chiamando infatti x (fig. 1.10) la distanza dalla stazione al punto al cui zenit passa l'elettrogetto, positiva se questo è a nord della stazione, negativa nel caso contrario, si ha, per distanze sufficientemente piccole da poter trascurare la curvatura della Terra, $x = h \cdot \Delta Z / \Delta H$, dove h è l'altezza dell'elettrogetto, e ΔZ e ΔH sono rispettivamente i valori simultanei delle componenti verticale ed orizzontale del vettore perturbazione della S_D .

Con i dati dell'Anno Polare 1932-33 Vestine⁽¹²⁾ ha costruito la traccia dell'elettrogetto, nella ipotesi di un'altezza di 300 km, trovando che essa coincide piuttosto bene con la curva di Vestine della massima frequenza aurorale (vedi 2.2.1). Diviene quindi naturale definire la zona aurorale mediante la posizione dell'elettrogetto, tanto più che appare molto ragionevole pensare a una stretta connessione tra tale corrente e i fenomeni aurorali.

Per il modo come è stata calcolata, la curva di Vestine rappresenta in ogni suo punto la posizione dell'elettrogetto nel corrispondente istante di massima ampiezza della S_D , istante che è praticamente uguale per H e per Z ; trattandosi dello stesso tempo *locale* per le varie longitudini (con l'approssimazione di cui alla fine del paragrafo precedente), la curva è quindi la traccia delle successive posizioni della massima intensità dell'elettrogetto, e non dà alcuna idea sulle variazioni diurne di esso. Queste variazioni possono invece esser messe in rilievo mediante la costru-

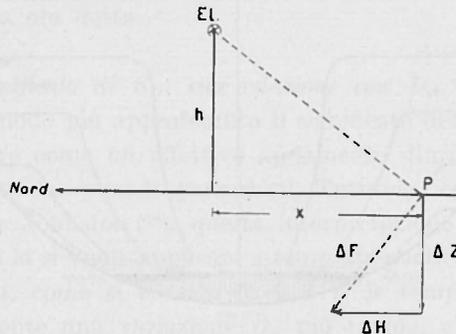


Fig. 1.10 - Determinazione della distanza x tra una stazione P e il punto al cui zenit scorre un elettrogetto El. (diretto a est). h : altezza dell'elettrogetto dal suolo.

zione di un sistema di correnti del tipo di quello descritto in 1.2.3, il quale rappresenti la variazione S_D in tutto il globo. In fig. 1.11 è riportato il sistema di correnti costruito da Chapman, il quale però è in realtà troppo schematizzato. Gli studi approfonditi di Harang⁽¹¹⁾, Fukushima⁽¹⁴⁾, Vestine^(12, 15) sulla S_D hanno messo in rilievo innanzi tutto che tale sistema di correnti deve essere anticipato in fase di qualche ora, cioè deve essere ruotato verso ovest di qualche decina di gradi; inoltre l'intensità dell'elettrogetto antimeridiano e notturno scorrente da est a ovest è maggiore di quella dell'elettrogetto pomeridiano in direzione ovest-est, il che equivale a dire che nella zona aurorale la fase negativa della S_D di H è di intensità maggiore della fase positiva. Su questo punto torneremo brevemente nel prossimo paragrafo.

Il sistema di correnti S_D corretto presenta un elettrogetto aurorale diretto verso est nell'emisfero pomeridiano, con un massimo di intensità approssimativamente nel meridiano delle 16^h, ed un elettrogetto aurorale

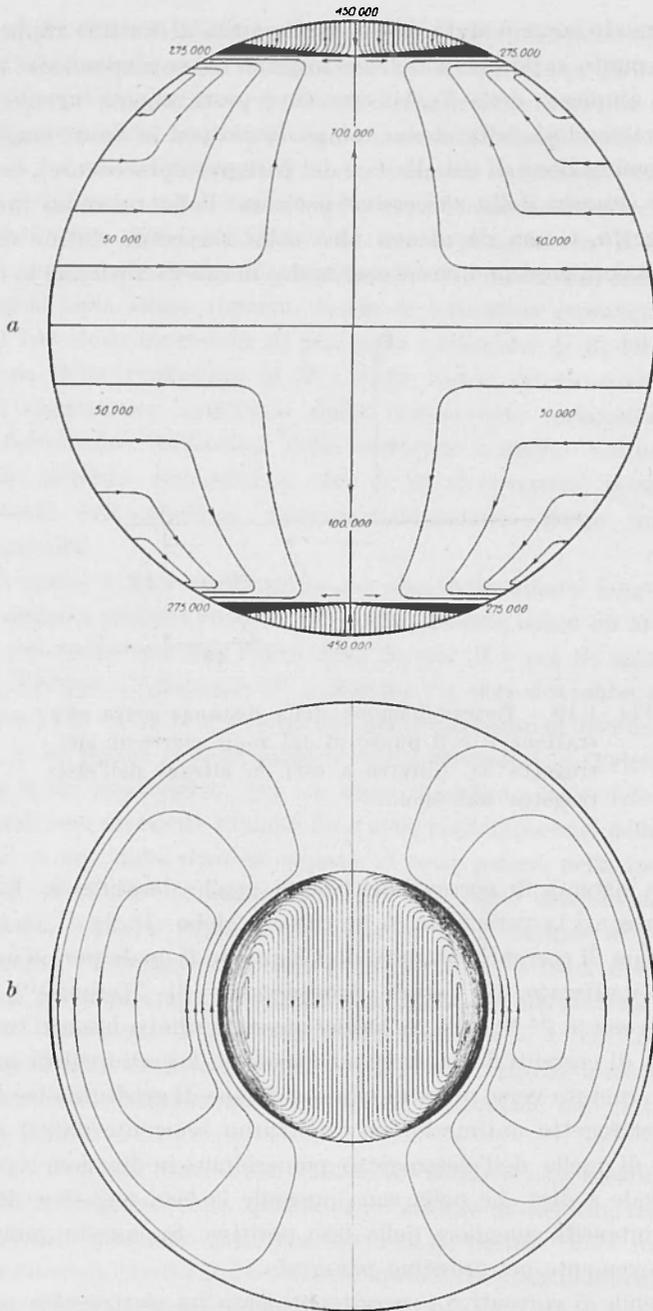


Fig. 1.11. - Sistema di correnti rappresentativo del campo S_D . *a*: visto dal Sole; *b*: visto da sopra il Polo Nord (secondo Chapman).

diretto a ovest, più intenso del precedente, nell'emisfero antimeridiano, con un massimo di intensità tra la mezzanotte e le 3^h. La corrente dei due elettrogetti si richiude in parte alle basse latitudini, dando luogo alla variazione S_D ivi (si noti la inversione nella direzione delle correnti a sud della zona aurorale, che rende conto della inversione di fase della S_D di H), e in parte molto maggiore attraverso la calotta polare. Naturalmente queste conclusioni hanno un carattere puramente statistico; nelle singole tempeste, e anche in istanti diversi di una stessa tempesta, il sistema di correnti può presentare una morfologia anche notevolmente diversa da quella ora detta.

1.3.4. *Significato di S_D ; sua relazione con D_{st} .* — È necessario ora studiare in modo più approfondito il significato del campo S_D . Esso potrebbe apparire come un effettivo andamento diurno, analogo a S_q , ma caratteristico dei periodi perturbati. Tuttavia, come hanno fatto notare McNish e Johnston (¹⁶), questa interpretazione porta a qualche difficoltà quando la si vuole applicare a tempeste particolarmente intense e rapide. Infatti, come si è visto in 1.2.1, le tempeste più intense hanno generalmente una variazione D_{st} più rapida, e talvolta durano meno di 24 ore; tuttavia in esse compare regolarmente la variazione S_D . Si pone naturalmente il problema se anche questa variazione in tali eventi divenga più rapida, nel qual caso scomparirebbe il periodo di 24 ore e il carattere di andamento diurno. Chapman (¹⁰) ha precisato che la S_D non ha in realtà tale carattere, ma rappresenta l'effetto del tempo locale, istante per istante, sul campo di perturbazione; mentre il campo D_{st} ad una determinata latitudine per come è definito rappresenta ad ogni istante la media del campo di perturbazione su quel parallelo, S_D rappresenta gli scarti da quella media, in quell'istante, lungo lo stesso parallelo, scarti che hanno un carattere sistematico, funzione della longitudine rispetto al Sole. È questa la ragione per cui Chapman propone di chiamare questo campo, computato nel modo descritto in 1.3.1, D_S , *disturbance local-time inequality*, lasciando il simbolo S_D al campo dedotto dalla differenza tra l'andamento diurno in tutti i giorni (o nei giorni perturbati) e quello dedotto nei giorni tranquilli. Si tratta però, come si preciserà meglio nel prossimo paragrafo, di una distinzione apparente; per non complicare troppo le cose, useremo perciò nel seguito solo la notazione S_D .

Dal punto di vista statistico, Chapman (¹⁰) ha mostrato che la S_D è presente fin dalle prime ore di una tempesta, con ampiezza crescente, il cui massimo precede di circa tre ore quello della D_{st} ; gli anda-

menti dell'ampiezza della S_D e della D_{st} , ancora per le quaranta tempeste di moderata intensità più volte considerate, sono riportati in fig. 1.12.

Allo stesso risultato si può giungere studiando le singole tempeste con un metodo generale ora correntemente usato. Si determina anzitutto per ogni Osservatorio il vettore perturbazione ad un certo istante, definito come differenza tra il campo attuale e un campo non perturbato,

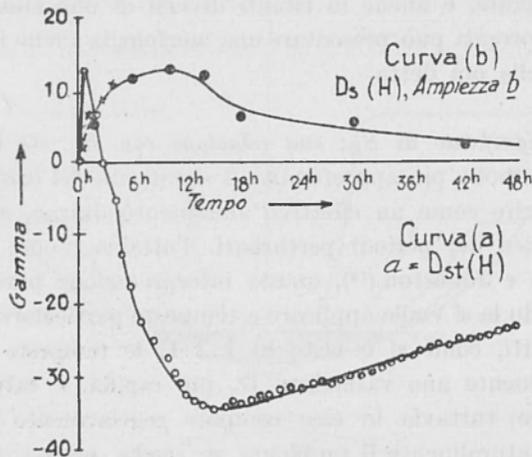


Fig. 1.12. — Variazione D_{st} e ampiezza della variazione S_D (D_S) in funzione del tempo (secondo Chapman).

scelto con opportuni criteri; si determina la componente orizzontale di questo vettore perturbazione; si tracciano poi su di una mappa del globo in proiezione conveniente le *freccie di corrente*, vettori indicanti in grandezza e verso la densità di corrente che potrebbe dar luogo a quel vettore perturbazione; la lunghezza di ciascuna freccia è proporzionale alla intensità della componente orizzontale del vettore perturbazione, il verso si ottiene rotando in senso orario di 90° quello della stessa componente orizzontale. L'insieme di queste freccie di corrente dà una idea approssimativa del sistema di correnti che potrebbe essere responsabile della perturbazione all'istante dato; tale rappresentazione può essere poi completata tracciando le linee di corrente.

Il sistema di correnti così costruito consente, per un determinato istante di una tempesta, la rappresentazione del vettore *totale* di perturbazione, cioè della *somma* delle due porzioni D_{st} e S_D presenti in quell'istante; poichè però alle alte latitudini la S_D è nettamente pre-

valente sulla D_{st} , è da attendersi che, almeno a tali latitudini, il sistema di correnti rappresentativo della S_D sia facilmente riconoscibile.

Con questo metodo, applicato all'esame di singole tempeste soprattutto nelle zone di alta latitudine, Vestine (¹⁵) e Fukushima (^{17, 18}), hanno anch'essi dimostrato che un sistema di correnti corrispondente al campo S_D esiste fin dai primi momenti di una tempesta.

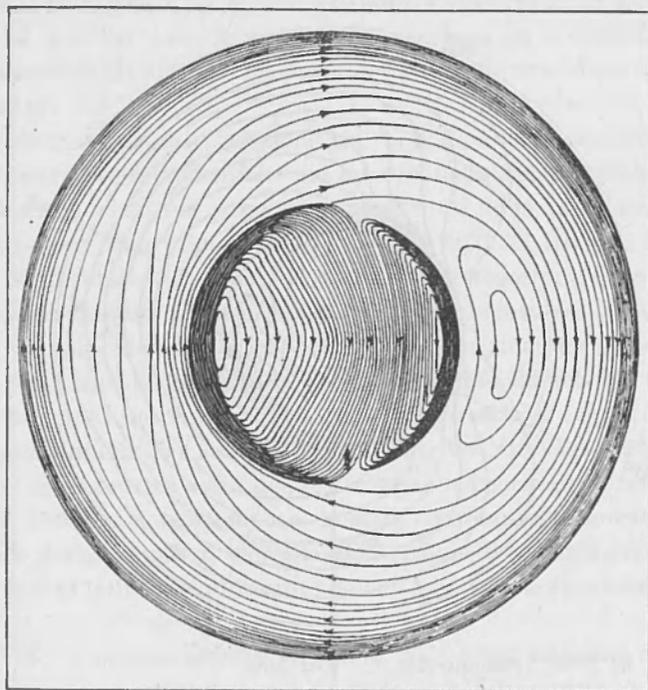


Fig. 1.13. - Sistema di correnti rappresentativo del campo di perturbazione totale, visto da sopra il Polo Nord (secondo Chapman).

Si può concludere quindi che sin dall'inizio di una tempesta a inizio brusco, o almeno ben determinabile, il campo di perturbazione risulta composto dei due campi D_{st} e S_D . Quest'ultimo varia di intensità col progredire della tempesta; esso, naturalmente, compare in un determinato punto del globo con la fase corrispondente al tempo locale di quel punto; talvolta il rapido sviluppo di S_D fin dai primi istanti di una tempesta magnetica a inizio brusco produce una profonda differenza nell'aspetto della fase iniziale della tempesta in due Osservatori distanti, anche se alla stessa latitudine, per i quali il tempo locale dell'inizio brusco corrisponde a due fasi opposte della variazione S_D .

La fig. 1.13 rappresenta il sistema di correnti totale, costruito da Chapman come somma dei sistemi D_{st} di fig. 1.3 *b* e S_D di fig. 1.11 *b*, mentre in fig. 1.14 è riportato il sistema di correnti corrispondente al campo di perturbazione alle 18^h T. M. G. del 1 maggio 1933, durante la fase principale della tempesta più intensa dell'Anno Polare 1932-33 ⁽¹⁵⁾. Come si vede, le due figure si corrispondono abbastanza bene, specialmente

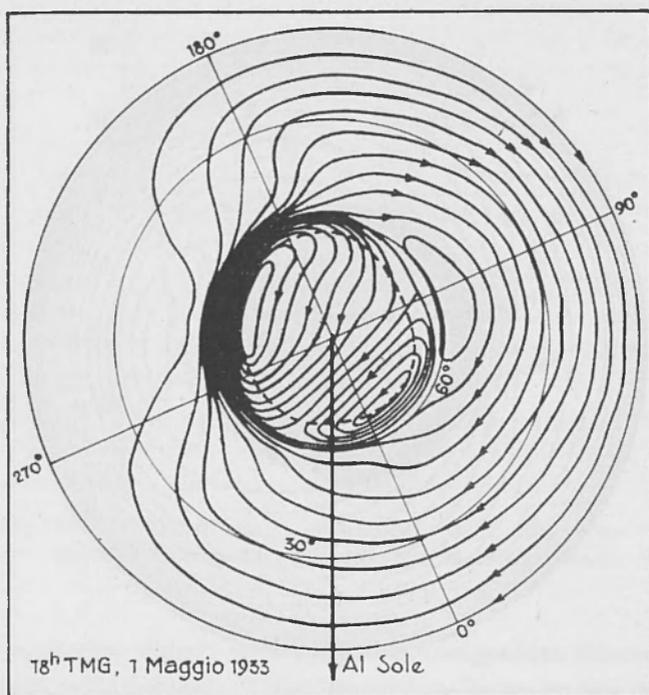


Fig. 1.14. — Sistema di correnti rappresentativo del campo di perturbazione durante la tempesta del 1 maggio 1933, visto da sopra il Polo Nord (secondo Vestine).

alle alte latitudini, pur di variare la fase del sistema S_D di Chapman ruotandolo di qualche decina di gradi verso ovest (vedi 1.3.3).

Anche la semplice sovrapposizione dei due sistemi schematizzati D_{st} e S_D di Chapman potrebbe spiegare la differenza di intensità degli elettrogetti aurorali pomeridiano e notturno, in quanto nella zona aurorale durante il pomeriggio l'elettrogetto corrispondente al campo D_{st} , sempre diretto verso ovest, è di verso opposto a quello corrispondente al campo S_D , mentre durante la notte è di verso concorde. Tuttavia (vedi fig. 1.8 e 1.3.3) risulta proprio una caratteristica intrinseca della variazione

S_D in H quella di avere, alle alte latitudini, la fase negativa maggiore della fase positiva, cioè l'elettrogetto scorrente verso ovest più intenso di quello scorrente verso est; possiamo perciò concludere che la S_D influisce sul valore medio diurno di H , abbassandolo rispetto al valore normale, e di conseguenza essa influisce su D_m , aumentandone l'intensità. Ricordando allora che il sistema di correnti corrispondente al campo D_{st} costruito da Chapman per le alte latitudini è dedotto dallo studio di D_m (vedi 1.2.2 e fig. 1.3), si può pensare che esso sia in buona parte, se non totalmente, fittizio; solo gli elettrogetti della S_D avrebbero quindi una realtà fisica.

Un'altra importante relazione tra S_D e D_{st} è lo spostamento a sud, durante le tempeste magnetiche più intense, della zona aurorale, definita, come abbiamo visto nel paragrafo precedente, dalla posizione dell'elettrogetto polare. Con i dati dell'Anno Polare 1932-33 Harang, nel lavoro già più volte citato⁽¹¹⁾, conclude che tale elettrogetto, e quindi la zona aurorale, che durante i giorni meno perturbati si trova tra 200 e 300 km a nord di Tromsø, durante le più intense perturbazioni si sposta in media a circa 140 km a sud di quella località. Secondo Bartels⁽¹⁹⁾, durante la intensa tempesta del 1 marzo 1941 la zona aurorale si è spostata per un breve spazio di tempo a sud di Potsdam (lat. 52° N). Nagata⁽²⁰⁾ ha determinato lo spostamento a sud dell'elettrogetto nel corso della tempesta del 1 maggio 1933; tale spostamento, iniziato contemporaneamente alla fase principale della tempesta, cioè alla diminuzione di H , raggiunse un valore di circa 10° in latitudine all'istante del massimo della D_{st} (minimo di H).

1.3.5. *Tempeste magnetiche polari, baie e loro relazione con S_D .* — L'attività geomagnetica delle zone aurorali è caratterizzata da frequenti, caratteristiche perturbazioni che vengono chiamate tempeste magnetiche polari. Secondo Harang⁽¹¹⁾ una perturbazione polare generalmente ha inizio con una fase positiva (cioè con un aumento di H) tra le 14^h e le 16^h di tempo locale, la quale è seguita da una fase negativa che raggiunge il suo massimo verso mezzanotte con un minimo in H assai pronunciato, e infine si spegne gradualmente nelle prime ore del mattino. Le tempeste polari avvengono assai spesso anche in assenza di grandi tempeste di carattere planetario, e a differenza di queste, che interessano tutto il globo e possono durare alcuni giorni, con inizio in una qualsiasi ora e simultaneo in tutta la Terra, esse interessano prevalentemente le alte latitudini e sono strettamente dipendenti dal tempo locale. Quest'ultima caratteristica fa ragionevolmente pensare che le tempeste polari siano la causa predominante della S_D delle zone polari; in altre parole, questa è

semplicemente il risultato di una media eseguita su di un gran numero di tempeste polari. D'altra parte abbiamo visto in 1.3.3 (fig. 1.11) che la S_D alle basse e medie latitudini è strettamente connessa con quella alle latitudini elevate; è immediata perciò la conclusione che il campo S_D rappresenta l'effetto globale, mediato su di un gran numero di casi individuali, delle perturbazioni magnetiche polari, effetto che, se pure prevalente alle alte latitudini, giunge anche, con intensità decrescente, alle latitudini inferiori.

Da quanto detto sopra e nel paragrafo precedente, risulta ulteriormente approfondita la ragione della similarità tra la D_S e la S_D . Possiamo infatti ammettere che durante una tempesta magnetica di carattere planetario avente andamento D_{st} si sviluppino contemporaneamente una perturbazione magnetica polare con la sua caratteristica dipendenza dal tempo locale. Ne risulta allora che quella parte del campo di perturbazione totale della tempesta che è dipendente dal tempo locale e che è per definizione la D_S , rappresenta l'effetto della perturbazione polare. La D_S e la S_D sono perciò misure di uno stesso fenomeno, la perturbazione polare, con l'unica differenza che la D_S prende in esame solo le perturbazioni polari che avvengono durante le tempeste ad andamento D_{st} , mentre la S_D comprende anche le perturbazioni, generalmente meno intense ma numerose, che si producono indipendentemente da quelle.

In stretta relazione con le tempeste magnetiche polari è un importante tipo di perturbazione: la *baia*. Tale denominazione deriva dal particolare aspetto che assumono sulla registrazione, durante questa perturbazione, le tracce delle tre componenti del campo magnetico terrestre, aspetto che ricorda le profonde insenature di una costa rappresentata sulla carta geografica. Alle basse e medie latitudini le baie magnetiche si presentano spesso nette e isolate, interrompendo per lo spazio di un'ora o due un andamento calmo; altre volte si hanno invece periodi piuttosto lunghi di agitazione magnetica, caratterizzata da un susseguirsi continuo di baie. Le baie sono particolarmente accentuate nelle componenti H e D , ed è anzi proprio dall'andamento della componente H che esse vengono distinte in due classi, baie negative e baie positive, a seconda che durante il fenomeno la H diminuisca o aumenti.

Numerose statistiche delle baie sono state fatte da vari Autori e per vari Osservatori. Qui accenniamo a due risultati importanti di tali studi (²¹): *a*) l'ampiezza delle baie aumenta all'aumentare della latitudine; *b*) esse presentano un evidente andamento diurno, sia per quanto riguarda la frequenza, che per quanto riguarda il tipo: e precisamente, alle basse e medie latitudini le baie negative sono meno numerose delle

baie positive, e si presentano prevalentemente nel pomeriggio locale, fin verso le 18^h o le 19^h, mentre le baie positive sono particolarmente frequenti durante la notte. Alle alte latitudini la situazione è rovesciata: le baie negative sono molto più numerose e più ampie di quelle positive, e nella zona aurorale la proporzione tra i due tipi è di nove a uno; le baie negative presentano un massimo di frequenza alle 01^h di tempo

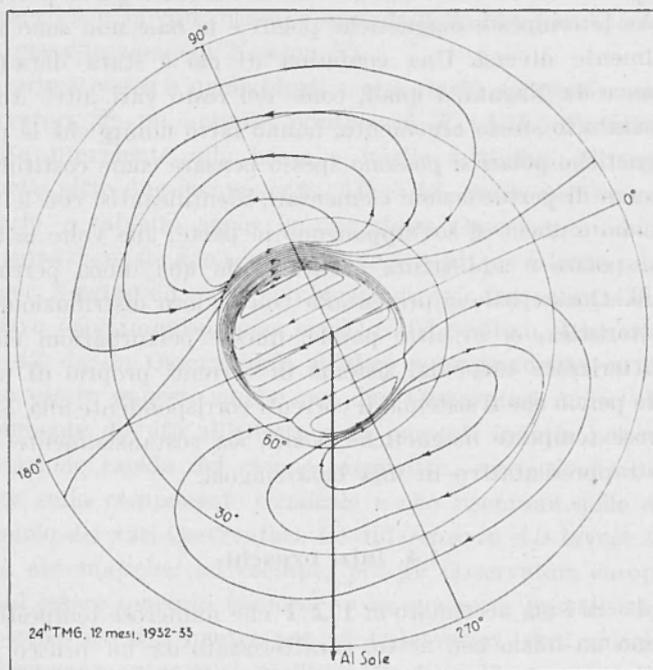


Fig. 1.15. – Sistema di correnti rappresentativo di una baia (secondo Silsbee e Vestine).

geomagnetico locale e sono praticamente assenti tra la 11^h e le 15^h; le baie positive hanno un massimo di frequenza attorno alle 18^h, e normalmente durante la notte la loro frequenza è nulla.

Malgrado questa dipendenza del tipo di baia dal tempo locale, le baie non sono fenomeni puramente locali. Ciò è dimostrato in modo molto evidente dal sistema di correnti rappresentativo delle baie, di cui la fig. 1.15 mostra un esempio: questo sistema è stato costruito da Silsbee e Vestine⁽²¹⁾ come media di numerose baie osservate durante l'Anno Polare 1932-33. Le due caratteristiche delle baie sopra citate si rilevano facilmente dall'esame del sistema di correnti; si rileva inoltre da questo

che le baie sono perturbazioni aventi un carattere planetario, anche se la loro origine è localizzata nella zona aurorale.

Un altro fatto assai evidente è la somiglianza del sistema di correnti delle baie col sistema di correnti S_D . Al principio di questo paragrafo abbiamo visto che la S_D rappresenta l'effetto medio delle tempeste magnetiche polari; or ora si è visto che le baie hanno origine nella zona aurorale; la somiglianza dei due sistemi di correnti porta perciò a concludere che le tempeste magnetiche polari e le baie non sono fenomeni sostanzialmente diversi. Una conferma di ciò è stata data (14, 22) da Fukushima e da Nagata, i quali, come del resto vari altri Autori che hanno trattato lo stesso argomento, hanno fatto notare che le perturbazioni magnetiche polari si possono spesso pensare come costituite da un certo numero di perturbazioni elementari, identificantisi con le baie, che si susseguono o anche si sovrappongono in parte; alle volte la tempesta magnetica polare è addirittura costituita da una unica perturbazione elementare. Queste baie si presentano con la loro distribuzione temporale caratteristica, o, in altre parole, queste perturbazioni elementari sono caratterizzate tutte dal sistema di correnti proprio di una baia. È naturale perciò che il sistema di correnti corrispondente alla S_D , media di numerose tempeste magnetiche polari, sia sostanzialmente lo stesso di quello rappresentativo di una baia singola.

1.4. Inizi bruschi

1.4.1. Si è già accennato in 1.2.1 che numerose tempeste magnetiche hanno un inizio ben netto, caratterizzato da un brusco impulso, spesso in tutte tre le componenti, anche se con diversa intensità, ma con particolare evidenza nella componente H . Tale impulso, chiamato *inizio brusco*, viene generalmente indicato con la sigla s. c. dall'inglese *sudden commencement* (*).

La caratteristica principale degli inizi bruschi è la loro simultaneità su tutta la Terra. Gli studi finora eseguiti mostrano che gli inizi bruschi della componente H hanno luogo praticamente nello stesso istante in Osservatori distribuiti su tutto il globo; le piccole differenze osservate nell'istante di inizio, dell'ordine del mezzo minuto, sono probabilmente

(*) È da notare tuttavia che nei bollettini magnetici si usa attualmente la notazione s. s. c. (*storm sudden commencement*), in seguito alle risoluzioni del Comitato per le variazioni rapide e le correnti telluriche della I. A. G. A. (aprile 1957).

da attribuirsi agli errori di misura, ma conclusioni più sicure in proposito si potranno trarre solo quando si potrà disporre di un maggior numero di dati ottenuti con registratori a scorrimento rapido.

Malgrado la simultaneità, che indica come un inizio brusco sia un fenomeno planetario, questo presenta sistematiche differenze in Osservatori molto distanti o in longitudine, ossia con diverso tempo locale, o in latitudine. Per descrivere tali differenze è opportuno innanzi tutto distinguere gli s. c. in varie classi, a seconda della loro forma, e seguiremo in ciò la classificazione di Newton (²³).

Una prima classe è quella degli s. c. *normali*, caratterizzati, in tutti gli Osservatori, da un impulso positivo in H ($\Delta H > 0$); tale classe è nettamente prevalente alle basse e medie latitudini. Il segno degli impulsi nelle altre due componenti, ΔD e ΔZ , varia da Osservatorio a Osservatorio, e talvolta anche in uno stesso Osservatorio, in ciascuno dei quali tuttavia esiste una combinazione di segni prevalente; ad esempio, per Abinger Newton dà come combinazione più frequente ΔH positivo, ΔD negativo (cioè impulso verso ovest) e ΔZ positivo. La variazione di segno di ΔZ da un Osservatorio all'altro è sorprendente, in quanto il segno può essere opposto anche per due Osservatori molto vicini; ciò è probabilmente dovuto all'effetto delle correnti indotte nel sottosuolo dalla variazione rapida del campo magnetico, correnti che influiscono fortemente sulla componente verticale e che risentono delle differenze del sottosuolo dei vari Osservatori. Le differenze in ΔD invece sembrano molto più sistematiche: ad esempio per gli Osservatori europei i ΔD tendono ad essere concordi fra loro, e con una certa prevalenza negativi (impulso verso ovest), mentre per gli Osservatori nord-americani essi sono generalmente opposti a quelli registrati in Europa. Già Van Bemelen (²⁴) aveva concluso che la componente orizzontale degli inizi bruschi è diretta lungo il meridiano geomagnetico; tale conclusione sembra soddisfacentemente confermata dagli studi successivi di McNish (²⁵) e di Obayashi e Jacobs (²⁶). Questi ultimi trovano una stretta relazione tra il valore dei ΔD e l'angolo $D - \psi$, cioè l'angolo formato dal meridiano magnetico locale e dal meridiano geomagnetico: dove ψ è più occidentale di D , come in Europa, si hanno ΔD prevalentemente negativi, cioè occidentali, e viceversa dove D è più occidentale di ψ , come nel Nord-America. Ciò indica, per le stesse considerazioni già fatte a proposito dell'andamento D_{st} per la declinazione (1.2.1), che il vettore di perturbazione corrispondente agli s. c. è sensibilmente parallelo all'asse geomagnetico.

Una seconda classe di s. c. è costituita da quegli inizi bruschi che sono preceduti da un breve impulso in direzione opposta; questi inizi bruschi

vengono indicati con s. c.*. Il breve impulso iniziale, detto *impulso preliminare*, può essere presente in tutte tre le componenti, oppure in due o anche in una sola; a parte tale impulso preliminare, l'inizio brusco è per il resto dello stesso carattere degli s. c. normali.

Infine una terza classe è formata dagli s. c. il cui andamento è l'opposto degli s. c. normali, almeno nella componente H , ma non è raro il caso che l'inversione avvenga effettivamente in tutte tre le componenti.

La durata degli inizi bruschi è di 3-5 minuti; la loro ampiezza è molto variabile, anche per uno stesso Osservatorio: un valore abbastanza indicativo dell'ampiezza della variazione ΔH alle medie latitudini è 20-25 gamma. Newton ⁽²³⁾ ad Abinger e McIntosh ⁽²⁷⁾ a Lerwick trovano che in media gli inizi bruschi più intensi sono associati alle tempeste più intense. Tuttavia già un semplice esame superficiale dei magnetogrammi mostra che tale risultato ha un significato puramente statistico, poichè non è raro il caso di tempeste magnetiche molto intense con s. c. di scarsa entità e viceversa. Si hanno anzi numerosi casi di forti inizi bruschi non seguiti da tempesta; alcuni Autori, come ad esempio Ferraro e collab. ⁽²⁸⁾, giungono a considerare tali inizi isolati come un fenomeno fisicamente diverso dagli inizi bruschi in senso stretto.

La latitudine geomagnetica ha una netta influenza sugli s. c. Innanzi tutto ⁽²⁹⁾ l'intensità della componente orizzontale degli s. c. aumenta all'aumentare della latitudine, raggiungendo valori assai elevati nella zona aurorale. Tuttavia Sugiura ⁽³⁰⁾ e Forbush e Vestine ⁽³¹⁾ hanno mostrato che a Huancayo, sull'equatore geomagnetico, l'intensità ΔH degli inizi bruschi che si verificano nelle ore meridiane è eccezionalmente elevata, in concordanza col ben noto fenomeno della eccezionale ampiezza dell'andamento S_o in H ; Forbush e Vestine hanno addirittura messo in rilievo l'esistenza a Huancayo di un'approssimativa relazione di proporzionalità tra l'intensità di un inizio brusco e l'ampiezza della S_o in H nel giorno in cui esso ha luogo.

Non solo l'ampiezza, ma anche la frequenza di occorrenza dei vari tipi di s. c. varia con la latitudine. Nagata ⁽³²⁾ ha mostrato che alle basse latitudini gli s. c.* sono praticamente assenti; salendo via via alle latitudini più elevate la loro frequenza aumenta rapidamente; inoltre all'aumentare della latitudine aumenta anche il rapporto tra l'ampiezza dell'impulso preliminare e quella dell'impulso principale. Ferraro e collab. ⁽²⁸⁾, Jackson ⁽³³⁾, Chakrabarty ⁽³⁴⁾ hanno ottenuto risultati sostanzialmente in accordo con quelli di Nagata.

Quanto infine agli s. c. della terza classe, quelli inversi, la loro frequenza di occorrenza, anch'essa praticamente nulla alle basse e medie

latitudini, aumenta rapidamente alle alte latitudini: mentre Newton ⁽²³⁾ trova che ad Abinger (lat. geomagn. 54° N) solo il 7% degli s. c. è di tipo inverso, McIntosh ⁽²⁷⁾ ne registra a Lerwick (lat. geomagn. 62°, 5 N) una frazione del 33%.

1.4.2. Assai importante è l'influenza del tempo locale sulla frequenza di occorrenza dei vari tipi di s. c. I risultati di numerosi Autori già citati ^(23, 27, 28, 32, 34) e inoltre di Ishikawa e Kadena ⁽²⁵⁾ e di Nagata e Abe ⁽²⁶⁾, malgrado non siano sempre in completo accordo fra loro, portano alle seguenti conclusioni: *a)* la frequenza degli s. c. normali alle alte e medie latitudini ha un minimo attorno alle 8^h di tempo locale, e un massimo poco accentuato nelle ore notturne; *b)* la frequenza degli s. c.* ha anch'essa un minimo la mattina, quando essi sono presenti, in numero scarso, solo alle alte latitudini, ma presenta un netto massimo nel pomeriggio, centrato alle 16^h di tempo locale; *c)* la frequenza degli s. c. inversi, presenti solo alle alte latitudini, ha un massimo proprio nel periodo in cui gli altri due tipi di s. c. hanno un minimo, cioè la mattina; ciò sembra indicare l'esistenza di qualche processo che in quelle ore tende a produrre la inversione degli s. c. alle alte latitudini.

Per valutare l'attendibilità dei precedenti risultati, occorre tener conto del fatto che alle alte latitudini è spesso difficile individuare un inizio brusco, a causa della forte attività quasi permanente in queste regioni, ed è possibile che in certi casi particolarmente sfavorevoli esso venga mascherato non solo da una perturbazione preesistente, ma anche dalla formazione pressochè contemporanea della S_D , che può modificare la forma.

1.4.3. Obayashi e Jacobs ^(26, 27, 28) hanno compendiato tutti i precedenti risultati sulla distribuzione in latitudine e in tempo locale degli s. c., mostrando che il vettore perturbazione dell'inizio brusco può essere considerato come costituito, analogamente al vettore perturbazione delle tempeste, dalla somma di due contributi. L'uno, denominato dagli Autori D_{st} , ha carattere planetario e dipende dalla latitudine, ma non dal tempo locale; l'altro, denominato D_S , dipende invece, oltre che dalla latitudine, anche dal tempo locale. Questi due vettori e il vettore di perturbazione totale loro somma, possono essere dedotti da appropriati sistemi di correnti (fig. 1.16), che spiegano morfologicamente i risultati sopra descritti. Risultati simili sono stati ottenuti da Oguti ⁽²⁹⁾.

Lo studio degli s. c. riveste notevole importanza ai fini della costruzione di una teoria delle tempeste magnetiche. Infatti, se il vettore D_{st}

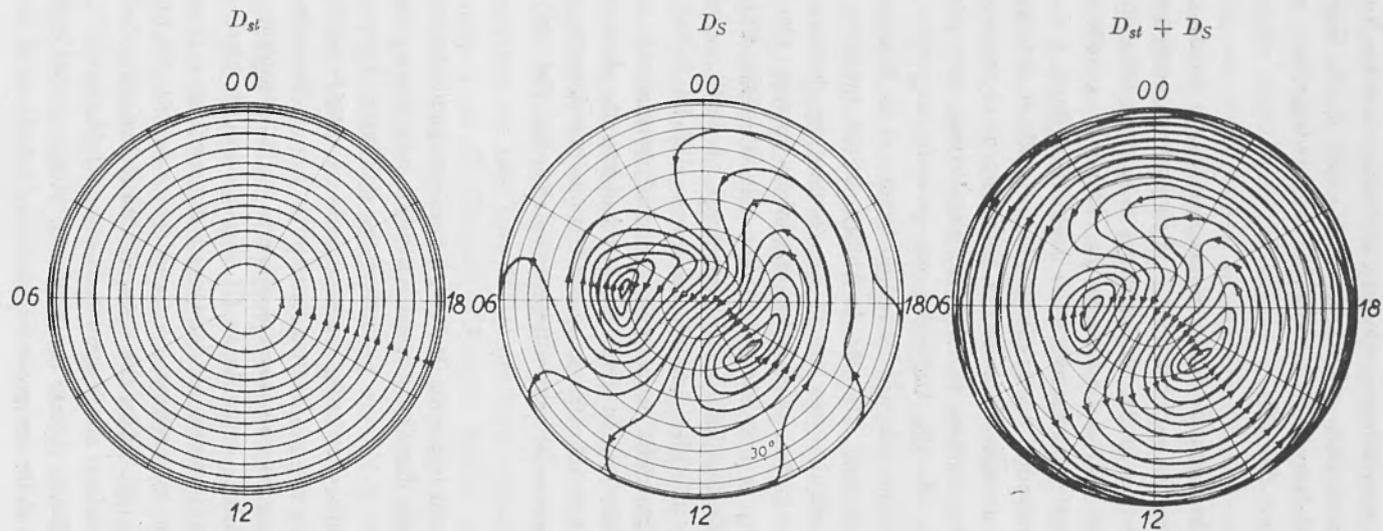


Fig. 1.16. - Sistema di correnti rappresentativo degli s. c. visto da sopra il Polo Nord. Intensità tra due linee di corrente: 10.000 A (secondo Obayashi e Jacobs).

degli inizi bruschi può essere interpretato, come fanno Obayashi e Jacobs, come l'effetto di una causa extraterrestre, il vettore D_S mostra chiaramente una influenza terrestre, certamente da localizzarsi nell'alta atmosfera. Obayashi e Jacobs interpretano tale influenza come un « effetto dinamo » dell'atmosfera che subisce un improvviso aumento di ionizzazione nelle zone polari, piuttosto che come un'azione di schermo della ionosfera, per effetto di induzione elettromagnetica, alla rapida variazione del campo magnetico. Se ciò è vero, una teoria delle tempeste magnetiche deve rendere conto di tale improvvisa ionizzazione all'istante stesso dell'inizio della perturbazione.

1.5. Tempeste magnetiche e attività solare

Si è da lungo tempo riconosciuto che le tempeste magnetiche sono connesse con l'attività solare. Ciò risulta chiaro dal fatto che la frequenza e la intensità delle perturbazioni geomagnetiche presentano andamenti temporali abbastanza simili a quelli dei fenomeni solari; in particolare esse seguono piuttosto fedelmente il ciclo undecennale dell'attività solare, e hanno una tendenza a ripetersi dopo un intervallo di 27 giorni, pari al periodo di rotazione sinodico del Sole a bassa e media latitudine solare.

1.5.1. *Ciclo undecennale.* — La grandezza tradizionalmente utilizzata per la valutazione dell'attività solare è il numero di Wolf R . La giustificazione di questa scelta è da cercarsi molto più nella facilità con cui si può ottenere R che non nella convinzione che esso rappresenti una effettiva misura dell'attività solare interessante i fenomeni geofisici; dato però che la maggior parte dei fenomeni costituenti l'attività del Sole ha una stretta correlazione con R , tale scelta può ritenersi sufficientemente giustificata.

La constatazione, fatta fin dalla fine del secolo scorso, che l'attività geomagnetica tende a procedere parallelamente all'attività del Sole, manifestata dal numero di macchie visibili sulla sua superficie, ha indotto a studiare quantitativamente la correlazione tra il numero di Wolf R e un indice che rispecchiasse in qualche modo l'attività magnetica. Uno studio di tale questione è stato compiuto da Bartels (⁴⁰); esso si riferisce al periodo 1872-1930. In tale periodo il coefficiente di correlazione tra le medie annuali di R e le medie annuali dell'indice u_1 di attività magnetica (*) risulta uguale a +0,884. Nel periodo 1906-1930, in cui sono

(*) Per la definizione dei vari indici di attività magnetica citati nel testo rimandiamo all'Appendice A.1.

state computate anche le medie annuali dell'indice C internazionale (C_i), il coefficiente di correlazione tra R e u_1 è ancora assai elevato, $+0,820$, mentre il coefficiente di correlazione tra R e C_i è soltanto $+0,570$. È da notare che, per la definizione degli indici, sul valore di C_i influisce qualsiasi perturbazione che modifichi il regolare andamento diurno del campo magnetico terrestre, mentre u_1 è una misura delle sole perturbazioni che influiscono sul valore medio diurno della componente orizzontale H .

Se, anziché le medie annuali delle varie grandezze, si prendono in esame le medie mensili, i coefficienti di correlazione diminuiscono sensibilmente. Nello stesso periodo 1872-1930 il coefficiente di correlazione tra le medie mensili di R e di u_1 è $+0,65\pm$.

Se poi si porta l'esame sui singoli giorni, la correlazione sembra addirittura scomparire: si hanno infatti molti giorni in cui, pur essendo il numero R assai elevato, l'attività geomagnetica è nulla, mentre in molti casi si hanno giorni magneticamente perturbati anche se il disco solare è praticamente privo di macchie. È noto del resto che le perturbazioni magnetiche sono tutt'altro che scarse anche al minimo di attività solare, quando R può essere nullo per parecchi giorni consecutivi. In questa fase del ciclo solare anche le medie mensili di R e u_1 presentano una scarsissima correlazione: Bartels cita il caso degli anni 1918-20, in cui il coefficiente di correlazione tra le due grandezze è $+0,06$, e degli anni 1928-30 in cui esso è $+0,01$, cioè la correlazione è nulla.

È interessante esaminare la relazione tra attività solare e attività magnetica, individuando quest'ultima, piuttosto che mediante indici, mediante le singole tempeste, da cui essa è in gran parte costituita. Risultati importanti sono stati ottenuti suddividendo le tempeste in varie classi e studiando separatamente per le singole classi l'andamento della frequenza di occorrenza nel corso del ciclo solare. Newton e Milsom⁽⁴¹⁾, utilizzando le registrazioni magnetiche ottenute a Greenwich-Abinger tra il 1878 e il 1952 (circa 7 cicli solari), hanno diviso le tempeste magnetiche in due classi principali, tempeste intense e tempeste moderate; la divisione fra le due classi è data da una escursione di $60'$ in declinazione e 300 gamma in H o in Z . Le tempeste moderate sono state a loro volta suddivise in due sottoclassi, tempeste a inizio brusco (*tempeste s. c.*) e tempeste a inizio graduale (*tempeste non s. c.*). La frequenza percentuale per ogni anno del ciclo solare (ottenuta dalla media sui sette cicli) per ciascuna delle tre categorie di tempeste è stata confrontata con la corrispondente media di R . Il risultato interessante di questo studio

è rappresentato dalla fig. 1.17, la quale mostra che, mentre le curve di frequenza delle tempeste intense e delle tempeste moderate s. c. seguono fedelmente la curva di R , quella delle tempeste moderate non s. c. ha un andamento assai diverso, raggiungendo un massimo solo un paio d'anni dopo il massimo di attività solare, e rimanendo a un livello piuttosto elevato nei successivi anni del ciclo.

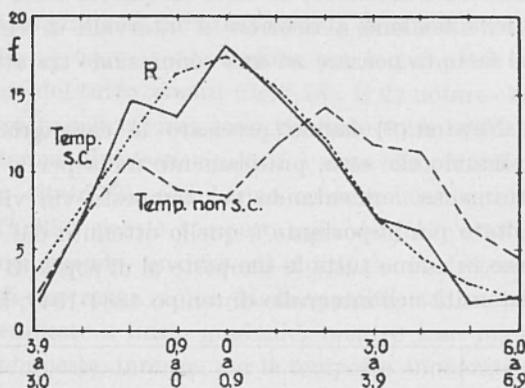


Fig. 1.17. — Frequenza percentuale f delle tempeste s. c. e delle tempeste non s. c. durante il ciclo solare, da 3.9. anni prima del massimo di R a 6.9 anni dopo (secondo Newton-e Milsom).

Si profila, da quanto sopra esposto, una distinzione netta tra due classi di tempeste: l'una è piuttosto strettamente collegata con quel complesso di fenomeni solari che costituisce, col suo andamento temporale, il ciclo di attività e che comprende fra le altre manifestazioni anche la formazione dei gruppi di macchie, l'altra sembra quasi indipendente da tali fenomeni. Tale distinzione di origine è accompagnata da una abbastanza chiara distinzione morfologica. Infatti le due classi di tempeste si differenziano: *a*) per il modo di inizio, assai ben definito e preciso per le tempeste intense e s. c. (si noti che la grande maggioranza delle tempeste intense presenta un inizio brusco), graduale o addirittura indefinito per l'altra classe; *b*) la prima classe presenta generalmente in modo chiaro la variazione D_{st} , mentre per la seconda questa è poco evidente; *c*) le tempeste della prima classe hanno durata piuttosto breve, che raramente supera le 48 ore, e hanno spesso una fine abbastanza ben individuabile, mentre quelle della seconda classe tendono a essere più lunghe, alle volte sette od otto giorni, terminano smorzandosi così gradualmente

che è ben difficile individuarne la fine, e sono costituite prevalentemente da larghe fluttuazioni e da un susseguirsi di baie.

Una ulteriore importante distinzione fra le due classi è infine quella che riguarda la tendenza alla ricorrenza di 27 giorni.

1.5.2. Tendenza alla ricorrenza di 27 giorni. — I lavori di Maunder e di Chree hanno messo in rilievo, da circa cinquanta anni, che le perturbazioni magnetiche tendono a ricorrere a intervalli di circa 27 giorni, ed anche questo fatto fa pensare ad una connessione tra attività magnetica e solare.

Greaves e Newton⁽⁴²⁾ hanno precisato le caratteristiche di tale tendenza, dimostrando che essa, praticamente nulla per le tempeste più intense, va nettamente aumentando per tempeste via via più deboli.

Ma un risultato più importante è quello ottenuto dai Thellier⁽⁴³⁾, i quali hanno preso in esame tutte le tempeste al di sopra di una determinata soglia di intensità nell'intervallo di tempo 1884-1947, suddividendo-

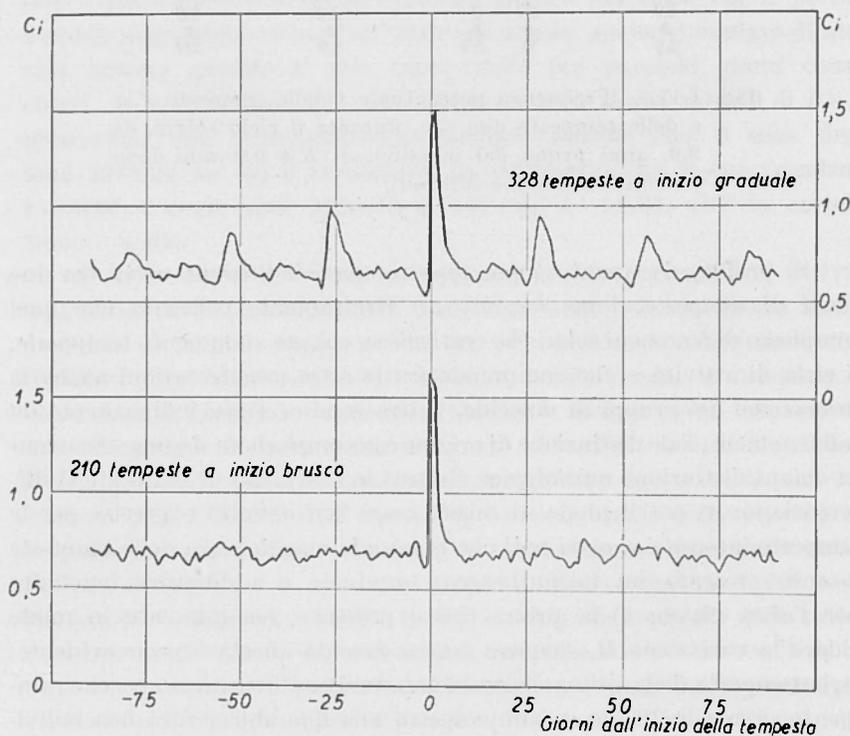


Fig. 1.18. — Tendenza alla ricorrenza per due tipi di tempeste (secondo Thellier e Thellier).

le, in base allo studio dei magnetogrammi di numerosi Osservatori, nelle due classi di tempeste a inizio brusco e tempeste a inizio graduale; complessivamente essi hanno catalogato 210 tempeste della prima classe e 328 della seconda. Mediante il metodo delle epoche sovrapposte applicato separatamente alle due classi, prendendo come giorno 0 il giorno di inizio di ognuna delle tempeste e come indice di attività magnetica caratterizzante ciascun giorno l'indice C , i Thellier hanno trovato per le tempeste a inizio graduale nettissime punte di attività magnetica attorno ai giorni ± 27 , ± 54 e ± 81 , mentre per le tempeste a inizio brusco tali punte erano del tutto assenti (fig. 1.18). È da notare che in questa statistica le tempeste più intense sono risultate tutte a inizio brusco.

Una conferma di questi risultati è stata data da Newton e Milsom nel lavoro già citato⁽⁴¹⁾; essi hanno eseguito una statistica analoga a quella dei Thellier per le tempeste già da loro studiate (paragrafo precedente), ma usando, anziché gli indici C , la frequenza delle tempeste. Punte di ricorrenza molto chiare appaiono attorno ai giorni $+27$ e $+54$ per le tempeste a inizio graduale, mentre esse mancano assolutamente per le tempeste intense; per le tempeste moderate a inizio brusco una punta attorno al giorno $+27$ può essere considerata, in base al « t-test », come un risultato casuale.

Rimane con ciò definitivamente assodata l'esistenza di una chiara differenza tra le due categorie di tempeste, ed è quindi giustificato un trattamento separato nell'esame delle loro correlazioni con i fenomeni solari. Conserveremo la denominazione di *tempeste s. c.* e *tempeste non s. c.* per le due categorie, con l'avvertenza però che si tratta semplicemente di una denominazione di comodo: la distinzione tra le due classi viene fatta in base al complesso delle caratteristiche morfologiche e delle connessioni con i fenomeni solari, e la condizione della esistenza di un inizio brusco per l'assegnazione alla prima categoria, per quanto assai importante, come si è visto, non è tuttavia assoluta: non sono infatti rari, anche se relativamente poco numerosi, i casi di tempeste che per la chiara tendenza alla ricorrenza vanno assegnate alla seconda categoria, ma che presentano ugualmente un inizio brusco.

1.5.3. Andamento annuo. — L'attività magnetica presenta un altro andamento temporale, che, in linea di principio, non può essere attribuito con certezza ad una causa solare: è l'andamento annuo, di periodo 6 mesi, con massimi attorno agli equinozi.

Una chiara dimostrazione della esistenza e sistematicità di tale andamento è stata data da Bartels⁽⁴⁰⁾, il quale ha preso in esame l'attività

magnetica, espressa dalla misura u_1 , durante i 59 anni dell'intervallo 1872-1930. Classificando gli anni in tre gruppi di forte, media e bassa attività magnetica, comprendenti rispettivamente 20, 19 e 20 anni, e mediando per ciascuno dei tre gruppi i valori medi mensili di u_1 , Bartels ha ottenuto le tre curve della fig. 1.19, che mostrano la costanza dell'effetto annuo: i massimi sono, per tutte tre le curve, in marzo o aprile e in ottobre.

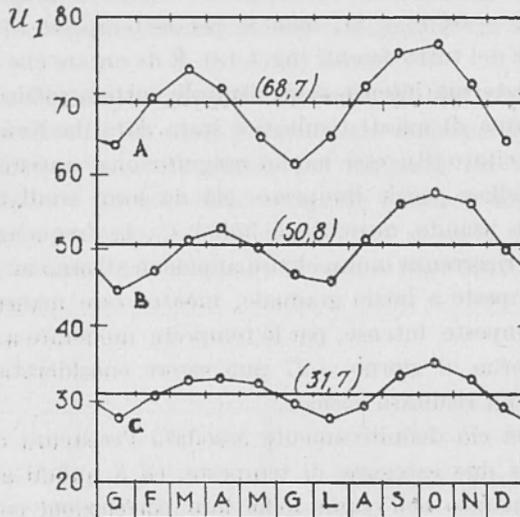


Fig. 1.19 - Andamento annuo dell'attività geomagnetica in anni di forte (A), media (B) e bassa (C) attività (secondo Bartels).

L'ipotesi più immediata che si può avanzare per spiegare l'andamento annuale è che si tratti di un effetto dovuto alle particolari condizioni dell'atmosfera terrestre nei periodi equinoziali (*ipotesi equinoziale*). Ma si può con altrettanta ragionevolezza supporre che si tratti di un effetto solare: infatti l'asse di rotazione del Sole è inclinato di $7^{\circ},2$ rispetto all'asse dell'eclittica, e la Terra raggiunge la massima latitudine eliografica di $7^{\circ},2$ Nord e Sud rispettivamente i giorni 7 settembre e 5 marzo. Un effetto solare può essere in tal caso spiegato ammettendo che in queste epoche sia minima la differenza in latitudine eliografica tra la Terra e le regioni solari responsabili dell'attività geomagnetica (*ipotesi assiale*).

Per poter scegliere tra le due ipotesi, Bartels ha effettuato alcuni «tests». Uno di esse consiste nel cercare la relazione tra l'attività magne-

tica u_1 , nei due gruppi di mesi Febbraio, Marzo, Aprile e Agosto, Settembre, Ottobre, durante i quali la Terra è alle massime latitudini eliografiche rispettivamente sud e nord, e l'area delle facole fotosferiche dell'emisfero « favorevole ». L'attività è risultata indipendente dal fatto che l'emisfero « favorevole » fosse più o meno ricco di facole dell'emisfero « sfavorevole »; se si considera in qualche modo giustificata la scelta delle facole come regioni responsabili dell'attività geomagnetica (*), tale prova sembrerebbe quindi concludere a favore della ipotesi *equinoziale*, cioè di un effetto terrestre.

Un secondo test è di carattere statistico: dall'analisi armonica della curva dell'andamento annuale per l'intero intervallo 1872-1930 si ottiene, oltre ad un'onda di periodo 12 mesi, poco pronunciata e di incerto significato fisico, un'onda di periodo 6 mesi, con massimi il 5 Aprile e il 4 Ottobre, quindi molto più vicini agli Equinozi che alle date di massima latitudine eliografica della Terra. Con considerazioni statistiche sui dati di osservazione Bartels ha calcolato la probabilità che il massimo (primaverile) cada effettivamente in uno dei tre intervalli, di dieci giorni ciascuno, centrati al 5 Aprile, al 21 Marzo e al 5 Marzo; esse sono rispettivamente $6,86 \cdot 10^{-1}$, $9,6 \cdot 10^{-2}$ e $2,2 \cdot 10^{-5}$. Sembrerebbe quindi esclusa ogni relazione con la data del 5 Marzo (massima latitudine eliografica sud della Terra) e quindi la conclusione sarebbe nuovamente favorevole alla ipotesi equinoziale.

D'altra parte Allen (⁴⁴) ha notato che solo le tempeste ricorrenti, (cioè quelle che noi abbiamo chiamato « tempeste non s. c. ») hanno una frequenza che presenta il caratteristico andamento annuale con i massimi agli equinozi, mentre le tempeste non ricorrenti non presentano tale andamento. Ciò sembra ulteriormente confermato dai risultati di Newton sull'andamento annuale degli s. c. (²³). Appare quindi piuttosto strana una spiegazione *equinoziale*, cioè terrestre, di un effetto che è particolarmente evidente in tempeste le quali, data la loro caratteristica ricorrenza di 27 giorni, sono evidentemente di origine solare, mentre altre tempeste, ugualmente di origine solare, non sembrano risentire di quell'effetto.

Su recenti interessanti sviluppi di tale problema torneremo in 1.5.5.

(*) Si noti che BARTELS ha scelto le facole fotosferiche per la sola ragione che, al tempo del suo studio, valori medi *mensili*, confrontabili quindi con u_1 , computati separatamente per l'emisfero nord e sud del Sole, esistevano solo per l'area delle facole (pubblicati da Maunder). Per l'area delle macchie, esistevano soltanto medie per rotazione solare.

1.5.4. *Tempeste s. c.* — Per quanto è stato illustrato in 1.5.1 e 1.5.2, si intendono comprese in questa categoria quelle tempeste magnetiche che si possono considerare strettamente dipendenti da qualcuno dei fenomeni solari aventi un andamento temporale analogo a quello delle macchie, e che non presentano una chiara tendenza alla ricorrenza di 27 giorni; l'assegnazione delle singole tempeste a tale categoria non è tuttavia sempre facile, soprattutto attorno al massimo di attività solare.

1.5.4.1. Oltre agli studi sulla correlazione tra attività magnetica e numero di Wolf, di cui si è brevemente parlato in 1.5.1, sono state cercate le relazioni tra singole tempeste e macchie o gruppi di macchie presenti sul disco solare al momento dell'inizio della tempesta. Dopo i primi lavori di Ellis, di Maunder, di Maurain e di altri, un esame approfondito è stato eseguito per gli anni 1874-1927 da Greaves e Newton^(42, 45), i quali hanno riconosciuto che la presenza di un grande gruppo di macchie nella regione centrale del Sole al momento dell'inizio di una intensa tempesta magnetica è un fatto che si verifica con maggior frequenza di quanto possa avvenire casualmente. La maggiore associazione si ha per le macchie comprese fra 26° a est e 53° a ovest dal meridiano centrale, cioè in un intervallo di tempo che va da due giorni prima a quattro giorni dopo il passaggio al meridiano centrale; questa asimmetria è stata interpretata come rivelatrice di un ritardo (di circa un giorno) fra la causa solare e l'effetto terrestre, ritardo dovuto al tempo di transito tra il Sole e la Terra dell'agente solare che provoca tale effetto.

La concidenza certamente non casuale tra tempeste magnetiche e macchie solari va gradualmente diminuendo per tempeste via via più deboli e macchie meno estese.

Newton⁽⁴⁶⁾ ha cercato di precisare le correlazioni, suddividendo tutte le macchie di area maggiore di 500 milionesimi dell'emisfero solare comparse nel periodo 1914-1944 in quattro categorie, a seconda della estensione (area maggiore di 1500 milionesimi, tra 1500 e 1000, tra 1000 e 750, e tra 750 e 500), e applicando il metodo delle epoche sovrapposte all'indice di attività C_i assumendo come giorno 0 il giorno del passaggio delle macchie al meridiano centrale. Come si vede dalla fig. 1.20, solo per le prime due categorie si ha un aumento dell'indice C_i attorno al giorno 0 (per la seconda categoria, comprendente macchie di area tra 1500 e 1000 milionesimi, il massimo è ritardato di due o tre giorni rispetto al giorno del passaggio al meridiano centrale); e tale aumento non è molto cospicuo, raggiungendo C_i un valore di circa 1,0

per la prima categoria (macchie giganti) e di 0,8 per la seconda. Data la forte intensità di molte tempeste, durante le quali l'indice C , raggiunge valori superiori a 1,5, questo risultato puramente statistico rivela chiaramente che in molti casi la presenza di grosse macchie non è associata a tempeste magnetiche intense. Ciò del resto è dimostrato anche dal precedente lavoro di Greaves e Newton, dal quale risulta che su 23 macchie giganti (del periodo 1874-1927) sette non erano state accompagnate da perturbazioni magnetiche; inoltre risulta pure che, viceversa, alcune delle tempeste più intense erano associate con macchie di area minore.

È quindi molto probabile che la causa solare delle tempeste magnetiche non debba essere cercata puramente e semplicemente nella esistenza di macchie, per quanto di grande estensione. È noto anzi che in qualche caso le macchie possono accompagnare una causa inibitoria delle perturbazioni magnetiche: infatti, oltre al fenomeno della interruzione delle sequenze di tempeste ricorrenti, di cui parleremo più avanti (1.5.5), è importante il fatto, messo in luce da Becker (⁴⁷), che il passaggio al meridiano centrale di due macchie, o gruppi di macchie, di analogo stadio di sviluppo, in posizione simmetrica rispetto all'equatore solare, è generalmente accompagnato, dopo due o tre giorni, da una diminuzione della attività magnetica.

1.5.4.2. È stato messo in rilievo da Hale nel 1931 (⁴⁸) che brillamenti solari di importanza eccezionale sono spesso seguiti da tempeste magnetiche a uno o due giorni di distanza (26 ore secondo la statistica di Hale, basata però su solo cinque brillamenti). Newton nel 1943 (⁴⁹) ha esteso lo studio ad un numero maggiore di brillamenti, prendendone in esame 37 di eccezionale intensità, ai quali egli ha attribuito l'importanza 3+ (*). 28 di questi brillamenti si erano verificati nella regione centrale del disco solare, a meno di 45° dal centro del disco; 21 di questi erano seguiti, entro due giorni, da una tempesta magnetica, per lo più di forte intensità. Dei 9 brillamenti non centrali, 5 non erano seguiti da tempeste entro il suddetto intervallo di due giorni, e 4 erano seguiti da tempeste deboli. Newton ne deduceva che in generale brillamenti molto intensi sono seguiti da importanti tempeste magnetiche solo se essi hanno luogo nella parte centrale del disco solare, e che l'intervallo medio di tempo tra brillamento e tempesta è di 21^h,5. In un successivo lavoro del 1951, Newton e Jackson (⁵⁰) hanno ottenuto per questo intervallo il valore di 17^h,5.

(*) Vedi Appendice A.2.

Si può quindi tentare di attribuire in generale ai brillamenti la causa delle tempeste, il che permetterebbe di spiegare i casi di mancata corrispondenza tra il passaggio di grosse macchie al meridiano centrale e il verificarsi di una tempesta magnetica con l'assenza di brillamenti

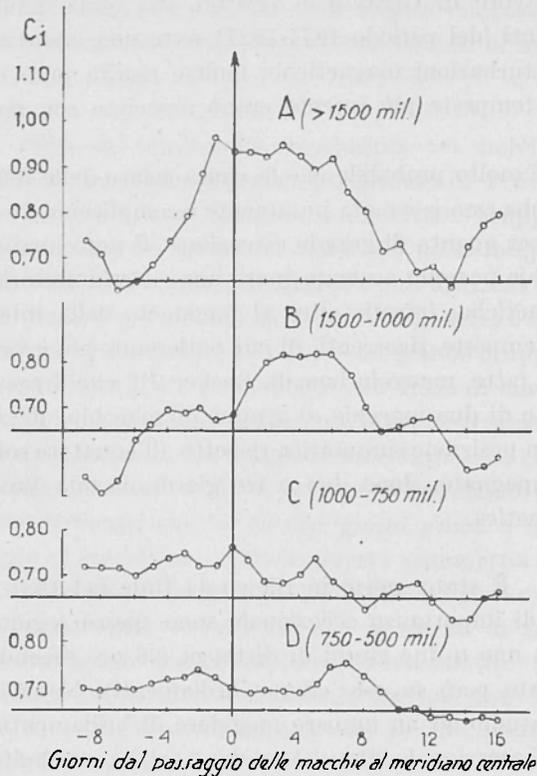


Fig. 1.20. - Relazione tra attività geomagnetica e passaggio al meridiano centrale del Sole delle macchie di differente area (secondo Newton).

nei pressi di tali gruppi di macchie. Tale ipotesi è stata esaminata da Newton con due metodi.

Col primo ⁽⁵¹⁾ egli ha cercato, in analogia col suo studio precedente, la corrispondenza tra tempeste magnetiche e brillamenti, oltre che di importanza 3+, anche di importanza 3 e 2. Ne è risultato che mentre i brillamenti 3+ sono in media seguiti, come si è visto sopra, da un forte aumento di attività magnetica, i brillamenti di importanza 3 danno

luogo statisticamente solo ad un lieve aumento, e quelli di importanza 2 non sembrano influire, in media, sull'attività magnetica.

Col secondo procedimento, più indiretto (⁴⁶), Newton ha applicato il metodo delle epoche sovrapposte agli indici C_i , assumendo questa

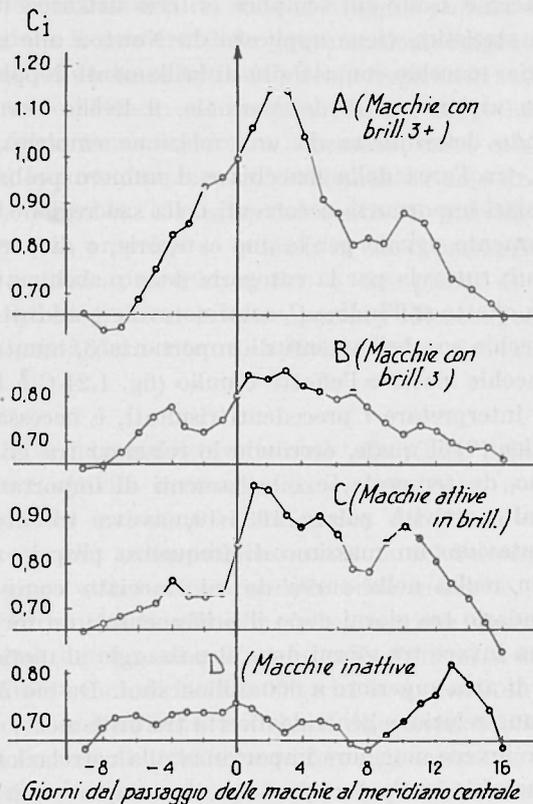


Fig. 1.21. — Relazione tra attività geomagnetica e passaggio al meridiano centrale del Sole delle macchie con differente attività in brillamenti (secondo Newton).

volta come giorno 0 il giorno del passaggio al meridiano centrale del Sole dei gruppi di macchie (25 nel periodo 1908-44) in cui si era verificato almeno un brillamento di importanza 3+. Anche se l'area media di tali macchie è minore di quella della prima categoria precedentemente da Newton considerata (macchie giganti di area maggiore di 1500 milionesimi, fig. 1.20 A), l'effetto del loro passaggio al meridiano centrale sugli indici C_i è maggiore (fig. 1.21 A): il massimo valore di C_i supera 1,1, e

viene raggiunto due giorni dopo il giorno 0. L'analogo esame per le macchie in cui si era verificato almeno un brillamento di importanza 3, (fig. 1.21 B), la cui area media è risultata di 643 milionesimi, mette in luce un effetto molto più piccolo, anche se importante rispetto all'effetto nullo delle macchie scelte col semplice criterio dell'area (fig. 1.20 D).

La stessa statistica viene applicata da Newton alle macchie divise in due categorie: macchie con attività di brillamenti doppia del normale, e macchie con attività metà del normale, il livello normale per ogni macchia essendo determinato da una relazione empirica, proposta da Giovanelli (⁵²), tra l'area della macchia e il numero probabile di brillamenti di qualsiasi importanza occorrenti nella sua regione. L'area media risulta praticamente uguale per le due categorie, e di poco superiore ai 500 milionesimi; tuttavia per la categoria delle macchie attive in brillamenti si ha un effetto sull'indice C_i assai notevole e addirittura maggiore che per le macchie con brillamenti di importanza 3, mentre per la categoria delle macchie inattive l'effetto è nullo (fig. 1.21 C e D).

Prima di interpretare i precedenti risultati, è necessario accennare a quelli di Allen (⁴⁴) il quale, cercando le relazioni tra gli inizi bruschi, seguiti o meno da tempeste, e i brillamenti di importanza 3 durante il periodo di alta attività solare 1936-40, aveva trovato che gli inizi bruschi presentavano un massimo di frequenza proprio nel giorno del brillamento (in realtà nella curva da lui tracciata compare anche un massimo secondario tre giorni dopo il brillamento); un forte massimo di frequenza si ha invece tre giorni dopo il passaggio al meridiano centrale delle macchie di area superiore a 600 milionesimi. Da ciò Allen è portato a dubitare di una relazione generale diretta tra brillamenti e inizi bruschi, e ad attribuire invece maggiore importanza alla correlazione tra gli inizi bruschi e le macchie in sè stesse; solo per le tempeste più intense Allen ritiene attendibile cercare una causa nei brillamenti di importanza 3 e 3+.

Da quanto sopra esposto si può concludere che, mentre la grande maggioranza dei brillamenti di importanza 3+, cioè eccezionali, è seguita da tempeste magnetiche, per quelli di importanza 3 solo una frazione notevolmente minore ha analogo effetto, e la percentuale diminuisce ulteriormente per i brillamenti di importanza inferiore. Si noti però che in un intervallo di tempo di lunghezza considerevole il numero totale dei brillamenti di importanza 1 e 2 è di gran lunga maggiore di quelli 3 e 3+. I risultati di Newton rappresentati in fig. 1.21 sembrerebbero dunque costituire un elemento favorevole alla ipotesi dei brillamenti come causa delle perturbazioni geomagnetiche. Infatti la curva C della fig. 1.21 mostra che, *statisticamente*, il passaggio al meridiano centrale delle

macchie molto attive in brillamenti, qualunque sia la loro importanza, è accompagnato da un aumento dell'attività magnetica (aumento maggiore che per la curva B).

Tale curva tuttavia è suscettibile di due interpretazioni diverse e sostanzialmente contrastanti: *a*) dato il maggior numero di brillamenti, è anche maggiore il numero delle perturbazioni magnetiche associate alle macchie attive, anche se solo una piccola frazione di tutti i brillamenti è magneticamente efficace; ciò sembra inoltre suggerire che anche i brillamenti di importanza inferiore a 3 possono essere causa di tempeste magnetiche; *b*) la forte frequenza di brillamenti è solo un indice di una proprietà delle macchie, o meglio dei centri di attività in cui quelle macchie si formano, proprietà la quale fa sì che il passaggio di tali centri al meridiano centrale provochi, a uno o due giorni di distanza, una perturbazione geomagnetica; in altre parole l'efficacia geomagnetica sarebbe una proprietà del centro di attività, e non dei brillamenti in sé stessi.

1.5.4.3. Un importante contributo allo studio delle relazioni tra attività solare e attività geomagnetica è stato dato, a questo punto, dalle ricerche sulla emissione radioelettrica del Sole.

Come è noto, alla radioemissione continua del Sole *calmo* si sovrappone spesso, soprattutto nel campo delle onde metriche, una emissione intermittente e complessa, che alle volte, per una determinata banda di frequenze, può superare di un fattore mille l'intensità della radiazione di quiete. Mediante metodi interferometrici le sorgenti di tale emissione irregolare sono state localizzate nei centri di attività solare.

Non tutti i centri di attività sono fonte di emissione radioelettrica: se si classificano tali centri secondo la loro importanza, basata sulle proprietà ottiche, si trova che l'emissione radioelettrica di frequenza dell'ordine di 100 o 200 MHz ha luogo quasi esclusivamente dai centri di importanza maggiore; tuttavia anche una notevole percentuale di questi centri importanti non emette radioonde (come pure le maggior parte dei centri di importanza minore).

Dato che le manifestazioni più appariscenti di un centro di attività sono le macchie, il fatto ora citato porta a suddividere queste ultime in due classi, a seconda delle proprietà radioelettriche, e cioè macchie radioelettricamente attive e macchie radioelettricamente inattive.

Allen ha riconosciuto nel 1947⁽⁵³⁾ una certa correlazione tra attività radioelettrica solare e attività geomagnetica. Denisse⁽⁵⁴⁾ studia più a fondo la questione, cercando la correlazione tra macchie e attività

geomagnetica con gli stessi metodi usati da Newton, ma classificando le macchie appunto secondo le loro proprietà radioelettriche, e precisamente secondo la emissione di radiazione di frequenza 158 MHz.

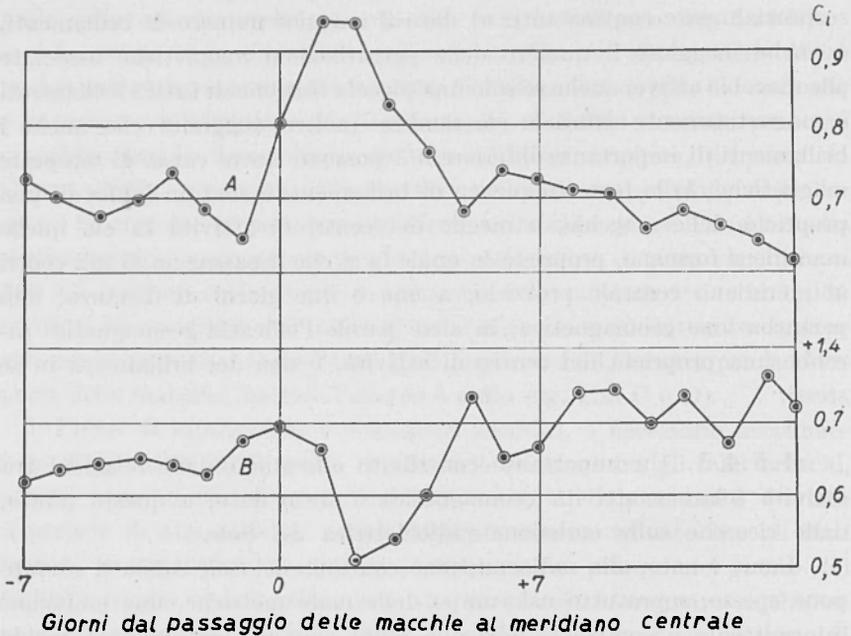


Fig. 1.22. — Relazione tra attività geomagnetica e passaggio al meridiano centrale del Sole delle macchie radioelettricamente attive (A) e radioelettricamente inattive (B) (secondo Denisse).

In mancanza di sufficienti dati interferometrici per la individuazione dei centri radioemittenti, Denisse fa uso, per la classificazione delle macchie del periodo 1948-50, della forte proprietà direttiva della radioemissione: la radiazione che giunge sulla Terra da un centro attivo è massima al passaggio della regione al meridiano centrale, e la sua intensità è già dimezzata per una distanza dal meridiano di poco più di un giorno⁽⁵⁵⁾. Attribuendo a ciascun giorno un certo indice S di attività radioelettrica, esprimibile con i numeri interi da 0 a 6, il quale tiene conto sia della intensità che dell'agitazione della radioemissione, Denisse chiama radioelettricamente attivo un centro di attività, quando l'indice S assume un valore uguale o maggiore di 4 almeno una volta nell'intervallo di cinque giorni avente come giorno centrale quello del passaggio della

suddetta regione al meridiano centrale del Sole; in caso contrario il centro viene considerato radioelettricamente inattivo.

Applicando il metodo delle epoche sovrapposte all'indice C , per i due tipi di centri, col giorno 0, come al solito, coincidente con quello del passaggio del centro al meridiano, Denisse ottiene l'importante risultato che le macchie, o centri, radioelettricamente attivi danno luogo ad un netto aumento di attività geomagnetica, con un massimo uno o due giorni dopo il passaggio al meridiano, mentre la classe inattiva mostra una tendenza ad una diminuzione dell'indice C ; (fig. 1.22). È interessante il confronto con le curve di Newton, da cui risulta come solo la curva A di fig. 1.21, cioè quella relativa alle macchie con brillamenti di importanza 3 +, abbia un massimo superiore a questo, mentre la curva C di fig. 1.21 è molto simile, per l'ampiezza e in parte anche per la forma, alla curva di Denisse per i centri attivi. Tale risultato sarebbe valido solo per le tempeste s. c.: Denisse infatti afferma che le tempeste ricorrenti a inizio graduale non corrispondono ad alcuna attività radioelettrica.

L'attività radioelettrica delle macchie è dunque un fattore importante per la produzione di tempeste magnetiche. Ciò è stato confermato da Simon (⁵⁶), il quale, mediante il metodo di Newton, ha preso in esame, per il periodo 1947-54, le macchie in cui erasi verificato almeno un brillamento di importanza 3 o 3+, suddividendolo però nelle due classi di macchie radioelettricamente attive e inattive, denominate rispettivamente R e Q ; col solito metodo delle epoche sovrapposte, e usando l'indice K_p anziché l'indice C , Simon trova che la curva relativa alle macchie R presenta un forte massimo al giorno +1 (un giorno dopo il passaggio al meridiano), mentre quella relativa alle macchie Q non dà luogo ad alcun aumento di attività magnetica; è da notare che la distribuzione temporale dei brillamenti durante il passaggio delle macchie sul disco solare è sensibilmente uguale per le due classi, per cui le due curve sono direttamente confrontabili (fig. 1.23).

Ancora più significativo sembra il fatto che, suddividendo le macchie nelle due classi ricche di brillamenti e povere di brillamenti, con un criterio simile, anche se non uguale, a quello usato da Newton, e dividendo poi ognuna delle due classi in due ulteriori categorie, a seconda che si tratti di macchie R o di macchie Q , Simon trova che un aumento di attività magnetica si ha solo al passaggio al meridiano centrale delle macchie R , siano o non siano attive in brillamenti; le macchie Q , invece, attive e non attive in brillamenti, non danno luogo, al loro passaggio al meridiano, ad alcun aumento di attività geomagnetica.

In un successivo lavoro Simon ⁽⁵⁷⁾, con lo stesso materiale di osservazione precedentemente trattato, cerca, sempre mediante il metodo delle epoche sovrapposte, le relazioni dirette tra brillamenti di importanza 3 e 3+ e attività geomagnetica, e ritiene raggiunte le seguenti conclusioni: *a)* solo i brillamenti che hanno luogo su di una macchia,

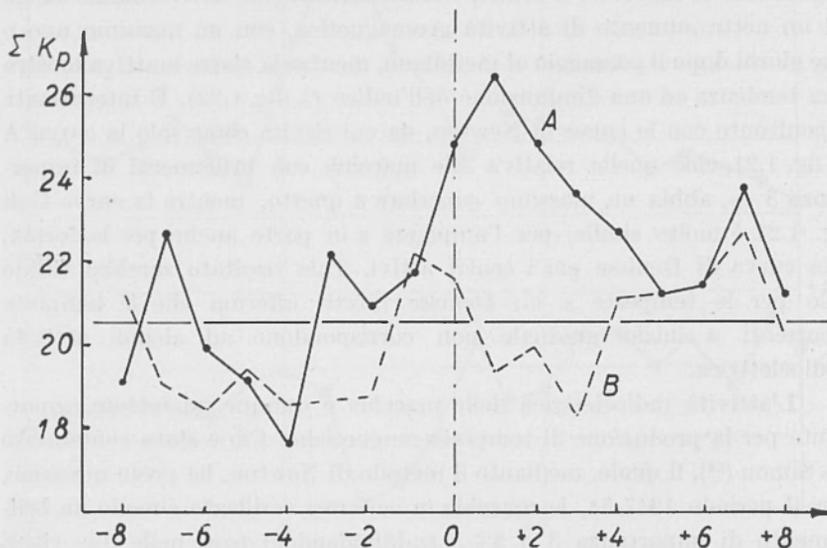


Fig. 1.23. - Relazione tra attività geomagnetica e passaggio al meridiano centrale del Sole delle macchie con brillamenti 3 + radioelectricamente attive (A) e radioelectricamente inattive (B) (secondo Simon).

o gruppo di macchie, *R* possono produrre un aumento di attività geomagnetica; *b)* tra questi brillamenti sono magneticamente efficaci soprattutto quelli che hanno luogo proprio nel giorno, da lui chiamato giorno *R*, in cui effettivamente l'indice *S* di Denisse uguaglia o supera il valore di 4; *c)* l'attività geomagnetica associata a tali brillamenti non è tuttavia quella caratteristica delle tempeste a inizio brusco, con un ritardo medio di uno o due giorni rispetto al fenomeno solare ritenuto come causa, ma un'attività che ha il suo massimo nello stesso giorno del brillamento; *d)* l'attività geomagnetica a inizio brusco appare invece associata al passaggio al meridiano centrale del Sole, circa due giorni prima, delle macchie radioelectricamente attive.

In realtà queste conclusioni sono il frutto della interpretazione che Simon dà alle curve da lui ottenute (fig. 1.24 e 1.25), interpretazione che non è sempre immediata, e che anzi a volte appare un poco forzata.

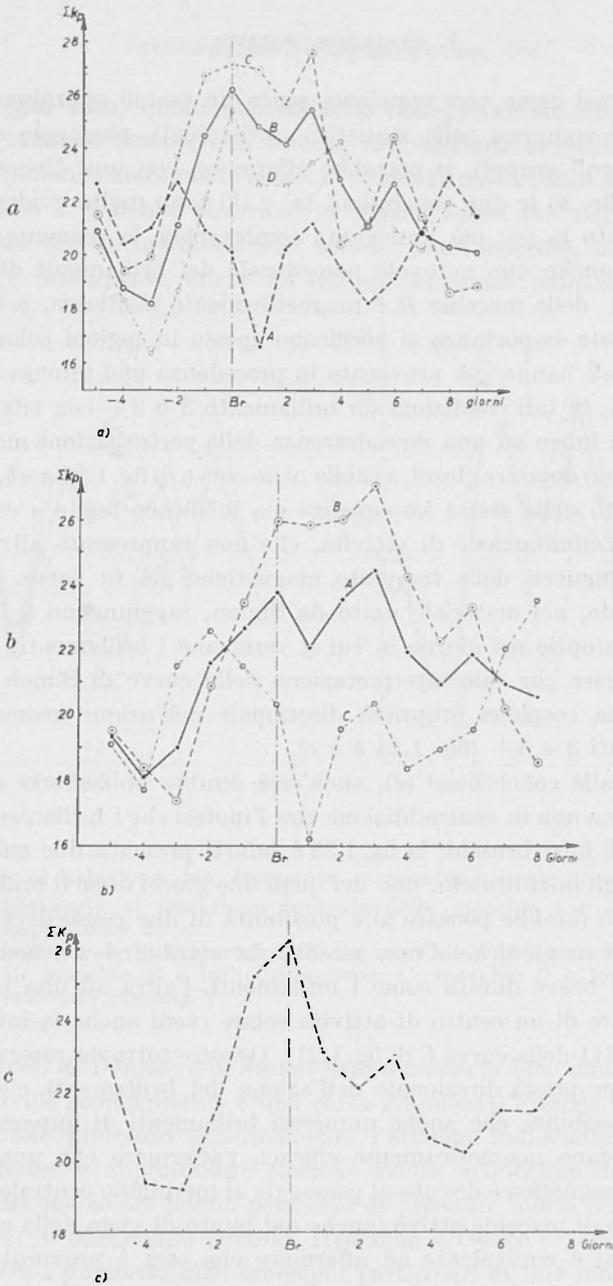


Fig. 1.24. - Attività geomagnetica attorno al giorno (Br) di un brillamento di importanza 3 o 3+ (secondo Simon).

- a) A: Brillamenti su macchie Q ; B: brillamenti su macchie R ; C: brillamenti su macchie R in giorni R ; D: brillamenti su macchie R in giorni Q .
- b) Brillamenti nella parte centrale del disco solare (a meno di 45° dal meridiano centrale). A: brillamenti complessivi; B: brillamenti su macchie R ; C: brillamenti su macchie Q .
- c) Brillamenti non centrali (a più di 45° dal meridiano centrale).

Dalle curve così come esse appaiono, senza un esame approfondito dei singoli eventi compresi nella statistica (brillamenti, passaggio al meridiano dei singoli gruppi), si potrebbe affermare, con una diversa interpretazione, che, se le due conclusioni (*a*) e (*b*) sono molto evidenti, non lo è altrettanto la (*c*); più immediata sembrerebbe la seguente diversa conclusione: anche una notevole percentuale dei brillamenti di importanza 3 e 3+ delle macchie *R* è magneticamente inefficace, e i brillamenti di questa importanza si verificano spesso in regioni solari molto attive, le quali hanno già provocato in precedenza una intensa attività geomagnetica; in tali condizioni un brillamento 3 o 3+ con effetto geomagnetico dà luogo ad una recrudescenza della perturbazione magnetica con un massimo dopo tre giorni, visibile nelle curve di fig. 1.24 *a* e *b*, mentre un brillamento della stessa importanza ma inefficace tende a essere seguito da una diminuzione di attività, che non rappresenta altro che il graduale estinguersi delle tempeste magnetiche già in corso, le quali statisticamente, nel materiale usato da Simon, raggiungono il massimo di intensità proprio nel giorno in cui si verificano i brillamenti; è necessario aggiungere che tale interpretazione delle curve di Simon sembra richiedere una cospicua proprietà direzionale dell'azione geomagnetica dei brillamenti 3 e 3+ (fig. 1.24 *b* e *c*).

Quanto alla conclusione (*d*), anch'essa sembra abbastanza evidente (fig. 1.25 *a*), ma non in contraddizione con l'ipotesi che i brillamenti siano la causa degli inizi bruschi; la fig. 1.25 *b* infatti presenta due massimi di frequenza degli inizi bruschi, uno dei quali due giorni dopo il brillamento.

Tutto ciò farebbe pensare alla possibilità di due cause diverse delle perturbazioni magnetiche: l'una sarebbe da attribuirsi a fenomeni improvvisi e di breve durata come i brillamenti, l'altra ad una proprietà fisica peculiare di un centro di attività solare (vedi anche la interpretazione a pag. 341 della curva C di fig. 1.21). Occorre tuttavia osservare che, ammessa la proprietà direzionale dell'azione dei brillamenti, e ammessa inoltre la possibilità che anche numerosi brillamenti di importanza inferiore a 3 siano magneticamente efficaci, l'affermare che una perturbazione geomagnetica è dovuta al passaggio al meridiano centrale del Sole di un gruppo di macchie attive (anche dal punto di vista della emissione radioelettrica) è equivalente ad affermare che essa è provocata da un brillamento, eventualmente sfuggito alla osservazione, verificatosi in quel gruppo di macchie in vicinanza del meridiano; questa considerazione, tuttavia, si può anche invertire, e ciò mette in luce la difficoltà di scelta tra le due cause di perturbazione magnetica, a meno che future osservazioni non permettano di escluderne con certezza una.

In ogni caso, qualunque siano le interpretazioni che si vogliono dare ai risultati statistici di Simon, essi, insieme a quelli di Denisse, sembra abbiano chiaramente messo in evidenza che la causa delle tempeste magnetiche s. c. debba ricercarsi in regioni solari che siano caratterizzate, oltre che da manifestazioni ottiche come macchie, intense regioni facolari e brillamenti, anche da intensa emissione radioelettrica.

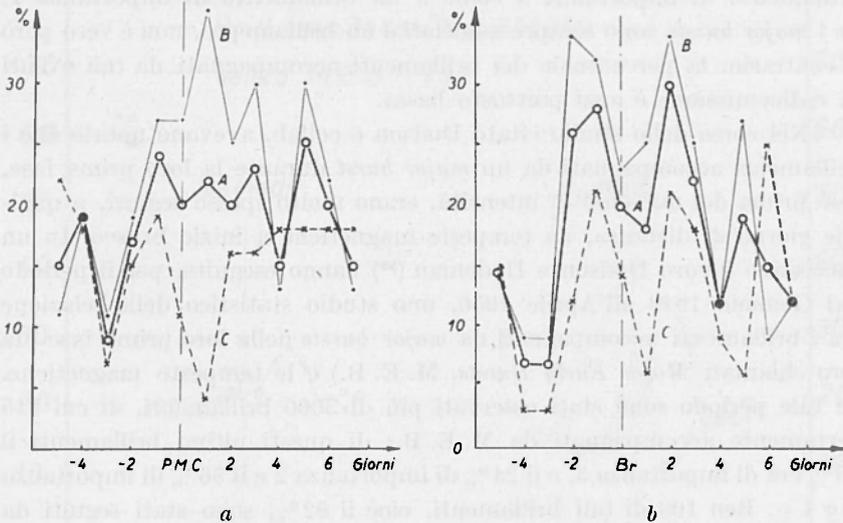


Fig. 1.25. - Relazione tra frequenze percentuali degli inizi bruschi e:
 a) passaggio al meridiano centrale delle macchie con brillamenti di importanza 3;
 b) brillamenti di importanza 3. A: macchie o brillamenti complessivi; B: macchie R o loro brillamenti; C: macchie Q o loro brillamenti (secondo Simon).

I lavori di Denisse e di Simon hanno messo in luce una correlazione tra l'attività geomagnetica e una certa grandezza, l'indice S di Denisse, che esprime piuttosto genericamente l'attività radioelettrica del Sole. Le numerose e approfondite ricerche svolte nell'ultimo decennio sulla radioemissione solare hanno permesso di precisare molte delle sue caratteristiche; in particolare Dodson, Hedeman e Owren⁽⁵⁸⁾ hanno messo in rilievo, tra i numerosi altri fenomeni particolari di tale radiazione, l'esistenza di un caratteristico tipo di radioemissione, attorno alla frequenza di 200 MHz. Tale emissione si manifesta con un improvviso aumento del flusso radioelettrico, che può raggiungere punte assai elevate e che ha una durata di alcuni minuti; questo fenomeno è stato chiamato *burst*, o meglio *major burst* (o *outburst*) per distinguerlo da fenomeni

analoghi ma di minore intensità e durata, ed è spesso, ma non sempre, seguito da un secondo aumento di flusso, questa volta però più graduale e di durata assai più lunga. Questi *outbursts* sembrano tutti contemporanei a brillamenti, ed è quindi naturale associarli con essi; non sembra che vi sia alcuna chiara relazione tra l'importanza del brillamento e l'occorrenza di un *outburst*: questo infatti può essere associato sia a un brillamento di importanza 3 come a un brillamento di importanza 1. Se i *major bursts* sono sempre associati a un brillamento, non è vero però il contrario: la percentuale dei brillamenti accompagnati da tali eventi di radioemissione è anzi piuttosto bassa.

Nel corso dello studio citato Dodson e collab. avevano notato che i brillamenti accompagnati da un *major burst* durante la loro prima fase, cioè prima del massimo di intensità, erano molto spesso seguiti, a qualche giorno di distanza, da tempeste magnetiche a inizio brusco. In un successivo lavoro Dodson e Hedeman (⁵⁸) hanno eseguito, per il periodo dal Gennaio 1949 all'Aprile 1956, uno studio statistico della relazione tra i brillamenti accompagnati da *major bursts* nella loro prima fase (da loro chiamati *Major Early Bursts*, M. E. B.) e le tempeste magnetiche. In tale periodo sono stati osservati più di 3000 brillamenti, di cui 115 certamente accompagnati da M. E. B.; di questi ultimi brillamenti il 20% era di importanza 3, e il 24% di importanza 2 e il 56% di importanza 1 o 1+. Ben 106 di tali brillamenti, cioè il 92%, sono stati seguiti da una perturbazione magnetica, generalmente a inizio brusco, entro quattro giorni dal loro verificarsi. È da notare però che non si tratta sempre di singole tempeste magnetiche seguenti i singoli eventi solari, in quanto in molti casi due o più brillamenti del tipo in esame precedono, entro il suddetto intervallo di tempo di quattro giorni, la stessa tempesta; in tali casi, nella ipotesi di una effettiva relazione causale tra brillamenti e tempeste, non è praticamente possibile individuare a quale brillamento vada attribuita la tempesta. Fra i 115 eventi solari, seguiti complessivamente da 81 tempeste separate, Dodson e Hedeman identificano 68 casi chiari di associazione tra singoli brillamenti e tempeste, cioè il 59%. Il numero di tali associazioni è di gran lunga maggiore che per una coincidenza casuale.

Applicando inoltre il metodo delle epoche sovrapposte agli indici K_p e A_p (fig. 1.26), Dodson e Hedeman trovano un rapido aumento dell'attività magnetica dopo un brillamento con M. E. B., col massimo il terzo giorno dopo l'evento; i brillamenti di importanza 3 danno luogo a un massimo di ampiezza maggiore dei brillamenti di importanza 1 e 2. Un confronto tra i brillamenti di importanza 3 e 3+ accompagnati da M. E. B., e

quelli della stessa importanza certamente non associati a eventi radioelettrici, mostra una chiarissima differenza tra le due categorie: i primi sono seguiti da un forte aumento di attività geomagnetica, gli altri invece sembrano dare luogo ad una diminuzione.

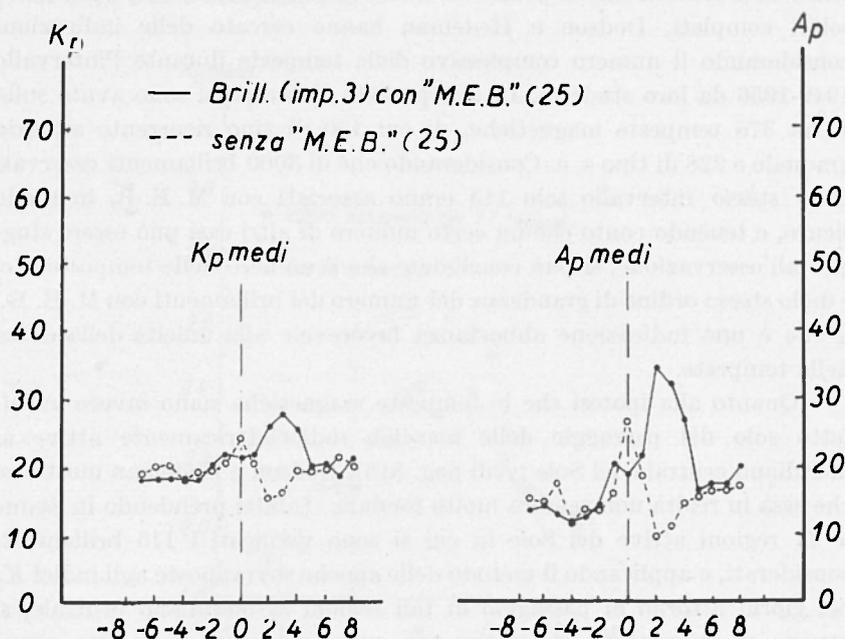


Fig. 1.26. - Relazione tra attività geomagnetica e brillamenti con e senza M. E. B. (secondo Dodson e Hedeman).

L'intervallo di tempo medio tra i brillamenti con M. E. B. e la successiva tempesta magnetica risulta di due giorni e mezzo, più lungo di quanto generalmente assunto sulla base dei lavori di Hale e di Newton (20-24 ore). La posizione del brillamento sul disco solare non sembra avere influenza sulla occorrenza delle tempeste, ma solo sulla loro intensità: i brillamenti nella zona centrale del disco solare hanno una maggiore probabilità di essere seguiti da tempeste intense.

Sembra dunque di poter concludere che un'alta percentuale dei brillamenti accompagnati da un evento solare del tipo M. E. B. appare come causa diretta delle tempeste magnetiche di tipo s. c. Ai fini di una completa conoscenza delle relazioni tra attività solare e attività geomagnetica sarebbe tuttavia necessario sapere se essi ne sono anche

l'unica causa; occorrerebbe cioè investigare se tutte le tempeste magnetiche s. c. sono precedute da un brillamento del tipo suddetto. Tale ricerca presenta notevoli difficoltà, poichè molti brillamenti possono sfuggire alla osservazione diretta, e quindi una conclusione sicura in questo senso non sembra finora possibile. Tuttavia, anche in mancanza di dati solari completi, Dodson e Hedeman hanno cercato delle indicazioni considerando il numero complessivo delle tempeste durante l'intervallo 1949-1956 da loro studiato. In tale periodo di tempo si sono avute sulla Terra 378 tempeste magnetiche, di cui 150 di tipo ricorrente a inizio graduale e 228 di tipo s. c. Considerando che di 3000 brillamenti osservati nello stesso intervallo solo 115 erano associati con M. E. B. in modo sicuro, e tenendo conto che un certo numero di altri casi può essere sfuggito all'osservazione, si può concludere che il numero delle tempeste s. c. è dello stesso ordine di grandezza del numero dei brillamenti con M. E. B., il che è una indicazione abbastanza favorevole alla unicità della causa delle tempeste.

Quanto alla ipotesi che le tempeste magnetiche siano invece un effetto solo del passaggio delle macchie radioelettricamente attive al meridiano centrale del Sole (vedi pag. 346), Dodson e Hedeman mostrano che essa in realtà non sembra molto fondata. Infatti prendendo in esame le 77 regioni attive del Sole in cui si sono verificati i 115 brillamenti considerati, e applicando il metodo delle epoche sovrapposte agli indici K_p , nei giorni attorno al passaggio di tali regioni al meridiano centrale, si ottiene effettivamente una curva con un massimo tre o quattro giorni dopo tale passaggio, il che è in accordo con i risultati di Newton, Denisse e Simon; ma tale curva coincide quasi esattamente (fig. 1.27) con una curva calcolata nelle ipotesi: *a*) che le perturbazioni magnetiche siano dovute ai brillamenti con M. E. B., li seguano con un ritardo di $2\frac{1}{2}$ giorni, e abbiano un andamento degli indici K_p che è quello dedotto mediando gli andamenti dei K_p di numerose tempeste magnetiche; *b*) che i punti in cui si sono verificati i brillamenti siano distribuiti uniformemente sul disco solare; *c*) che i brillamenti abbiano una efficacia doppia nella regione centrale del Sole, da $33,5^\circ$ a est a $33,5^\circ$ a ovest del meridiano centrale.

Di conseguenza la asserita dipendenza dell'attività magnetica dal passaggio al meridiano dei centri attivi, apparirebbe semplicemente come un risultato statistico della distribuzione dei brillamenti sul disco solare e dell'andamento tipico dell'attività magnetica durante una tempesta.

I risultati di Dodson e Hedeman sono stati sostanzialmente confermati dai lavori di Sinno^(60, 62) e di Hakura⁽⁶¹⁾, secondo i quali, tuttavia, la caratteristica fondamentale dei brillamenti responsabili delle tempeste

magnetiche non sarebbe costituita dai M. E. B., cioè dai *major bursts* durante la prima fase del brillamento, ma piuttosto da quegli *outbursts* di bassa frequenza (attorno ai 200 MHz), che, dopo il primo improvviso aumento di flusso, ne presentano un secondo più graduale e più lungo (vedi pag. 348 e citazione (58)).

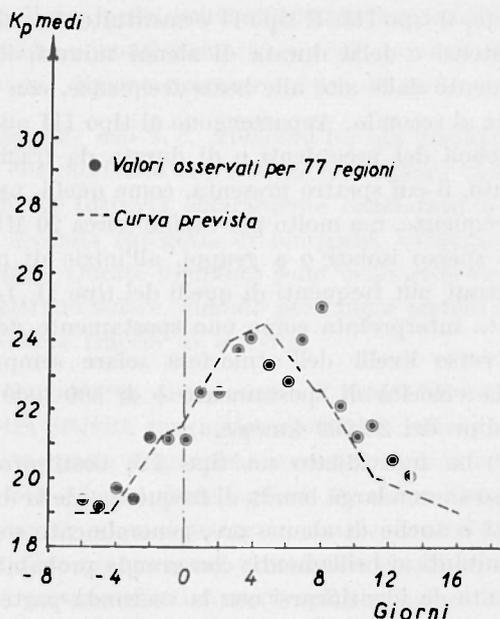


Fig. 1.27. - Relazione tra attività geomagnetica e passaggio al meridiano centrale di 77 regioni attive in brillamenti con M. E. B. (secondo Dodson e Hedeman).

1.5.4.4. In conclusione si può affermare che l'origine delle tempeste s. c. è da ricercarsi in improvvisi eventi solari del tipo dei brillamenti accompagnati da forte radioemissione, in conseguenza o in concomitanza dei quali si produce, probabilmente, una emissione di corpuscoli di velocità dell'ordine di 1000 km/sec i quali possono raggiungere la Terra dopo uno o due giorni. Il fatto che, come si è visto in 1.5.4.3, si possono riscontrare tempeste magnetiche anche in corrispondenza a brillamenti molto distanti dal meridiano centrale del Sole, induce a ritenere che i fasci di particelle emessi possono avere un'apertura angolare anche assai notevole.

Allo stato attuale delle nostre conoscenze sulle relazioni tra tempeste magnetiche s. c. e attività solare, è prevedibile che le future ricerche si orienteranno sullo studio approfondito delle caratteristiche dei *bursts* di radioemissione, in particolar modo del loro spettro.

Basandosi sulle proprietà di quest'ultimo, Wild ⁽⁶³⁾ aveva suddiviso i *bursts* in tre tipi, di cui i più importanti per il nostro studio sono il tipo II e, in parte, il tipo III. Il tipo II è costituito da *outbursts*, generalmente molto intensi e della durata di alcuni minuti, il cui spettro si sposta gradatamente dalle alte alle basse frequenze, con una variazione di circa 0,2 MHz al secondo. Appartengono al tipo III quei *bursts*, generalmente più deboli dei precedenti e di durata da frazioni di secondo a circa un minuto, il cui spettro presenta, come quelli, uno spostamento verso le basse frequenze, ma molto più rapido (circa 20 MHz al secondo); essi compaiono spesso isolati o a gruppi, all'inizio di un brillamento, e sono eventi assai più frequenti di quelli del tipo II. La variazione di frequenza è stata interpretata come uno spostamento della sorgente di radioemissione verso livelli dell'atmosfera solare sempre più elevati; per il tipo II la velocità di spostamento è di 500-1000 km/sec, per il tipo III dell'ordine dei 30.000 km/sec.

Boisshot ⁽⁶⁴⁾ ha individuato un tipo IV, costituito da un forte aumento di flusso su una larga banda di frequenza, della durata di alcune decine di minuti e anche di alcune ore, generalmente seguente i grossi *outbursts* concomitanti ai brillamenti; con grande probabilità questo tipo è sistematicamente da identificarsi con la «seconda parte» che, secondo la classificazione della Dodson (su frequenza singola), segue sovente gli *outbursts*.

Il tipo II è assai interessante, perchè si ritiene possa essere dovuto a fasci di particelle che, attraversando l'alta cromosfera e la corona a velocità dell'ordine dei 1000 km/sec, producono oscillazioni del plasma a radiofrequenza; la velocità delle particelle è proprio quella richiesta per spiegare il ritardo tra brillamenti e inizi delle tempeste magnetiche. Questo punto di vista è in armonia con i risultati di Dodson e Hedeman, nella ipotesi che i loro M. E. B. siano tutti del tipo II.

I lavori di Sinno e Hakura già citati, tuttavia, pur confermando la relazione tra tempeste magnetiche e *outbursts* di radioemissione, tendono a far pensare al tipo IV, piuttosto che al tipo II, come responsabile delle perturbazioni geomagnetiche. Recentissime ricerche di McLean ⁽⁶⁵⁾ e di Simon ⁽⁶⁶⁾ che, col metodo delle epoche sovrapposte, hanno messo in relazione l'attività geomagnetica con i *bursts* di tipo II e di tipo IV esattamente identificati dal loro spettro, sembrano portare una precisa

conferma alle conclusioni di Sinno e Hakura, attribuendo chiaramente al tipo IV la causa delle tempeste magnetiche.

Questi risultati attendono naturalmente di essere confermati ulteriormente da statistiche basate su un maggior numero di eventi; è ormai indubbio, comunque, che per l'indagine approfondita delle correlazioni fra attività solare e attività geomagnetica, o anche semplicemente per lo scopo pratico di una previsione sufficientemente sicura delle perturbazioni geomagnetiche e ionosferiche (v. cap. 3), e quindi dei disturbi nelle radiocomunicazioni, diviene necessario l'uso di radiospettrometri.

1.5.5. Tempeste non s. c. Abbiamo fin qui discusso quelle tempeste magnetiche che mostrano una stretta correlazione con i centri di attività solare; abbiamo tuttavia chiaramente constatato in 1.5.1 e 1.5.2 che esiste una seconda categoria di tempeste, evidentemente indipendenti da tali centri. Queste tempeste sono facilmente riconoscibili verso il minimo dell'attività solare, quando per lunghi periodi di tempo il Sole non presenta alcuna traccia di attività.

1.5.5.1. Bartels (⁴⁰), considerando il basso valore del coefficiente di correlazione tra attività magnetica e macchie solari, aveva avanzato l'ipotesi che le tempeste magnetiche avessero la loro origine in regioni perturbate dal Sole, da lui dette *regioni M*, non necessariamente coincidenti con le macchie o con zone caratterizzate da altri fenomeni visibili. Ora, da quanto visto nei paragrafi precedenti, possiamo dire che i centri di attività solare possono effettivamente spiegare una parte delle tempeste magnetiche, ma che per la seconda categoria di tempeste sono necessarie altre ipotesi, per es. quella delle regioni M.

Per tentare di individuare tali regioni, è necessario studiare il comportamento dell'attività geomagnetica ad esse attribuibile.

Come si è già visto, una caratteristica delle tempeste non s. c. è l'aspetto morfologico generalmente diverso da quelle s. c., in particolar modo per la frequente assenza di un inizio netto e di un deciso andamento D_{st} ; un'altra caratteristica importante è poi la tendenza alla ricorrenza.

Questa tendenza si manifesta in *sequenze* di perturbazioni rinnovantisi ogni 27 giorni circa, cioè una rotazione solare dopo la perturbazione precedente. Tali sequenze sono particolarmente evidenti negli ultimi anni del ciclo solare, e possono essere assai lunghe. Chapman e Bartels (¹) citano alcune sequenze durate più di 13 rotazioni consecutive, una delle quali può essere chiaramente seguita dal Dicembre 1929 al Marzo 1931, cioè per 17 rotazioni; più recentemente Bhargava e Naqvi (⁶⁷) hanno individuato, nello scorcio dell'ultimo ciclo 1944-54, due lunghe sequenze,

una delle quali, iniziata l'11-12 Luglio 1950, era ancora esistente nel Settembre 1953, dopo ben 40 ricorrenze, mentre l'altra contava 21 ricorrenze tra il Novembre 1951 e il Settembre 1953.

Una caratteristica essenziale delle regioni M è dunque una notevole stabilità: dagli esempi di sequenze ora citati è evidente che esse hanno una vita molto maggiore dei più importanti e durevoli gruppi di macchie. Kiepenheuer (⁶⁸) ha avanzato l'ipotesi che tali regioni M siano da identificarsi con le protuberanze quiescenti, che appaiono sul disco solare fotografato in luce di idrogeno ($H\alpha$) come filamenti oscuri. L'ipotesi si basa appunto sulla notevole durata delle protuberanze quiescenti rispetto agli altri fenomeni dei centri di attività solare, e sul fatto che le protuberanze, o filamenti, hanno, a differenza dei centri, un'attività piuttosto rilevante anche negli anni immediatamente precedenti il minimo, alle alte latitudini solari.

Per controllare l'ipotesi, Kiepenheuer ha determinato, per ogni giorno del periodo di bassa attività solare 1922-1924, l'area dei filamenti in una banda di 14° in longitudine (un ventisettesimo di rotazione solare), estendentesi simmetricamente attorno al meridiano centrale, e ha separato inoltre i filamenti equatoriali, compresi nella zona delimitata dalle latitudini solari $\pm 30^\circ$, da quelli polari, al di fuori di tale zona. Egli ha poi applicato il metodo delle epoche sovrapposte a tali aree, assumendo come giorni 0 una volta i giorni magneticamente perturbati e un'altra volta i giorni magneticamente calmi. Le curve da lui ottenute presentano un massimo cospicuo dell'area dei filamenti quattro giorni prima dei giorni magneticamente perturbati, soprattutto per i filamenti polari, mentre per i giorni calmi non si rileva alcun andamento particolare. Analogo esame per il periodo di forte attività solare 1926-1928 mostra una sensibile diminuzione della relazione tra aree dei filamenti e attività magnetica: solo per i filamenti polari appare un massimo di non grande importanza due giorni prima dei giorni magneticamente perturbati. Kiepenheuer considera in tal modo confermata la sua ipotesi che le regioni M siano costituite dai filamenti, dai quali sarebbe emessa una radiazione corpuscolare lenta, impiegante circa quattro giorni a raggiungere la Terra; i filamenti sarebbero efficaci solo quando l'attività solare è bassa, mentre la presenza di numerosi centri di attività sembra impedire o l'emissione o il moto verso la Terra della radiazione corpuscolare.

Questi risultati di Kiepenheuer non sembrano tuttavia confermati da successive ricerche. Roberts e Trotter (⁶⁹) hanno eseguito uno studio analogo ma riferito ad altri periodi, e precisamente Maggio-Ottobre 1953, e Febbraio-Giugno 1954, nella fase decrescente e nel minimo del-

l'ultimo ciclo solare; essi inoltre hanno usato, anzichè l'area dei filamenti, l'area delle protuberanze al bordo. Operando, per il resto, come Kiepenheuer, essi non trovano traccia del massimo delle aree dei filamenti (o protuberanze) quattro giorni prima dei giorni magneticamente perturbati; si potrebbe addirittura affermare, dall'esame della curva da essi ottenuta, che le perturbazioni magnetiche tendono a presentarsi quando l'area delle protuberanze accenna ad un minimo.

Per accertarsi che tale risultato non sia dovuto all'uso delle protuberanze anzichè dei filamenti, Leighton e Billings⁽⁷⁰⁾ hanno successivamente ripetuto lo studio di Roberts e Trotter per gli stessi periodi, usando però l'area dei filamenti: i loro risultati sono sostanzialmente identici a quelli di Roberts e Trotter.

Risultati negativi sono stati recentemente ottenuti anche da Hansen⁽⁷¹⁾, il quale ha studiato, col metodo delle epoche sovrapposte, la relazione tra i numeri caratteristici dei filamenti⁽⁷²⁾ e le tempeste magnetiche comprese nelle nove sequenze più notevoli del periodo 1917-1944.

La identificazione dei filamenti con le regioni M sembra quindi assai problematica.

Una conclusione di Kiepenheuer sembra tuttavia notevole, ed è il fatto dell'azione negativa dei centri di attività solare sulla emissione di radiazione capace di produrre sulla Terra perturbazioni magnetiche. Un tale effetto era già stato messo in rilievo da Allen⁽⁴⁴⁾, il quale aveva notato che il passaggio al meridiano centrale del Sole di importanti gruppi di macchie tende a interrompere le sequenze di tempeste ricorrenti, la cui comparsa dovrebbe circa coincidere coi giorni del suddetto passaggio: in altre parole, negli anni prossimi al minimo di attività solare, il passaggio al meridiano centrale del Sole di un centro di attività tende a produrre, tre giorni più tardi, una netta diminuzione dell'attività magnetica. Da ciò Allen era portato a concludere che le regioni M sono regioni calme del Sole.

Questa ipotesi di Allen, che a tutta prima appare sorprendente, ha preso sempre maggiore consistenza negli anni successivi, soprattutto in seguito agli studi sulla correlazione tra attività geomagnetica e intensità delle righe emesse dalla corona solare, in particolare la riga di lunghezza d'onda 5303Å del *Fe* XIV (emessa cioè da atomi di *Fe* ionizzati 13 volte). È noto che le regioni di forte intensità coronale coincidono generalmente con i centri di attività solare, mentre le regioni calme sono accompagnate da zone di bassa emissione nella corona. È a priori pensabile, quindi, che le relazioni tra centri di attività e perturbazioni magnetiche, che sono state discusse in 1.5.4, valgano anche

per le regioni di intensa emissione coronale. In effetti Kiepenheuer, nel lavoro già citato⁽⁶⁸⁾, trova che un notevole massimo dell'attività geomagnetica, valutata mediante la somma giornaliera degli indici K_p , ha luogo sette od otto giorni dopo il passaggio al bordo est del Sole di una regione coronale di *molto forte* intensità nella riga λ 5303, cioè immediatamente dopo il passaggio di tale regione al meridiano centrale. Un risultato particolarmente interessante è che le regioni di *forte* (ma non *molto forte*) intensità dell'anno 1943, al minimo dell'attività solare, sono seguite, a circa 10 giorni dal loro passaggio al bordo est, cioè tre giorni dopo il passaggio al meridiano centrale, da un distinto minimo di attività geomagnetica; il che conferma le conclusioni dello stesso Kiepenheuer e di Allen sull'effetto negativo dei centri di attività solare sulle tempeste magnetiche nella fase finale del ciclo solare. Analoghe conclusioni possono essere dedotte dagli studi di Shapley e Roberts⁽⁷³⁾ e Lincoln e Shapley⁽⁷⁴⁾.

L'ipotesi della identificazione delle regioni M con regioni solari calme sembra ulteriormente confermata dalla relazione tra il passaggio al meridiano centrale del Sole di regioni coronali di intensità inferiore alla media, negli anni immediatamente precedenti il minimo del ciclo, e le perturbazioni magnetiche. Bruzek⁽⁷⁵⁾, esaminando tre sequenze, due nel 1943 e una nel 1950, trova che ognuna delle tempeste magnetiche coincideva col passaggio al meridiano centrale di una regione coronale notevolmente estesa in latitudine e in longitudine, in cui l'intensità della riga λ 5303 era nettamente più bassa che nelle altre regioni; secondo Bruzek il ritardo medio tra il passaggio al meridiano centrale delle regioni coronali e il *momento centrale* delle tempeste magnetiche ammontava a circa 3 giorni.

A conclusioni analoghe giungono Bell e Glazer⁽⁷⁶⁾, esaminando la relazione tra corona e attività geomagnetica nel periodo 1950-1953. Mediante il metodo delle epoche sovrapposte essi trovano che il passaggio al bordo est delle regioni coronali di più bassa intensità della riga λ 5303 è seguito a dieci giorni di distanza da un cospicuo massimo degli indici K_p (somma degli otto valori giornalieri); si ha quindi anche in questo caso un ritardo di tre giorni tra il passaggio al meridiano della regione coronale di bassa intensità e il massimo di intensità delle perturbazioni magnetiche.

Risultati perfettamente concordanti sono stati ottenuti da Notuki, Nagakomi e Fukatsu⁽⁷⁷⁾ e da Sinno⁽⁷⁸⁾.

Appare perciò come assai plausibile una ipotesi di Pecker e Roberts⁽⁷⁹⁾, i quali, dopo aver confermato per il periodo Luglio 1952-Agosto

1953 (periodo immediatamente precedente un minimo di attività solare) l'effetto negativo dei centri di attività solare sulle perturbazioni magnetiche, ammettono che da tutta la superficie solare vengano emessi con continuità getti di particelle, presumibilmente associati con le

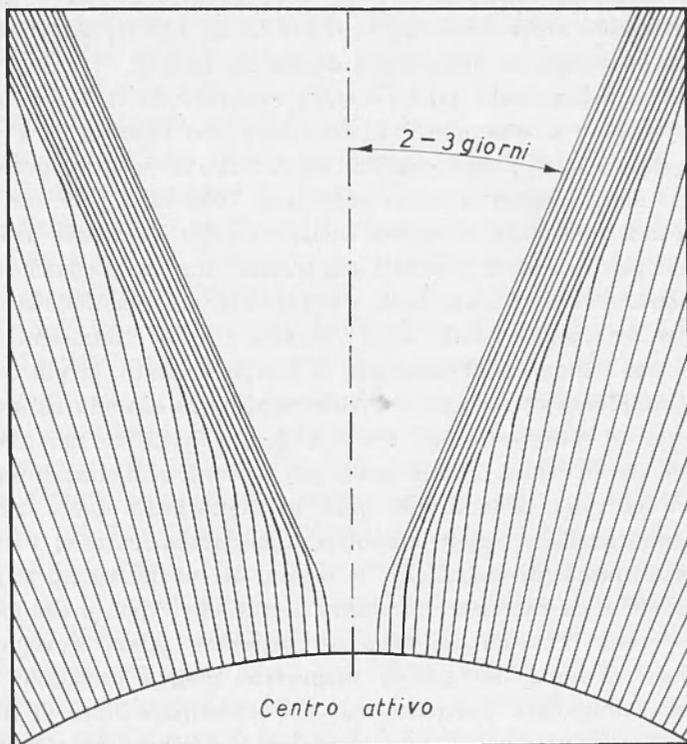


Fig. 1.28. - Distribuzione attorno ad un centro di attività delle particelle emesse dalla superficie solare (secondo Pecker e Roberts).

spicule cromosferiche. La velocità di queste particelle sarebbe in media tale da far loro percorrere la distanza dal Sole alla Terra in circa tre giorni. Un centro di attività eserciterebbe delle forze, probabilmente di natura magnetica, su tali fasci di particelle in modo da farli divergere, cosicchè sopra al centro di attività si formerebbe un cono vuoto di particelle, con asse approssimativamente radiale; a circa tre giorni di distanza dal passaggio del centro attivo al meridiano centrale del Sole si ha perciò

sulla Terra una diminuzione delle particelle in arrivo, e di conseguenza una diminuzione dell'attività magnetica. Invece per regioni prive di centri di attività (quindi con bassa intensità nella emissione coronale), nessun ostacolo viene frapposto alla uscita delle particelle; al di sopra di tali regioni si ha quindi una emissione corpuscolare, a cui si aggiunge quella deviata dai centri di attività, che, secondo Pecker e Roberts, si concentrerebbe attorno al cono proibito. La fig. 1.28 riproduce schematicamente la situazione prospettata da questa ipotesi.

Un'altra interessante ipotesi è stata avanzata da H. W. Babcock e H. D. Babcock (⁸⁰); essa non è in contrasto con l'ipotesi di Pecker e Roberts, ma ne appare un completamento. Nella sistematica determinazione dei campi magnetici solari negli anni 1952-54, i Babcock hanno messo in luce l'esistenza di regioni solari a campo magnetico *unipolare*; il campo in esse è di bassa intensità (da frazioni di gauss a qualche gauss), e le regioni sono spesso assai estese con contorni non ben definiti; nessun particolare fenomeno visibile della fotosfera e della cromosfera accompagna queste regioni. Nell'intervallo di tempo studiato, la più cospicua di tali regioni ha mostrato una notevole persistenza essendo riconoscibile per almeno sei rotazioni solari, tra il Maggio e l'Ottobre 1953; contemporaneamente ad essa si è osservata la più notevole sequenza di tempeste ricorrenti dell'anno, ognuna delle quali ha avuto inizio due o tre giorni dopo il passaggio della regione unipolare al meridiano centrale. I Babcock propongono quindi di identificare le regioni M con le regioni unipolari, tanto più che è da ritenersi abbastanza attendibile l'ipotesi che l'incanalamento verso l'esterno dei fasci di corpuscoli possa avvenire solo lungo linee di forza del campo magnetico quali è probabile escano dalle regioni unipolari. Naturalmente, per confermare l'idea di Babcock sono necessarie numerose altre osservazioni del genere da eseguirsi nei futuri periodi di minima attività solare.

1.5.5.2. La ricerca delle regioni M ha portato anche un contributo allo studio dell'andamento annuo dell'attività magnetica. Abbiamo visto in 1.5.3 che, in seguito a considerazioni statistiche, Bartels era portato a ritenere improbabile la spiegazione *assiale* dei massimi equinoziali di attività geomagnetica. I lavori di Bhargava e Naqvi (⁸⁷), Bell e Glazer (⁷⁶) e Sinno (⁷⁸) già citati, hanno però fornito degli elementi favorevoli a tale spiegazione. Bhargava e Naqvi, infatti, trovano che nelle due lunghissime sequenze da essi individuate tra il 1950 e il 1953 l'intensità delle singole tempeste componenti le sequenze aveva un chiaro andamento annuale, ma *un solo massimo* per ognuna delle due sequenze;

quella iniziata nel luglio 1950 aveva il massimo in Settembre-Ottobre, l'altra, iniziata nel novembre 1951, in Marzo-Aprile. La spiegazione più plausibile di ciò è che la prima sequenza fosse originata da una regione M situata nell'emisfero nord del Sole, l'altra da una regione analoga dell'emisfero sud, a circa 130° di distanza in longitudine della prima.

Inoltre Bell e Glazer nel loro studio sulle correlazioni tra intensità coronale e attività geomagnetica, hanno considerato separatamente la corona nei due emisferi del Sole, nord e sud; chiamando poi emisfero «favorevole» quello dalla cui parte si trova la Terra all'epoca delle singole osservazioni coronali, emisfero «sfavorevole» quello opposto, e applicando il metodo delle epoche sovrapposte agli indici K_p e alle intensità coronali separatamente per i due emisferi, essi hanno trovato che la netta correlazione negativa tra le due grandezze, già descritta precedentemente, si manifesta solo per l'emisfero «favorevole». Questo «effetto emisfero» non si estenderebbe, secondo Bell e Glazer, alle tempeste del tipo s. c.

Ad analoghe conclusioni è giunto Sinno, sempre in relazione alle regioni M e alle sequenze magnetiche degli anni 1950-53.

Quanto sopra depone molto a favore della spiegazione *assiale* dei massimi equinoziali dell'attività geomagnetica, purchè si ammetta che i fasci di particelle responsabili delle sequenze magnetiche siano strettamente delimitati in latitudine solare, almeno dalla parte dell'equatore. Restano tuttavia da spiegare due fatti: a) il ritardo di circa un mese tra l'istante in cui la Terra raggiunge la massima latitudine eliografica e l'epoca del massimo di attività magnetica, dedotto da Bartels per gli anni 1872-1930; b) il nettissimo andamento annuale dell'attività magnetica anche negli anni in cui essa è forte (vedi fig. 1.19), nei quali sono decisamente prevalenti le tempeste s. c.; ciò costituisce una difficoltà in quanto, come si è visto in 1.5.4.4, tali tempeste appaiono originate da fasci corpuscolari di notevole apertura angolare, nel quale caso non si dovrebbe attendere nè l'effetto emisfero nè la variazione annuale dell'attività geomagnetica, in accordo appunto con le affermazioni di Bell e Glazer ⁽⁷⁴⁾ e di Allen ⁽⁴⁴⁾.

APPENDICE A.1

Indici di attività magnetica (*)

A.1.1. Indice C — Ogni Osservatorio assegna a ciascun *giorno di Greenwich* il carattere 0, 1, 2, a seconda che l'attività magnetica in quel giorno venga giudicata nulla, moderata o intensa, rispettivamente. Il criterio per distinguere i tre gradi di attività è scelto liberamente e indipendentemente da ogni Osservatorio.

La media di questi indici di carattere (*character-numbers*) computata su tutti gli Osservatori che li forniscono ed espressa in unità e decimi da 0,0 a 2,0, è l'*indice C internazionale*, C_i .

A.1.2. Misura u e u_1 — La misura u si basa sul fatto che durante le perturbazioni magnetiche si produce una variazione del valore medio diurno della componente orizzontale H . Ogni Osservatorio computa ⁽⁴⁰⁾ la differenza U tra il valore medio diurno di H in un certo giorno e il valore medio nel giorno successivo, e ne prende il valore assoluto. Tale misura U è attribuita al secondo dei due giorni in questione. La grandezza U dipende evidentemente dalla latitudine geomagnetica (1.2.1); allo scopo di ottenere una misura di attività che abbia un carattere planetario si ammette che il campo di perturbazione sia parallelo all'asse geomagnetico, e si computa per ogni Osservatorio la misura u data da

$$u = U/\cos \varphi$$

dove φ è la latitudine geomagnetica; si ottiene così il valore della misura U ridotta all'equatore geomagnetico. La misura u viene espressa in unità 10 γ , per fare in modo che essa abbia un valore dell'ordine dell'unità, cioè dell'ordine dell'indice C_i .

Nelle ricerche sulle correlazioni tra attività geomagnetica e attività solare si fa spesso uso delle medie mensili sia di u che di R (numero di Wolf). Ma mentre la distribuzione di frequenza delle medie mensili di R è, almeno per i valori elevati, approssimativamente del tipo normale (distribuzione di Gauss), la distribuzione di frequenza delle medie mensili di u è caratterizzata da punte isolate di valore assai elevato, dovute a quei mesi in cui si verificano tempeste magnetiche di notevole intensità. Tale fatto rende inoltre diverso il comportamento della misura u e dell'indice C_i per i mesi molto perturbati: infatti, mentre la misura u è

(*) Si definiscono qui solo gli indici di attività magnetica che sono citati nel testo.

approssimativamente proporzionale alla intensità delle perturbazioni, l'indice C_i non può mai superare il valore 2,0, anche per le tempeste di intensità eccezionale. Siccome per molti scopi è utile avere un indice che smorzi, come C_i , l'effetto delle perturbazioni più intense, Bartels (¹⁰) ha costruito empiricamente una funzione di u , da lui chiamata u_1 , che risponde a quel requisito e che ha, almeno per i valori elevati, una distribuzione di frequenza simile a quella di R . La misura u_1 , funzione di u , è data dalle espressioni seguenti:

$$\begin{array}{ll} \text{per } u \leq 0,6 & u_1 = 100u - 30 \\ 0,6 \leq u \leq 1,6 & u_1 = 30 + 100(u - 0,6) - 30(u - 0,6)^2 \\ 1,6 \leq u \leq 3,6 & u_1 = 100 + 40(u - 1,6) - 10(u - 1,6)^2 \\ u \geq 3,6 & u_1 = 140 \end{array}$$

A.1.3. Indici K e K_p . — Gli indici K hanno lo scopo di fornire una misura dell'attività geomagnetica originata dalla radiazione corpuscolare proveniente dal Sole (⁸¹). Per computare tali indici è necessario quindi eliminare le variazioni del campo magnetico terrestre dovute a radiazione elettromagnetica solare; in pratica ciò si ottiene eliminando l'andamento diurno dei giorni calmi, che è dato da $S_g + L$. Altre variazioni da eliminare nel computo sono i *crochets* magnetici, dovuti alla radiazione ultravioletta dei brillamenti solari, e la cosiddetta *post-perturbation*, cioè il graduale ritorno al livello normale delle componenti del campo magnetico terrestre dopo una tempesta; esse tuttavia sono di importanza secondaria rispetto alla variazione diurna.

Gli indici K si riferiscono a intervalli di tre ore; in una giornata ve ne sono quindi otto. Per il computo si divide il giorno di Greenwich in intervalli di tre ore; per ognuno di questi intervalli si misura il massimo scarto in γ dell'andamento effettivo di ciascuna componente dall'andamento normale dei giorni calmi proprio del mese e della fase del ciclo solare; dei tre scarti in H , D e Z così ottenuti si considera il maggiore; l'indice K dell'intervallo triorario in esame è uno dei numeri da 0 a 9 che si ottiene da una scala convenzionale che dà la relazione tra tali indici K e gli scarti effettivi in γ . La scala ovviamente varia con la latitudine geomagnetica dell'Osservatorio: per l'Italia la scala più opportuna è la seguente (costruita da Bartels per latitudine geomagnetica 40°):

scarto in γ											
compreso tra	0	4	8	16	30	50	85	140	230	350	
$K =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

L'attività geomagnetica, pur avendo un carattere planetario, risente fortemente di influenze locali e regionali: in Europa, per esempio, sono in media più perturbate le ore serali che le ore meridiane. Ciò naturalmente si riflette sugli indici K di ogni Osservatorio.

Per avere una misura rigorosamente esente da influenze locali sarebbe necessario mediare gli indici K di tutti gli Osservatori esistenti: la distribuzione degli Osservatori attuali è tuttavia così irregolare, che una semplice media non sarebbe sufficiente allo scopo. Per ovviare all'inconveniente, Bartels ha proposto il procedimento seguente, che è stato accettato dal *Comitato per la caratterizzazione magnetica* della I. A. G. A. e che viene ora ufficialmente usato (^{82, 83}).

Sono stati scelti 12 Osservatori alle alte e medie latitudini, distribuiti il più uniformemente possibile in longitudine. Essi sono riportati nella tabella 1.1.

Tabella 1.1

Osservatorio	Coord. geogr.		Coord. geomagn.	
	lat.	long. E	lat.	long. E
Lerwick	+ 60° 08'	358° 49'	+ 62,5°	88,6°
Meanook	+ 54° 37'	246° 40'	+ 61,8°	301,0°
Sitka.	+ 57° 04'	224° 40'	+ 60,0°	275,4°
Eskdalemuir	+ 55° 19'	356° 48'	+ 58,5°	82,9°
Lovö	+ 59° 21'	17° 50'	+ 58,1°	105,8°
Rude Skov	+ 55° 51'	12° 27'	+ 55,8°	98,5°
Agincourt	+ 43° 47'	280° 47'	+ 55,0°	347,0°
Wingst	+ 53° 45'	9° 04'	+ 54,5°	94,0°
Witteveen	+ 52° 49'	6° 40'	+ 54,2°	91,0°
Abinger	+ 51° 11'	359° 37'	+ 54,0°	83,3°
Cheltenham (*)	+ 38° 44'	283° 10'	+ 50,1°	350,5°
Amberley	— 43° 09'	172° 43'	— 47,7°	252,5°
(*) Dal 1957 Fredericksburg	+ 38° 17'	282° 38'	+ 49,6°	349,8°

Per ognuno di questi Osservatori vengono costruiti gli *indici K standardizzati*, K_s . Essi vanno, come gli indici K , da 0 a 9, ma sono

ulteriormente suddivisi in terzi di unità (i decimi darebbero una precisione illusoria): per esempio, 5- per valori da $4\frac{1}{2}$ a $4\frac{5}{6}$, 5₀ da $4\frac{5}{6}$ a $5\frac{1}{6}$, 5+ da $5\frac{1}{6}$ a $5\frac{1}{2}$. Questi indici si ottengono dagli indici K normali mediante scale di trasformazione, dedotte imponendo la condizione che nel periodo di tempo 1943-47 in ognuno degli otto intervalli triorari del giorno di Greenwich la frequenza dei singoli K_s sia uguale per tutti i suddetti Osservatori.

La media dei K_s per i dodici Osservatori, in un dato intervallo triorario, è l'indice K planetario K_p . Anche i K_p sono suddivisi in terzi di unità come i K_s .

A.1.4. Indici A_k e A_p — Gli indici K e K_p costituiscono una misura dell'attività geomagnetica in scala quasi logaritmica (come si può vedere dalla scala degli indici K per la latitudine geomagnetica di 40° riportata precedentemente). Per molti scopi è più utile una misura che rappresenti l'attività geomagnetica in scala approssimativamente lineare.

Per giungere a tale misura, Bartels (⁸³) ha costruito la seguente scala che fa corrispondere ad ogni K_p un altro indice a_p :

$K_p =$	0 ₀	0 ₊	1-	1 ₀	1 ₊	2-	2 ₀	2 ₊	3-	3 ₀	3 ₊	4-	4 ₀	4 ₊	5-	5 ₀	5 ₊	6-	6 ₀	6 ₊	7-	
$a_p =$	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32	39	48	56	67	80	94	111	

Il significato di a_p è il seguente: per una stazione a latitudine geomagnetica di circa 50°, avente come limite inferiore per $K=9$ uno scarto di 500 γ , lo scarto medio della componente più perturbata in un intervallo triorario caratterizzato da un determinato K_p è approssimativamente 2 a_p . L'indice a_p rappresenta perciò una «ampiezza equivalente», espressa, per tali stazioni, in unità 2 γ . L'indice A_p è la media degli otto valori giornalieri di a_p .

Per ogni singola stazione si possono computare degli indici a_k e A_k analoghi agli a_p e A_p , mediante la scala seguente:

$K =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a_k =$	0	3	7	15	27	48	80	140	240	400

Volendo convertire gli a_k in γ , essi vanno moltiplicati per un coefficiente che dipende dalla latitudine geomagnetica. Per stazioni con limite inferiore per $K = 9$ pari a 500 γ , esso è, come si è visto prima, 2;

per stazioni aventi come limite inferiore per $K = 9$ il valore L , il coefficiente diviene $\frac{2L}{500}$.

Per caratterizzare l'attività magnetica di una giornata è preferibile usare A_p , piuttosto che la somma degli indici K_p . Ciò risulta evidente dal seguente esempio:

Giorno 1: $K = 0\ 0\ 2\ 2\ 2\ 2\ 2\ 2$; $\Sigma K = 12$ $A_k = 5$ (esattamente 5,25)

Giorno 2: $K = 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 4\ 8$; $\Sigma K = 12$ $A_k = 33$ (» 33,375)

Il giorno 1 è evidentemente calmo, mentre il giorno 2 è caratterizzato da una intensa perturbazione nei due ultimi intervalli triorari; ciò non viene rispecchiato dalla somma degli indici K , che è uguale per i due giorni.

APPENDICE A.2

Classificazione dei brillamenti solari

I brillamenti solari vengono suddivisi in tre classi principali di importanza, dai meno cospicui classificati di importanza 1, ai più notevoli classificati di importanza 3. Newton nel 1943⁽⁴⁹⁾ ha introdotto la classe 3+ a cui appartengono i brillamenti di carattere eccezionale.

Fino al 1955 i criteri per stabilire la importanza di un brillamento sono stati piuttosto indeterminati: gli osservatori si basavano principalmente sull'area e sulla intensità di un brillamento osservato in luce $H\alpha$, e l'assegnazione del fenomeno a una data classe era inevitabilmente influenzata da valutazioni soggettive.

Nel 1955 l'Unione Astronomica Internazionale ha adottato delle regole ben determinate per la classificazione, in base a proposte avanzate specialmente da Ellison. Tali regole si fondano essenzialmente sulla misura dell'area del brillamento, valutata all'istante dalla massima intensità ed espressa in milionesimi dell'emisfero solare o in gradi quadrati (1 grado quadrato = 48,5 milionesimi). Naturalmente l'area direttamente osservata deve essere corretta per la prospettiva. La classificazione è fatta in base alla scala seguente⁽⁸⁴⁾:

Classe di importanza	mil.	Area gr. quadr.
1 — (Subflares)	< 100	< 2,06
1	100–250	2,06–5,15
2	250–600	5,15–12,4
3	600–1200	12,4–24,7
3+	> 1200	> 24,7

Per tener conto, almeno in parte, anche della intensità, sono state aggiunte le due categorie 1+ e 2+: ad esempio, un brillamento di area compresa tra 100 e 250 milionesimi viene classificato 1+ se la sua intensità è maggiore della intensità che normalmente presentano i brillamenti di tale area (importanza 1), e un brillamento che col criterio dell'area potrebbe essere classificato di importanza 3, viene classificato 2+ se la sua intensità è inferiore al normale.

Tale scala sarebbe soddisfacente se esistesse una approssimativa relazione di proporzionalità tra area e intensità di un brillamento, il che invece non sembra corrispondere al vero. Non è quindi escluso che i criteri di classificazione debbano venire in seguito modificati.

(ricevuto il 30 giugno 1959)

ABSTRACT

Object of this paper is the critical exposition, from both phenomenological and theoretical point of view, of the whole of the phenomena including aurorae and geomagnetic, ionospheric and cosmic rays storms, which are originated or influenced from some solar event. These phenomena may be regarded as different terrestrial effects of a more general, single perturbation of electromagnetic nature, whose cause lies on the Sun.

As this matter shows a continuous and rapid evolution, we think it useful to make a review, as far as possible organic, of the results which have been obtained till now on the subject. The picture which we present in this paper is obviously provisional, and will be in future very probably changed, at least in some respect, owing to the acquisition of new observational facts, especially during the International Geophysical Year.

This paper consists of two parts. In the first part the observational facts concerning aurorae and geomagnetic, ionospheric and cosmic rays storms are described and discussed, also from the point of view of the reciprocal connection and their correlation with the solar activity. In the second part the main theories and hypotheses concerning the above phenomena are considered.

In the first chapter the morphology of the geomagnetic storms is discussed; the two components of the perturbation field, D_{st} and S_D , are described also in terms of electric current systems flowing in the ionosphere, and the meaning of S_D is illustrated. A brief description is made also of the sudden commencements of geomagnetic storms, of their geographical distribution and diurnal variation. The last part of the first chapter deals with the relations between geomagnetic storms and solar activity.

BIBLIOGRAFIA

- (¹) CHAPMAN S., BARTELS J., *Geomagnetism*, Oxford, Clarendon Press (1940).
- (²) CHAPMAN S., *Proc. Roy. Soc., A*, **95**, 61 (1918).
- (³) CHAPMAN S., *Proc. Roy. Soc., A*, **115**, 242 (1927).
- (⁴) YOKOUCHI Y., *Mem. Kakioka Magn. Observ.*, **8**, n. 1, 27 (1957).
- (⁵) CYNK B., *Terr. Magn.*, **44**, 51 (1939).
- (⁶) SCHMIDT A., *Zeitschr. für Geoph.*, **1**, 3 (1924).
- (⁷) VAN BEMMELEN W., *Terr. Magn.*, **5**, 123 (1900).
- (⁸) SLAUCITAJŠ L., MCNISH A. G., *I. U. G. G. - I. A. T. M. E. Bull.*, **10**, 289, Edinburgh Meeting 1936.
- (⁹) CHAPMAN S., in *Vistas in Astronomy*, a cura di A. Beer, **2**, 912, Londra, Pergamon Press (1956).
- (¹⁰) CHAPMAN S., *Ann. Geofis.*, **5**, 481 (1952).
- (¹¹) HARANG L., *Terr. Magn.*, **51**, 353 (1946).
- (¹²) VESTINE E. H., *Terr. Magn.*, **43**, 261 (1938).
- (¹³) VESTINE E. H., CHAPMAN S., *Terr. Magn.*, **43**, 351 (1938).
- (¹⁴) FUKUSHIMA N., *Polar geomagnetic storms and geomagnetic bays*, Geoph. Inst. Tokyo Univ. (1953).
- (¹⁵) VESTINE E. H., *I. U. G. G. - I. A. T. M. E. Bull.*, **11**, 360, Washington Meeting 1939.
- (¹⁶) MCNISH A. G., JOHNSTON H. F., *I. U. G. G. - I. A. T. M. E. Bull.*, **11**, 348, Washington Meeting 1939.
- (¹⁷) FUKUSHIMA N., *Rep. Ionosph. Res. Japan*, **5**, 85 (1951).
- (¹⁸) FUKUSHIMA N., *Rep. Ionosph. Res.*, Japan, **5**, 191 (1951).
- (¹⁹) BARTELS J., *Zeitschr. für Geoph.*, **17**, 56 (1942).
- (²⁰) NAGATA T., *Journ. Geoph. Res.*, **55**, 127 (1950).
- (²¹) SILSBEE H. B., VESTINE E. H., *Terr. Magn.*, **47**, 195 (1942).
- (²²) NAGATA T., FUKUSHIMA N., *Rep. Ionosph. Res. Japan*, **6**, 85 (1952).
- (²³) NEWTON H. W., *Monthly Not. Roy. Astr. Soc., Geoph. Suppl.*, **5**, 159 (1948).
- (²⁴) VAN BEMMELEN W., *Proc. Acad. Sci. Amsterdam*, **10**, 773 (1908).
- (²⁵) MCNISH A. G., *Comptes Rendus Assemblée de Lisbonne, I. A. T. M. E. Bull.*, **9**, 234 (1933).
- (²⁶) OBAYASHI T., JACOBS J. A., *Journ. Geoph. Res.*, **62**, 589 (1957).
- (²⁷) MCINTOSH D. H., *Journ. Atm. Terr. Phys.*, **1**, 223 (1951).
- (²⁸) FERRARO V. C. A., PARKINSON W. C., UNTHANK H. W., *Journ. Geoph. Res.*, **56**, 177 (1951).
- (²⁹) YUMURA T., *Mem. Kakioka Magn., Observ.*, **7**, n. 1, 27 (1954).
- (³⁰) SUGIURA M., *Journ. Geoph. Res.*, **58**, 558 (1953).
- (³¹) FORBUSH S. E., VESTINE E. H., *Journ. Geoph. Res.*, **60**, 299 (1955).
- (³²) NAGATA T., *Rep. Ionosph. Res. Japan*, **6**, 13 (1952).
- (³³) JACKSON W., *Nature*, **166**, 691 (1950).
- (³⁴) CHAKRABARTY S. K., *Nature*, **167**, 31 (1951).
- (³⁵) ISHIKAWA G., KADENA M., *Rep. Ionosph. Res. Japan*, **5**, 144 (1951).
- (³⁶) NAGATA T., ABE S., *Rep. Ionosph. Res. Japan*, **9**, 39 (1955).
- (³⁷) JACOBS J. A., OBAYASHI T., *Can. Journ. Phys.*, **34**, 876 (1956).

- (38) JACOBS J. A., OBAYASHI T., *Geofis. pura e appl.*, **34**, 21 (1956).
- (39) OGUTI T., *Rep. Ionosph. Res. Japan*, **10**, 81 (1956).
- (40) BARTELS J., *Terr. Magn.*, **37**, 1 (1932).
- (41) NEWTON H. W., MILSOM A. S., *Journ. Geoph. Res.*, **59**, 203 (1954).
- (42) GREAVES W. M. H., NEWTON H. W., *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.*, **89**, 641 (1929).
- (43) THELLIER E., THELLIER O., *C. R. Acad. Sci. Paris*, **227**, 1044 (1948).
- (44) ALLEN C. W., *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.*, **104**, 13 (1944).
- (45) GREAVES W. M. H., NEWTON H. W., *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.*, **88**, 556 (1928) e **89**, 84 (1929).
- (46) NEWTON H. W., *Monthly Not. Roy. Astr. Soc., Geoph. Suppl.* **5**, 321 (1949).
- (47) BECKER U., *Zeitschr. für Astroph.*, **32**, 195 (1953).
- (48) HALE G. E., *Astroph. Journ.*, **73**, 379 (1931).
- (49) NEWTON H. W., *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.*, **103**, 244 (1943).
- (50) NEWTON H. W., JACKSON W., *Seventh Report of the Commission for the Study of Solar-Terrestrial Relations*, p. 107, Parigi, Hemmerlé, Petit & Co. (1951).
- (51) NEWTON H. W., *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.*, **104**, 4 (1944).
- (52) GIOVANELLI R. G., *Astroph. Journ.*, **89**, 555 (1939).
- (53) ALLEN C. W., *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.*, **107**, 386 (1947).
- (54) DENISSE J. F., *Ann. Géoph.*, **8**, 55 (1952).
- (55) VAN DE HULST H. C., *A Course in Radioastronomy*, Leiden (1951).
- (56) SIMON P., *C. R. Acad. Sci. Paris*, **240**, 940 (1955).
- (57) SIMON P., *Ann. Géoph.*, **12**, 167 (1956).
- (58) DODSON H. W., HEDEMAN E. R., OWREN L., *Astroph. Journ.*, **118**, 169 (1953).
- (59) DODSON H. W., HEDEMAN E. R., *Journ. Geoph. Res.*, **63**, 77 (1958).
- (60) SINNO K., *Rep. Ionosph. Res. Japan*, **12**, 6 (1958).
- (61) HAKURA Y., *Journ. Radio Res. Lab.*, **5**, 283 (1958).
- (62) SINNO K., *Journ. Radio Res. Lab.*, **6**, 17 (1959).
- (63) WILD J. P., *Austral. Journ. Sci. Res. A.*, **3**, 399, 541 (1950).
- (64) BOISCHOT A., *C. R. Acad. Sci. Paris*, **244**, 1326 (1957).
- (65) MCLEAN D. J., *Austral. Journ. Phys.*, **12**, (1959), in corso di stampa.
- (66) SIMON P., *Ann. Astroph.*, in corso di stampa.
- (67) BHARGAVA B. N., NAQVI A. M., *Nature*, **173**, 498 (1954).
- (68) KIEPENHEUER K. O., *Astroph. Journ.*, **105**, 408 (1947).
- (69) ROBERTS W. O., TROTTER D. E., *Journ. Atm. Terr. Phys.*, **6**, 282 (1955).
- (70) LEIGHTON H. I., BILLINGS D. E., *Journ. Atm. Terr. Phys.*, **7**, 349 (1955).
- (71) HANSEN R. T., *Journ. Geoph. Res.*, **64**, 23 (1959).
- (72) RIGHINI G., GODOLI G., *Ann. Geof.*, **3**, 50 (1950).
- (73) SHAPLEY A. H., ROBERTS W. O., *Astroph. Journ.*, **103**, 257 (1946).
- (74) LINCOLN J. V., SHAPLEY A. H., *Trans. Amer. Geoph. Union*, **29**, 849 (1948).
- (75) BRUZEK A., *Zeitschr. für Naturforsch.*, **7a**, 708 (1952).
- (76) BELL B., GLAZER H., *Journ. Geoph. Res.*, **59**, 551 (1954) e **61**, 179 (1956).
- (77) NOTUKI M., NAGAKOMI Y., FUKATSU M., *Rep. Ionosph. Res. Japan*, **9**, 215 (1955).

- (78) SINNO K., *Rep. Ionosph. Res. Japan*, **10**, 250 (1956).
- (79) PECKER J. C., ROBERTS W. O., *Journ. Geoph. Res.*, **60**, 33 (1955).
- (80) BABCOCK H. W., BABCOCK H. D., *Astroph. Journ.*, **121**, 349 (1955).
- (81) BARTELS J., HECK N. H., JOHNSTON H. F., *Terr. Magn.*, **44**, 411 (1939).
- (82) BARTELS J., in LANDOLT-BORNSTEIN, *Zahlenwerte und Funktionen*, **3**, 733, Springer-Verlag, (1952).
- (83) *Annals of I. G. Y.*, **4**, 215-236, Londra, Pergamon Press (1957).
- (84) *Annals of I. G. Y.*, **5**, 264, Londra, Pergamon Press (1958).