101° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica
Roma, 21-25 Settembre 2015

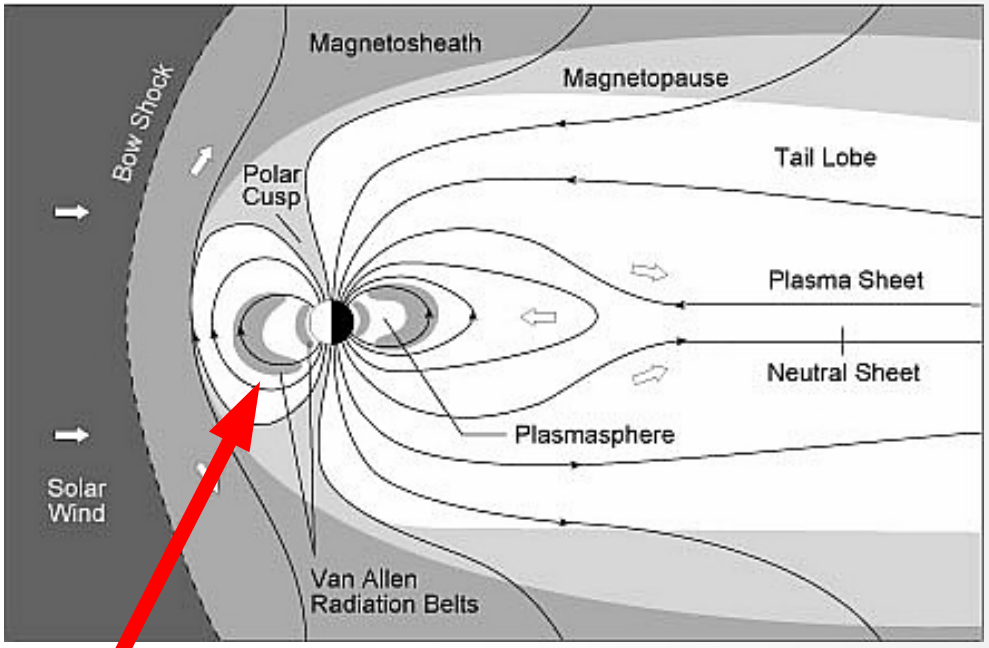
Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

Dr. **Mauro Regi**,
Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche,
Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila.

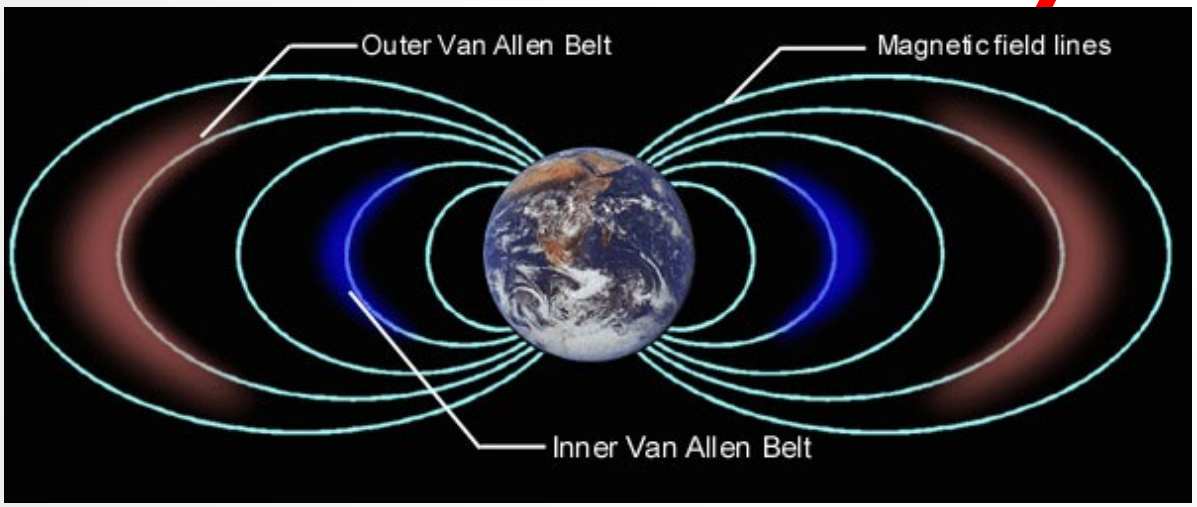
Il vento solare, la magnetosfera terrestre e le fasce di radiazione

Il vento solare ed il campo magnetico terrestre

- È ben noto che il Sole emette con continuità plasma ad elevata conducibilità (**vento solare**).
- Il campo magnetico terrestre di origine interna (nucleo) viene confinato (teorema di Alfvèn) in una regione detta **magnetosfera terrestre**.



Le fasce di radiazione



Le particelle cariche elettroni e ioni (essenzialmente protoni) popolano due regioni dette fasce di radiazione:

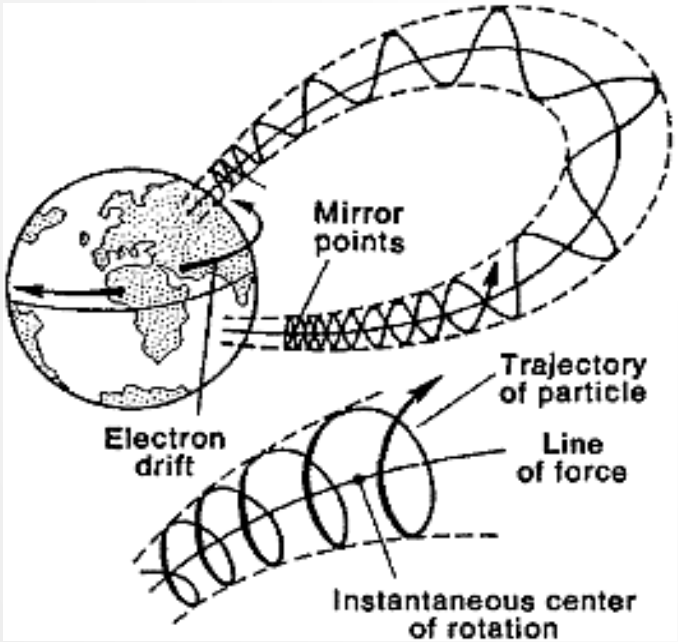
- **elettroni** di energie E>0.5 MeV popolano la più esterna fra i ~4-7 Re
- **protoni** di energia E>10 MeV popolano la fascia interna.

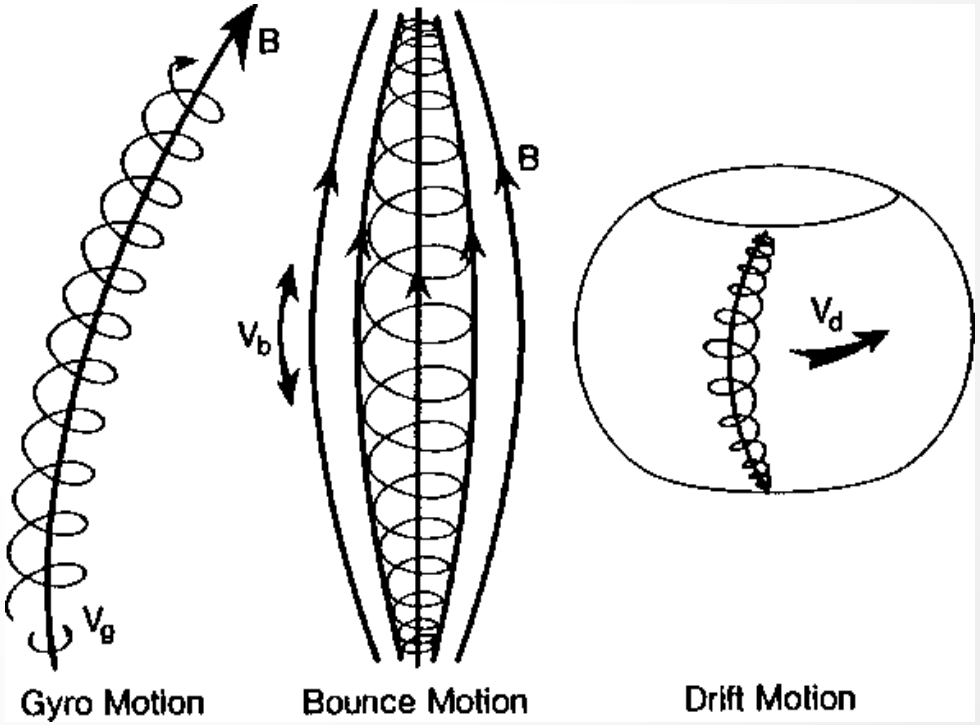
Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera: ***gli invarianti adiabatici***

Le particelle cariche intrappolate nella magnetosfera terrestre sono vincolate a muoversi nel campo magnetico terrestre

1) Gyro Motion (attorno al campo)
2) Bounce Motion (fra due emisferi)
3) Drift Motion (attorno alla Terra)

Ciascun moto ha un range di frequenze caratteristiche. In particolare, le **frequenze tipiche del moto di Drift** degli elettroni nella fascia di radiazione esterna sono comprese nel range delle pulsazioni continue **Pc5 (1-7 mHz)**





Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera.

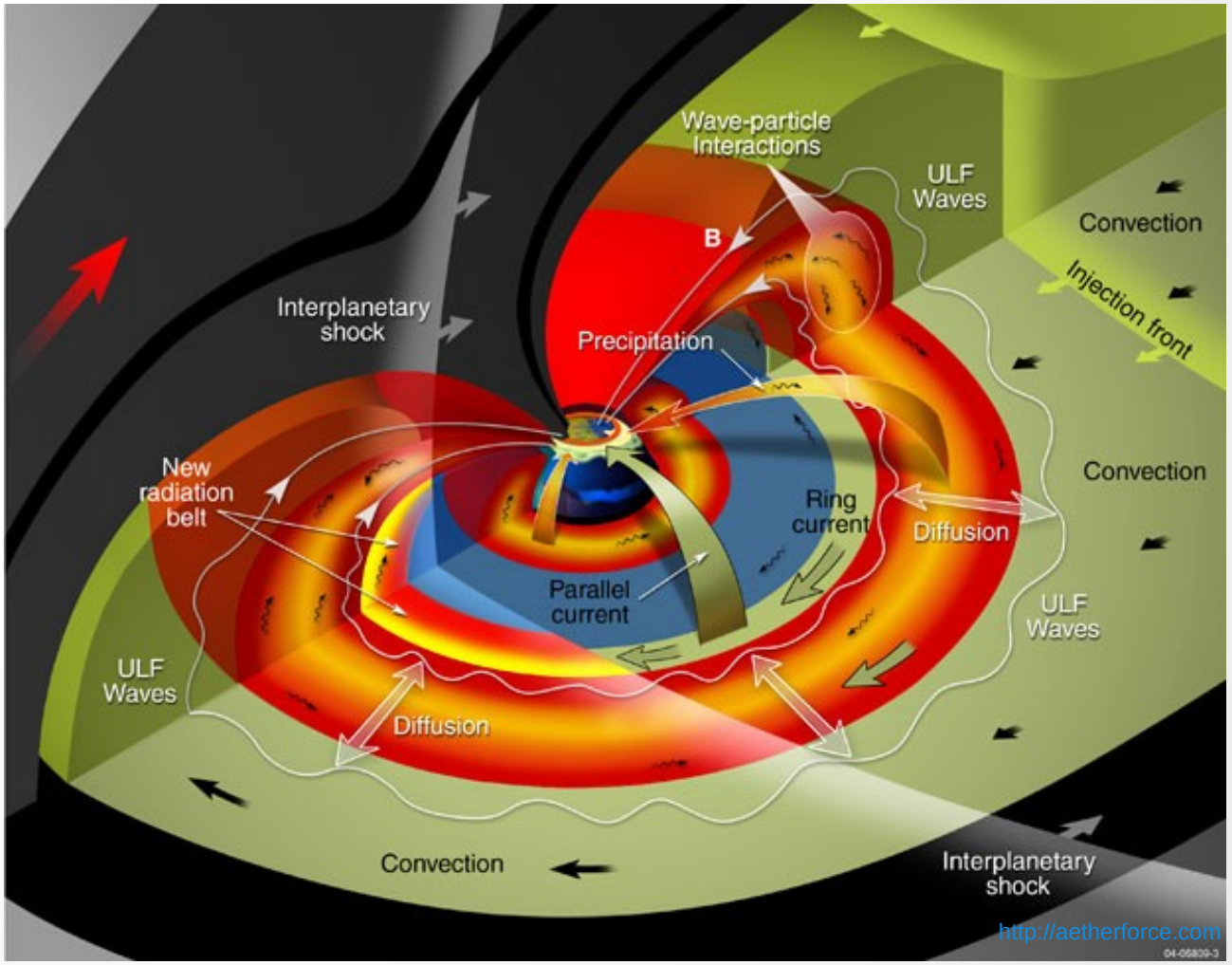
L'interazione fra onde ULF ed elettroni nella fascia di radiazione esterna

Gli invarianti non sono sempre "invarianti"!!

Le perturbazioni indotte nella magnetosfera possono propagarsi in essa sotto forma di onde magnetoidrodinamiche (MHD). La loro classificazione viene fatta essenzialmente in base al range di frequenze che vanno da 1 mHz ad 5 Hz (**onde ULF**).

Le onde ULF nel range delle **Pc5** (1-7 mHz) hanno la frequenza giusta per dar luogo, sotto opportune condizioni, ad **interazioni risonanti con gli elettroni relativistici**.
Tale interazione può dar luogo al fenomeno della **diffusione radiale degli elettroni**.
(violazione del 3° invariante)

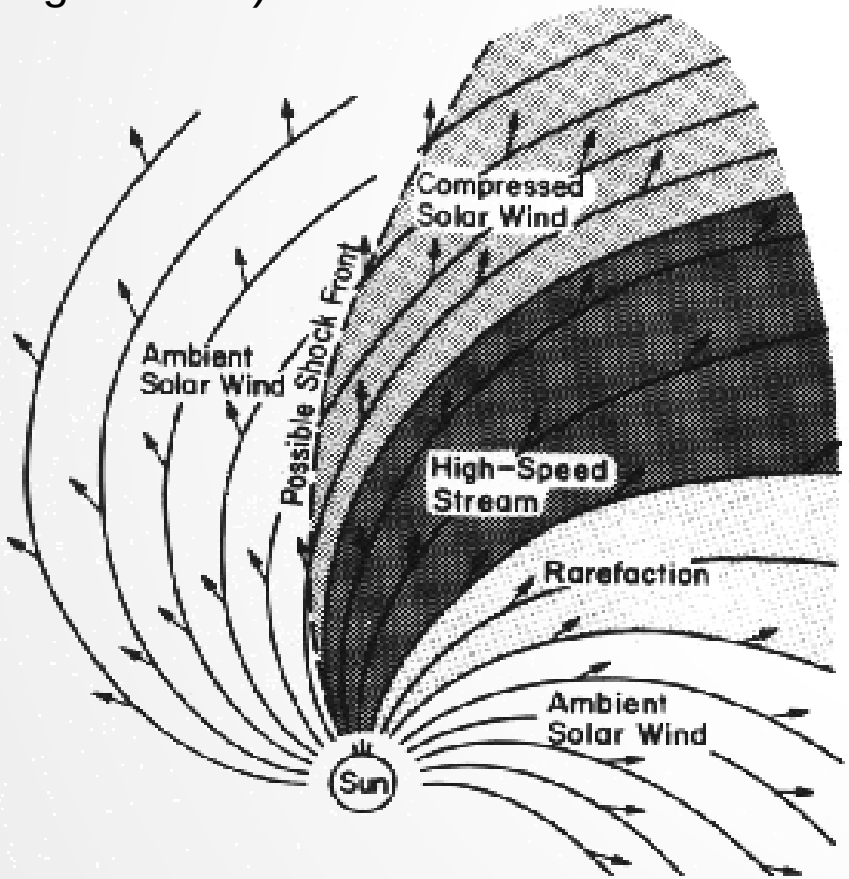
Infine, le onde ULF nel range delle ***Pc1-2*** *(100 mHz-1Hz) possono interagire con gli elettroni ("gyro-resonant interaction"), con scattering nel cono di perdita e conseguente precipitazione ad alta latitudine.*
(violazione del 2° invariante)



Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

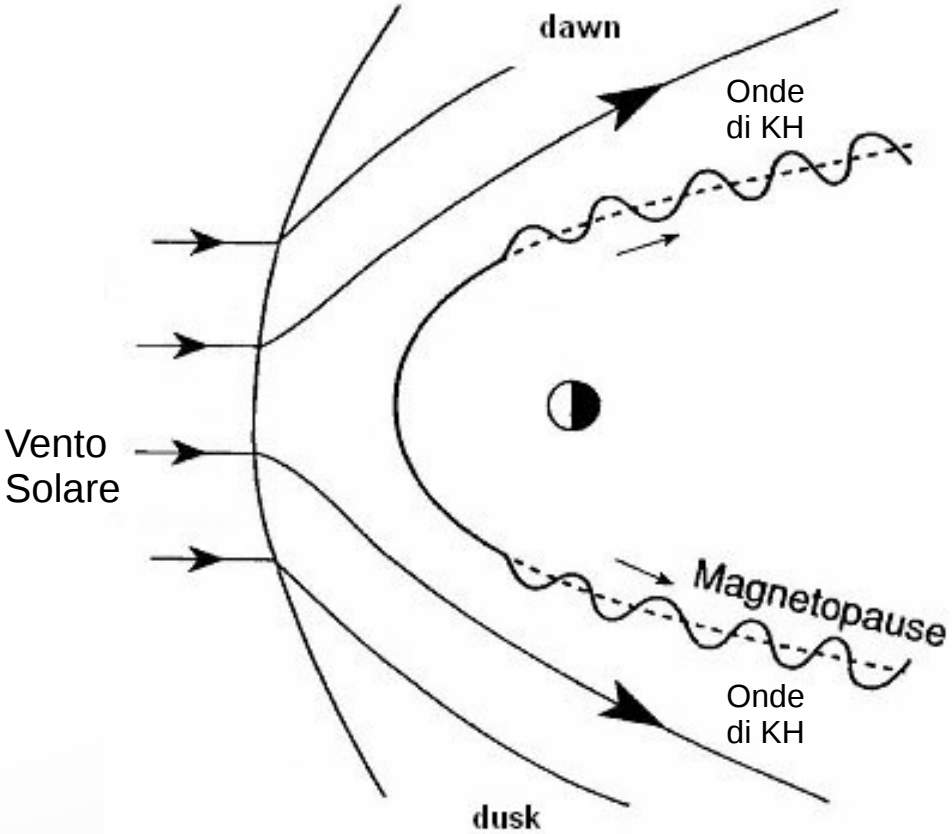
Possibili sorgenti per le fluttuazioni Pc5 geomagnetiche

a) Propagazione diretta di onde generate nella regione di compressione fra fasci di bassa ed alta velocità del vento solare (Corotating Interaction Regions **CIR**).



Le onde ULF associate alle CIR possono essere trasmesse in magnetosfera sia ad alta che bassa latitudine

b) Generazione di onde per mezzo dell'instabilità di Kelvin-Helmoltz (**KHI**) sui fianchi della magnetopausa, per alte velocità del vento solare *V*.



...mentre le onde ULF da instabilità di KH sono essenzialmente osservabili ad alta latitudine.

Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

I risultati delle ricerche condotte presso l'Università dell'Aquila

Obiettivi

1) Indagine sull'**origine delle fluttuazioni Pc5**, e studio dei meccanismi di trasmissione delle onde MHD in magnetosfera.

2) Studio della **risposta della diffusione radiale in relazione all'attività Pc5**

Metodi

Studio delle correlazioni (a diversi ritardi) fra fluttuazioni di potenza delle Pc5 a Terra, in magnetosfera e nello spazio interplanetario, e con i flussi di elettroni.

1) Sono stati impiegati i dati di **campo magnetico** acquisiti presso **AQU** (L'Aquila, Italia), **TNB** (Terra Nova Bay, Antartide), **GOES** (satelliti geostazionari ad L~6.6 Re, sensori di **particelle** energetiche e magnetometri), **OMNI** (dati di campo magnetico interplanetario e di vento solare).

2) Per i nostri studi abbiamo scelto l'**approccio statistico**, basandoci su una lunga serie di dati, collezionati dal 2006 al 2010 (ciclo solare 23°, minimo di attività durante tutto il 2009).

3) Ciascun risultato statistico è stato confrontato con quello ottenuto mediante test Monte Carlo, al fine di stabilirne l'effettiva **significatività**.

Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

I risultati delle ricerche condotte presso l'Università dell'Aquila

Medie giornaliere dei logaritmi delle potenze nel range delle Pc5, sottratte le variazioni annuale e semi-annuale

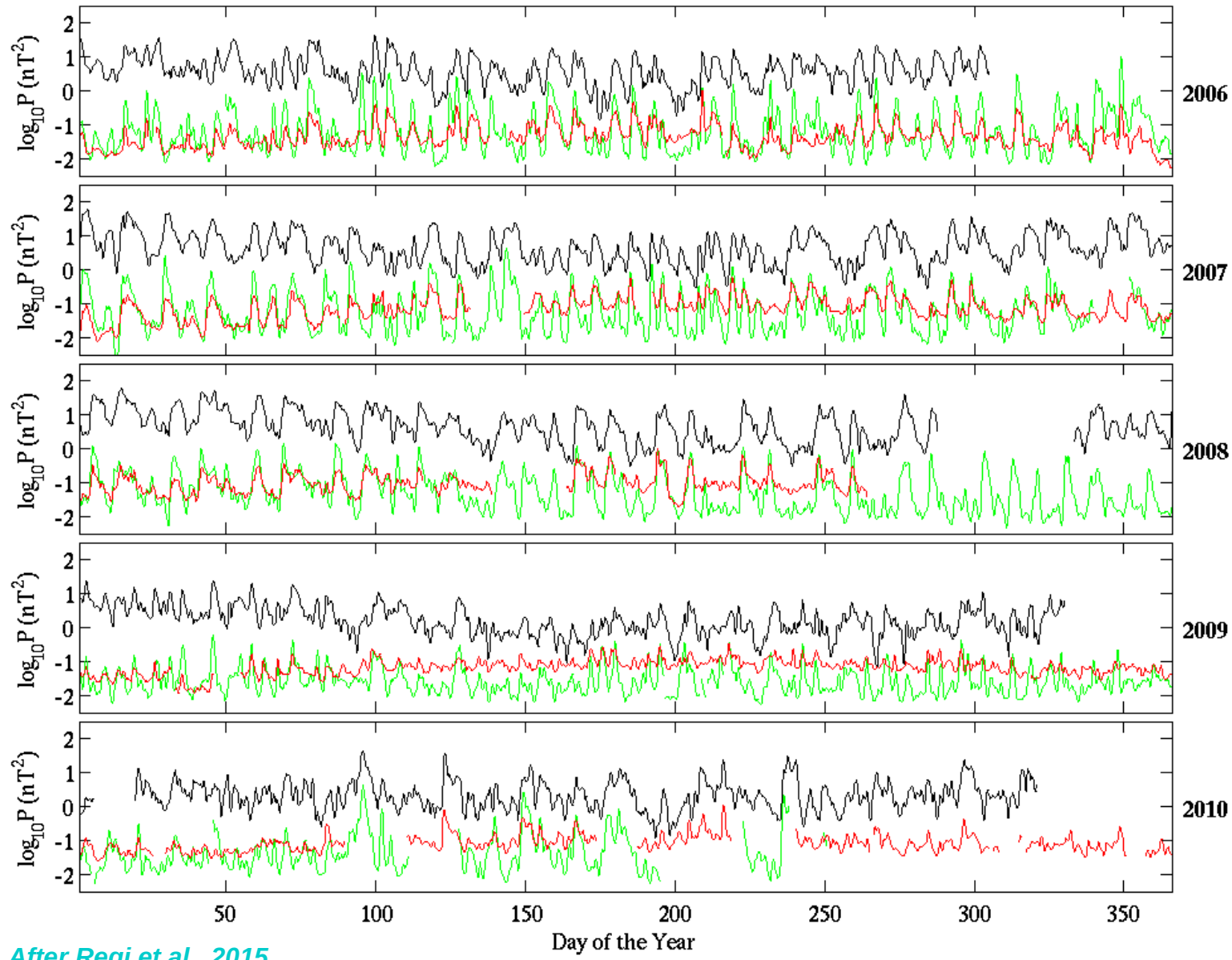
TNB

G12

AQU

Anno di minimo di attività solare

Fluttuazioni del campo geomagnetico e magnetosferico



After Regi et al., 2015

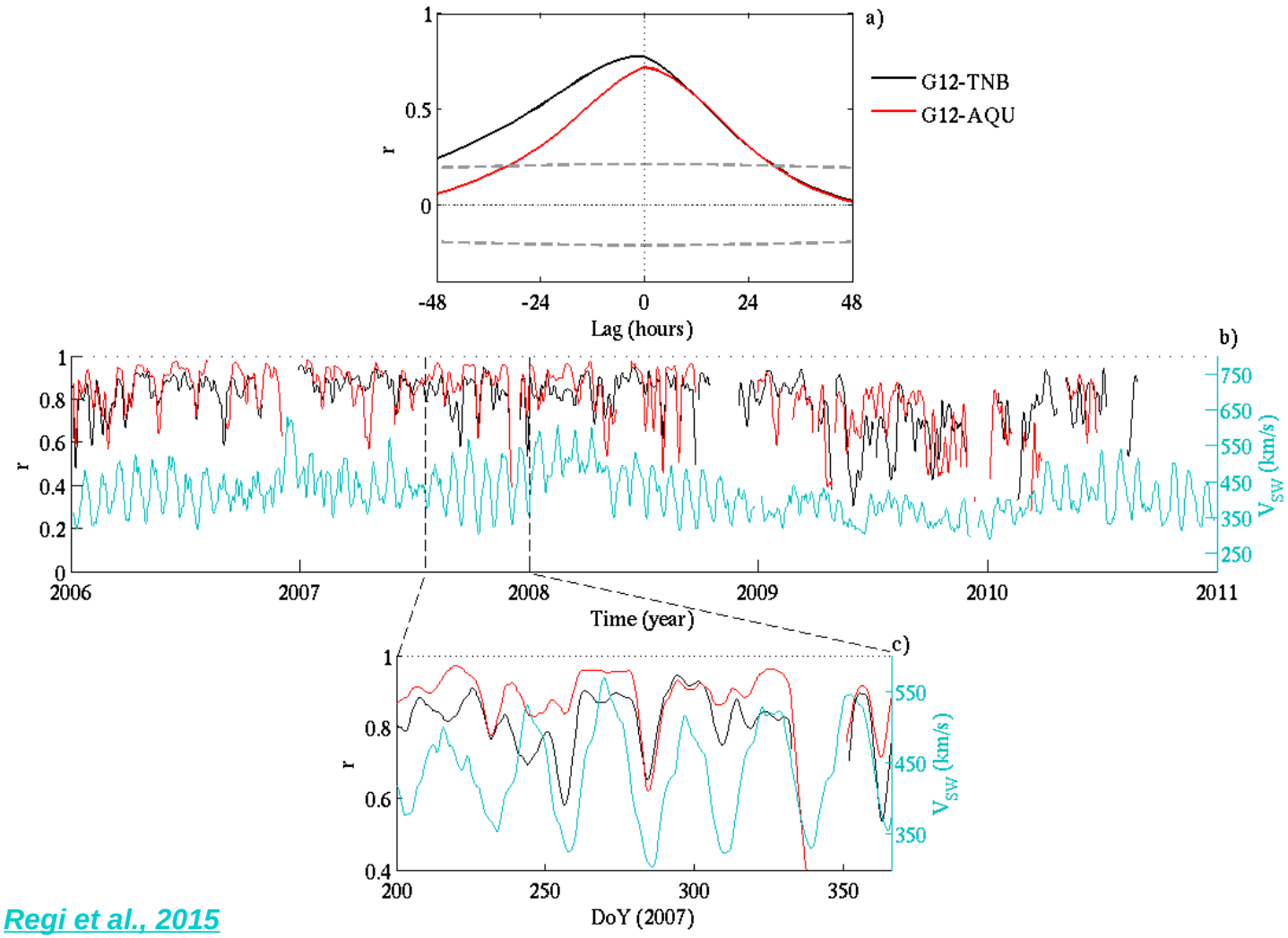
Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

I risultati delle ricerche condotte presso l'Università dell'Aquila

Correlazione fra dati magnetosferici (G12) e a terra sia a bassa (**AQU**) che alta (**TNB**) latitudine

Osservazioni

- Le fluttuazioni di potenza in magnetosfera sono fortemente correlate con quelle a terra
- Dal 2006→2009 (verso la fase di minimo solare) la correlazione mediamente diminuisce



After Regi et al., 2015

Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

I risultati delle ricerche condotte presso l'Università dell'Aquila

Analisi di correlazione tra parametri esterni, del vento solare, e potenze Pc5 in magnetosfera.

Alta latitudine

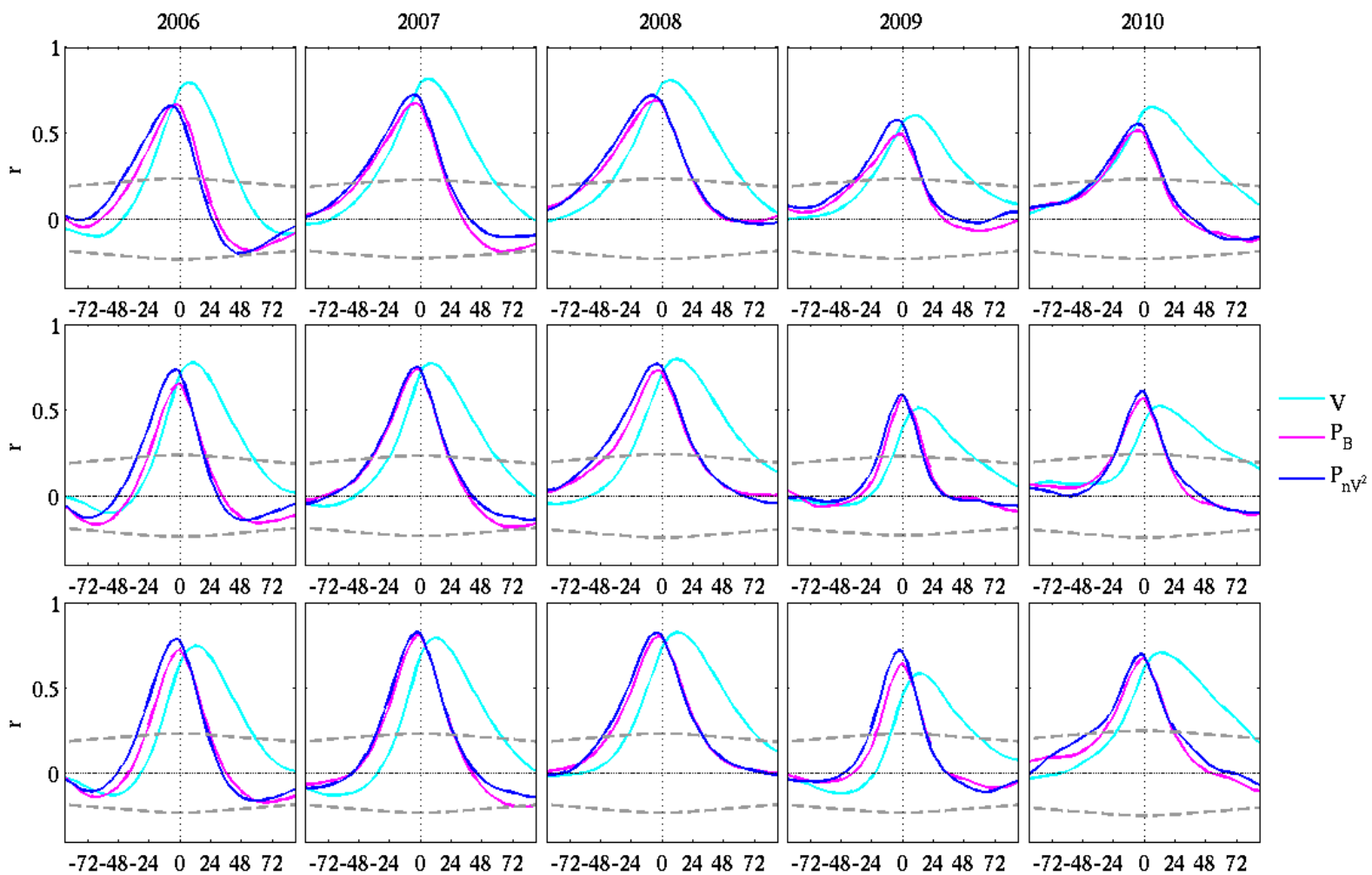
TNB

Bassa latitudine

AQU

Orbita geosincrona

G12



Osservazioni

Rispetto alle Pc5 magnetosferiche:

1) le potenze di *B* e nV^2 sono quasi simultanee
2) *V* è in ritardo di ~6-9 ore.

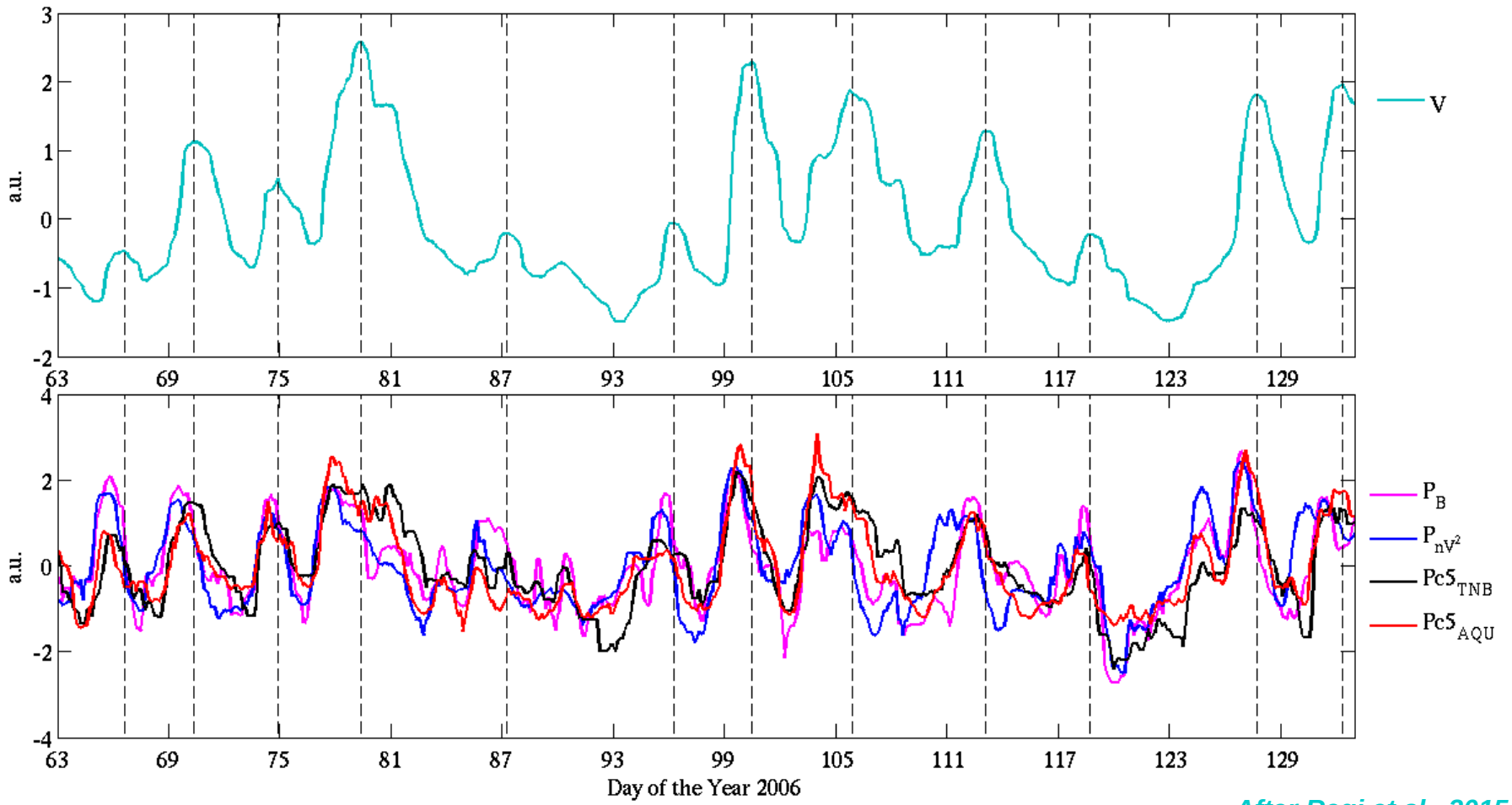
After Regi et al., 2015

Ritardo (ore)

Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

I risultati delle ricerche condotte presso l'Università dell'Aquila

….dettaglio temporale che mostra lo shift temporale fra *V* e le potenze di *V*, *B*, nV^2,...



After Regi et al., 2015

Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

I risultati delle ricerche condotte presso l'Università dell'Aquila

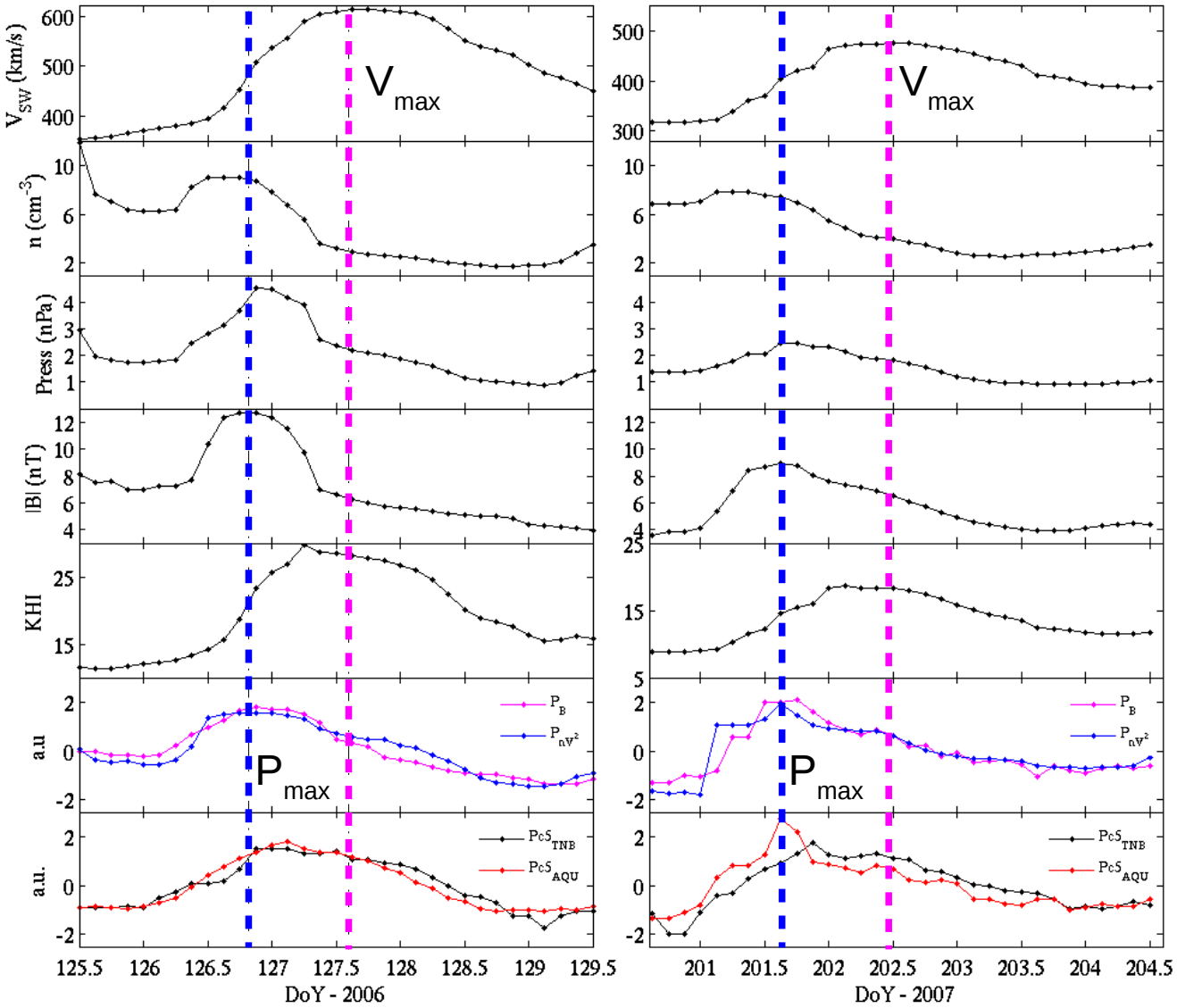
….se le oscillazioni ULF nel range Pc5 fossero generate da onde di instabilità di Kelvin-Helmoltz ?

Da questi due esempi (ma anche da altri) e dalle analisi di correlazione a vari ritardi si può concludere che l'innalzamento di potenza delle Pc5 a terra è essenzialmente guidato dalle fluttuazioni di potenza nel vento solare, e non dalla velocità del vento solare.

Indice di instabilità di KH →

Fluttuazioni delle potenze del Vento Solare →

Fluttuazioni del campo geomagnetico a terra →

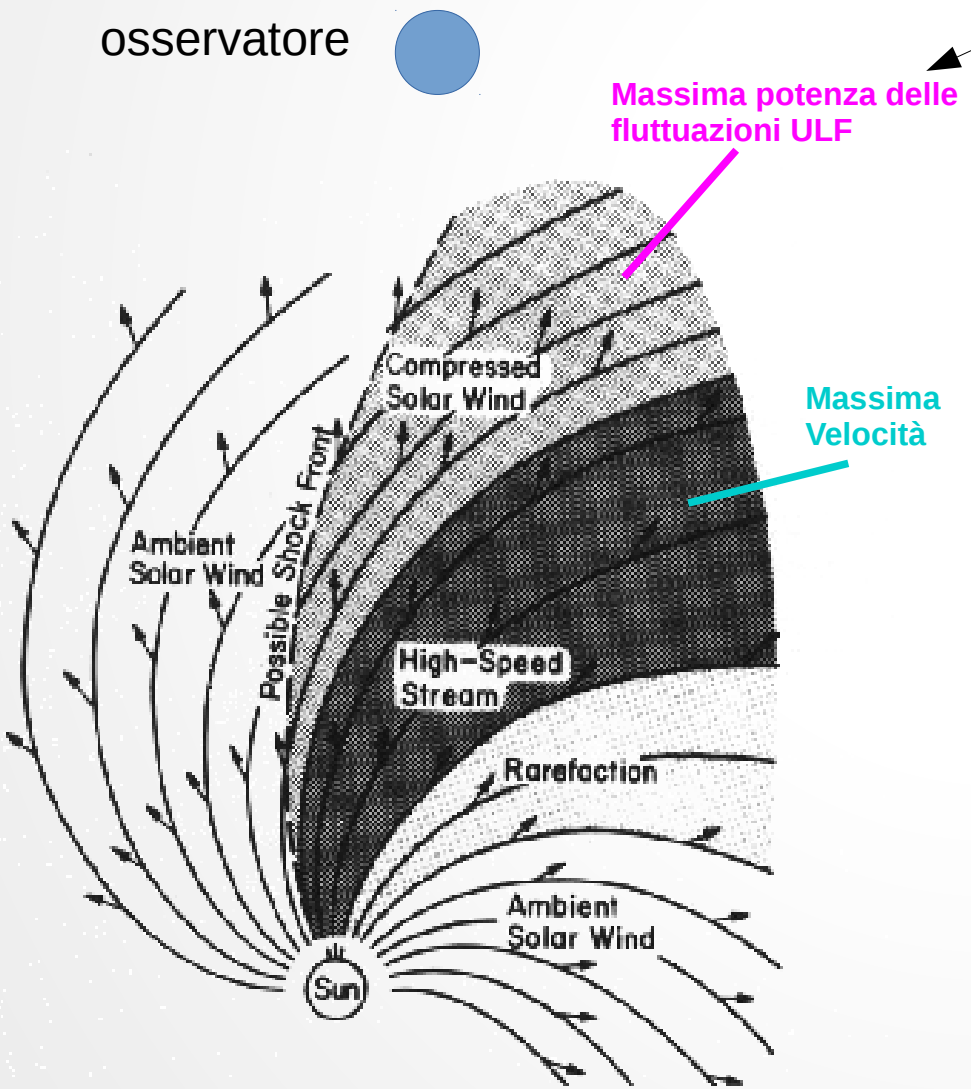


After Regi et al., 2015

Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

I risultati delle ricerche condotte presso l'Università dell'Aquila

*Corotating Interaction Regions (**CIR**)*



Ci si aspetta che le regioni di compressione vengono osservate prima di quelle caratterizzate da alti valori di velocità del vento solare.

Osservazioni sperimentali

I massimi delle potenze delle Pc5 a terra, sono registrate prima dei massimi di velocità del vento solare, e quasi simultaneamente ai massimi di potenza nelle fluttuazioni dei parametri di vento solare.

Discussione

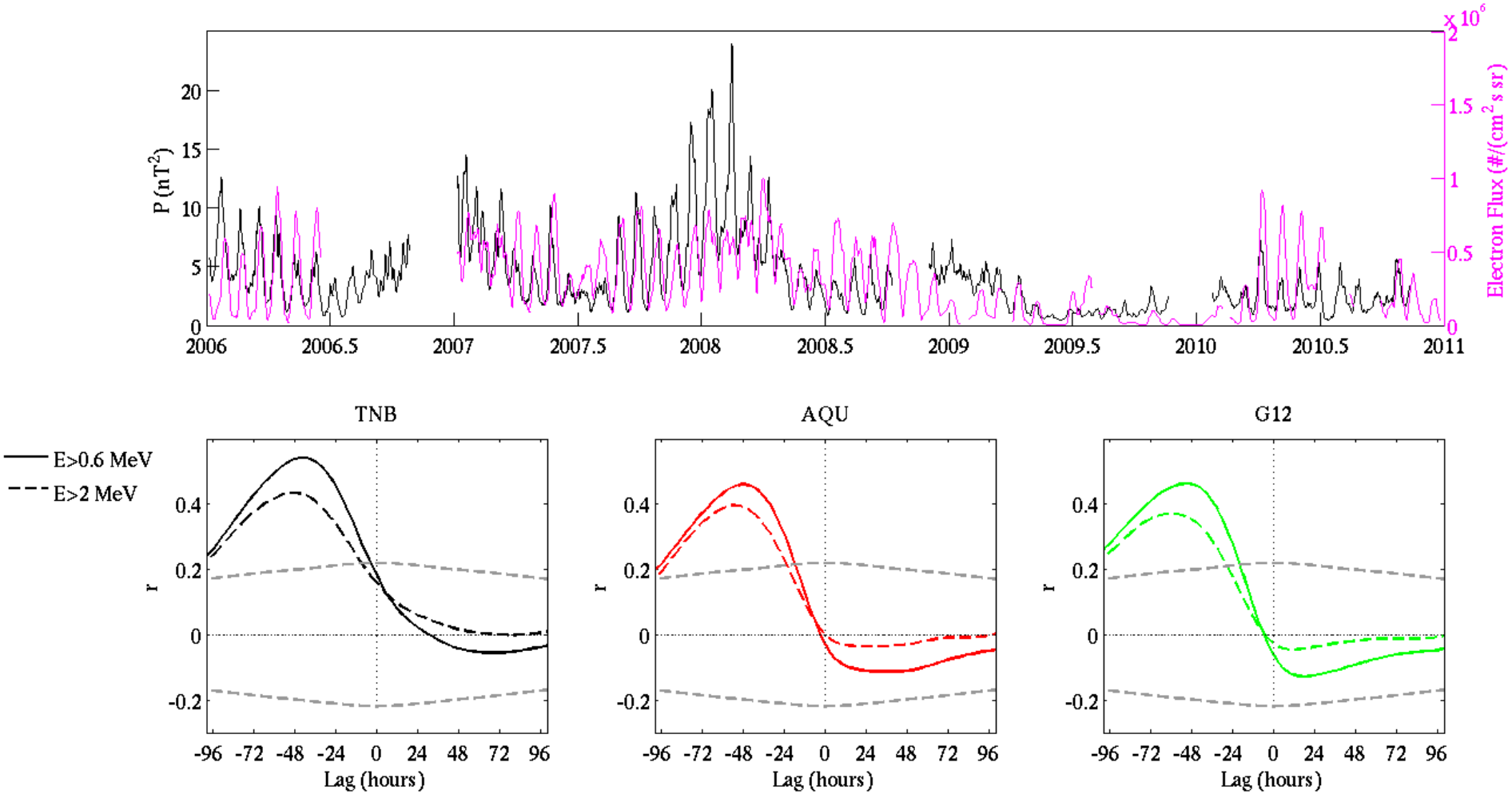
Nel vento solare (nella regione di compressione) son presenti onde ULF di bassa frequenza (range delle Pc5).

Giunte in prossimità della magnetosfera possono propagarsi in essa e dar luogo al fenomeno della diffusione radiale degli elettroni…..

Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera

I risultati delle ricerche condotte presso l'Università dell'Aquila

…..come osservato comparando i dati geomagnetici con i flussi di elettroni all'orbita geosincrona.
Il ritardo temporale fra Pc5 a terra e variazione nei flussi è di circa 2 giorni. In particolare, per gli elettroni ad energie maggiori il ritardo è maggiore (t~2.0-2.4 giorni per E>2MeV, t~1.8-2.0 per E>600 keV)



After Regi et al., 2015

Le fluttuazioni geomagnetiche Pc5 in relazione con i parametri di vento solare e con i flussi di elettroni relativistici nella magnetosfera: ***Conclusioni***

- Le fluttuazioni di potenza nel range Pc5 osservate in magnetosfera (all'orbita geosincrona) e a terra (a bassa ed alta latitudine) sono essenzialmente correlate con le fluttuazioni di potenza delle onde ULF generate nelle regioni di compressione delle CIR e risultano quasi simultanee. Al contrario, l'instabilità di KH gioca un ruolo di secondo ordine ed essenzialmente ad alta latitudine, con un ritardo di alcune ore rispetto alle fluttuazioni di potenza a terra.

- La correlazione a ritardi positivi (alcune ore) fra le potenze delle Pc5 e la velocità del vento solare V_{sw} è dovuta all'intrinseca correlazione fra V_{sw} con le fluttuazioni di potenza nel vento solare [*Takahashi and Ukhorskiy 2008*].

- La significativa correlazione fra aumenti dei flussi di elettroni ed aumenti di potenza nelle fluttuazioni di campo geomagnetico nel range Pc5 indicano che le Pc5 sono responsabili della diffusione radiale.

- Il ritardo temporale (~2 giorni) fra aumento di attività di pulsazione e aumento dei flussi è consistente con il modello di diffusione radiale [*Rostoker et al. 1998; Baker et al. 1998; Mathie and Mann 2001; Mann et al. 2004, Kozyreva et al. 2007*], con tempi di diffusione maggiori per elettroni di più alta energia [Rodger et al. 2010].

Grazie

Pubblicazioni e presentazione a Congressi

1) **Regi M., M. De Lauretis and P. Francia (2015), Pc5 geomagnetic fluctuations in response to solar wind excitation and their relationship with relativistic electron fluxes in the outer radiation belt, *Earth, Planets and Space* 67:9 doi: 10.1186/s40623-015-0180-8**

2) **Regi M, M. De Lauretis and P. Francia (2015), Pc5 geomagnetic fluctuations in response to solar wind excitation and their relationship with relativistic electron fluxes in the outer radiation belt, 26th IUGG General Assembly, Prague, Czech Republic, *POSTER SESSION.***

Referenze:

(1) Baker DN, Pulkkinen TI, Li KX, Kanekal SG (1998) Coronal mass ejections, magnetic clouds and relativistic magnetospheric electron events: ISTP. J Geophys Res 103:17279–17291
(2) Kozyreva O, Pilipenko V, Engebretson MJ, Yumoto K, Watermann J, Romanova N (2007) In search of a new ULF wave index: comparison of Pc5 power with dynamics of geostationary relativistic electrons. Planet Space Sci 55:755–769, doi:10.1016/j.pss.2006.03.013
(3) Mann IR, O'Brien TP, Milling DK (2004) Correlations between ULF wave power, solar wind speed, and relativistic electron flux in the magnetosphere: solar cycle dependence. J Atmos Sol Terr Phy 66:187–198, doi:10.1016/j.jastp.2003.10.002
(4) Mathie RA, Mann IR (2001) On the solar wind control of Pc5 ULF pulsation power at midlatitudes: implications for MeV electron acceleration in the outer radiation belt. J Geophys Res 106(12):9,783–29,796
(5) Rostoker G, Skone S, Baker DN (1998) On the origin of relativistic electrons in the magnetosphere associated with some geomagnetic storms. Geophys Res Lett 25(19):3701–3704
(6) Takahashi K, Ukhorskiy AY (2008) Timing analysis of the relationship between solar wind parameters and geosynchronous Pc5 amplitude. J Geophys Res 113:A12204, doi:10.1029/2008JA013327
(7) Rodger CJ, Clilverd MA, Green JC, Lam MM (2010) Use of POES SEM-2 observations to examine radiation belt dynamics and energetic electron precipitation into the atmosphere. J Geophys Res 115:A04202, doi:10.1029/2008JA014023

Acknowledgements

This research activity was supported by the Italian PNRA (Programma Nazionale di Ricerca in Antartide), PdR2013/B2.09.
The author acknowledge J.H. King and N. Papatashvilli at NASA and CDAWeb for solar wind data and H. Singer and T. Onsager at NOAA SEC and CDAWeb for GOES satellites data of magnetic field and relativistic electron flux measurements.