

Interazioni magnetosfera-ionosfera

Maurizio Candidi

CNR, Istituto di Fisica Spazio Interplanetario, Frascati, Italia

1. Premessa

L'obiettivo di questa presentazione è di scendere all'interno della magnetosfera terrestre per descrivere le sue interazioni con la ionosfera.

L'interazione fra magnetosfera e ionosfera è dovuta allo scambio di particelle cariche fra le due regioni, e quindi è determinata dai processi attraverso i quali il plasma presente attorno alla terra interagisce con i campi elettrici e magnetici ivi presenti. Come introduzione a questa presentazione occorrerà quindi ricordare quali siano le caratteristiche del moto di una particella carica in varie configurazioni del campo magnetico, ed eventualmente del campo elettrico, ai quali essa possa venire sottoposta.

Le formule che descrivono il moto di una particella carica in presenza di campi elettrici e magnetici sono trasformabili in modo da dare luogo ai cosiddetti invarianti adiabatici. Si può dimostrare che una particella carica che si muova in presenza solo di un campo magnetico non uniforme che non vari velocemente nel tempo ed il cui gradiente non sia estremamente intenso, conserva nel suo moto tre quantità, appunto invarianti del moto (Lyons e Williams, 1984).

$$\mu = \frac{p_{\perp}^2}{2mB} = \text{const} \quad 1^{\text{a}} \text{ Invariante Adiabatico} \quad (1.1)$$

$$J = \oint p_{\parallel} dl = 2 \int_{l_{M1}}^{l_{M2}} \gamma m v_{\parallel} dl \quad 2^{\text{a}} \text{ Invariante Adiabatico} \quad (1.2)$$

$$\Phi_M = \int B ds \quad 3^{\text{a}} \text{ Invariante Adiabatico} \quad (1.3)$$

Il primo è legato al moto di girazione attorno al campo magnetico dovuto alla forza di Lorentz: il momento magnetico, che è il rapporto fra l'energia cinetica perpendicolare al campo e l'intensità del campo stesso, resta costante. Il secondo invariante introduce il concetto di specchio magnetico: se la particella, mentre gira attorno al campo, si muove lungo la linea di forza, al variare dell'intensità del campo magnetico varia anche in modo coerente la energia cinetica perpendicolare, come impone la conservazione del primo invariante; l'energia cinetica perpendicolare aumenta all'aumentare del campo, e quindi, per la conservazione dell'energia, costringe l'energia cinetica parallela a diminuire. Se quindi la particella si muove nel verso in cui il campo aumenta, è costretta a farlo con velocità parallela decrescente, fino a quando questa si annulla, e fino a quando la particella è costretta ad invertire il moto in un punto che le fa da specchio. Il secondo invariante descrive quale relazione corre fra i punti nei quali una particella trova tali specchi; in particolare in una geometria di campo magnetico puramente dipolare, il secondo invariante dice che la particella oscilla fra due punti la cui latitudine magnetica è opposta in segno ma ha lo stesso valore assoluto. Il terzo invariante è legato, sempre in una ipotetica geometria dipolare, al moto della particella attorno al momento di dipolo. Nella sua oscillazione fra specchio settentrionale e specchio meridionale, la particella può anche

muoversi longitudinalmente, ma lo fa muovendosi su quella che viene indicata come una cortecchia magnetica, che in un campo dipolare è data dalla rivoluzione di una linea di forza attorno al dipolo magnetico. La fig. 1 mostra schematicamente il moto descritto dagli invarianti adiabatici.

Altri effetti importanti sono i moti di deriva in presenza di campi elettrici e magnetici. La formula

$$V_{DE} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \quad (1.4)$$

mostra gli effetti di un campo magnetico uniforme e di un campo elettrico uniforme incrociati; il moto di una particella carica in tale configurazione è semplicemente una traslazione, nello stesso verso per ambedue le polarità di carica, trasversalmente rispetto al piano definito dai campi. Questo moto essendo comune alle due polarità non comporta conduzione di corrente, per un plasma neutro. La formula

$$V_{DB} = \frac{m}{2qB^3} (v_{\perp}^2 + 2v_{\parallel}^2) \mathbf{B} \times \vec{\nabla} B \quad (1.5)$$

rappresenta il moto di una particella carica in presenza di un campo magnetico non uniforme; per effetto combinato del gradiente di tale campo non uniforme e della sua curvatura, si vede che la particella carica si muove perpendicolarmente al piano definito dal campo magnetico e dal suo gradiente; in questo caso il moto è opposto per i due tipi di carica e quindi un plasma neutro che sia soggetto ad un campo con tale geometria si muove in modo tale da dar luogo ad una corrente elettrica diversa da zero; tale corrente scorre come detto perpendicolarmente sia al campo magnetico che al suo gradiente. Possiamo ora passare alla descrizione della magnetosfera terrestre, descrizione nella quale troveremo ripetutamente modo di applicare i concetti appena esposti.

2. Introduzione

La magnetosfera è quella regione dello spazio attorno alla Terra in cui il campo magnetico terrestre interagisce con il plasma del vento solare e con quello che proviene dalla ionosfera terrestre (Villante, questo volume).

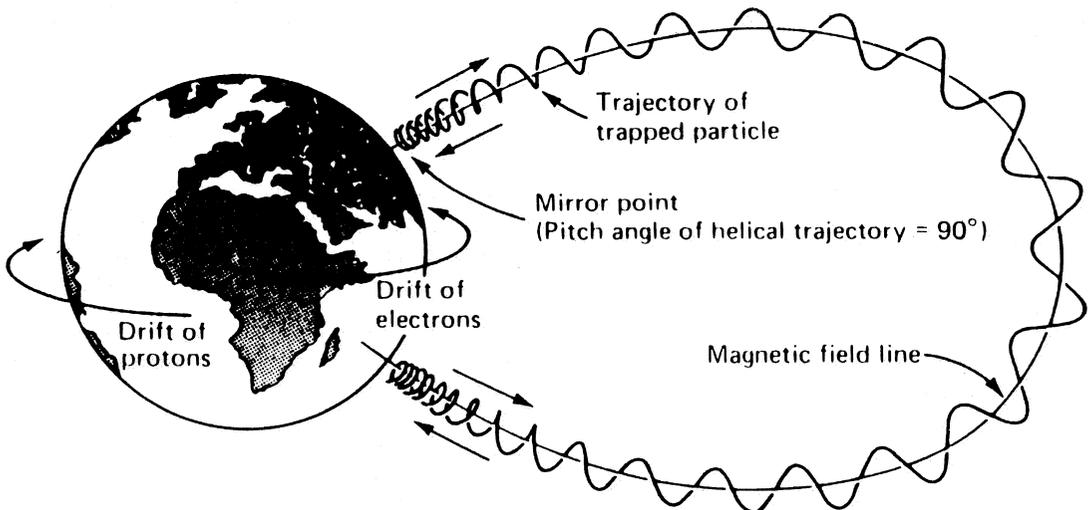


Fig. 1. Moto di una particella carica in un campo magnetico dipolare.

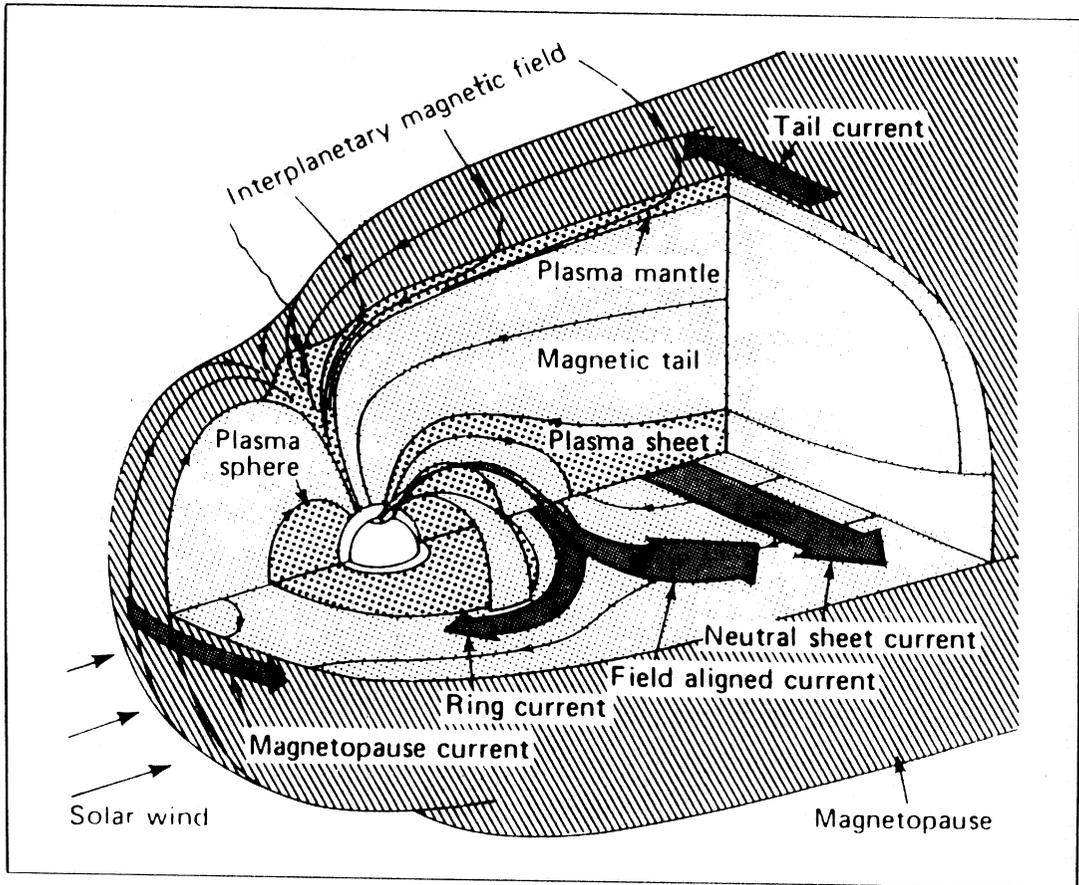


Fig. 2. La magnetosfera terrestre ed i vari sistemi di corrente che vi scorrono.

In fig. 2 è data una rappresentazione della magnetosfera e delle varie regioni in essa presenti. Il campo magnetico terrestre ha una densità di energia che decresce velocemente in funzione della distanza da terra.

Nelle regioni più vicine a terra quindi l'interazione è dominata dal campo magnetico, ed il plasma si muove sotto l'effetto del campo; è questa la magnetosfera interna in cui le correnti elettriche generate dal moto del plasma portano solo piccole deformazioni al campo magnetico. Nelle regioni magnetosferiche più lontane invece il campo magnetico ha intensità molto inferiore, ed inferiore in particolare

alla densità di energia del plasma; in queste regioni (magnetosfera esterna) il moto del plasma genera correnti che determinano forti perturbazioni al campo ambiente, che ne viene drasticamente deformato.

Nella descrizione della magnetosfera si usa spesso una terminologia che ha a che fare con la posizione di un punto o di una regione rispetto alla Terra in un sistema che tiene conto della posizione del Sole; vediamo la definizione di tale sistema di riferimento in fig. 3: l'origine è nel centro della Terra e l'asse x è diretto sistematicamente verso il Sole, con asse z perpendicolare all'eclittica; in tale sistema si

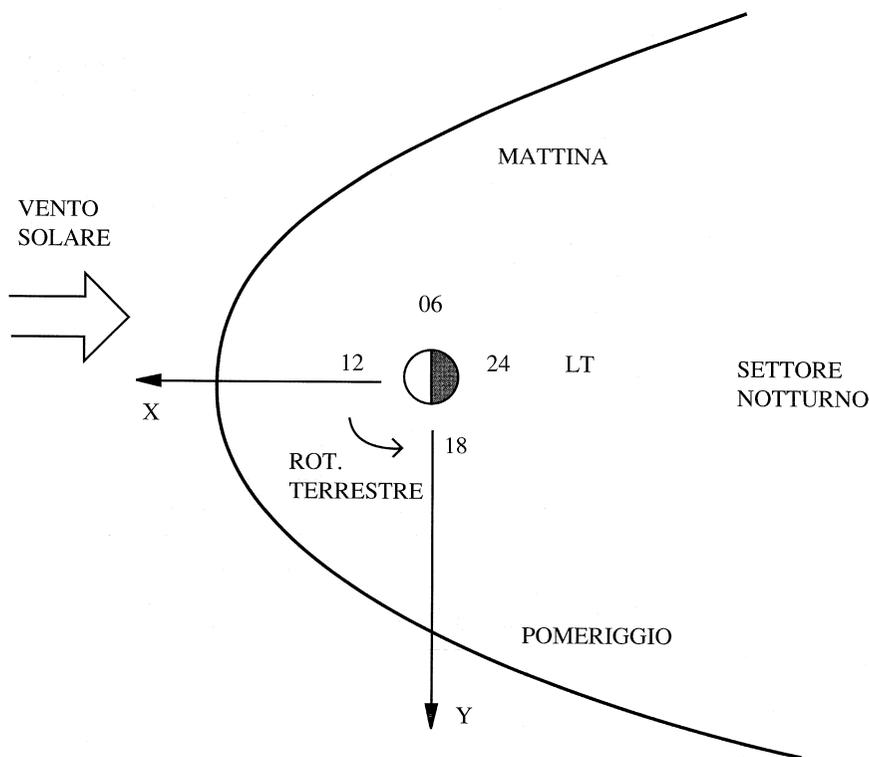


Fig. 3. Definizione delle regioni magnetosferiche in relazione alla posizione del Sole.

può parlare di lato mattina per quella regione che si trova nel semispazio delle y negative, in quanto è quella la regione in cui si trova un punto sulla superficie terrestre quando dalla notte emerge alla luce solare; conseguentemente si parla di regione pomeridiana per quel semispazio che corrisponde a valori di y positivi.

Come descritto nella rassegna di Villante, il campo geomagnetico viene confinato all'interno della cavità magnetosferica delimitata a sua volta dalla magnetopausa. Sulla magnetopausa scorre la corrente di Chapman-Ferraro, calcolabile in ogni punto mediante la considerazione che essa deve essere tale da annullare il campo magnetico dovuto al dipolo nella regione esterna. La direzione in cui fluisce la

corrente sulla magnetopausa nella regione subsolare è dal lato mattina della magnetosfera verso il lato pomeriggio; l'intera parte subsolare della magnetopausa è quindi percorsa da questo strato di corrente.

Diversissima è la situazione nella parte sottovovente della magnetosfera, come mostrato in fig. 4; il campo magnetico terrestre al confine con la magnetopausa in queste regioni è quasi orizzontale e diretto verso il Sole nell'emisfero settentrionale ed in direzione antisolare nell'emisfero meridionale. Per formare una magnetopausa in queste regioni occorre, come nella regione subsolare, che sulla magnetopausa scorra una corrente tale da generare all'esterno un campo opposto a quello dovuto al dipolo. Nell'emisfero settentrionale quindi oc-

corre una corrente superficiale che generi un campo diretto in direzione antisolare nello spazio sovrastante la magnetopausa; questa corrente deve quindi scorrere dal lato pomeriggio verso il lato mattina, in direzione opposta quindi a quella che la corrente di Chapman-Ferraro ha sulla magnetopausa subsolare; la stessa cosa accade sulla magnetopausa meridionale, dove il campo va generato invece nella regione sottostante la magnetopausa ed in direzione opposta, cioè verso il Sole. La corrente di Chapman-Ferraro quindi, scorrendo da mattina a pomeriggio sul naso della magnetosfera, si richiude scorrendo sulla magnetopausa in direzione opposta, da pomeriggio verso mattina, nella parte sottovento, e cioè oltre quel punto in ciascun emisfero in cui le linee di forza del campo terrestre, dopo essersi allontanate dalla superficie delle regioni polari, invece di piegare verso il Sole, iniziano ad allontanarsi in direzione antisolare; questi due punti vengono chiamati punti neutri (infatti,

per continuità, dovendo il campo magnetico convergere o allontanarsi in ogni direzione, il campo in questi punti non può essere altro che nullo).

La ionosfera terrestre a sua volta è un serbatoio di plasma che, evaporando lungo le linee di forza del campo magnetico, può permeare tutta la magnetosfera. Il plasma ionosferico è ovviamente molto diverso da quello di vento solare, essendo estremamente più freddo ($kT = 0.1$ eV) ed estremamente più denso (10^{16} /cc a 300 km). Questi due tipi di plasma comunque permeano alcune regioni della magnetosfera, come si vede sempre dalla fig. 2; in particolare la regione equatoriale della coda magnetosferica è sede di un plasma di densità dell'ordine di una particella per cc, ad elevata temperatura ($kT = 10$ keV). È questo plasma che, risiedendo attorno alla regione in cui il campo si inverte ed è quasi nullo, costituisce il cosiddetto foglio di plasma. Questo plasma, come vedremo più avanti, è sede di

TSYGANENKO MODEL

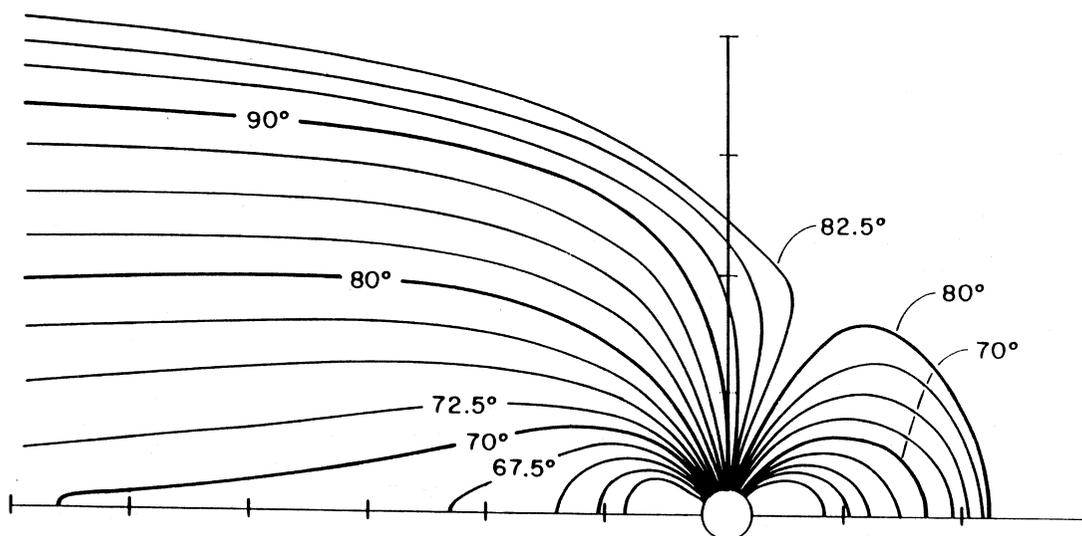


Fig. 4. La struttura del campo magnetico magnetosferico nella proiezione meridionale da mezzogiorno alla mezzanotte (Potemra, 1984).

correnti elettriche trasversali alla coda magnetosferica che scorrono nel piano equatoriale della coda stessa; tali correnti sono essenziali al sostentamento della struttura della coda magnetosferica data la geometria della coda; il campo dell'emisfero settentrionale converge verso terra e quello dell'emisfero meridionale se ne allontana e quindi per continuità la componente orizzontale deve annullarsi nel piano equatoriale; in corrispondenza della regione equatoriale della coda geomagnetica c'è uno strato in cui il campo magnetico è quasi nullo e diretto in direzione perpendicolare al piano equatoriale stesso, caratteristica tipica dell'equatore magnetico comunque. In questa regione di campo magnetico quasi nullo può scorrere la corrente del foglio neutro che separa il campo magnetico che va verso la coda nell'emisfero meridionale da quello che converge verso la Terra nell'emisfero settentrionale.

In quanto detto abbiamo sempre parlato di confinamento del campo magnetico terrestre all'interno della magnetosfera; questo modo di dire sottintende una problematica sulla quale non c'è unanimità di consensi fra i ricercatori del settore: se cioè la magnetosfera sia «aperta» o «chiusa». Il vento solare trasporta un campo magnetico, di origine solare anch'esso, che all'orbita terrestre ha una intensità di pochi nT ed una direzione media che segue la spirale di Parker; tale campo ha mediamente direzione all'incirca a 45 gradi rispetto alla linea Terra-Sole e polarità che lo rende diretto verso il Sole od in direzione antisolare a seconda del settore nel quale ci si trova; questo campo è estremamente fluttuante e quindi la sua componente nord-sud, che in media è nulla, può assumere in un certo istante valori sia negativi che positivi. Al momento in cui il vento solare incontra la magnetopausa il campo magnetico da esso trasportato si trova ad essere contiguo a quello, interno alla magnetosfera, che nella regione subsolare è diretto da sud a nord, come si vede in fig. 5; se il campo magnetico del vento solare ha componente z negativa ci si trova in presenza di una configurazione di campi con polarità opposte, per i quali è possibile il fenomeno di riconnessione. Le linee di forza antiparallele possono, per fluttuazioni delle correnti nel plasma locale,

riconfigurarsi e riconnettersi, dando luogo all'apertura della linea di forza terrestre che prima invece era chiusa su sé stessa; le due metà della linea di forza del campo terrestre si trovano dopo tale riconfigurazione ad essere connesse alla linea di forza del campo solare che continua a fluire insieme al vento solare; la linea di forza quindi, all'interno della magnetosfera, si trova ad essere trasportata verso la coda nella magnetosfera polare.

Questo fenomeno di riconnessione può avvenire su tutta la superficie della magnetosfera subsolare, quando si hanno condizioni di polarità negativa della componente z del campo magnetico nel vento solare, o, più correttamente, con efficienza più alta laddove la configurazione sia più vicina all'antiparallelismo, dove cioè l'angolo fra campo magnetico esterno e campo magnetico interno sia massimo. Il luogo dei punti dove ciò può avvenire forma sulla magnetopausa subsolare una linea ideale continua, detta, nelle teorie di tale fenomeno, linea di riconnessione.

Quando si ha riconnessione, il flusso magnetico riconnesso dal lato subsolare viene trasportato ed aggiunto alla coda geomagnetica, dove il campo si intensifica e si comprime. La geometria del campo nella coda è, come visto prima, anch'essa tale da favorire il fenomeno di riconnessione, in quanto il campo magnetico tende ad essere antiparallelo attorno al piano equatoriale, con linee di forza che sono dirette verso terra a nord del piano stesso e verso la coda a sud. All'aumentare del flusso di campo magnetico trasportato dalla magnetosfera diurna verso quella notturna, si raggiunge generalmente una situazione instabile nella quale la riconnessione nel piano neutro può avvenire. Il luogo dei punti dove questo può accadere forma nella coda una linea ideale di riconnessione che completa quella presente sulla magnetopausa subsolare. All'interno di questa linea, in condizioni stazionarie, il flusso magnetico deve essere restituito alla magnetosfera subsolare; questa restituzione avviene mediante la circolazione convettiva del plasma all'interno della magnetosfera, che ha verso antisolare ed è opposta a quella imposta all'esterno della magnetosfera dal vento solare; il plasma all'interno della magnetosfera

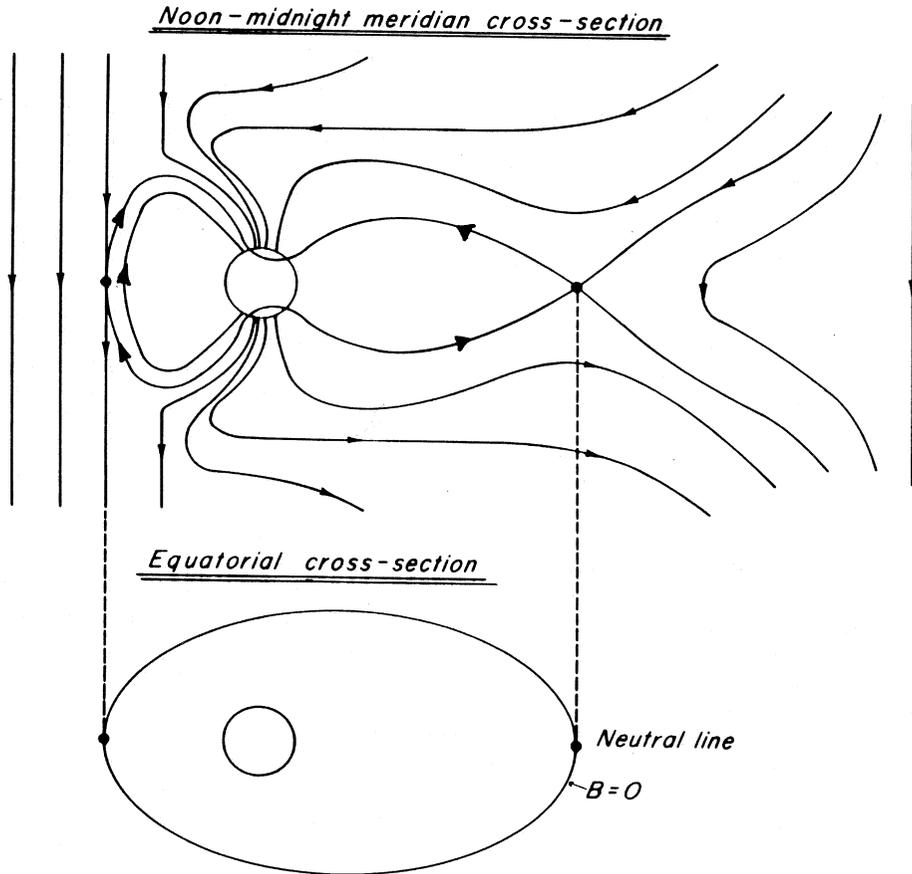


Fig. 5. Topologia teorica della riconnessione alla magnetopausa e linea neutra.

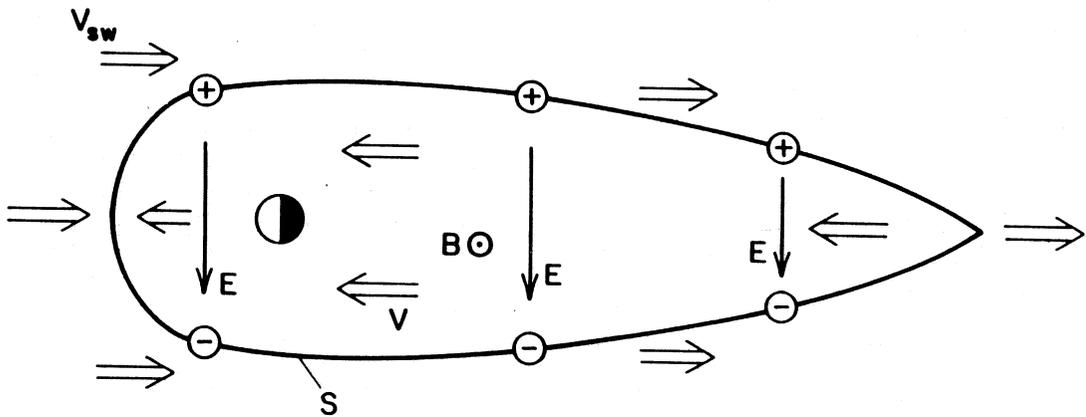


Fig. 6. La convezione del plasma sul piano equatoriale magnetosferico.

fluisce, nella regione equatoriale della magnetosfera esterna, dalla coda verso la terra e quindi in direzione solare come mostrato in fig. 6. In un sistema di riferimento fisso rispetto alla Terra questo flusso di plasma all'interno della magnetosfera, che ritrasporta campo magnetico dalla coda verso la parte diurna della magnetosfera, corrisponde ad un campo elettrico

$$E = -v \times B \quad (2.1)$$

diretto da mattina a pomeriggio; questo è parte del campo elettrico generale della magnetosfera esterna; esso è applicato dal lato mattina al lato pomeridiano e dà luogo ad una caduta di potenziale che ammonta a varie decine di migliaia di Volts.

Il plasma della magnetosfera esterna sotto l'azione di questo campo elettrico, può ovviamente dare luogo a delle correnti elettriche, anzi poiché come sappiamo il plasma tende ad equilibrare elettricamente le regioni in cui si trova, il plasma magnetosferico dà luogo a delle correnti elettriche nel tentativo di neutralizzare il campo elettrico generale. Come mostrato in fig. 7, nella coda magnetosferica uno dei cammini di minima resistenza che il plasma trova è quello offerto dalla regione equatoriale dallo strato neutro, in cui, come abbiamo detto, il campo magnetico è minimo. Le particelle cariche che si trovano sulle linee di forza che si chiudono nel foglio di plasma arrivano all'equatore nella coda, trovano un campo magnetico con forti gradienti e quindi non si comportano più in modo adiabatico (non rimangono più legate alla linea di forza su cui girano), e sotto l'azione del campo elettrico possono fluire nella direzione del campo elettrico, od in verso contrario, a seconda del loro segno. Questo trasporto di cariche genera la corrente nel foglio di plasma, che percorre il piano equatoriale della coda magnetosferica dal lato mattina al lato pomeridiano; essa è essenziale al mantenimento della configurazione del campo magnetico nella coda stessa (occorre infatti una corrente per mantenere il rotore di B); questa corrente aggiunge come visto un contributo che ha rispettivamente nella metà settentrionale e nella metà meridionale

della coda il segno necessario a sostenere la geometria allungata che è propria della coda (Candidi *et al.*, 1990).

Un altro percorso di minima resistenza che è disponibile alla scarica del potenziale imposto alla magnetosfera, è offerto dalle linee di forza del campo magnetico stesso come mostrato in fig. 8. Mentre in un plasma magnetizzato la conducibilità elettrica è molto ridotta, in generale, in direzione perpendicolare al campo magnetico (e quindi conduzione di corrente può avvenire solo in zone di campo nullo o quasi, come nel foglio neutro, o in geometrie specifiche, come quelle in cui vi siano derive di gradiente e curvatura appropriati), non c'è nulla che impedisca il moto di particelle cariche parallelamente al campo magnetico, in zone in cui le collisioni con i neutri siano rare, come è vero al di fuori della bassa ionosfera terrestre. Questo è un concetto espresso solitamente con l'affermazione estrema che la conducibilità parallela al campo magnetico è infinita (e quindi che le linee di forza del campo magnetico sono equipotenziali) e che la conducibilità perpendicolare al campo magnetico è nulla.

Consideriamo ora due punti nella coda magnetosferica ai quali sappiamo che il vento solare applica un potenziale elettrico, e cioè due punti A e B sui due lati della coda magnetosferica alla stessa distanza dalla Terra, e consideriamo il seguente percorso ideale: la linea di forza sulla quale si trova il punto A , dal punto A alla ionosfera in AA , un percorso opportuno lungo la ionosfera terrestre da AA fino al piede BB della linea di forza che proviene dall'altro lato dal punto B , e la linea di forza fino al punto B ; come detto la resistenza connessa ai due tratti di tale percorso che sono dati dalle due linee di forza è nulla, e quindi la resistenza totale di tale cammino è ridotta alla resistenza del tratto ionosferico. La conducibilità delle regioni ionosferiche, anche perpendicolarmente alle linee di forza del campo magnetico, è elevata a causa delle frequenti collisioni con gli abbondanti neutri presenti, collisioni che distruggono il moto ordinato che il campo magnetico tenta di imporre al plasma. Il circuito descritto sopra risulta perciò concorrenziale dal punto di vista della

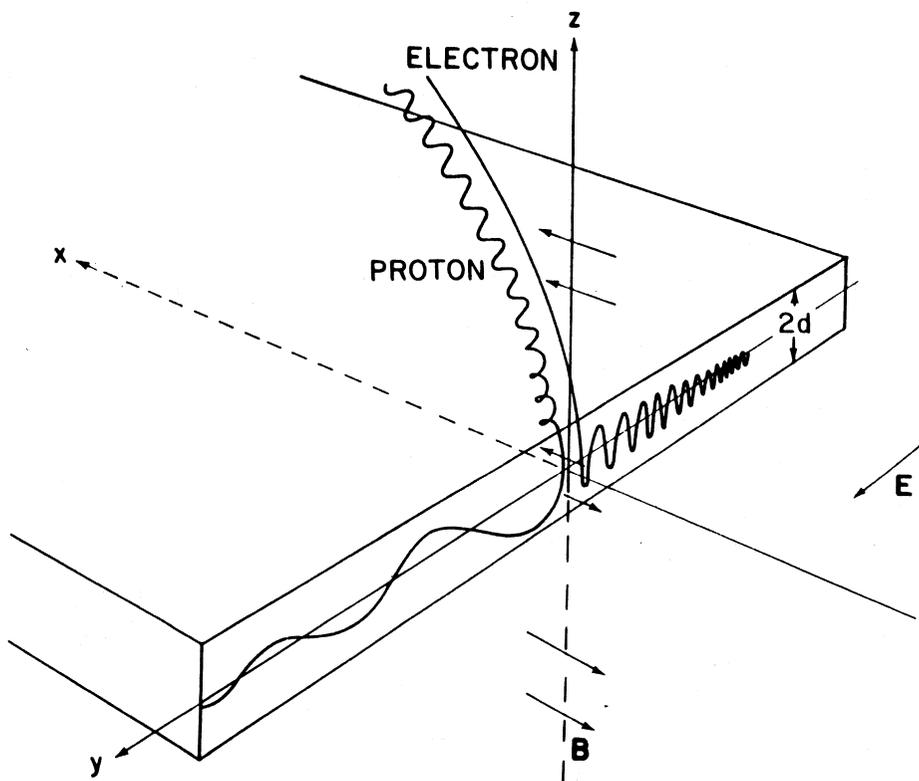


Fig. 7. Non conservazione degli invarianti adiabatici nel piano neutro della coda magnetosferica.

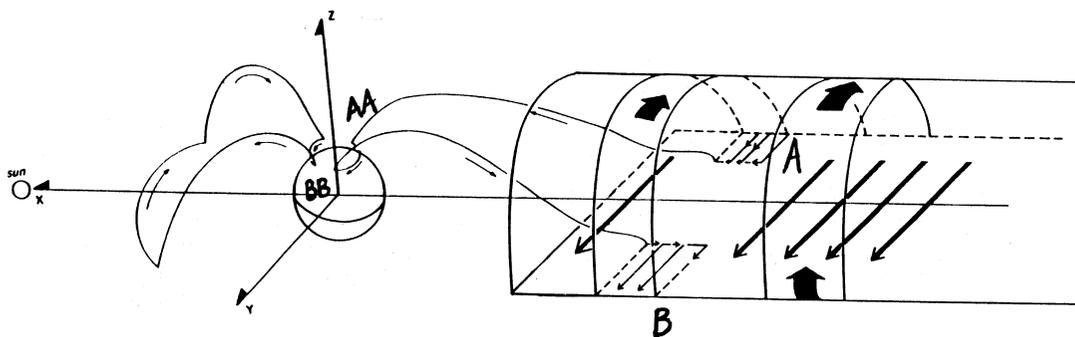


Fig. 8. Topologia del sistema di correnti allineate di Regione 1 nella coda magnetosferica (Yasuhara *et al.*, 1975).

possibilità di condurre corrente con quello che attraversa la coda magnetosferica nel piano equatoriale lungo lo strato neutro; a volte la corrente preferisce questo circuito all'altro, o più propriamente, il rapporto fra le correnti che percorrono i due circuiti varia nel tempo; generalmente, in periodi quieti la coda è il percorso preferenziale, mentre a volte, durante periodi disturbati, il circuito allineato e ionosferico si intensifica.

Si generano così le cosiddette correnti allineate al campo magnetico che convergono a terra dalla magnetosfera esterna nelle regioni polari; data la geometria della linea neutra che delimita la regione all'interno della quale il campo elettrico può generare correnti allineate, tali correnti terminano in una regione anulare, che è la proiezione lungo le linee di forza del campo geomagnetico della linea ideale di cui si parlava precedentemente sulla quale avviene secondo alcune teorie la riconnessione; questo anello circonda il polo magnetico nei due emisferi (Candidi e Meng, 1988) e coincide con la regione nella quale hanno luogo, e non a caso, i fenomeni aurorali polari; è l'ovale aurorale mostrato in fig. 9.

I dati rilevati dai satelliti artificiali hanno mostrato che la geometria dei circuiti di correnti allineate è più complicata di quanto brevemente accennato fin qui. In effetti esiste un altro sistema di correnti allineate che scorre al confine fra magnetosfera esterna e magneto-

sfera interna. Per descrivere questo altro sistema di correnti occorre analizzare ciò che accade nella magnetosfera interna.

3. Magnetosfera interna

Questa regione della magnetosfera è quella nella quale il campo magnetico terrestre è più intenso, in cui esso determina il moto del plasma, ed in cui le correnti portano deformazioni percentualmente più limitate al campo ambiente, data la maggiore intensità del campo terrestre in questa regione. Essa è percorsa dalle linee di forza chiuse del dipolo terrestre. In essa il moto delle cariche elettriche segue la geometria imposta dalla conservazione degli invarianti adiabatici, girando attorno al campo magnetico mentre il centro di girazione oscilla fra i punti specchio ad alta latitudine, e deriva in longitudine in versi opposti per i due tipi di carica elettrica.

Quest'ultimo moto in particolare, come detto prima, genera una corrente che può essere approssimata con un anello di corrente posto sul piano equatoriale magnetico a circa 5-6 raggi terrestri, appunto detta la corrente ad anello. Il verso di questa corrente è tale da deprimere la componente nord sud del campo magnetico a terra.

È la corrente ad anello che rappresenta la sorgente del circuito di correnti allineate più

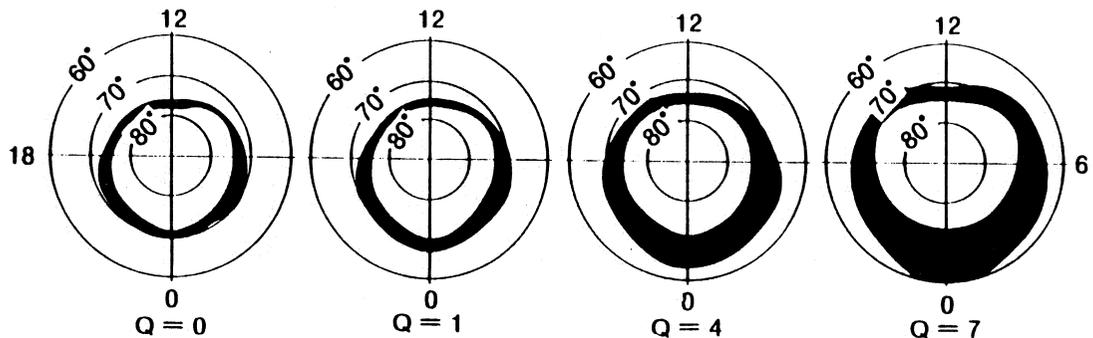


Fig. 9. L'ovale aurorale a diversi livelli di attività magnetosferica (Kamide, 1988).

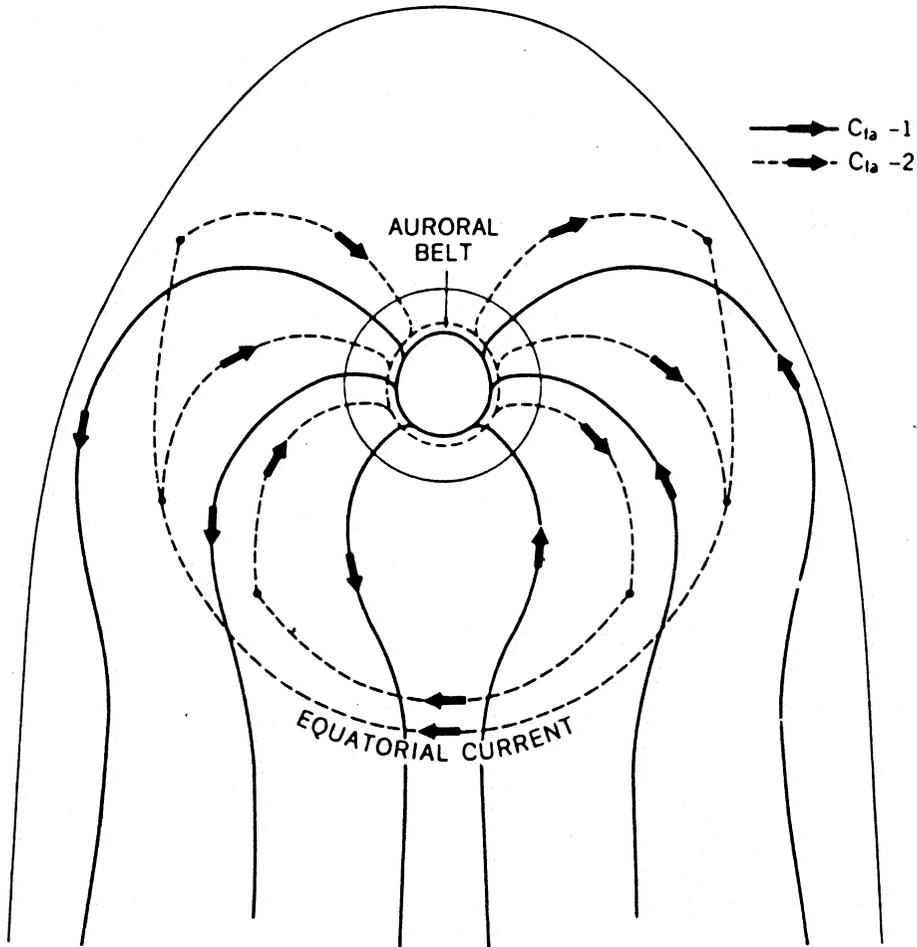


Fig. 10. I due sistemi di correnti allineate nella magnetosfera polare (Kamide, 1988).

equatoriale, rispetto a quello che si origina nella coda. Partendo dall'equazione magnetoidrodinamica del moto del plasma in un campo magnetico

$$m_i n \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \vec{\nabla} p \quad (3.1)$$

e mediante passaggi matematici riportati in Hasegawa e Sato (1979) si può giungere alla formula

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \mathbf{J}_{\parallel} &= -\vec{\nabla} \cdot \mathbf{J}_{\perp} \text{ e } \vec{\nabla} \cdot \mathbf{J}_{\perp} = \\ &= \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{\Omega}{B} \right) - \frac{2}{B} \mathbf{J}_{\perp} \cdot \vec{\nabla} B - \mathbf{J}_{in} \cdot \vec{\nabla} \ln \rho \end{aligned} \quad (3.2)$$

che mostra come sorgenti di correnti allineate possano essere sia regioni magnetosferiche in cui esiste vorticità del flusso di plasma, come anche regioni in cui vi siano correnti perpendicolari al campo magnetico, che siano anche non perfettamente perpendicolari al suo gra-

diente, come appunto avviene nella corrente ad anello (Nishida, 1982).

La fig. 10 mostra simultaneamente il circuito più esterno dovuto alla vorticità, cioè quello già descritto, dovuto alla convezione del plasma nella coda ed attorno alla Terra; il circuito dovuto ai gradienti del campo magnetico nella regione della corrente ad anello è quello più interno. I due sistemi consistono di correnti dirette in versi opposti, e specularmente simmetrici da lato mattina a lato pomeriggio; nella zona mattutina il sistema di Regione 1, più esterno, porta corrente dalla zona più

esterna della magnetosfera equatoriale alla parte più polare dell'anello di correnti ionosferiche, mentre il sistema di correnti di Regione 2, porta corrente dalla parte più equatoriale dell'anello di correnti nella ionosfera alla regione più interna della magnetosfera equatoriale.

Dal lato pomeridiano la situazione è simmetrica con il sistema di Regione 1 che porta corrente dalla parte polare dell'anello di correnti ionosferiche alla magnetosfera equatoriale più esterna, ed il sistema di correnti di Regione 2 che invece conduce corrente dalla zo-

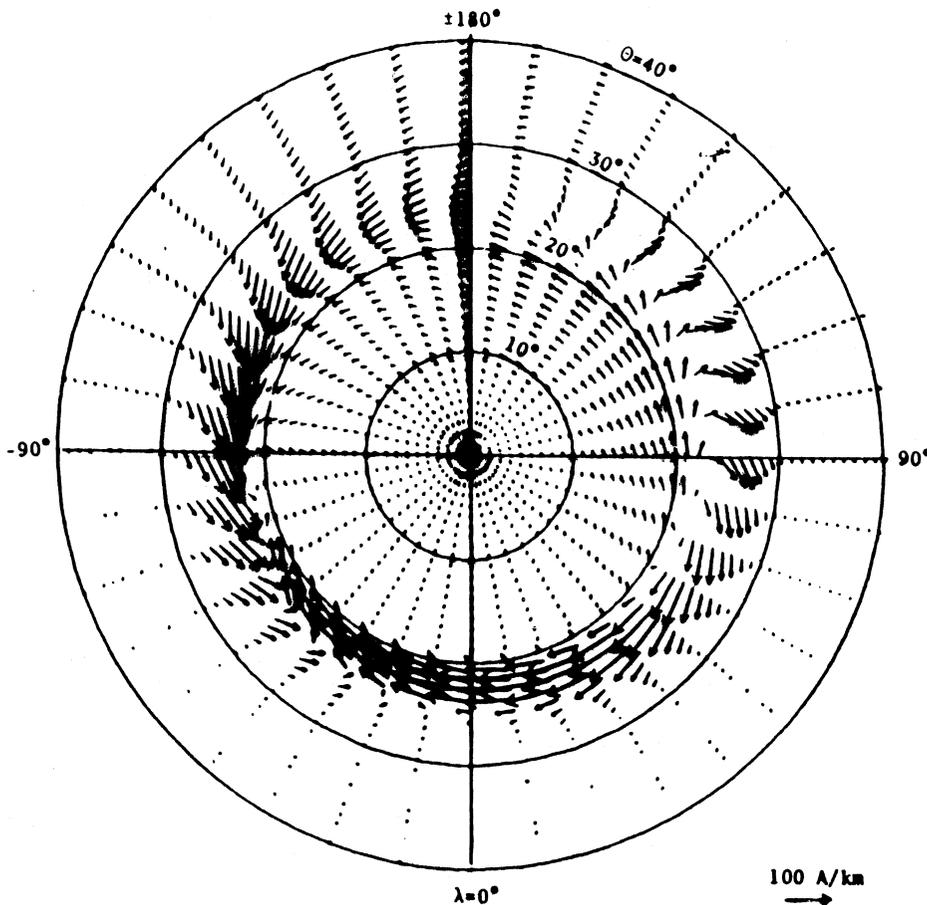


Fig. 11. L'elettrogetto aurorale nella ionosfera terrestre (Kamide, 1988).

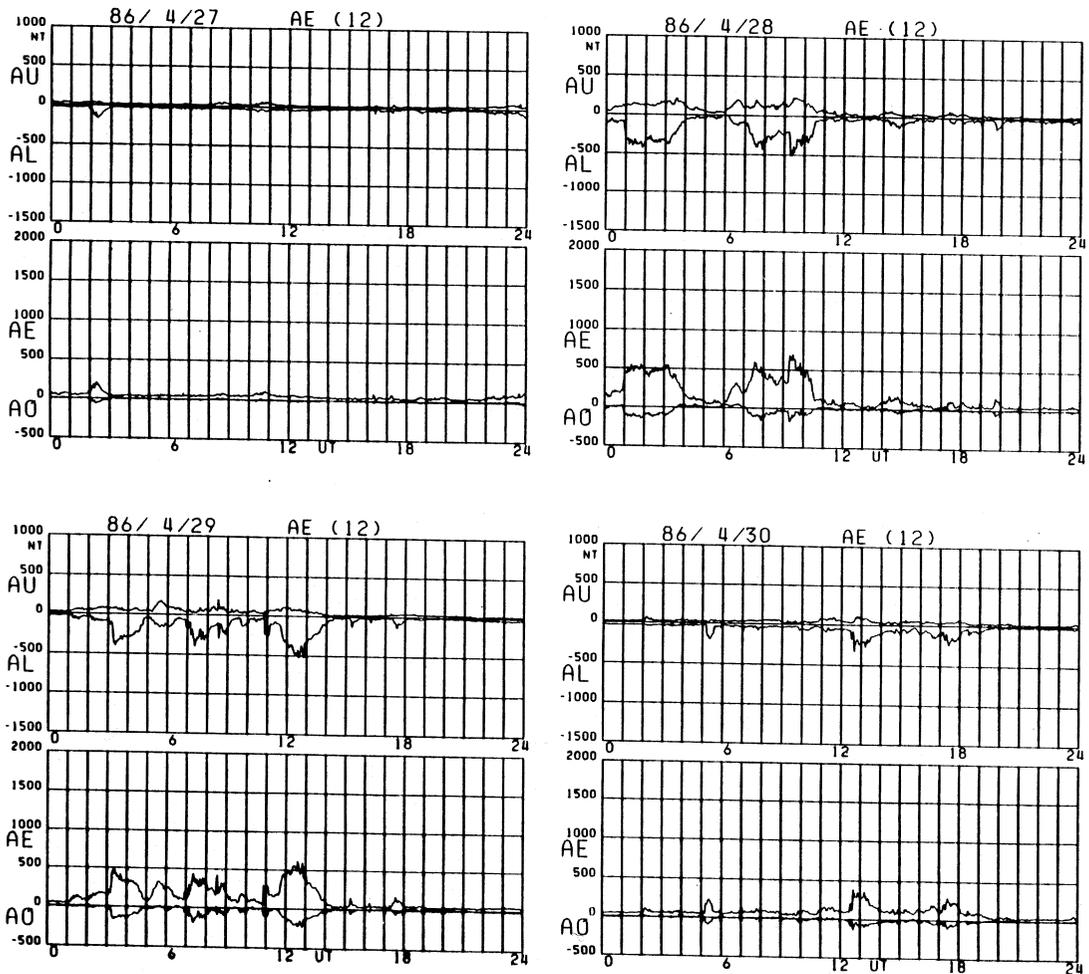


Fig. 12. Andamento dell'indice AE per il periodo dal 27 Aprile al 30 Aprile 1986. Il giorno 27 è quieto e moderati disturbi sono visibili nei giorni successivi (Kamei *et al.*, 1990).

na più interna della magnetosfera equatoriale alla parte a latitudini inferiori dell'anello ionosferico.

Un'altra caratteristica importante della magnetosfera interna è che essa è pervasa dal plasma ionosferico che evapora lungo le linee di forza chiuse; questo plasma forma la cosiddetta plasmasfera, in cui la densità del plasma freddo è alcuni ordini di grandezza superiore a quella del plasma delle regioni circostanti. Al campo elettrico generale della magnetosfera, che è pressoché uniforme dal lato mattina al

lato pomeriggio, si sovrappone nella regione della plasmasfera un campo elettrico di corotazione, che ha direzione pressoché radiale nel piano della magnetosfera equatoriale, e che si sovrappone al primo, intensificandolo dalla parte mattina e deprimendolo dalla parte meridiana. In effetti questo è un modo per dire che il campo elettrico della magnetosfera esterna non può penetrare fino nella plasmasfera, dove il plasma fa da gabbia di Faraday e ne impedisce la penetrazione.

Le correnti allineate al campo magnetico

terrestre nella Regione 1 e nella Regione 2 connettono quindi la regione equatoriale della magnetosfera lontana con un anello di correnti che scorrono nella ionosfera polare a bassa quota. Le correnti ionosferiche hanno la configurazione mostrata in fig. 11. Nella ionosfera polare, e per l'esattezza nell'ovale aurorale, scorre quindi un anello di correnti, detto elettrogetto aurorale. L'intensità massima della corrente è mediamente attorno alla mezzanotte locale, e la direzione della corrente ionosferica è generalmente da Est verso Ovest nella parte notturna e da Ovest verso Est nella parte diurna e pomeridiana.

Ovviamente, data la vicinanza a Terra e l'intensità delle correnti nell'elettrogetto aurorale, gli effetti a Terra di tale sistema sono i più notevoli, dal punto di vista dell'osservazione di disturbi magnetici dovuti a fenomeni magnetosferici.

L'indice *AE* (auroral electrojet) è una misura dell'intensità massima della corrente lungo l'elettrogetto. La fig. 12 mostra un periodo indicato nella terminologia corrente come da quieto a moderatamente disturbato, come si vede dal fatto che l'indice *AE* ha valori inferiori a 100 nT (quiete magnetica) o fino a circa 500 nT (disturbo magnetico moderato).

4. Tempeste magnetosferiche

Quanto detto fino ad ora delinea la configurazione delle correnti che circolano nella magnetosfera; il campo magnetico misurato in qualsiasi punto della magnetosfera, e quindi in particolare anche a terra, è la sovrapposizione del campo interno terrestre e degli effetti magnetici di tutte queste correnti. Se la magnetosfera fosse un oggetto statico le uniche variazioni che sarebbero utilizzabili ai fini magnetotellurici sarebbero quelle dovute alle variazioni del campo intrinseco della Terra, con tempi di evoluzione dell'ordine di anni, e quelli dovuti alla rotazione della Terra sotto i sistemi di corrente magnetosferici, che, essendo non simmetrici in tempo locale, darebbero modulazioni di periodo 24 ore, del campo misurato al suolo.

La magnetosfera però è tutt'altro che stati-

ca: come già visto nelle precedenti relazioni, dal Sole giunge un vento solare che è tutt'altro che costante; la sua velocità e densità variano nel tempo, a volte lentamente e con continuità, e a volte improvvisamente e nella forma di discontinuità violente; queste variazioni si riflettono in variazioni della pressione dinamica esercitata dal vento solare sulla magnetosfera ed in conseguenti variazioni della posizione del punto di equilibrio fra pressione dinamica e pressione magnetica; la posizione della magnetopausa è perciò modulata da tali variazioni e provoca modulazioni dell'intensità della corrente di Chapman-Ferraro. Si è anche visto che la polarità del campo magnetico trasportato dal vento solare influenza la struttura della magnetosfera, che può assumere una configurazione aperta e dar luogo a fenomeni di riconnessione per polarità negativa della componente verticale del campo magnetico interplanetario, oppure una configurazione chiusa in cui l'efficienza della riconnessione diviene minore, per polarità positiva della componente verticale di tale campo.

In corrispondenza all'arrivo a terra di regioni di vento solare in cui tale componente del campo magnetico interplanetario ha polarità opposte, si hanno riconfigurazioni della magnetosfera, con trasferimenti di plasma da una regione all'altra e conseguenti variazioni delle intensità e delle localizzazioni delle correnti all'interno della magnetosfera (Mastrantonio *et al.*, 1993); queste comportano modifiche del campo magnetico misurato, in particolare, a terra. Questi fenomeni costituiscono le cosiddette tempeste magnetosferiche (o più tradizionalmente tempeste magnetiche) che sono rilevate come variazioni del campo magnetico a terra. Le scale temporali di questi fenomeni sono variabili ma in generale dell'ordine di ore; ogni tempesta magnetica può essere scomposta in atti elementari di perturbazione, detti sottotempeste magnetosferiche. Queste sono visibili in generale nei tracciati del campo magnetico misurato a terra; ad esempio, per la tempesta magnetica del 13 Marzo 1989, la fig. 13 mostra la traccia delle varie componenti del campo misurato all'Aquila. Si vede che la depressione della componente orizzontale consiste in una serie di depressioni successive che

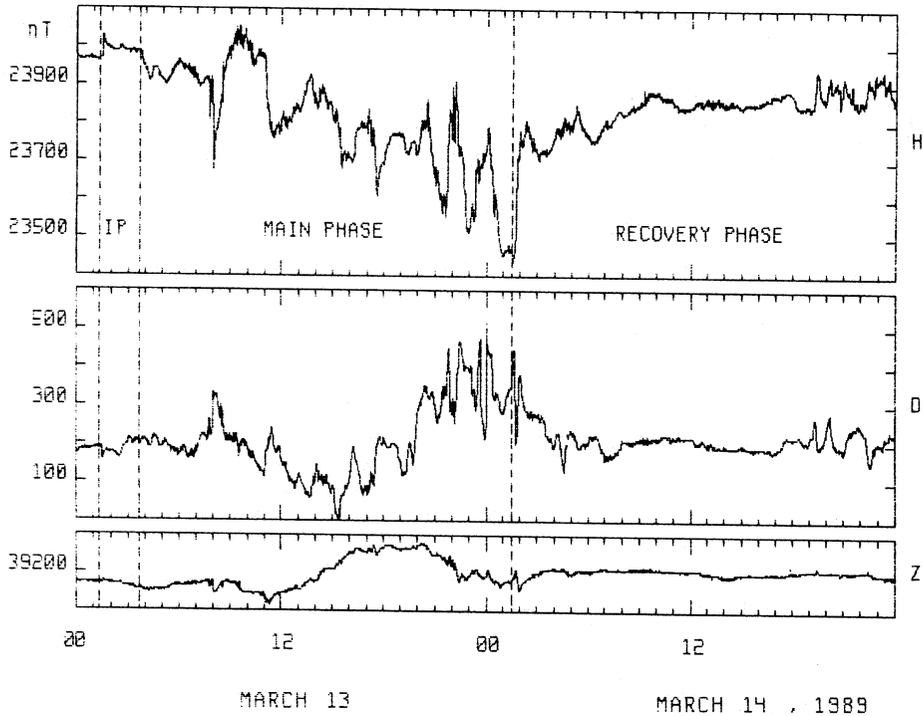


Fig. 13. Tracce del campo magnetico misurato a L'Aquila in occasione della tempesta del 13 Marzo 1989 (Villante *et al.*, 1990).

si sovrappongono. Ciascuna di esse è una sottotempesta.

Il processo di sottotempesta è ormai studiato in dettaglio e costituisce una sequenza di eventi nota; alla transizione della componente verticale del campo magnetico interplanetario da positiva a negativa, segue una intensificazione del processo di riconnessione fra campo interplanetario e campo magnetosferico, almeno secondo un modello di processo. In effetti esistono molti modelli che differiscono essenzialmente nelle descrizioni delle cause delle sottotempeste, mentre sono ovviamente d'accordo e cercano tutte di spiegare le varie manifestazioni di tali fenomeni; tali teorie cercano di incorporare gli stessi dati osservativi all'interno di vari modelli teorici. Senza entrare nella discussione sulla validità di questo o quel modello, vale qui la pena di elencare invece le più tipiche manifestazioni di una sot-

totempesta magnetosferica riportate nella tabella I (Lui, 1991). Nella descrizione delle sottotempeste si parla di varie fasi: crescita, espansione e decadimento. La fase di crescita può cominciare con un'inversione di polarità del campo magnetico interplanetario e corrisponde a quella in cui, nel modello della riconnessione, il flusso magnetico riconnesso nella regione subsolare della magnetosfera viene trasportato verso la coda dal plasma che fluisce nelle regioni polari della magnetosfera, intensificando il campo magnetico nella coda. Questi effetti sono stati mostrati da studi che pongono in correlazione le sottotempeste prevalentemente con periodi in cui la componente verticale del campo magnetico interplanetario è negativa come si vede in fig. 14. In ciascuna sottotempesta, gli indici Dst (cioè come detto l'intensità della corrente ad anello) ed AE (cioè l'intensità dell'elettrogetto aurorale) si

Tabella I. Several key observed substorm phenomena.

Regions	Phases		
	Growth, 0.5-1 hour	Expansion, 0.5-1 hour	Recovery, 1-2 hour
Solar wind	<i>southward turning of IMF</i>	substorm expansion onset occasionally corresponds to northward turning of IMF or sudden solar wind pressure increase	leakage of magnetospheric particles upstream
Ionosphere	enlargement of polar cap size, <i>enhancement of ionospheric electrojets</i>	sudden <i>auroral arc brightening</i> at expansion onset, formation of WTS and auroral bulge, appearance of bright structures in diffuse aurora, <i>further enhancement of electrojets</i> , outflow of ionospheric ions	reduction in auroral bulge size and luminosity
Near-Earth tail $5 \lesssim X \lesssim 15R_E$	<i>increase in tail cross section</i> , gradual plasma sheet thinning, <i>stretched magnetic field configuration</i> , development of field-aligned anisotropy of energetic electrons	decrease in tail cross section, particle injection, <i>relaxed magnetic field configuration</i> spreading in local time, impulsive electric fields	drift echoes
Midtail $15 \lesssim X \lesssim 80R_E$		plasma sheet thinning, transient fast plasma flow, occasionally large fluctuating electric fields	<i>plasma sheet thickening with fast field-aligned flow at plasma sheet boundary layers</i>
Far-tail $ X \gtrsim 80R_E$			B_z perturbation first northward then southward, tailward streaming electrons at plasma sheet entry, changing to isotropic electrons deeper in the plasma sheet.

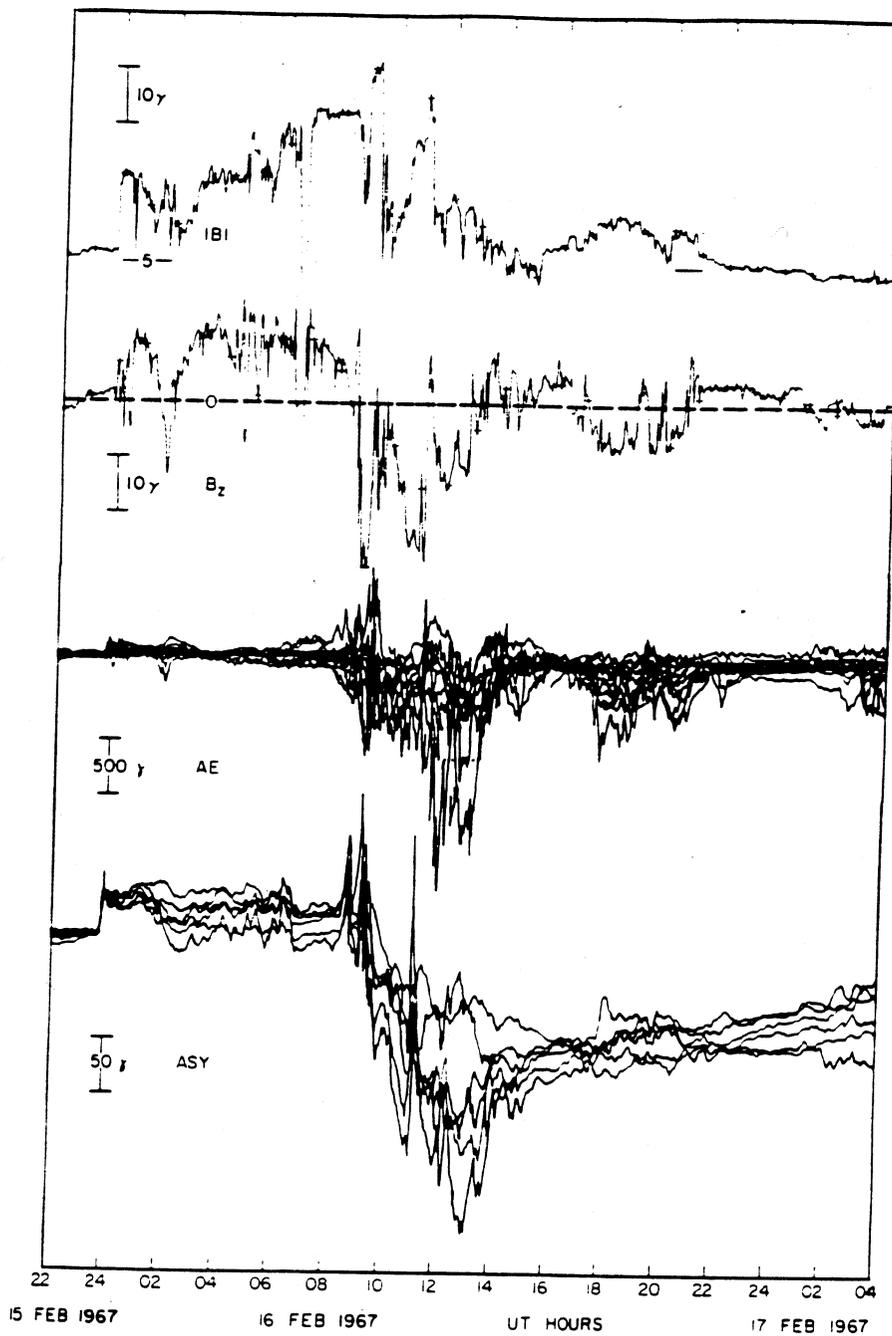


Fig. 14. Evoluzione della componente verticale del campo magnetico interplanetario e dell'indice AE e Dst (ASY) dal 15 al 17 Febbraio 1967.

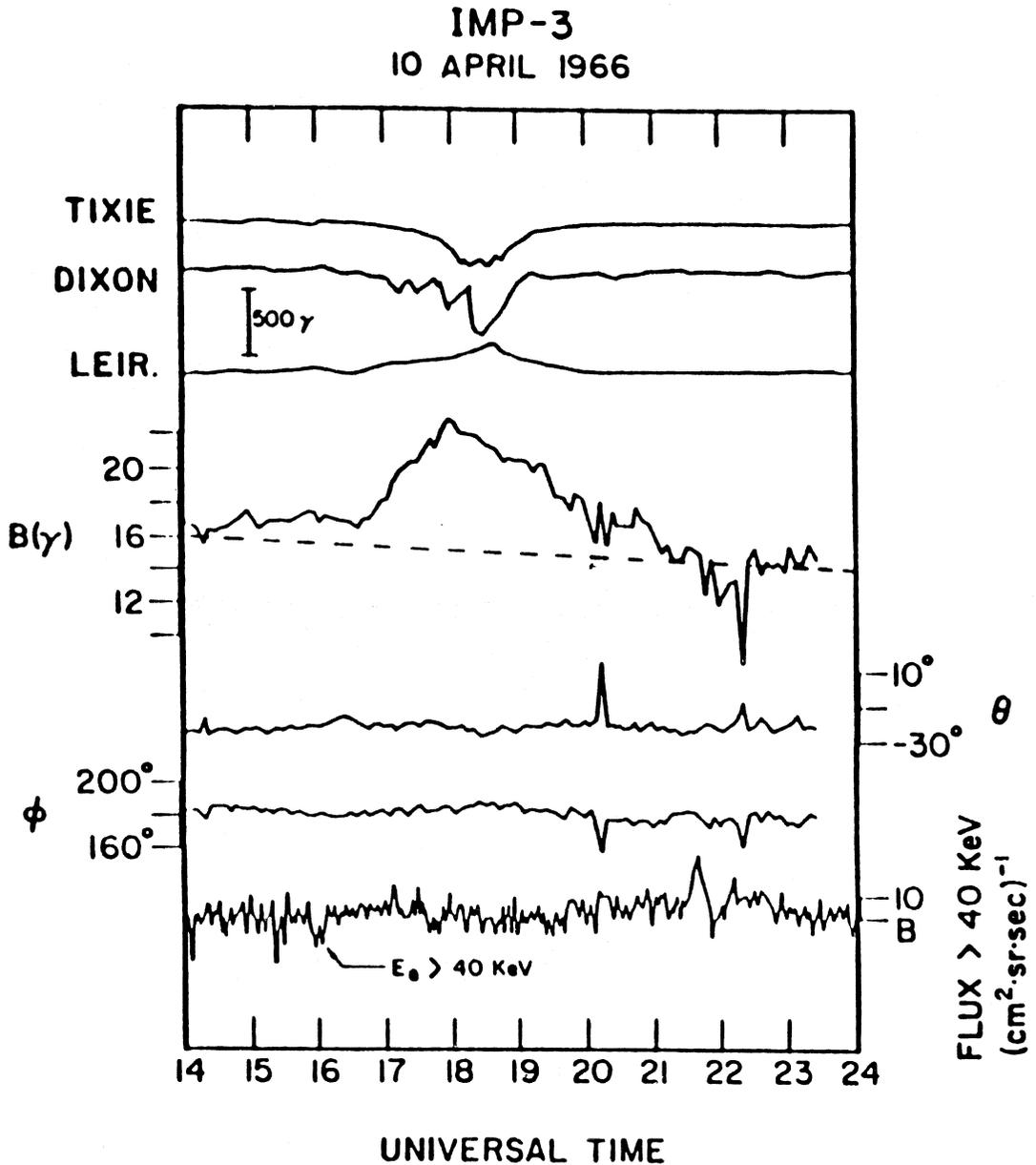


Fig. 15. Variazioni del flusso di elettroni energetici, del campo magnetico nella coda geomagnetica (intensità e angolo di inclinazione e longitudine rispetto al piano equatoriale) e del campo magnetico a terra in alcune stazioni aurorali (Akasofu, 1980).

correlano nella loro intensificazione con tali inversioni, e nella coda il campo magnetico aumenta come mostra la fig. 15. La fase di espansione è quella in cui, per effetto dello scaricamento verso la ionosfera con le correnti allineate e ionosferiche dell'energia accumulata, il campo magnetico nella coda cala e le correnti si intensificano con fenomeni ionosferici polari come la formazione delle aurore.

La fig. 16 mostra un'immagine UV presa dal satellite HILAT che mostra l'ovale aurorale in un periodo abbastanza quieto; quindi nelle figg. 17 e 18 immagini prese da DMSP, in bianco e nero, nella banda visibile, di nuovo la fig. 17 in un periodo quieto in cui la struttura degli archi aurorali è stabile, sopra le regioni settentrionali dell'Europa (si vedono le città scandinave e russe), e quindi la fig. 18 in un periodo di sottotempesta in cui invece la struttura è deformata e altamente dinamica. Nella fase di espansione della sottotempesta l'ovale aurorale si espande ed i fenomeni ionosferici si trasferiscono a latitudini magnetiche più basse, tanto più basse quanto più la sottotempesta è intensa, come si vede dalla fig. 19 che mostra l'espansione dell'ovale aurorale e la sua coerenza temporale con le variazioni dell'indice *Dst*. Si vede anche la relativa simmetria dei fenomeni aurorali fra i due emisferi, settentrionale e meridionale.

La morfologia del disturbo rilevato a terra in corrispondenza di un evento singolo di sottotempesta magnetosferica dipende ovviamente dalla localizzazione della stazione a terra rispetto alle correnti che cambiano nel tempo; avendo osservato che le correnti magnetosferiche sono collocate nello spazio in posizioni precise in un sistema di riferimento che tiene conto della posizione del Sole, mentre è relativamente indifferente alla posizione della Terra sotto tali sistemi di correnti, risulta ovvio che lo stesso evento di sottotempesta magnetosferica avrà effetti magnetici diversi ad una certa stazione terrestre a seconda della sua collocazione istantanea, e cioè a seconda del tempo locale al quale tale stazione si trova al momento in cui il disturbo ha luogo.

Questo è vero alle latitudini aurorali come si vede dalla fig. 20 che mostra le tracce delle stazioni aurorali disposte a varie longitudini.

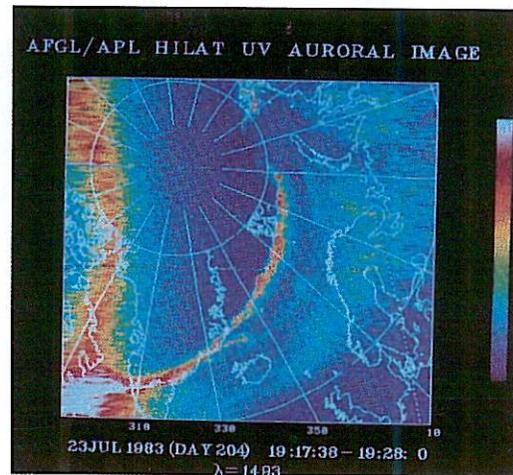


Fig. 16. Le aurore nell'ovale aurorale osservate nell'UV dal satellite HILAT (il segnale esteso alla sinistra è luce solare diretta) (da *Technical Digest*, 5 (2), R.E. Huffman e C.I. Meng «Ultraviolet imaging of sunlit auroras from HILAT»).

Si vede anche il diverso segnale nel settore pomeridiano (Kiruna) dovuto all'elettrogetto verso Est, rispetto a quello delle stazioni notturne e mattutine, sotto l'elettrogetto diretto verso Ovest (Barrow). La posizione delle stazioni è data nella fig. 21 anche rispetto alla posizione istantanea del sole. Nella fig. 22 invece si vedono le tracce delle registrazioni delle componenti orizzontali del campo magnetico osservate da osservatori disposti lungo catene meridionali in vari settori di longitudine; come si vede il campo mostra deflessioni rilevanti in funzione del tempo a tutte le stazioni, dando la sensazione delle globalità dell'effetto che stiamo osservando; tuttavia c'è da notare che in ciascuna catena, in funzione della latitudine, la perturbazione ha caratteristiche diverse, ed anche che alla stessa latitudine l'effetto della perturbazione è diverso a diverse longitudini. Chiaramente il tempo locale al quale la perturbazione viene osservata a ciascuna stazione dipende dalla sua longitudine, e si può assumere che se la perturbazione invece di avvenire attorno alle 14 UT, fosse avvenuta ad un diverso tempo UT, con una diversa collocazione delle varie catene di osser-



Fig. 17. L'ovale aurorale quieto osservato nel visibile da DMSP; si notano archi sottili e stabili (si vedono le luci delle città scandinave e russe).

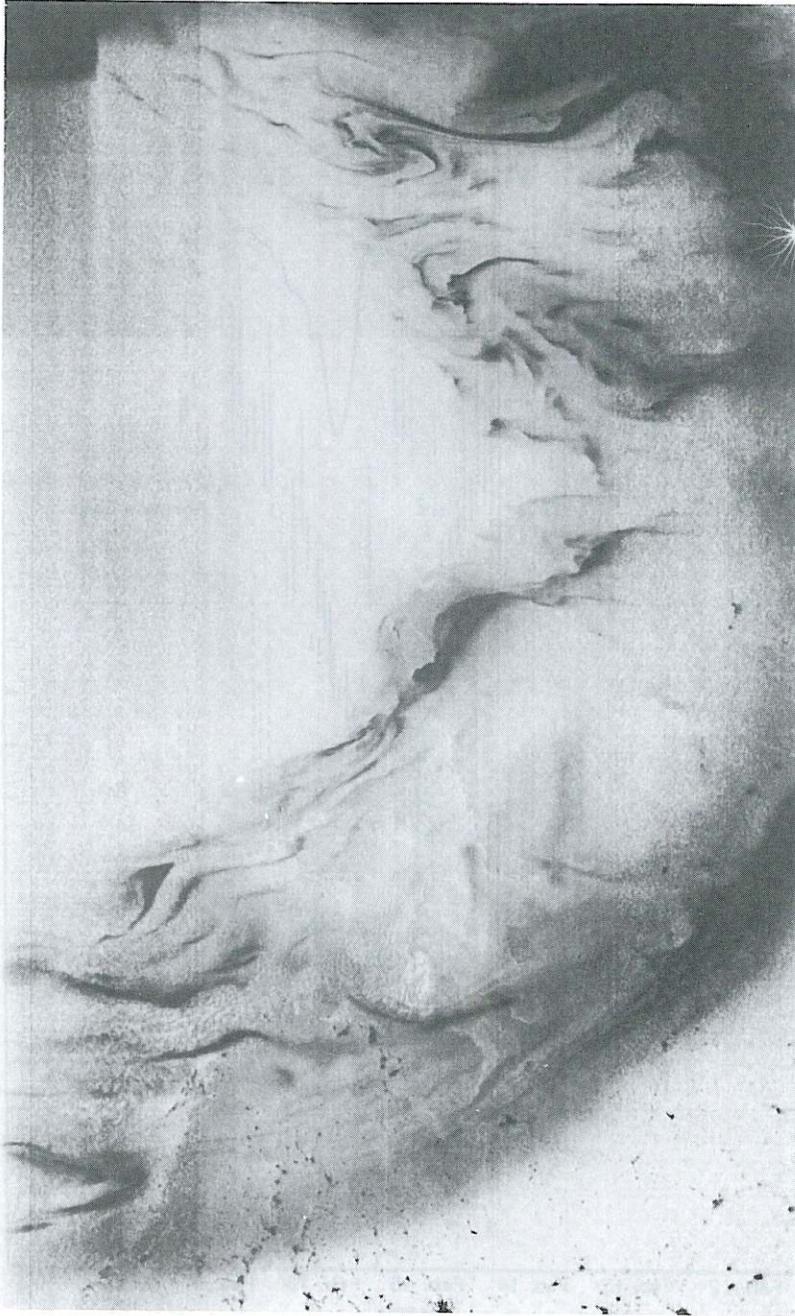


Fig. 18. L'ovale aurorale disturbato; si vedono archi multipli e molto dinamici e bande estese.

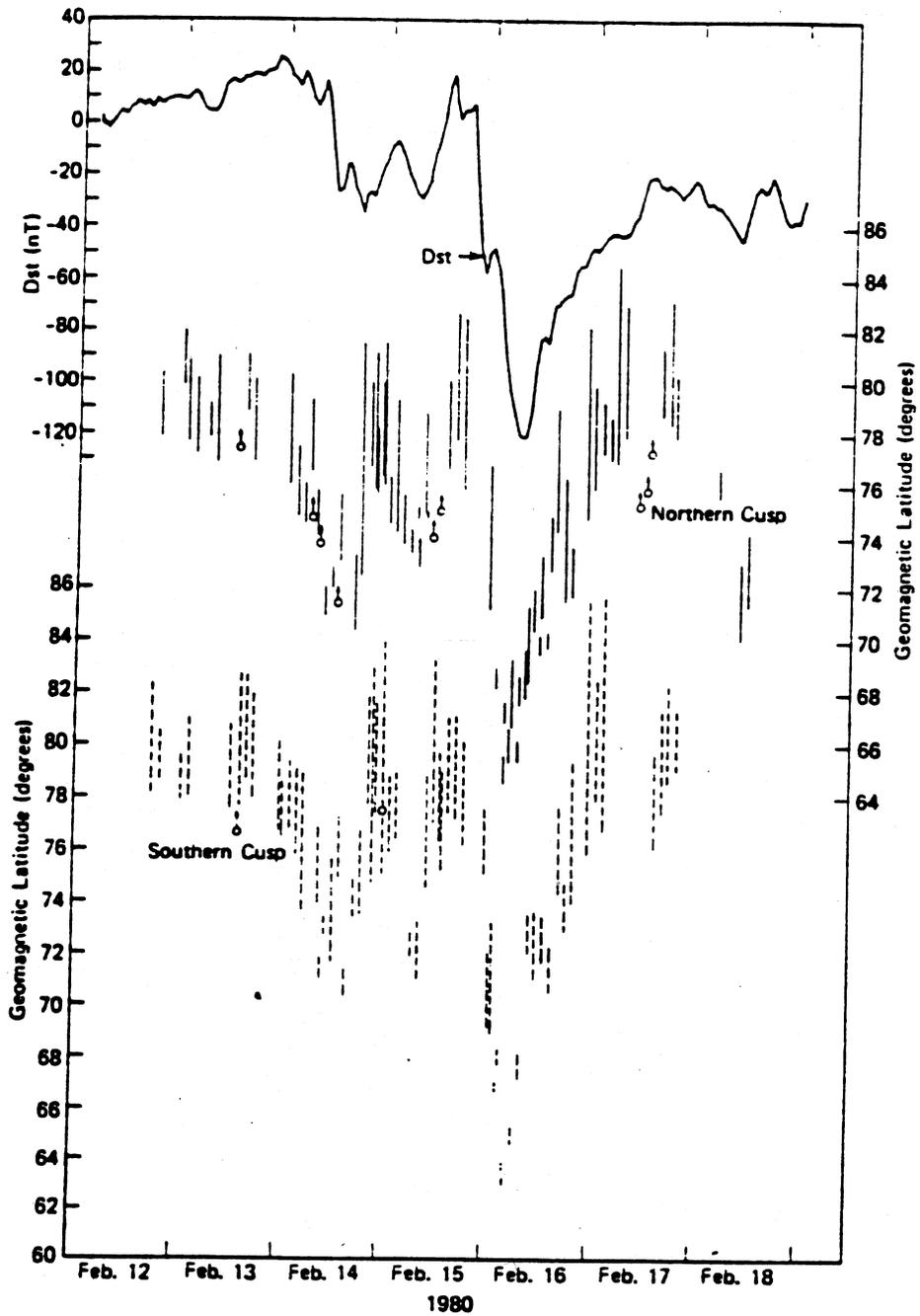


Fig. 19. Il movimento della cuspidi, la parte dell'ovale aurorale al tempo locale di mezzogiorno, coerentemente nei due emisferi ed in sincronismo con le variazioni di *Dst* (Meng, 1982).

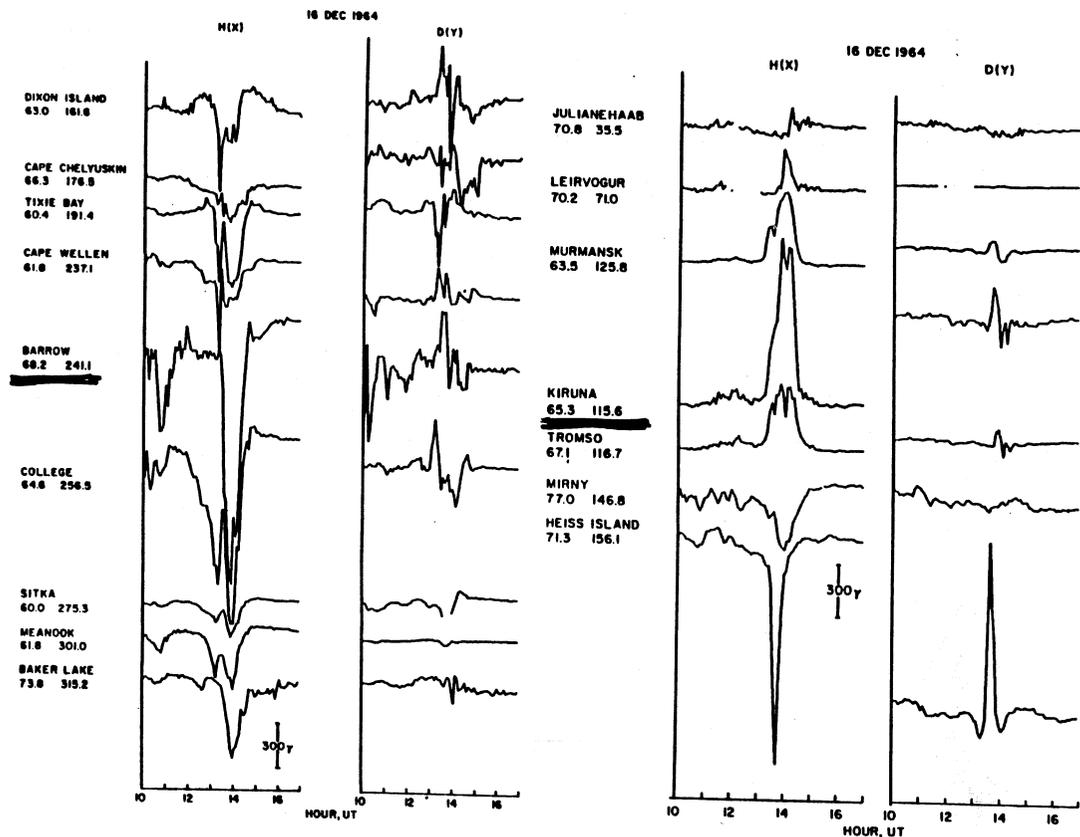


Fig. 20. Tracce del campo magnetico a terra in varie stazioni auroral in occasione di una sottotempesta magnetosferica (Akasofu, 1968).

vatori attorno alla Terra, i segnali avrebbero avuto le stesse caratteristiche ma sarebbero stati scambiati fra le varie stazioni; quindi il segnale disponibile a terra ad una certa località geografica per effetto di una certa sottotempesta magnetosferica è funzione anche del tempo locale al quale tale sottotempesta viene osservata.

Si vede dalle tracce che la stessa sottotempesta magnetosferica ha effetti diversi, ad un certo tempo locale, e cioè nel caso mostrato per una certa catena meridionale, alle varie latitudini; le deflessioni sono generalmente più intense alle elevate latitudini, che non a latitu-

dini medie o basse. Questo è l'effetto della distribuzione delle correnti ionosferiche, che sono quelle che hanno effetti più intensi a terra, data la vicinanza alle stazioni di misura; alle latitudini auroral la presenza dell'elettrogetto aurorale dà effetti più vistosi che a latitudini diverse. Anche il tipo di disturbo osservato alle medie e basse latitudini è diverso da quello che appare alle latitudini auroral. Ad esempio, a Kiruna, nel settore europeo si osserva un'intensa deflessione positiva di circa 1000 nT dovuta all'elettrogetto verso Est, mentre nel settore europeo alle medie latitudini si osservano ovunque baie negative. Invece nel set-

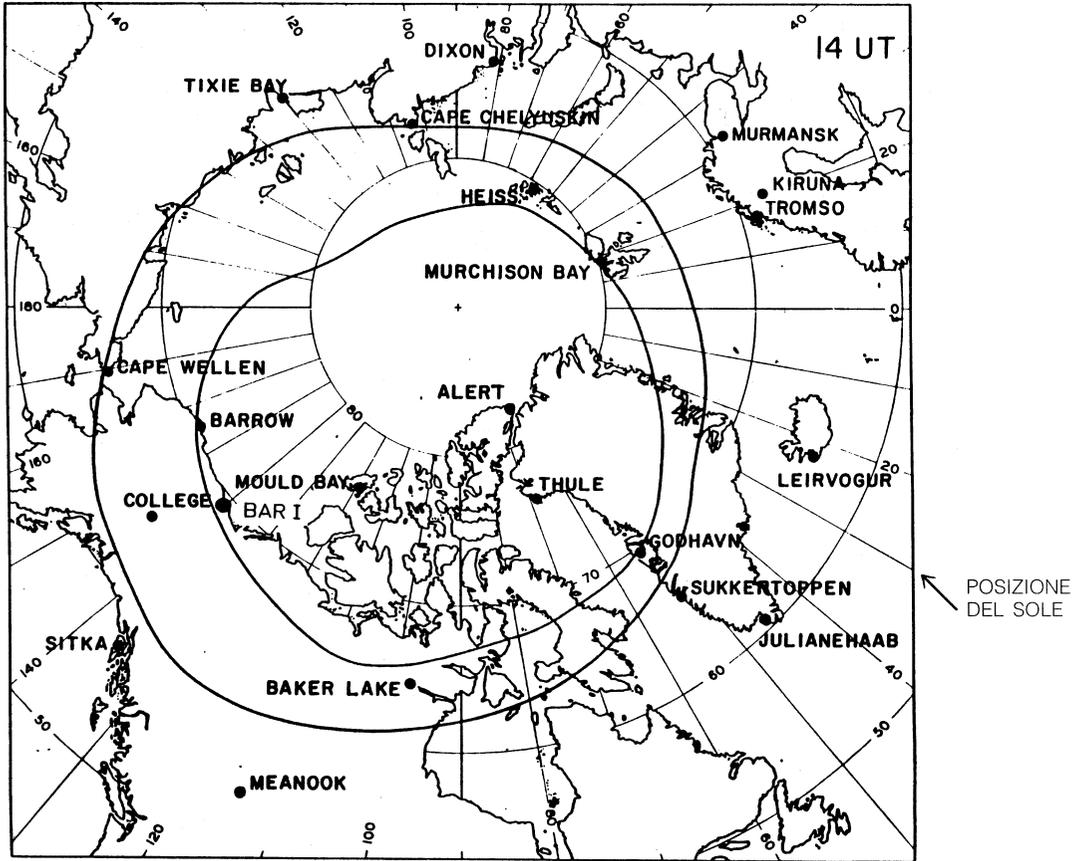


Fig. 21. La posizione delle stazioni aurorali settentrionali sotto l'ovale aurorale e rispetto alla posizione istantanea del Sole (Akasofu, 1968).

tore del Pacifico, il segnale a Barrow è molto intenso con circa 2000 nT e a Cape Wellen invece raggiunge solo i 300 nT; alle medie latitudini nel settore notturno si vedono strutture molto meno pronunciate che corrispondono però a baie positive, dovute all'effetto a terra del circuito di corrente allineata nella coda.

Per concludere vorrei accennare al problema della prevedibilità di eventi magnetosferici, che è particolarmente importante per chi voglia fare uso dei segnali magnetici associati a tali eventi per fini magnetotellurici. È noto che l'attività geomagnetica, essendo sollecitata dalle variazioni delle caratteristiche del vento

solare e del suo campo magnetico, è soggetta ad intensificazioni e depressioni legate al ciclo solare; questo va inteso solo in senso statistico, nel senso che la frequenza e l'intensità delle sottotempeste magnetosferiche hanno un andamento che segue il ciclo solare. Non esiste però una correlazione deterministica, né generalmente è prevedibile con esattezza quando e con quale intensità avverrà una tempesta magnetica. Ad esempio nella fig. 23 vediamo la traccia di AE durante la tempesta magnetosferica del 13 Marzo 1989.

L'attività magnetosferica durante questa tempesta è stata estrema (Allen *et al.*, 1989);

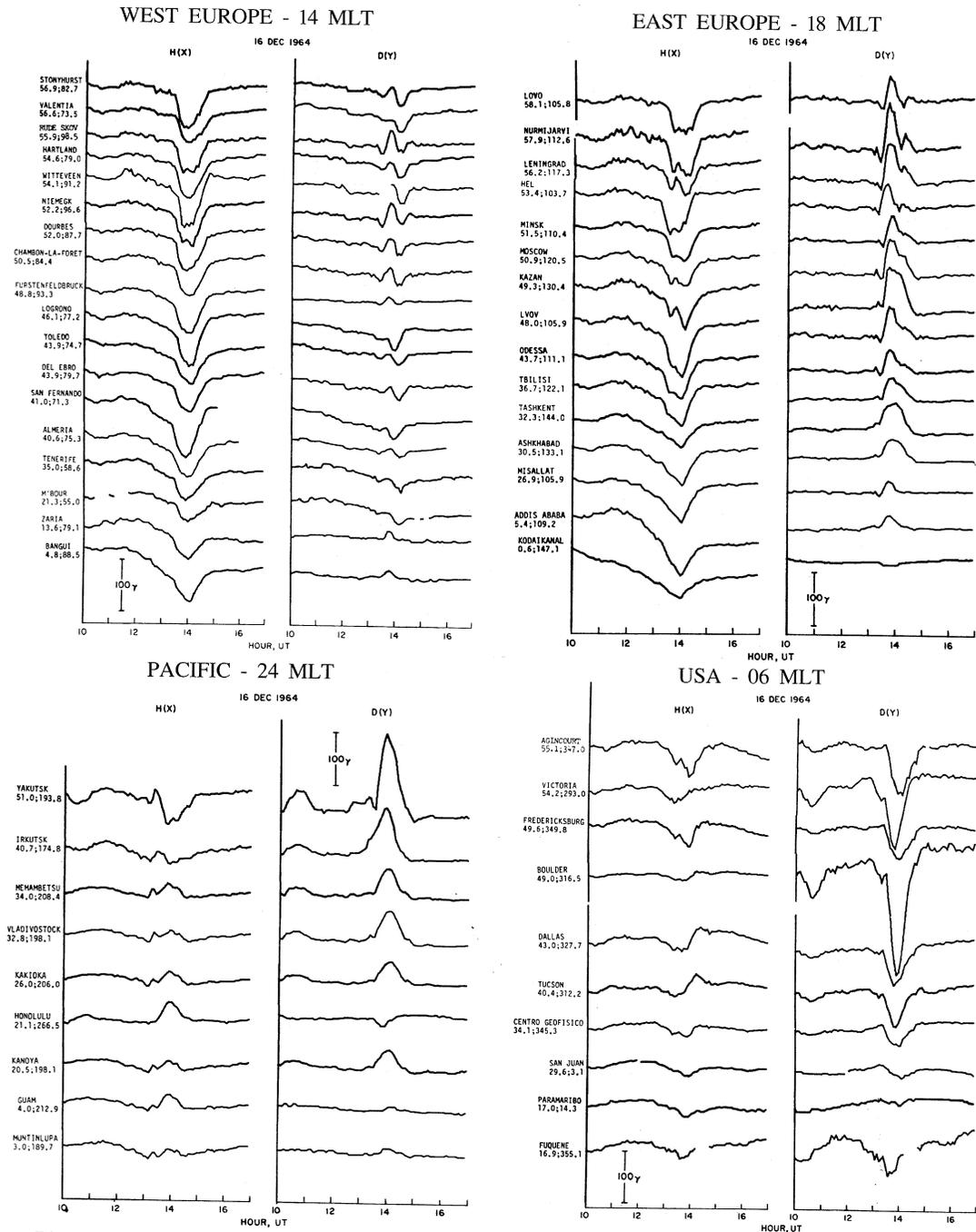


Fig. 22. Tracce del campo magnetico a terra lungo varie catene latitudinali a varie longitudini (e cioè tempi locali) per la stessa sottotempesta di fig. 20 (Akasofu, 1968).

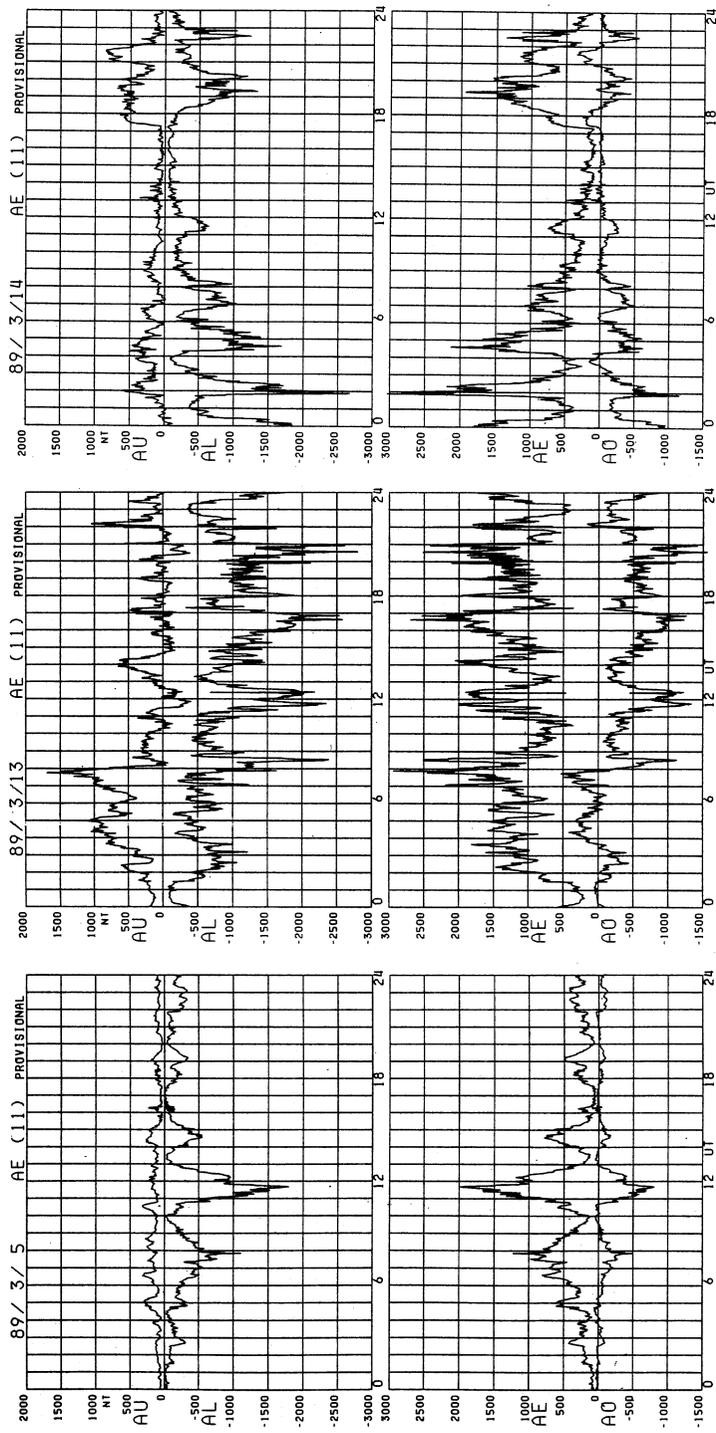


Fig. 23. L'indice aurorale AE in occasione dell'intensa sottotempesta del 5 Marzo 1989.

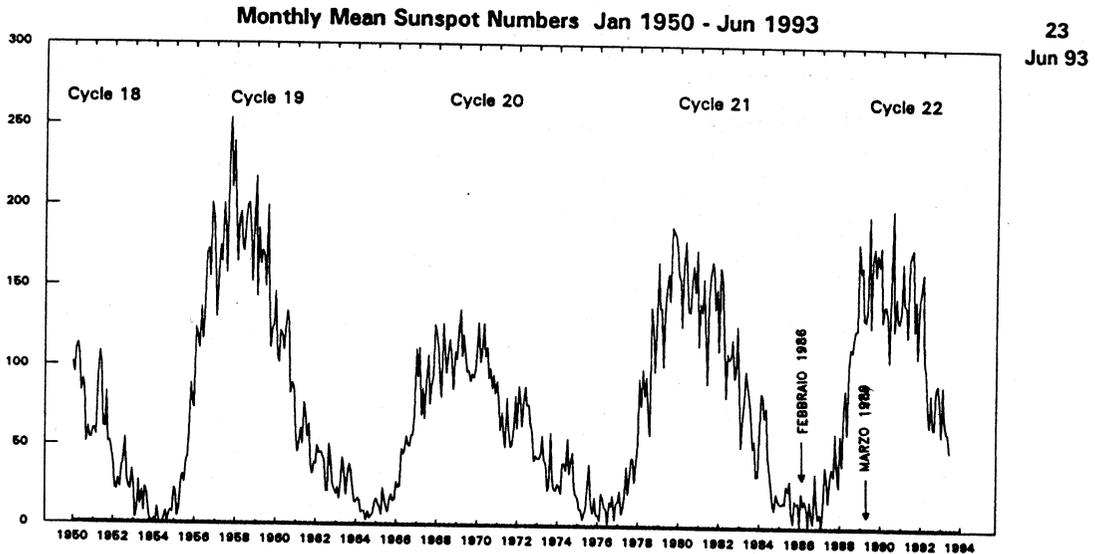


Fig. 24. Andamento temporale del numero di macchie solari per i cicli 21 e 22 (NOAA, 1990).

questo evento rappresenta uno dei più intensi mai registrati, con effetti globali sulla terra non osservati frequentemente; fenomeni aurorali furono osservati a latitudini molto basse, fino in Arizona (deve essere in occasione di tempeste magnetosferiche di intensità comparabile a questa che Aristotele nell'antica Grecia e Plinio il Vecchio nell'antica Roma hanno riportato notizia di osservazioni aurorali). Questa tempesta ha dato disturbi magnetici di ampiezza tale da mettere fuori uso la rete elettrica di distribuzione di energia nella regione del Quebec Canadese, dove le correnti indotte nelle linee ad alta tensione hanno fatto saltare vari trasformatori, lasciando tutti al buio per varie ore. Come vediamo in questo caso l'indice *AE* raggiunge valori di 3000 nT. Questa tempesta ebbe effetti straordinari anche alle medie latitudini; ad esempio la traccia registrata all'Aquila e riportata nella precedente fig. 13 mostra deflessioni di 600 nT rispetto ai 200 nT indicati dagli autori come valori usuali. Questa tempesta ha avuto luogo al massimo del ciclo 22 (con un numero di macchie solari

pari a 160 come mostra la fig. 24). Ciò quindi può essere considerato prevedibile in senso statistico.

D'altro canto, un altro esempio di forte attività è quello relativo alla fig. 25. Nel Febbraio del 1986, *AE* raggiunge valori estremamente intensi, più elevati di quelli già visti, fino a 5000 nT, anche se solo sporadicamente, ma comunque valori di 2500 nT come tipici, cioè valori tanto elevati quanto quelli visti prima; l'attività solare in quel periodo come di nuovo visibile in fig. 24 era invece al suo minimo con un numero di macchie solari di 15!

BIBLIOGRAFIA

- AKASOFU, S.I. (1968): *Polar and magnetospheric substorms* (Reidel Pub. Co.).
 AKASOFU, S.I. (1980): *Dynamics of the Magnetosphere*, Proc. vol. 78 (Reidel Pub. Co.).
 ALLEN, J.H., L. FRANK, H. SAUER e P. REIFF (1989): Effects of the March 1989 solar activity, *EOS*, **70**, 1479.
 CANDIDI, M. e C.I. MENG (1988): Low-altitude observations of the conjugate polar cusps, *J. Geophys. Res.*, **93**, 923.

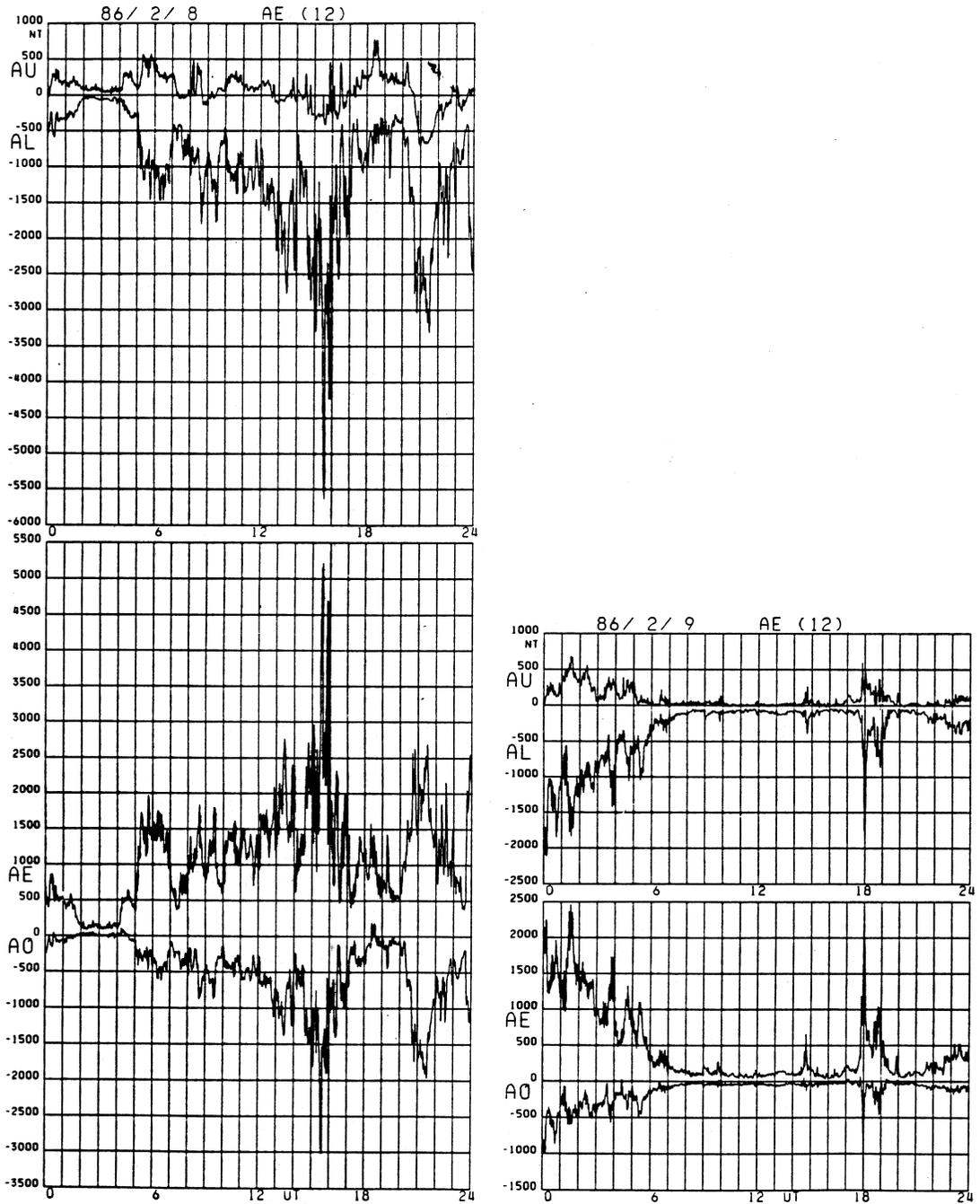


Fig. 25. L'indice AE per l'intensa sottotempesta dell'8 Febbraio 1986.

- CANDIDI, M., S. ORSINI, M. STOKHOLM e R. ELPHIC (1990): On the structure of the tail magnetic field, *J. Geophys. Res.*, **95**, 7929.
- HASEGAWA, A. e T. SATO (1979): Generation of field-aligned currents during substorms, in *Dynamics of the magnetosphere*, a cura di S.-I. AKASOFU (Reidel Pub. Co.), 529.
- KAMEI, T., M. SUGIURA e T. ARAKI (1990): *WDC C2 Data Books*, Kyoto University and National Institute of Polar Research, Tokyo.
- KAMIDE, Y. (1988): *Electrodynamic processes in the Earth's ionosphere and magnetosphere* (Kyoto Sangyo Univ. Press).
- LYONS, L.R. e D.J. WILLIAMS (1984): *Quantitative aspects of magnetospheric physics* (Reidel Pub. Co.).
- LUI, A.T.Y. (1991): A synthesis of magnetospheric sub-storm models, *J. Geophys. Res.*, **96**, 1846.
- MASTRANTONIO, G., M. CANDIDI e C.I. MENG (1993): Response of auroral regions to directional changes of the IMF: case study, *Il Nuovo Cimento* (in stampa).
- MENG, C.I. (1982): Latitudinal variation of the polar cusp during a geomagnetic storm, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 60.
- NISHIDA, A. (1982): *Magnetospheric plasma physics*, (Reidel Pub. Co.).
- NOAA (1990): *Solar Geophysical data*, Boulder, Co, USA.
- POTEMRA, T. (Ed.) (1984): Magnetospheric currents, *AGU Geophysical Monograph*, **28**.
- VILLANTE, U., M. VELLANTE, M. DE LAURETIS, A. MELONI e P. PALANGIO (1990): The strong geomagnetic storm of March 13, 1989: an analysis at a low latitude station, *Ann. Geophys.*, **8**, 337.
- YASUHARA, F., Y. KAMIDE e S.I. AKASOFU (1975): *Planet. Spa. Sci.* **23**, 575.