

# Vento solare e magnetosfera terrestre

Umberto Villante

*Dipartimento di Fisica, Università dell'Aquila, Italia*

## 1. Introduzione

Molto tempo prima che Parker proponesse il suo modello di espansione idrodinamica della corona solare (1958), che trovò chiara conferma nelle osservazioni sperimentali di vento solare effettuate dalle prime sonde interplanetarie, Chapman e Ferraro, nei loro monumentali lavori (1931), elaborarono di fatto una prima idea di magnetosfera terrestre proponendo che le variazioni impulsive del campo geomagnetico al suolo fossero la diretta conseguenza dell'arrivo di fasci di particelle cariche di origine solare. Il fascio di particelle doveva consistere di un ugual numero di particelle con opposta carica elettrica (e cioè costituire di fatto un plasma), con temperatura sufficientemente elevata da garantire una elevata conducibilità elettrica. In queste condizioni una corrente elettrica sarebbe stata indotta sulla superficie del fascio di particelle in modo da schermare l'interno del fascio dalla presenza del campo magnetico terrestre. D'altra parte l'interazione tra tale corrente ed il campo geomagnetico avrebbe modificato il moto del fascio di particelle giungendo a scavare attorno alla terra una cavità (fig. 1) cui sarebbe risultato inibito l'accesso di particelle di origine solare e nella quale l'intensità del campo magnetico sarebbe risultata amplificata per effetto delle correnti indotte nel fascio.

Le osservazioni sperimentali dirette, effettuate dalle prime sonde interplanetarie sul finire degli anni '50, mostrarono come le previsioni di Parker, relative ad una corona solare estesa a tutto lo spazio interplanetario, fossero essenzialmente esatte. Lo spazio interplaneta-

rio è infatti permeato con continuità da un plasma di origine coronale (essenzialmente composto da protoni, elettroni ed una modesta percentuale di particelle  $\alpha$ ) che all'altezza dell'orbita terrestre ha densità dell'ordine di  $3\text{-}20\text{ cm}^{-3}$ , e velocità dell'ordine di  $350\text{-}800\text{ km/s}$ . Tale plasma, in virtù della elevata conducibilità elettrica, «congela» il campo magnetico presente nelle regioni in cui ha origine trasportandolo a tutto lo spazio interplanetario.

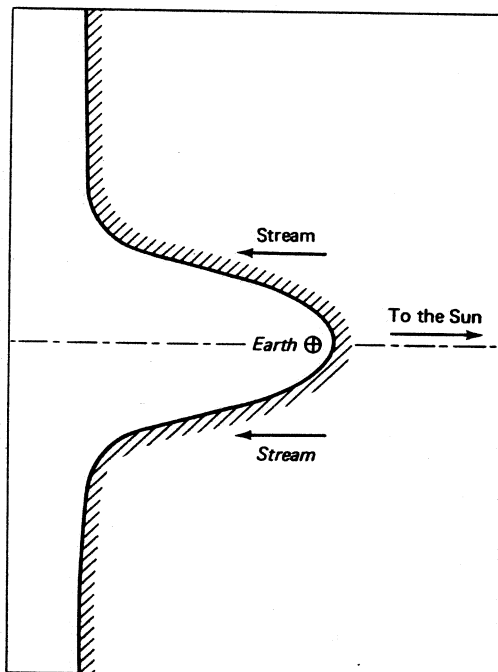
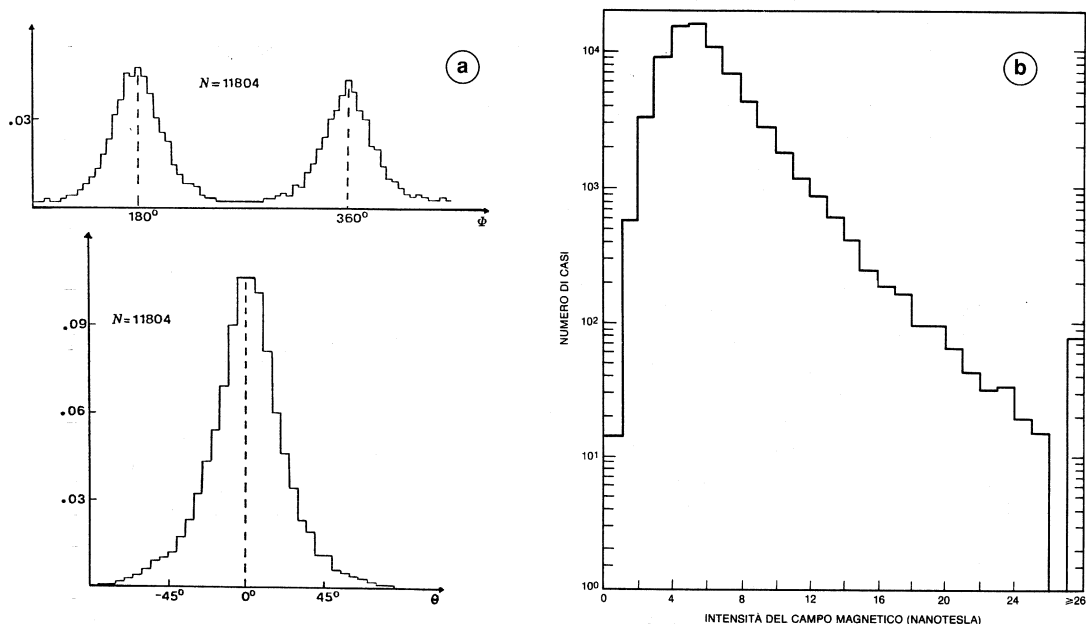


Fig. 1. Primo modello di magnetosfera di Chapman e Ferraro (Nishida, 1978).

L'effetto congiunto del moto radiale del vento solare e della corotazione solare avvolge le linee di forza del campo magnetico interplanetario lungo una spirale che, all'altezza dell'orbita terrestre, forma un angolo di circa  $45^\circ$  con la direzione radiale; il modulo di tale campo, sempre in prossimità della Terra, è tipicamente compreso, in condizioni normali, tra 3 e 15 nT con un valore medio dell'ordine di 6 nT (fig. 2). Densità particellare e campo magnetico interplanetario determinano la velocità, detta velocità di Alfvén, con cui si propagano le perturbazioni in tale fluido magnetoidrodinamico; tale velocità è dell'ordine di 40-50 km/s in condizioni ordinarie all'altezza dell'orbita terrestre.

L'intuizione di Chapman e Ferraro sulla interazione tra un gas di particelle cariche di origine solare ed il campo magnetico di un pianeta è alla base dell'odierno concetto di

magnetosfera planetaria, intesa, per l'appunto, come la regione di spazio nella quale il flusso continuo del vento solare confina il campo magnetico del pianeta modificandone profondamente la struttura. Una rappresentazione assai schematica della magnetosfera terrestre è presentata in fig. 3 in cui viene mostrata una sezione della magnetosfera nel piano perpendicolare al piano equatoriale nella situazione in cui l'asse del dipolo magnetico terrestre è assunto, per semplicità, perpendicolare alla linea Sole-Terra. Come si può vedere, in direzione solare il campo geomagnetico è confinato entro una cavità essenzialmente emisferica il cui punto subsolare è posto, in condizioni normali di vento solare, ad una distanza geocentrica dell'ordine di 10-11  $R_T$  (indicando con  $R_T$  il raggio terrestre), mentre in direzione antisolare le linee di forza del campo geomagnetico vanno a costituire una cavità grossolana-



**Fig. 2.** a) Un esempio della distribuzione degli elementi angolari del campo magnetico interplanetario nel sistema solare interno. I grafici indicano valori in percentuale sul tempo totale di circa 12 000 ore di osservazione (sonde Helios 1 e Helios 2).  $\Theta$ , l'angolo che il campo magnetico forma con l'equatore solare presenta un chiaro massimo attorno a  $0^\circ$ ;  $\Phi$ , l'angolo che la componente equatoriale del campo magnetico forma con la spirale teorica presenta due chiari picchi attorno a  $360^\circ$  (campo uscente dal Sole) e a  $180^\circ$  (campo orientato verso il Sole), (Villante *et al.*, 1982). b) Un esempio della distribuzione in intensità del campo magnetico interplanetario in prossimità dell'orbita terrestre (medie orarie), (Burlaga e King, 1979).

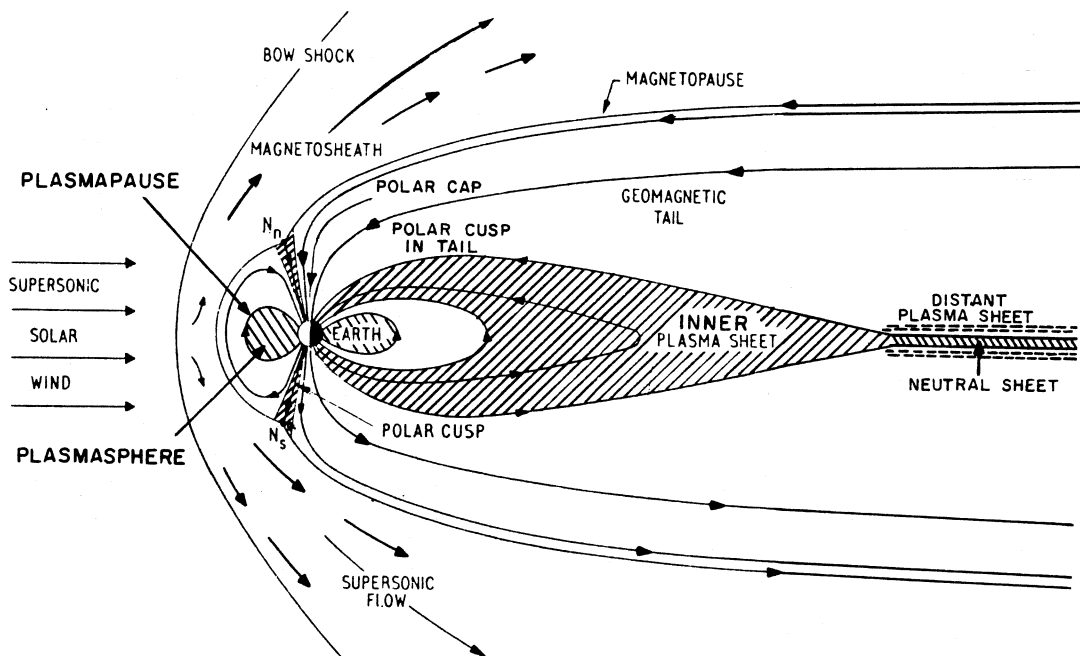


Fig. 3. Schematizzazione delle principali regioni della magnetosfera terrestre nel piano del meridiano di mezzogiorno (Patel, 1977).

mente cilindrica che si estende fino a distanze di diverse centinaia di  $R_t$  (coda geomagnetica).

La superficie ideale di separazione tra il vento solare ed il campo geomagnetico (*magnetopausa*) coincide di fatto con l'ultima linea di forza di origine geomagnetica; essa costituisce uno strato di corrente che scherma il campo geomagnetico dal flusso del vento solare e ne modifica la struttura. È peraltro evidente che, via via che ci si allontana da Terra in entrambe le direzioni, diventano progressivamente più significative le deviazioni del campo rispetto a quanto previsto dalla approssimazione di dipolo. In realtà la situazione reale della magnetosfera terrestre è estremamente più complessa di quanto schematizzato in fig. 3. Infatti una modesta, ma tuttavia importante, frazione di vento solare penetra profondamente all'interno della magnetosfera fino a quote dell'ordine del centinaio di km, mentre una modesta frazione di linee di campo geomagnetico, almeno in alcune situazioni

particolari, si interconnette con le linee del campo magnetico interplanetario. E sono questi aspetti di penetrazione di plasma all'interno della magnetosfera e di interconnessione di linee di forza che innescano e modulano la complessa dinamica dell'intera magnetosfera.

## 2. La magnetosfera «dayside»

In assenza del vento solare, il campo geomagnetico sarebbe rappresentabile, in prima approssimazione, anche a grande distanza geocentrica, in termini di un campo di dipolo con asse inclinato di circa  $11^\circ$  rispetto all'asse di rotazione terrestre e di momento equivalente  $M$  dell'ordine di  $7.9 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ . Detto  $\theta$  l'angolo di colatitudine geomagnetica (fig. 4), l'espressione delle linee di forza sarebbe quindi

$$r = r_0 \sin^2 \theta \quad (2.1)$$

in cui  $r_0$  è la distanza geocentrica del punto

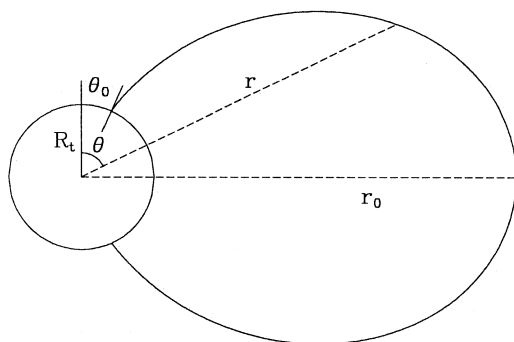


Fig. 4. Geometria di una linea di campo dipolare.

in cui la linea di forza interseca il piano equatoriale. Ad esempio, per la linea di forza passante per l'Osservatorio dell'Aquila ( $\theta \cong 47.5^\circ$ ), risulterebbe  $r_0 \cong 1.8$ . Linee di forza provenienti da colatitudini dell'ordine di  $10^\circ$  intersecherebbero invece il piano equatoriale a distanze geocentriche dell'ordine di  $33 R_t$  con una intensità di campo dell'ordine di  $0.8$  nT.

Da quanto esposto nella sezione precedente, si deduce invece che l'interazione con il vento solare provoca modificazioni di questa struttura dipolare che diventano via via più significative all'aumentare della distanza geocentrica. È ad esempio facile dedurre che la posizione del punto subsolare della magnetopausa viene a trovarsi, in prima approssimazione, nel punto in cui la pressione del campo magnetico  $B'$ , modificato dalla compressione del vento solare, risulta sufficientemente intensa da bilanciare la pressione dinamica legata al flusso del vento solare. Trascurando la presenza di plasma all'interno della magnetosfera e la presenza del campo magnetico interplanetario nella regione occupata dal vento solare (la pressione dinamica del vento solare è di gran lunga superiore alla pressione magnetica e di norma supera anche la pressione termica di almeno un ordine di grandezza), il bilancio di pressione lungo la magnetopausa può essere espresso dalla relazione

$$\frac{B'^2}{2\mu_0} = knmv^2 \cos^2 \psi \quad (2.2)$$

in cui  $n$ , e  $v$  rappresentano la densità particellare e la velocità del vento solare (con  $m$  pari alla massa del protone),  $k$  è un fattore (spesso approssimato, per analogie fluidodinamiche, con  $0.8$ ) che dipende sia dal numero di Mach (cioè dal rapporto tra la velocità del vento solare e la velocità di Alfvén), sia dal rapporto dei calori specifici,  $\psi$  è l'angolo tra la direzione del vento solare e la normale alla magnetopausa. Per quanto riguarda il campo magnetico  $B'$ , in questo ordine di approssimazione esso nel punto subsolare viene tipicamente considerato raddoppiato rispetto al campo di dipolo, come risulterebbe se la magnetopausa potesse essere approssimata con uno strato di corrente piano disposto perpendicolarmente alla linea Sole-Terra. È quindi possibile in questo caso legare la posizione del punto subsolare della magnetopausa alla intensità del momento del dipolo terrestre mediante la relazione

$$r_m = \left( \frac{\mu_0 M^2}{8\pi k n m v^2} \right)^{1/6} \quad (2.3)$$

che, per condizioni normali del vento solare incidente ( $n = 5 \text{ cm}^{-3}$ ,  $v = 400 \text{ km/s}$ ,  $k = 0.8$ ), porta a prevedere per il punto subsolare una distanza geocentrica dell'ordine di  $10 R_t$ .

In realtà per valutare in maniera più dettagliata la forma della magnetopausa ed il campo all'interno della magnetosfera è necessario sviluppare un algoritmo più complesso che tenga conto del campo magnetico prodotto dalla corrente che fluisce nella magnetopausa. I risultati di tali modelli forniscono un profilo globale della magnetopausa (fig. 5) che si è rivelato in ottimo accordo con le osservazioni sperimentali legate agli attraversamenti di magnetopausa effettuati dalle sonde interplanetarie ed in particolare portano a prevedere, rispetto alle più semplici valutazioni precedenti, un punto subsolare posto in  $1.07 r_m$ . In questo ambito è importante notare come sia esplicitamente prevista negli opposti emisferi la formazione di cuspidi dalle quali emergono le linee di forza che vanno a distribuirsi lungo la magnetopausa nelle opposte direzioni. Si noti in particolare come alcune linee di forza che in assenza della magnetopausa si chiuderebbero nella regione di magnetosfera rivolta verso

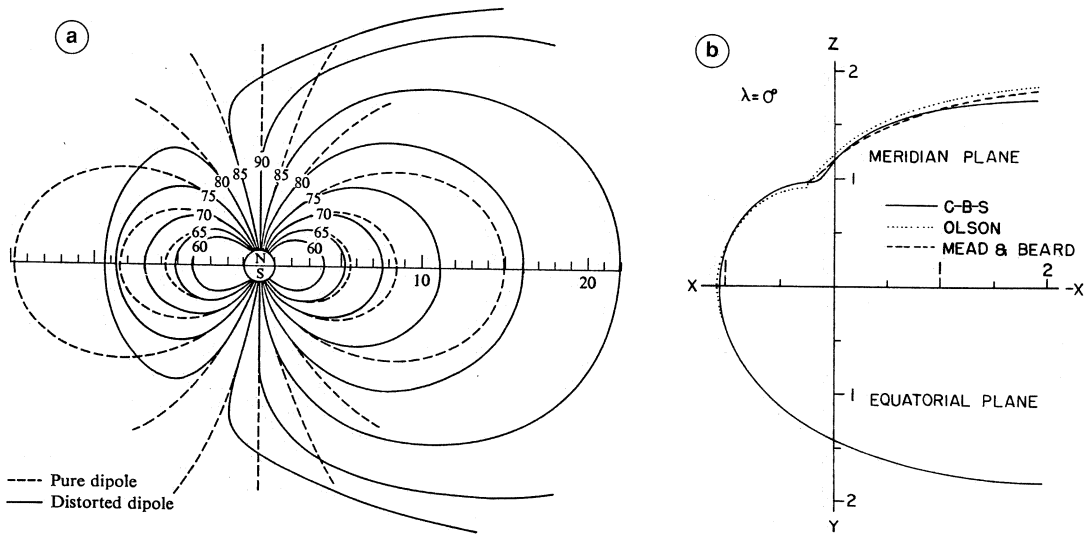


Fig. 5. a) La configurazione prevista per le linee di forza del campo della magnetosfera nel piano del meridiano di mezzogiorno. Il punto subsolare della magnetopausa è supposto a  $10 R_e$  (Mead, 1964). b) Sezione meridiana (semipiano superiore) ed equatoriale (semipiano inferiore) della magnetopausa teorica per un vento solare perpendicolare al dipolo magnetico (Beard e Choe, 1974).

il sole (dayside) vengano trasferite nella regione nightside della magnetosfera. La posizione prevista per le cuspidi è fortemente dipendente dall'angolo di incidenza del vento solare. Poiché l'asse di dipolo è orientato di  $\sim 11^\circ$  rispetto all'asse di rotazione terrestre, e quest'ultimo è inclinato di  $\sim 23^\circ$  rispetto al piano dell'eclittica, l'angolo  $\lambda$  tra la direzione del vento solare e l'asse di dipolo può in generale variare tra  $\sim 56^\circ$  e  $\sim 124^\circ$ . La posizione delle cuspidi è corrispondentemente prevista variare tra angoli di colatitudine compresi tra  $12^\circ$  e  $28^\circ$ .

L'intera magnetosfera costituisce peraltro un ostacolo per il flusso supersonico e superalfvénico del vento solare: ciò comporta la formazione, a monte della magnetopausa, di un *fronte d'urto* magnetoidrodinamico (fig. 3) il cui punto subsolare è previsto, sulla base di analogie fluidodinamiche (peraltro in ottimo accordo con le osservazioni sperimentali), a distanze geocentriche dell'ordine di  $1.3 r_m$ . I processi di termalizzazione che avvengono al fronte d'urto generano tra lo stesso fronte d'urto e la magnetopausa una *zona di transi-*

zione caratterizzata da un plasma ed un campo magnetico assai più turbolenti che nello spazio interplanetario.

Un aspetto estremamente importante per quanto concerne l'origine delle perturbazioni e delle oscillazioni del campo magnetico misurate sia all'interno della magnetosfera sia a Terra (soprattutto in riferimento all'origine delle *micropulsazioni geomagnetiche*, Vellante, questo volume) è rappresentato dall'esistenza, a monte del fronte d'urto, di una regione, nota come *foreshock region*, magneticamente connessa con il fronte d'urto, popolata da particelle riflesse dallo stesso fronte d'urto e propagantisi lungo le linee di forza del campo magnetico interplanetario. Tali particelle, interagendo con il vento solare, danno origine ad un'ampia varietà di fenomeni fisici che alterano le proprietà del vento solare in prossimità della magnetosfera terrestre provocando, in particolare, l'insorgere di vari modi di oscillazione (Tsurutani e Rodriguez, 1981). L'orientazione a spirale del campo magnetico interplanetario fa sì che di norma la *foreshock region* sia essenzialmente situata nella regione

di spazio che si estende ad est del punto sub-solare del fronte d'urto (fig. 6).

### 3. Sistemi di coordinate magnetosferici

Negli studi di fisica della magnetosfera si adottano diversi sistemi di coordinate (fig. 7).

Il sistema di coordinate *solare eclittico* (SE) è composto da un asse  $X_{se}$  rivolto verso il Sole, un asse  $Z_{se}$  perpendicolare al piano dell'eclittica ed orientato verso Nord, ed un asse  $Y_{se}$  che completa la terna ed è opposto alla direzione del moto di rivoluzione della Terra.

Nel sistema di coordinate *solare magnetosferico* (SM), l'asse  $X_{sm}$  coincide con l'asse  $X_{se}$ , l'asse  $Z_{sm}$  giace nel piano individuato da  $X_{sm}$  e dall'asse del dipolo geomagnetico e l'asse  $Y_{sm}$  di conseguenza.

Nel sistema di coordinate *solare magnetico* (MG),  $Z_{mg}$  coincide con l'asse del dipolo,  $Y_{mg}$  coincide con  $Y_{sm}$ , mentre l'asse  $X_{mg}$  giace nel piano individuato dalla linea Terra-Sole e dall'asse di dipolo.

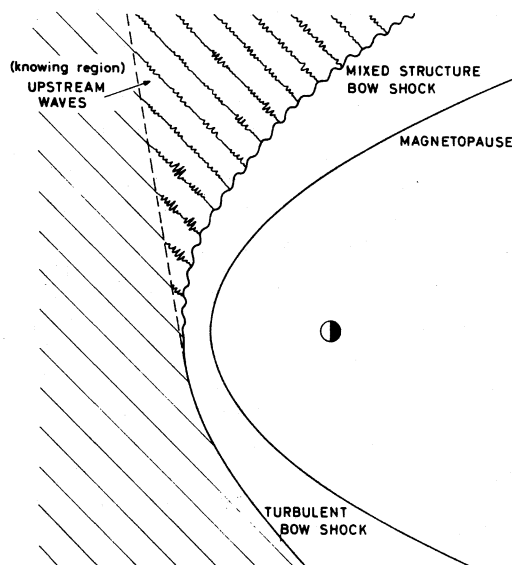


Fig. 6. Schematizzazione della foreshock region nel piano dell'eclittica nel caso di un campo magnetico interplanetario diretto lungo la spirale di Parker (Dobrowolny e Formisano, 1973).

Per studi relativi alle fasce di radiazione è particolarmente utilizzato il sistema di coordinate  $B$ - $L$  o di *Mc Ilwain* i cui parametri sono l'intensità del campo magnetico e l'integrale invariante

$$I = \int_a^{a'} (1 - B_1/B)^{1/2} ds \quad (3.1)$$

in cui l'integrale è calcolato lungo due punti coniugati di una linea di forza del campo geomagnetico,  $B$  è l'intensità del campo nel punto  $a$ ,  $B_1$  è l'intensità del campo lungo la linea di forza. Sulla base di tale invariante, Mc Ilwain introdusse per il campo reale un parametro  $L$  che è funzione di  $I$  e di  $B$  e che per il caso di un campo semplicemente dipolare coincide con  $r_0$ , nel senso che fornisce la distanza (in raggi terrestri) dell'intersezione della linea di forza con il piano equatoriale. Ad esempio, per l'Osservatorio di L'Aquila si ha  $L \cong 1.6$ . Il parametro  $L$  individua di fatto un'intera shell di linee di forza del campo geomagnetico. Noto  $L$ , si definisce inoltre *latitudine invariante* la grandezza  $\Lambda$  definita mediante la relazione  $\cos^2 \Lambda = 1/L$ .

### 4. Perturbazioni SI ed SSC

Si definisce perturbazione di tipo SI (sudden impulse) del campo geomagnetico una variazione di tipo impulsivo che viene registrata su tutta la Terra entro ritardi temporali variabili ma in genere contenuti entro il minuto. Tale perturbazione (che rappresenta solo uno degli aspetti dell'attività magnetosferica per i quali rinviamo alle rassegne di De Santis e di Candidi contenute in questo volume) è caratterizzata soprattutto da una esplicita variazione (positiva o negativa) della componente  $H$  del campo geomagnetico sebbene siano presenti altri aspetti fenomenologici aggiuntivi che dipendono dalla posizione del luogo di osservazione; in genere comunque, l'ampiezza di un SI raramente supera i 50 nT. Quando seguito da un periodo di intensa attività geomagnetica (che può prolungarsi per uno o due giorni) il fenomeno viene in genere catalogato come

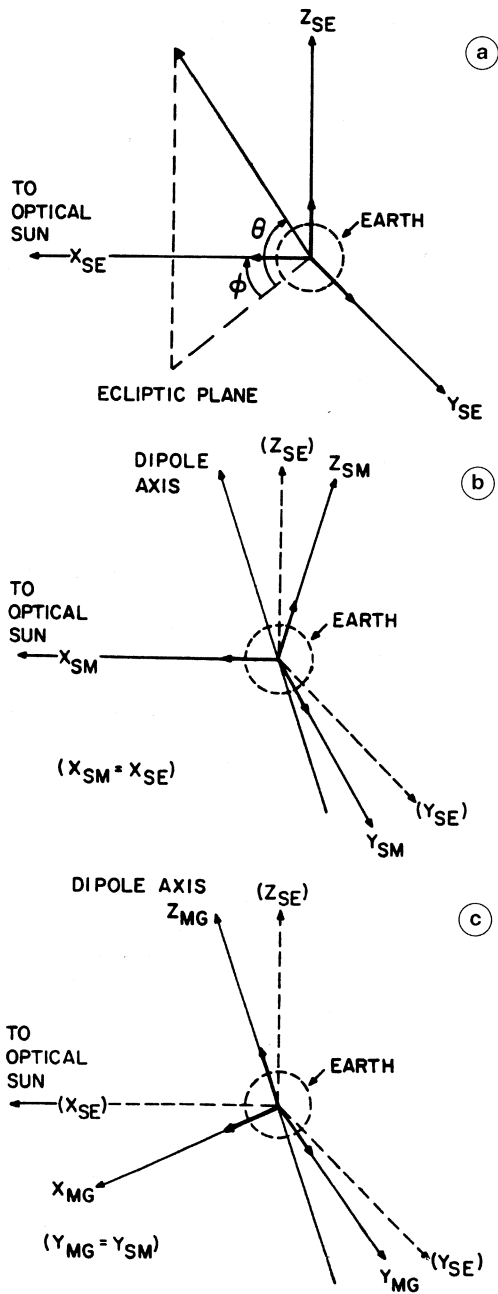


Fig. 7. a) Sistema di coordinate solare-eclittico (SE); b) sistema di coordinate solare-magnetosferico (SM); c) sistema di coordinate solare-magnetico (MG), (Patel, 1977).

SSC (storm sudden commencement, De Santis, questo volume).

Come intuito da Chapman e Ferraro, la fenomenologia degli eventi di tipo SI trova una prima e semplice interpretazione nei processi di interazione tra vento solare e campo geomagnetico. Infatti, sulla base delle semplici considerazioni svolte precedentemente, è facile prevedere come le variazioni di pressione dinamica del vento solare possano provocare variazioni di dimensioni e di struttura della magnetosfera terrestre. Ad esempio dalle relazioni (2.2), (2.3), raddoppiando sia la densità sia la velocità del vento solare, si otterrebbe un arretramento del punto subsolare della magnetopausa a distanze geocentriche dell'ordine di  $8 R_e$ , ed una conseguente compressione dell'intera magnetosfera dayside. L'arretramento del punto subsolare comporta di per se stesso una variazione del campo geomagnetico misurato al suolo: infatti si può prevedere che le variazioni del campo geomagnetico a terra nel punto subsolare rispetto a quanto previsto per il campo di dipolo siano dell'ordine di 10 nT per un vento solare con densità e velocità rispettivamente di  $5 \text{ cm}^{-3}$  e 300 km/s e dell'ordine di 40 nT per un vento solare con densità e velocità di  $15 \text{ cm}^{-3}$  e di 600 km/s. L'esempio di fig. 8 mostra la stretta correlazione esistente tra le variazioni di flusso del vento solare e le perturbazioni osservate al suolo a basse latitudini geomagnetiche. In realtà, le perturbazioni legate alle variazioni di flusso del vento solare si propagano come segnali idromagnetici tra la magnetopausa ed il suolo (fig. 9): i modelli di propagazione forniscono previsioni di ritardi temporali tra le variazioni di pressione del vento solare e il manifestarsi di una perturbazione del campo geomagnetico che risultano in buon accordo con le osservazioni effettuate a terra.

## 5. La coda geomagnetica

Come mostrato nella schematica illustrazione di fig. 3, in direzione antisolare le linee di forza del campo geomagnetico risultano in realtà assai più estese di quanto previsto per effetto delle correnti della magnetopausa. In

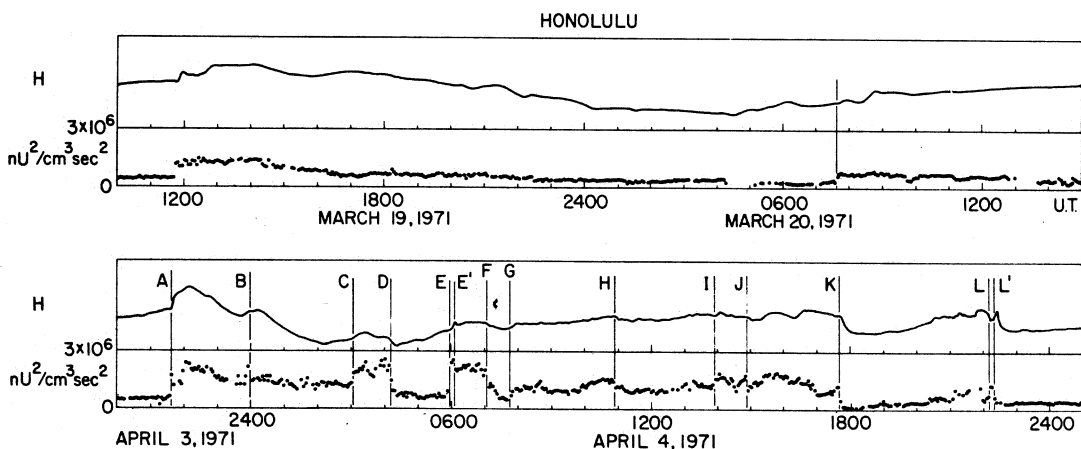


Fig. 8. Un esempio di correlazione tra variazioni dei parametri del vento solare e perturbazioni magnetiche osservate al suolo (Ogilvie e Burlaga, 1974).

effetti è oggi ben noto che esse risultano allungate a formare la coda geomagnetica, strutturata a sua volta in due cavità semicilindriche permeate da linee di campo di opposta orientazione (verso Terra nell'emisfero nord). A distanze geocentriche dell'ordine di  $(60-80 R_E)$ , la coda geomagnetica ha un diametro di circa  $50-60 R_E$ ; in conseguenza del moto di rivoluzione della Terra l'intera geometria presenta una aberrazione di  $4-5^\circ$  rispetto alla direzione Sole-Terra. Le osservazioni effettuate dalla sonda ISEE-3 hanno inoltre mostrato come la coda preservi una struttura piuttosto regolare almeno fino a distanze di  $240 R_E$  in direzione antisolare. Chiara evidenza per fenomeni lega-

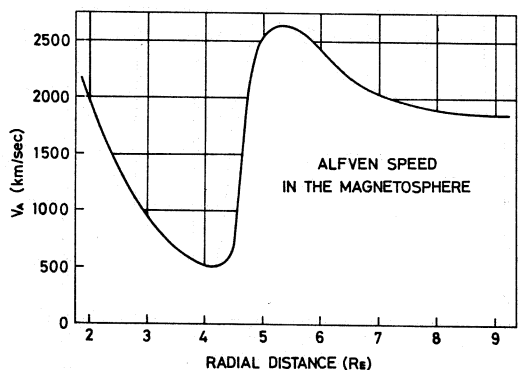


Fig. 9. Profilo radiale della velocità di Alfvén nella magnetosfera diurna (Nishida, 1978).

ti alla interazione tra vento solare e campo geomagnetico è stata peraltro notata anche a distanze geocentriche notevolmente superiori (fino a  $\approx 3000 R_E$ ); tuttavia l'intermittenza delle osservazioni ed il carattere episodico dei passaggi delle sonde in tali regioni non hanno consentito di chiarire in maniera definitiva se a tali distanze sia ancora lecito parlare di coda geomagnetica con il significato che a tale termine si attribuisce a minori distanze geocentriche.

Sebbene le linee di campo magnetico che formano la coda geomagnetica abbiano origine dal campo magnetico terrestre, esse in effetti conservano ben poca memoria della struttura di campo dipolare. Il campo magnetico della coda è infatti generato da correnti che fluiscono attraverso la coda geomagnetica e che si chiudono sulla superficie stessa della coda (fig. 10). L'origine fisica della coda geomagnetica è da imputare ad un fenomeno di trascinarsi delle linee di campo geomagnetico da parte del vento solare con conseguente trasferimento di momento dal vento solare alla magnetosfera. Il piano di separazione tra gli opposti emisferi della coda è impropriamente definito *strato neutro* in quanto in esso è presente una componente di riconnessione tra le linee di campo di opposta polarità (fig. 3). Come per la magnetosfera dayside, anche nella coda geomagnetica le linee di forza che si allungano sulla magnetopausa emergono dalle



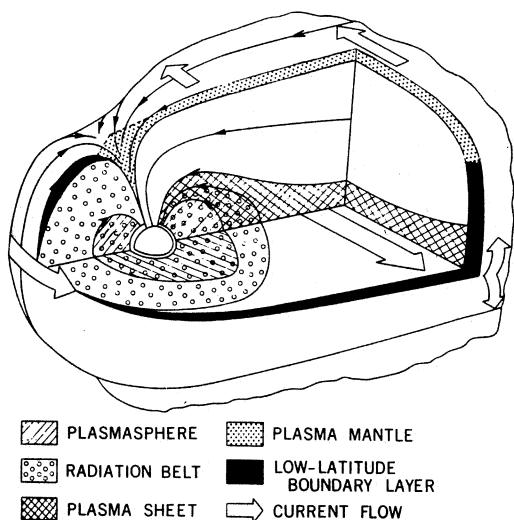


Fig. 10. Schematizzazione della struttura interna della magnetosfera (Nishida, 1982).

regioni precedentemente identificate come cuspidi polari.

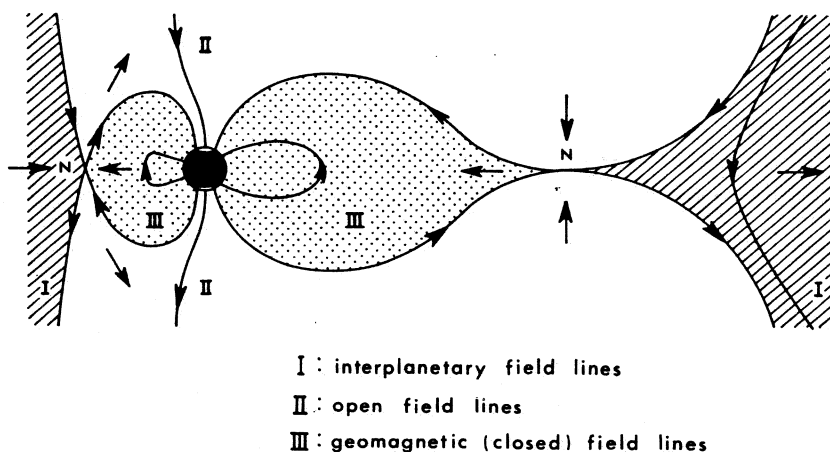
## 6. Popolazioni di plasma

La magnetosfera terrestre è popolata da diverse popolazioni di plasma che presentano

diverse caratteristiche sia per quanto riguarda la distribuzione spaziale sia per lo spettro energetico. Le principali caratteristiche di tali popolazioni sono le seguenti (fig. 10).

a) *Plasmasfera* - È una regione occupata da una popolazione di plasma con energie tipicamente inferiori a 20 eV che si estende al di sopra della ionosfera fino a distanze geocentriche di qualche  $R_e$ . Il suo confine, *plasmopause*, è tipicamente situato a distanze geocentriche equatoriali prossime a 4-5  $R_e$ , sebbene siano assai frequenti variazioni di posizione anche significative. Attraverso la plasmopause la densità del plasma varia assai rapidamente da densità anche dell'ordine di  $1000 \text{ cm}^{-3}$  a densità dell'ordine di  $10 \text{ cm}^{-3}$  (vedi fig. 4b nella relazione di Vellante, a pag. 84). Il plasma costituente la plasmasfera è principalmente composto di protoni ed elettroni sebbene siano presenti modeste frazioni di ioni di altri elementi quali l'elio e l'ossigeno.

b) *Fasce di radiazione* - Le fasce di radiazione costituiscono una popolazione di particelle energetiche (elettroni, protoni ed altri ioni atomici), intrappolate lungo le linee di forza del campo geomagnetico, che oscillano tra due punti speculari negli opposti emisferi. L'energia di tali particelle è di norma superiore ai 30



I : interplanetary field lines  
 II : open field lines  
 III : geomagnetic (closed) field lines

Fig. 11. Modello di magnetosfera aperta: flussi di plasma e topologia del campo magnetico nel piano del meridiano di mezzogiorno (Nishida, 1978).

keV. Le fasce hanno forma toroidale con asse di rotazione di fatto coincidente con l'asse del dipolo magnetico. In linea di principio ciascuna particella, indipendentemente dalle altre, si muove, con energia cinetica costante, di moto elicoidale attorno alle linee di campo. L'elica lentamente deriva in longitudine, verso Ovest, per particelle di carica positiva, verso Est per particelle di carica negativa. I tempi caratteristici con cui avvengono i vari moti sono dell'ordine del millisecondo (per il moto di girazione attorno alle linee di forza), del secondo (per la riflessione tra opposti emisferi), dell'ora (per la deriva longitudinale). Nella magnetosfera terrestre si distinguono due diverse fasce, di fatto largamente sovrapposte. La fascia più interna si estende, nel piano equatoriale, da circa  $1.2 R_E$  fino a qualche  $R_E$ ; le particelle che la costituiscono derivano essenzialmente dal decadimento di neutroni prodotti da raggi cosmici e da particelle energetiche solari nell'interazione con l'atmosfera terrestre. La fascia più esterna, che si estende per diversi  $R_E$ , ha origine essenzialmente da particelle del vento solare e della ionosfera terrestre. Ordini di grandezza dei flussi omnidirezionali sono  $J \cong 2 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  per protoni con energia  $E > 30 \text{ MeV}$  (fascia interna),  $J \cong 3 \times 10^8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  per protoni con  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ,  $J \cong 2 \times 10^8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  per elettroni con  $E > 0.04 \text{ MeV}$ ,  $J \cong 10^8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  per elettroni con  $E > 1.6 \text{ MeV}$  per le regioni più interne della fascia esterna. Le fasce di radiazione costituiscono in generale una riserva di energia assai significativa per la magnetosfera terrestre ( $10^{15}$ - $10^{18}$  J). Il moto delle particelle intrappolate costituisce una corrente ad anello che circonda la Terra ed è responsabile di depressioni del campo geomagnetico che interessano l'intera superficie terrestre. In periodi di particolare intensità di radiazione, i sistemi di correnti associati con la radiazione intrappolata possono causare variazioni del campo geomagnetico al suolo con intensità di diverse centinaia di nT.

c) *Strato di plasma* - Occupa la regione centrale della coda geomagnetica circondando lo strato neutro ed è costituito da una popolazione di plasma che ha essenzialmente energie intermedie tra quelle della plasmasfera e quel-

le delle fasce di radiazione (0.1-10 keV) e densità dell'ordine di  $0.1 \text{ cm}^{-3}$ . Come le fasce di radiazione, anche lo strato di plasma costituisce un'importante riserva di energia per la coda geomagnetica. Dallo strato di plasma hanno origine elettroni aurorali che precipitando nell'atmosfera terrestre con energie dell'ordine del keV eccitano la tipica emissione aurorale (fig. 11).

d) *Mantello* - È un sottile strato di plasma con energie confrontabili con quelle del vento solare che fluisce nelle regioni ad alta latitudine lungo le linee di forza interne alla coda geomagnetica. Plasma con energie simili a quelle del vento solare occupa anche le regioni immediatamente interne la magnetopausa dayside ed è specificamente identificato come strato di plasma a basse latitudini.

#### BIBLIOGRAFIA

- BEARD, D.B. e J.Y. CHOE (1974): The magnetospheric boundary, in *Correlated Interplanetary and Magnetospheric Observations* (Reidel Pub. Co.).
- BURLAGA, L.F. e J.H. KING (1979): Intense interplanetary magnetic fields observed by geocentric spacecraft during 1963-1975, *J. Geophys. Res.*, **84**, 6633.
- CHAPMAN, S. e V.C.A. FERRARO (1931): A new theory of magnetic storms, *Terr. Magn. Atm. Elect.*, **36**, 77.
- DOBROWOLNY, M. e V. FORMISANO (1973): The structure of the earth's bow shock, *Rivista del Nuovo Cimento*, **3**, 420.
- LYONS, L.R. e D.J. WILLIAMS (1984): *Quantitative Aspects of Magnetospheric Physics* (Reidel Pub. Co.).
- MEAD, G.D. (1964): Deformation of the geomagnetic field by the solar wind, *J. Geophys. Res.*, **69**, 1181.
- NISHIDA, A. (1978): *Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere* (Springer-Verlag).
- NISHIDA, A. (1982): *Magnetospheric Plasma Physics* (Reidel Pub. Co.).
- OGLIVIE, K.W. e L.F. BURLAGA (1974): *J. Geophys. Res.*, **79**, 2324.
- PATEL, V.R. (1977): Solar-terrestrial physics, in *Illustrated Glossary for Solar and Solar-Terrestrial Physics* (Reidel Pub. Co.).
- SCHULZ, M. (1991): The magnetosphere, in *Geomagnetism*, a cura di J.A. JACOBS (Academic Press), vol. 4.
- TSURUTANI, B.T. e P. RODRIGUEZ (1981): Upstream waves and particles: an overview of ISEE results, *J. Geophys. Res.*, **86**, 4319.
- VILLANTE, U., F. MARIANI e R. CIRONE (1982): Helios 1 + Helios 2 : a summary of IMF observations performed during 1975-1981 in the inner solar system, *Il Nuovo Cimento*, **5**, 497.