



Università degli Studi di Perugia
Dipartimento di Fisica e Geologia

Corso di Laurea in Fisica
Tesi Triennale

Sviluppo di un portale online per il monitoraggio della radiazione cosmica e dell'attività solare

Laureando:
David Pelosi

Relatori:
Dott. Tomassetti
Dott. Durante

11 Giugno 2020

Introduzione

Motivazioni

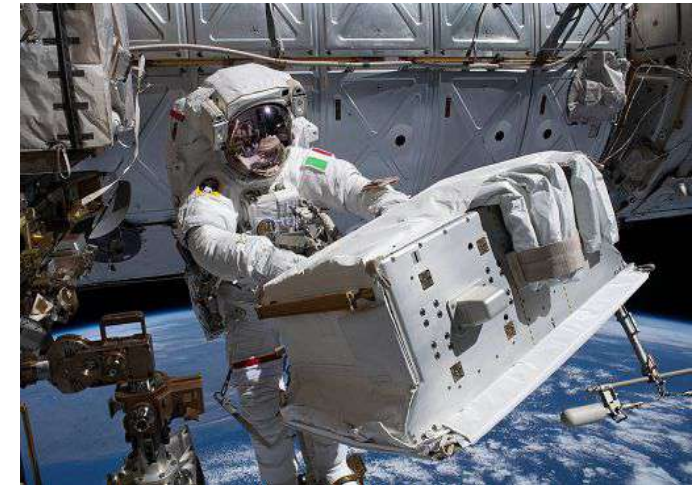
- Il flusso dei raggi cosmici nell'eliosfera è soggetto a variazioni temporali causate dal ciclo solare (**modulazione solare**)
- Per studiare la modulazione solare occorrono varie tipologie di dati: **dati solari e interplanetari** (riflettono il ciclo solare e delle condizioni dell'eliosfera) e **misure di raggi cosmici** a varie epoche (forniscono la variazione del flusso nel tempo).
- Valutazione rischi di radiazione per satelliti, esperimenti e astronauti in orbita e programmazione di missioni spaziali a lungo termine (**ARTEMIS (Luna), Marte**).

In questa tesi

- Ho sviluppato un portale online, ***Heliophysics Virtual Observatory (HVO)***, che reperisce in tempo reale i dati di attività solare e raggi cosmici, provenienti sia da missioni spaziali che da osservatori terrestri
- Ho implementato un **modello predittivo** che effettua il calcolo in tempo reale del flusso di raggi cosmici nello spazio vicino in funzione della loro energia

Indice

- 1) Le osservazioni solari e interplanetari, il ciclo solare
- 2) I dati sulla radiazione carica e monitor di neutroni
- 3) Il modello Force-Field per descrivere la modulazione solare
- 4) La determinazione in tempo reale del flusso di raggi cosmici
- 5) Il portale HVO e le sue funzionalità applicative
- 6) Conclusioni

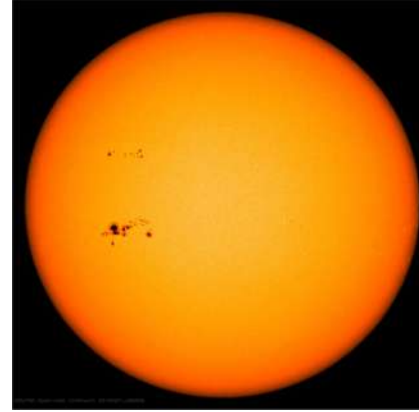


Dati solari e interplanetari

Macchie Solari (*sunspots*):

- numero di macchie mensile e giornaliero:
SunSpot Number (SSN)

International sunspot number: $R = k (10 g + n)$



Vento Solare

- velocità radiale del vento solare (V);
- densità dei protoni del vento solare;

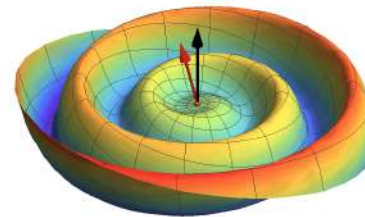
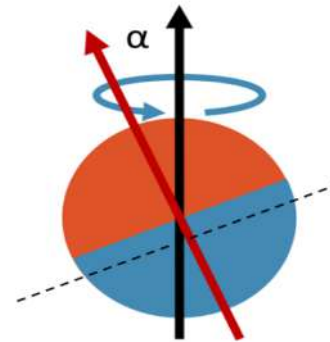
Campo Magnetico Solare (B):

- intensità e la direzione del campo ai poli (N/S);
- angolo di tilt dell'asse magnetico α : $10^\circ - 80^\circ$;

B produce una spirale magnetica descritta dal **modello di Parker**

$$B = B_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \sqrt{1 + (\tan \Psi)^2}$$

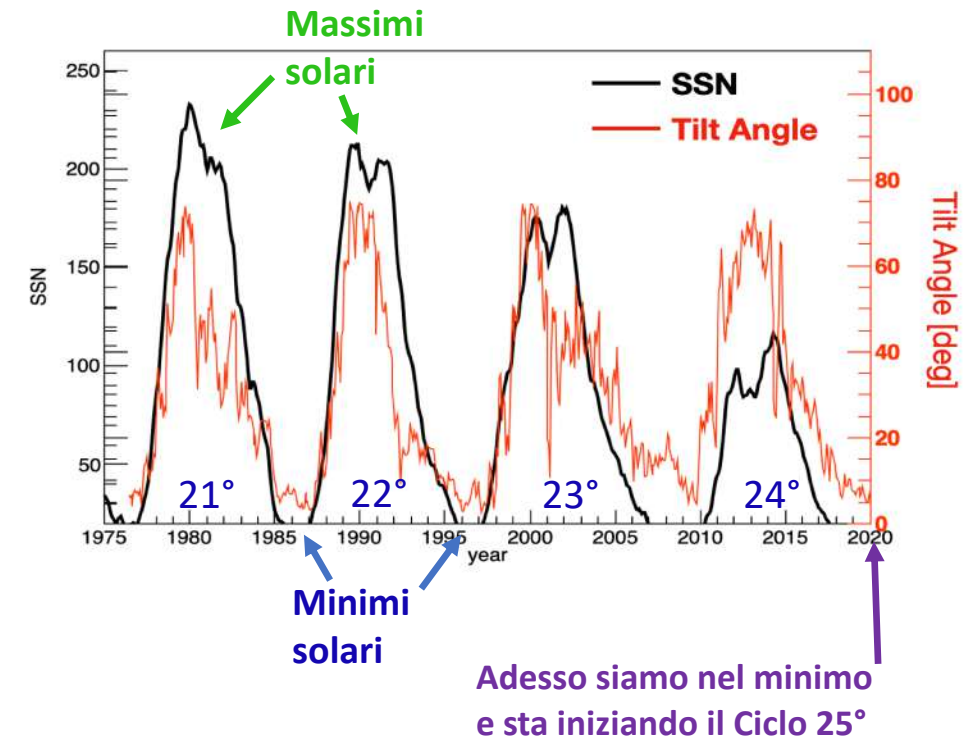
B inverte la propria polarità ogni 11 anni.



Ciclo solare

Il numero di macchie solari e i valori dell'angolo di tilt sono **ottimi indicatori** dell'attività solare.

Evidente il **ciclo** di periodo ≈ 11 anni



Dati di radiazione carica (1)

Raggi Cosmici primari

Composizione:

Protoni ~ 90%

He ~ 9%

C, O, Fe ~ 1%

Antimateria < 0.1%

Origine:

Supernovae : $E \approx 10^{15}$ eV

AGN, GRB e magnetar : $E > 10^{15}$ eV

Origine Solare (SEP) : $E < 10^8$ eV

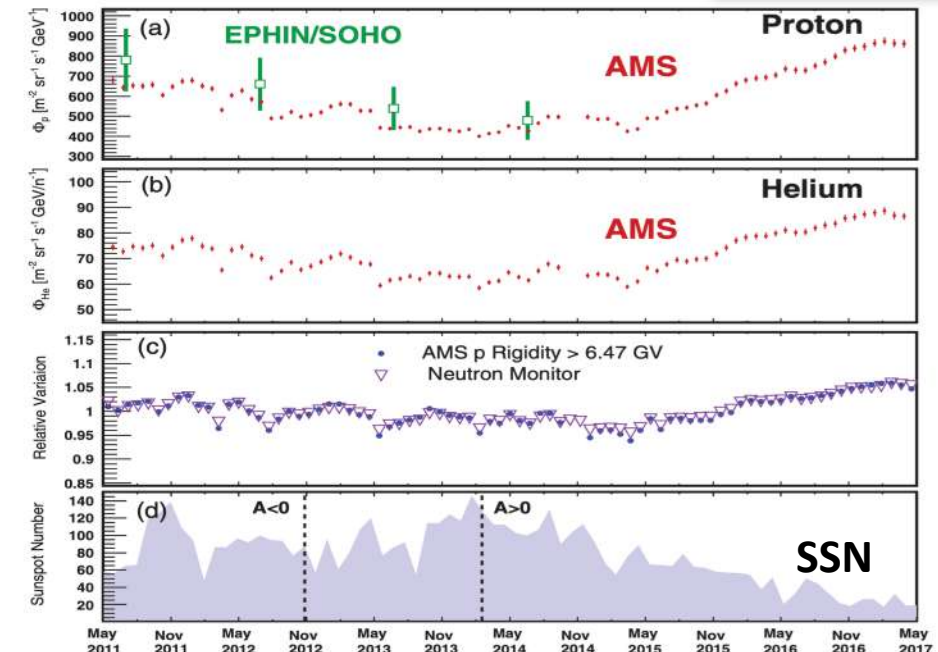
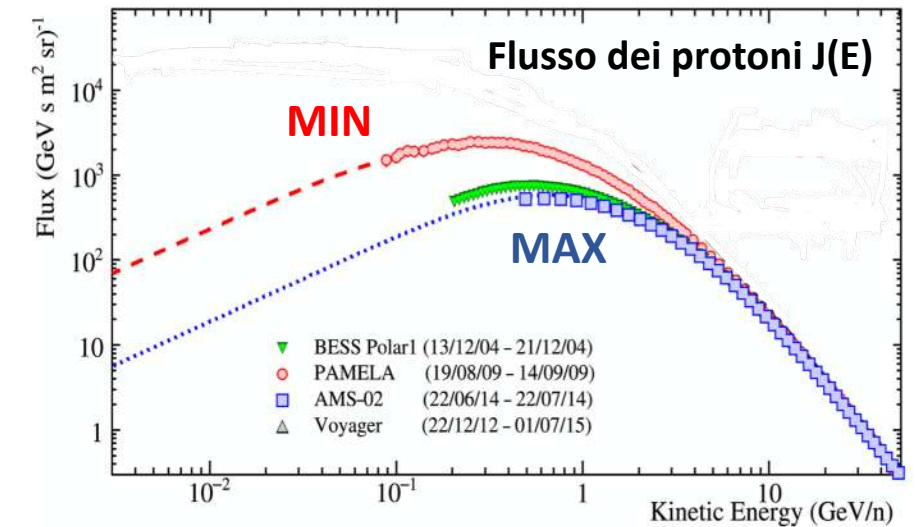
Flusso dei raggi cosmici:

$$J(E) = \frac{dN}{dE \cdot dt \cdot dS \cdot d\Omega}$$

I **raggi cosmici secondari** (pioni, kaoni, elettroni, muoni, neutrini) discendono dalle interazioni tra raggi cosmici primari e atmosfera terrestre.

Modulazione solare

Il flusso di RC è soggetto a significative variazioni nel tempo legate al ciclo solare.



Dati di radiazione carica (2)

Misurazioni dirette

Esperimenti sulla ISS e sonde spaziali:

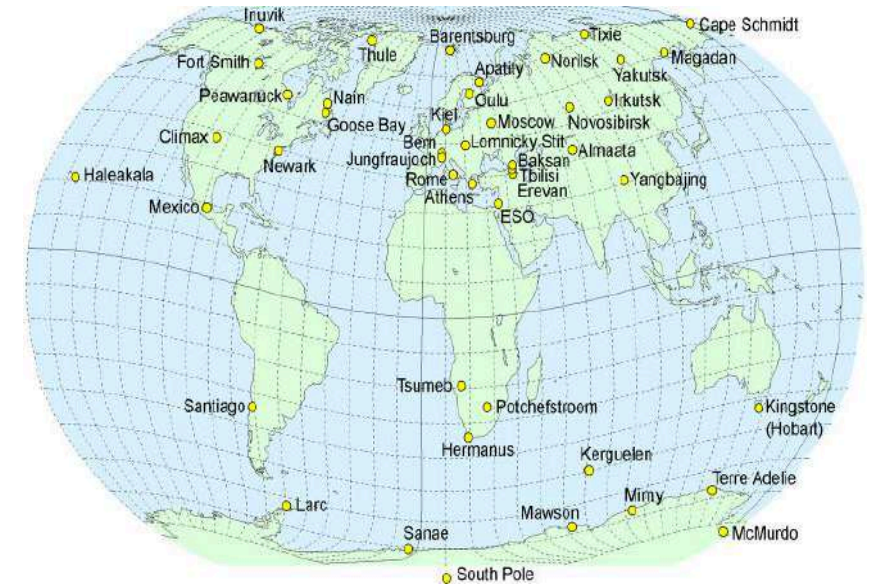
- AMS-02
- CALET, PAMELA, DAMPE
- ACE, ISEE-3, IMP-7/8, WIND
- Voyager 1/2

**Gli unici dati continuativi “real-time” provengono dai NM.
I dati riflettono il flusso dei protoni (~ 90%)**

Misurazioni indirette

Esperimenti a terra:

- ARGO, KASCADE, AUGER
- **Neutron Monitor (NM)**



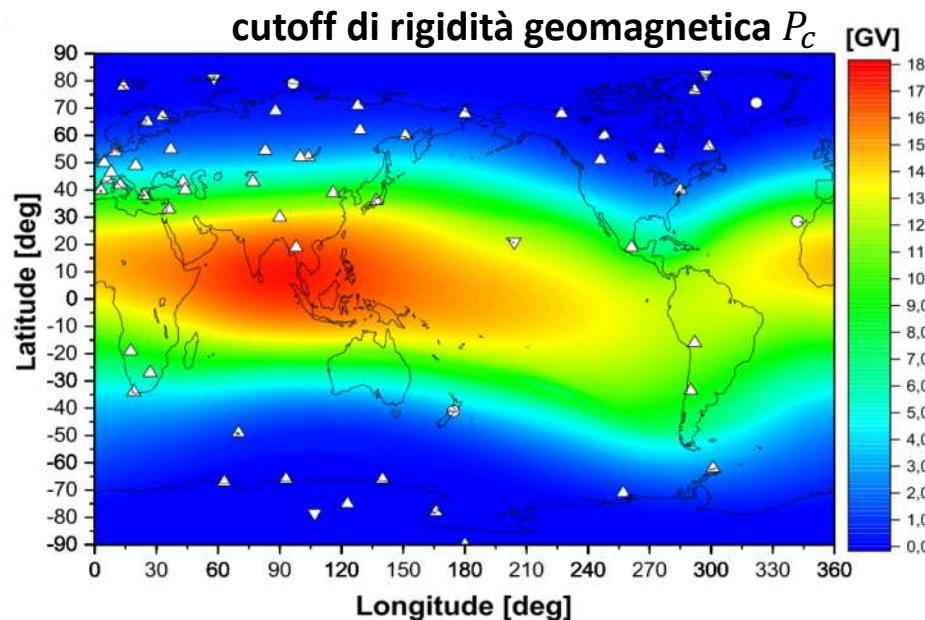
Rete mondiale NM operativa dal 1964

Neutron Monitor (NM)

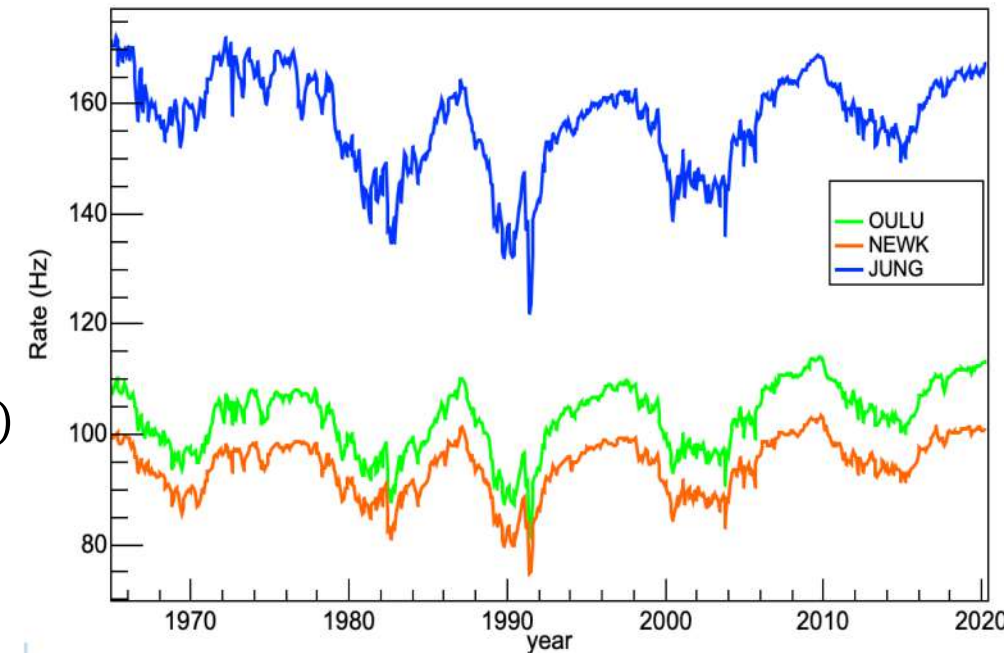
Tasso di conteggio $R(t)$:
$$R^d(t) = \sum_i \int_{E_{ci}}^{\infty} J_i(E, t) Y_i^d(E) dE \quad [1]$$

- i : specie di RC (90% protoni)
 - E_c : dipende dal campo geomagnetico
 - Y^d : funzione di risposta del rilevatore
- } Dipendono dalla stazione NM

La variazione temporale di $R(t)$ riflette la variazione del flusso di RC: $J(E, t)$



Tasso di conteggio per differenti stazioni



- Oulu, Finland
- Newark, New Jersey (USA)
- Jungfraujoch, Switzerland

Obiettivi

Determinare la variazione del flusso di raggi cosmici nello spazio vicino $J(E, t)$ usando i tassi di conteggio $R(t)$ dei neutron monitor

Il modello Force-Field

- Soluzione approssimata e analitica dell'equazione di Parker
- Relazione tra flusso modulato in eliosfera e flusso LIS

J_{LIS} : flusso di RC fuori dall'eliosfera.

$$J(E) = \frac{(E + M_p)^2 - M_p^2}{(E + M_p + \frac{Z}{A}\phi(t))^2 - M_p^2} J_{lis}(E + \frac{Z}{A}\phi(t)) \quad [2]$$

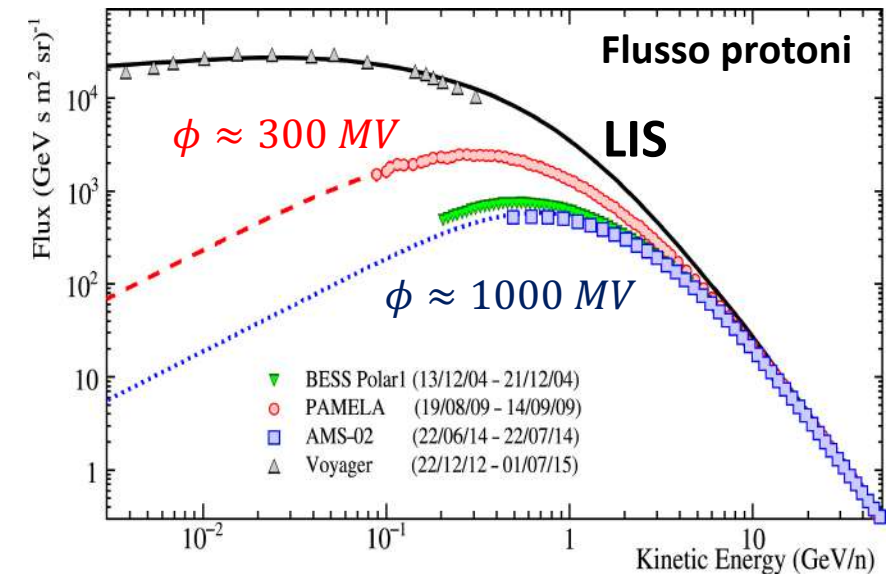
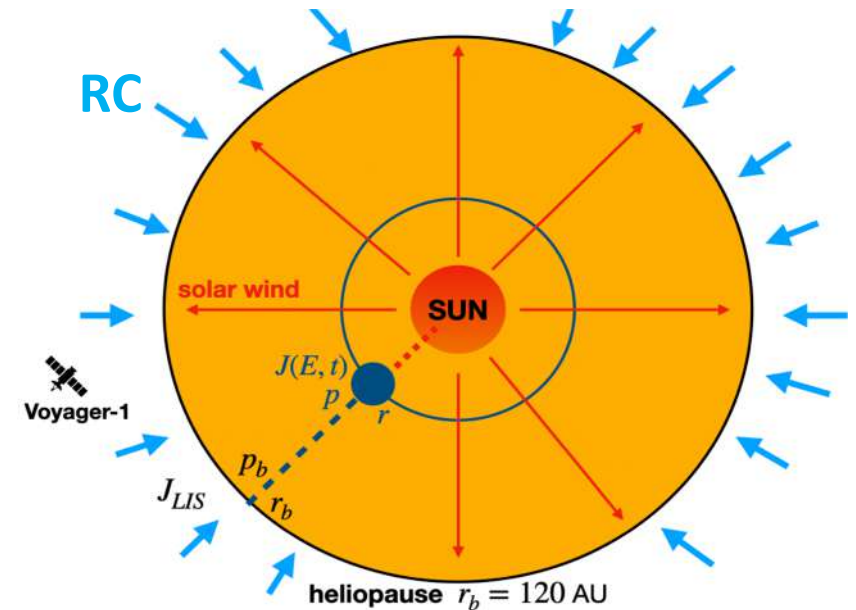
per ogni specie di RC (numero atomico Z e numero di massa A)

Nel modello FF, la modulazione è descritta dal **parametro ϕ** che rappresenta la **perdita media di momento** (per unità di carica Z) delle particelle. Occorre conoscere il flusso LIS fuori dall'eliosfera

- J_{LIS} è parametrizzato dai recenti dati di Voyager-1 e AMS-02, seguendo [C. Corti et al., ApJ 2016](#)
- ϕ varia con il ciclo solare (e quindi nel tempo), tra 300 e 1200 MV

Obiettivo

- Determinare la serie temporale di $\phi(t)$



Determinazione di ϕ

Inserendo [2] in [1], si ottiene:

$$R_{st}^d(t) = \sum_i \int_{E_{ci}}^{\infty} \frac{(E + M_p)^2 - M_p^2}{(E + M_p + \frac{Z}{A}\phi(t))^2 - M_p^2} J_{lis}(E + \frac{Z}{A}\phi(t)) Y_i^d(E) dE \quad [3]$$

Partendo dai conteggi di NM in approssimazione Force-Field si può ricavare $\phi(t)$:

- Determinando Y^d (**non nota a priori**)
- Invertendo la [2]

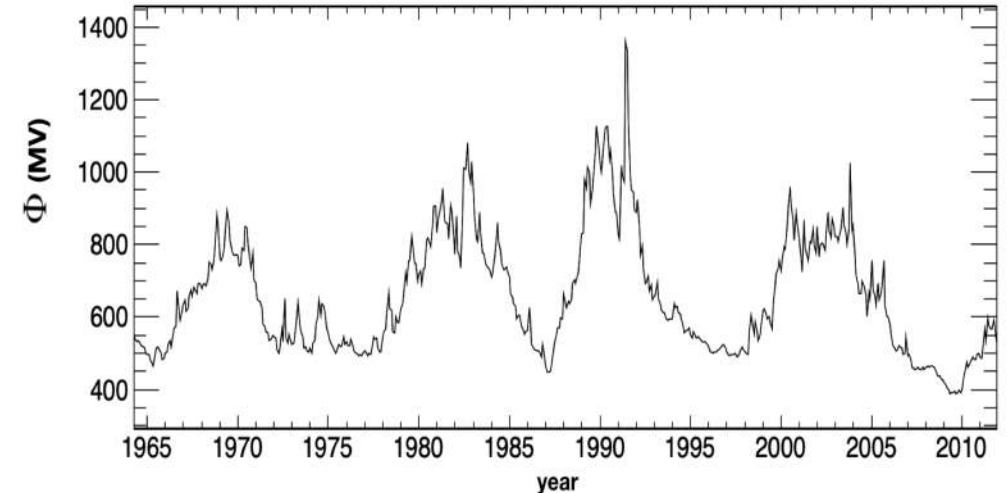
✓ Usiamo un approccio efficace

- Ricostruzione di ϕ dal 1964 al 2011, da **Usoskin et al. 2011**
- Assunzione che $Y(E)$ si è mantenuta costante nel tempo dopo il 2011

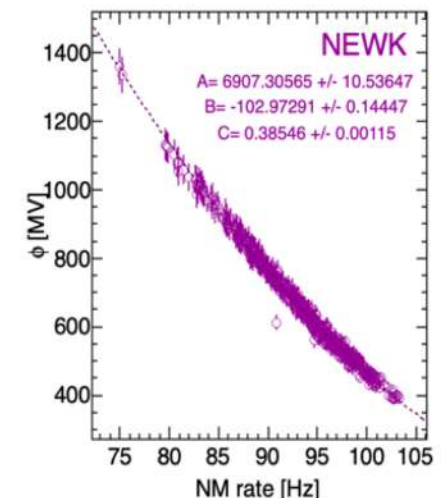
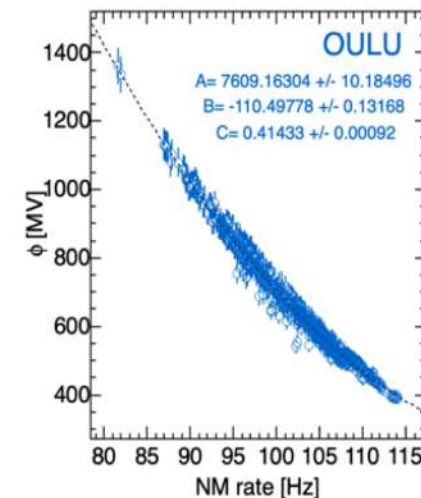
I dati di $\phi(t)$ e $R(t)$, valutati in un intervallo temporale comune, sono ben descritti dalla relazione:

$$\phi(R(t)) = A + B \cdot R(t) + C \cdot R(t)^2$$

Ricostruzione di $\phi(t)$ di Usoskin et al. 2011



Diagrammi di dispersione ϕ vs R per NEWK e OULU



Calcolo “real-time” del flusso di RC

Procedura (per ogni stazione di NM)

- calcolo *best fit parameters* A, B e C;
- $R(t) \longrightarrow \phi(t)$;
- si ottiene $J(E, t)$

$t \longrightarrow R(t) \longrightarrow \phi(t) \longrightarrow J(E, t)$

Applicazioni

- ad ogni epoca (per cui si ha $R(t)$);
- per ogni energia E;
- per ogni specie di RC (Z,A)

In Figura: usando i rates $R(t)$ della stazione si OULU, il flusso dei protoni $J(E, t)$ è stato calcolato in due epoche t:

Gennaio 2010, nel minimo solare (SSN basso, flusso alto)

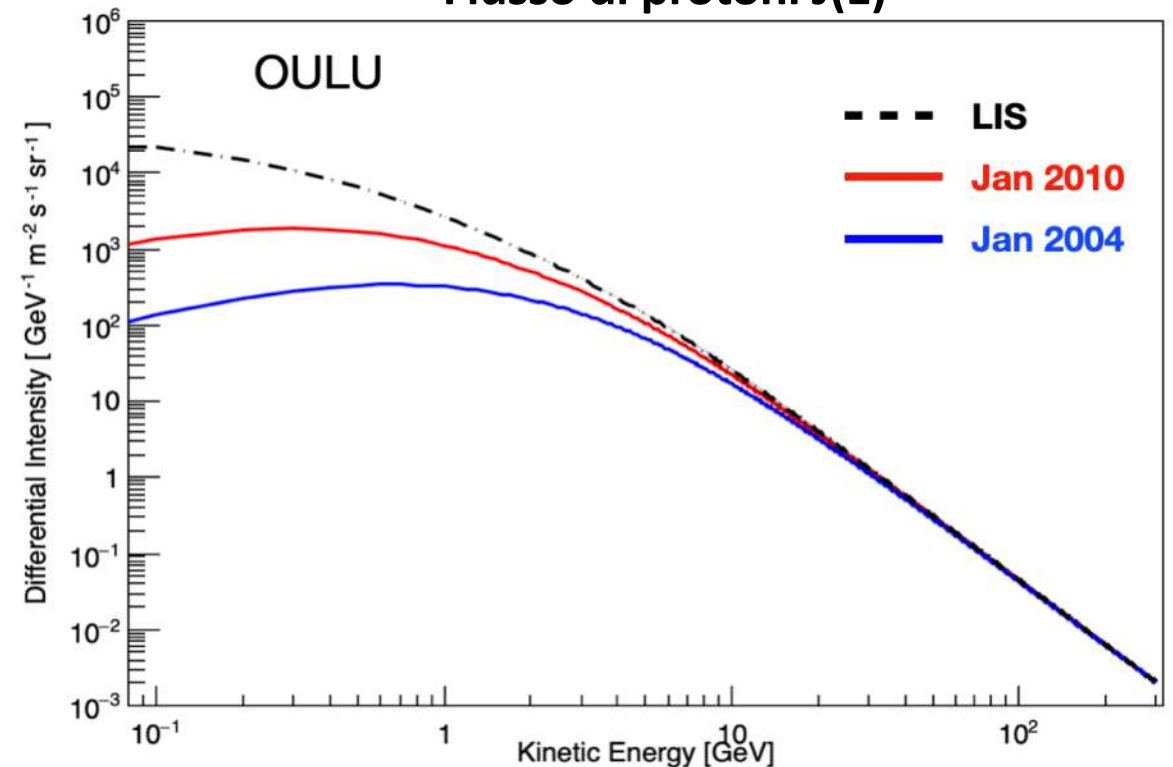
Gennaio 2004, nel massimo solare (SSN alto, flusso debole)

Usando altre stazioni si ottengono risultati compatibili

Stima “real-time” del flusso di protoni in alta atmosfera

$$J^p(E, t) = \frac{(E + M_p)^2 - M_p^2}{(E + M_p + \phi(t))^2 - M_p^2} J_{\text{lis}}^p(E + \phi(t)),$$

Flusso di protoni J(E)



Heliophysics Virtual Observatory (HVO)

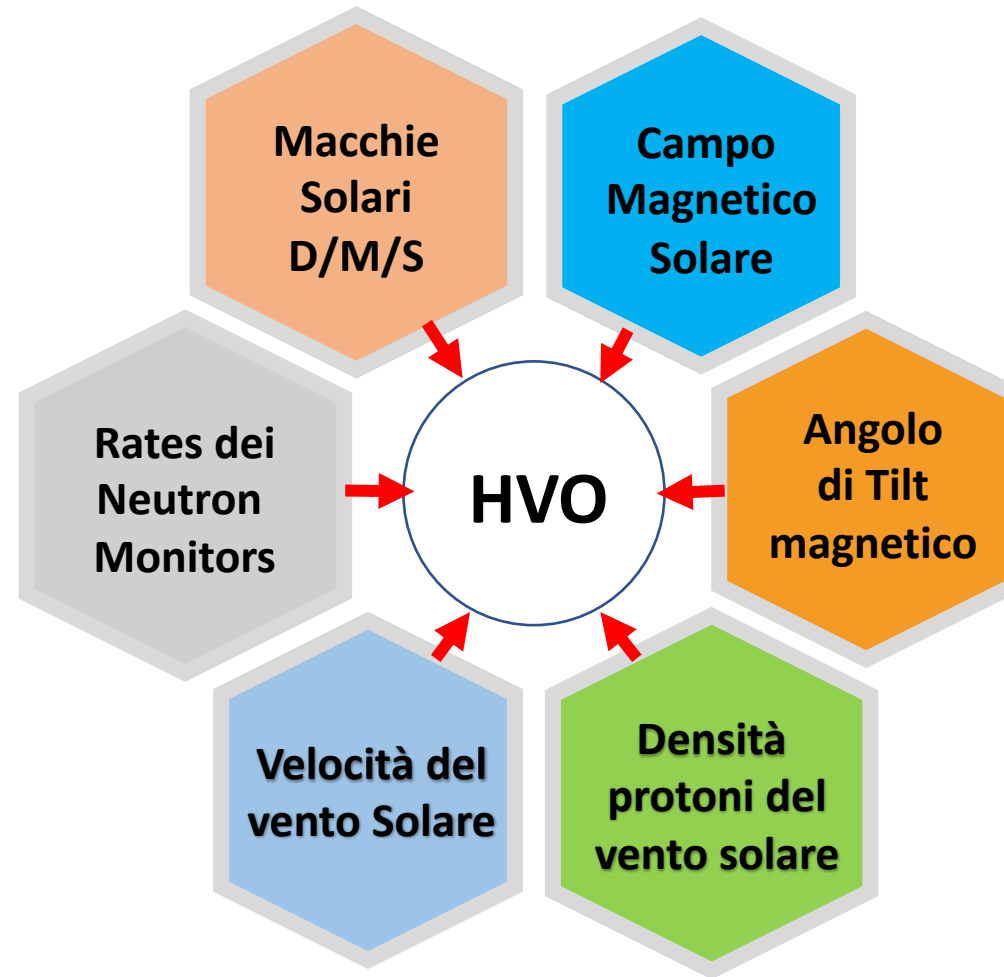
HVO è un portale online che raccoglie i dati di attività solare e radiazione carica da diversi database online. Archivia 50 anni di dati e si aggiorna a cadenza giornaliera. HVO inoltre implementa il modello di calcolo real-time del flusso di raggi cosmici.

Funzionalità

- Estrazione
- Visualizzazione
- Aggiornamento
- Download

HVO è implementato su una macchina virtuale (VM) installata presso la server farm INFN dello *Space Science Data Center* [SSDC/ASI](https://ssdc.asi.it).

<https://crisp.unipg.it/hvo>



Implementazione

- HTML
- JSROOT (JavascriptROOT)
- Python
- PHP
- C++

Heliophysics Virtual Observatory (HVO)

HVO è un portale online che raccoglie i dati di attività solare e radiazione carica da diversi database online. Archivia 50 anni di dati e si aggiorna a cadenza giornaliera. HVO inoltre implementa il modello di calcolo real-time del flusso di raggi cosmici.

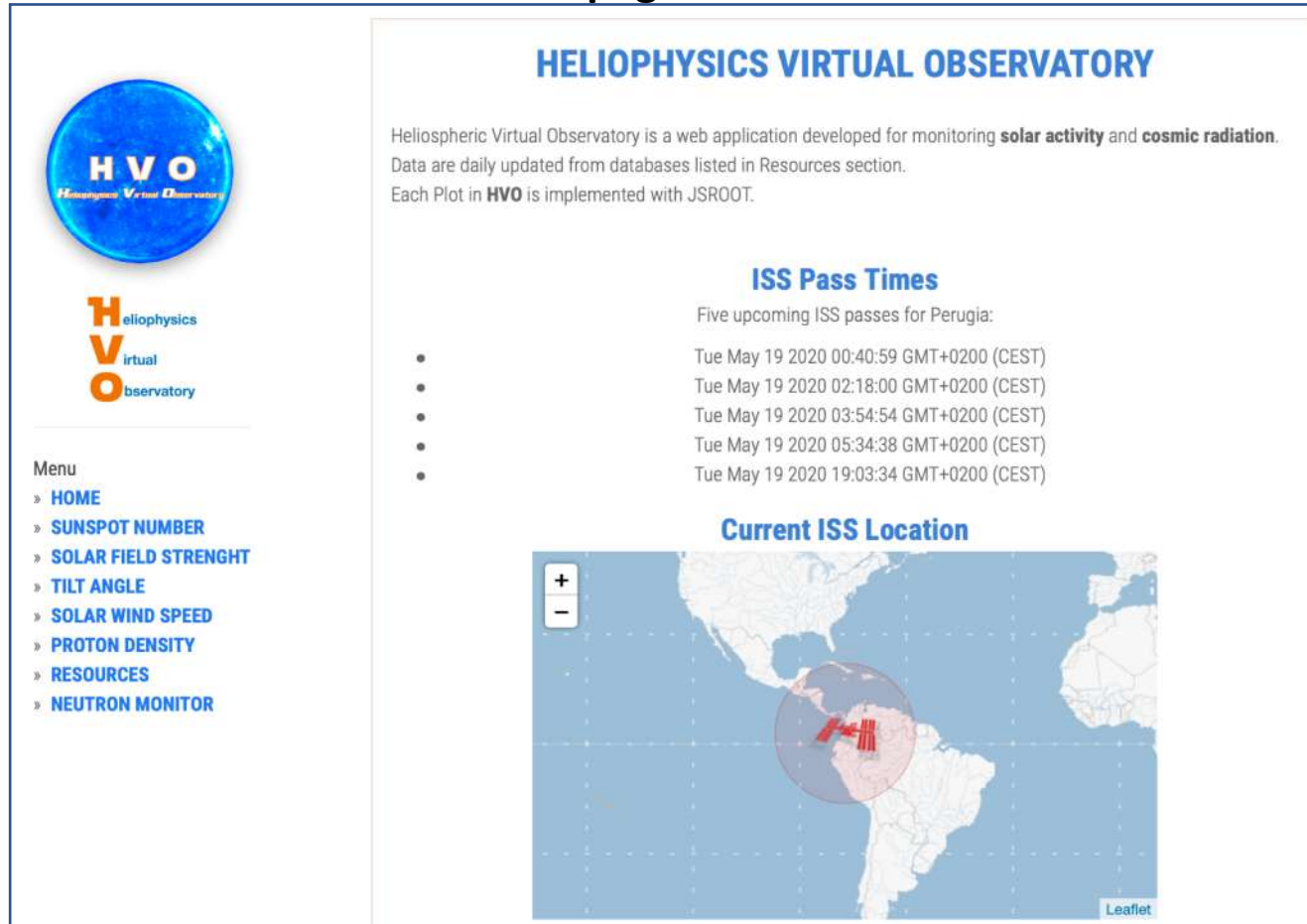
Funzionalità

- Estrazione
- Visualizzazione
- Aggiornamento
- Download

HVO è implementato su una macchina virtuale (VM) installata presso la server farm INFN dello **Space Science Data Center SSDC/ASI**.

<https://crisp.unipg.it/hvo>

Homepage di HVO

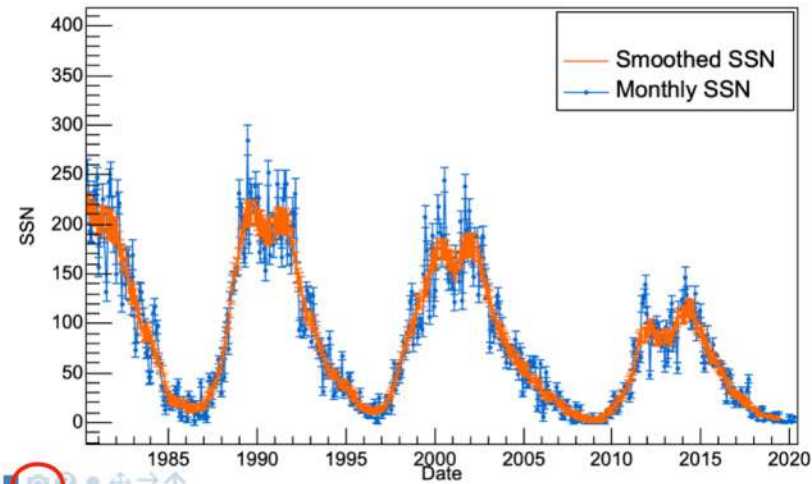
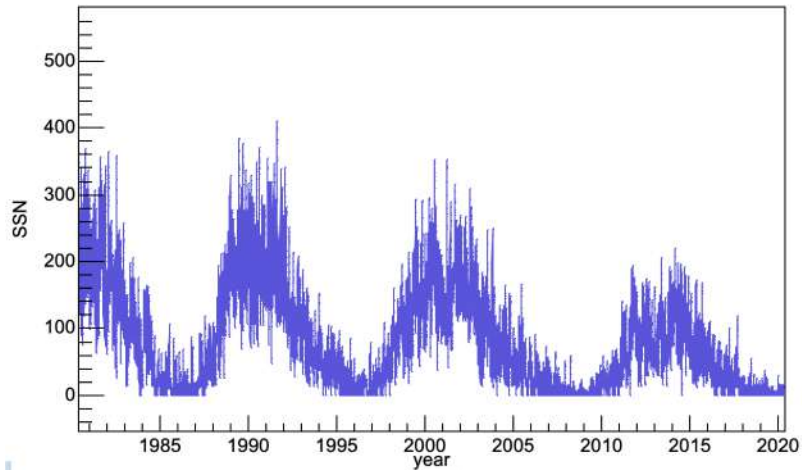


Implementazione

- HTML
- JSROOT (JavascriptROOT)
- Python
- PHP
- C++

Sezioni di HVO (1)

SSN(t)

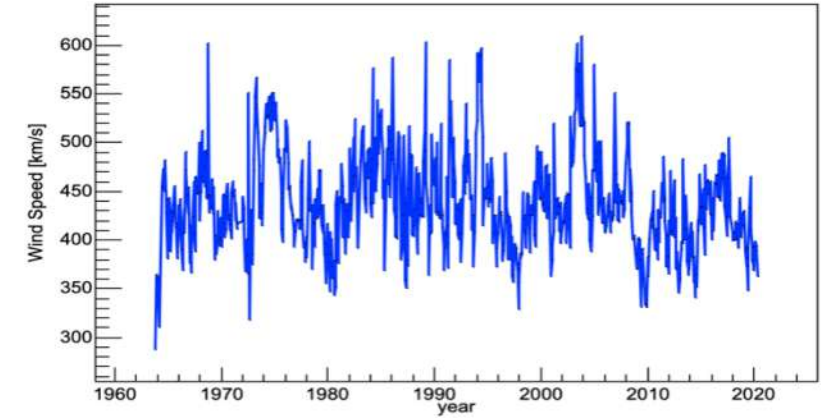


 PNG download button

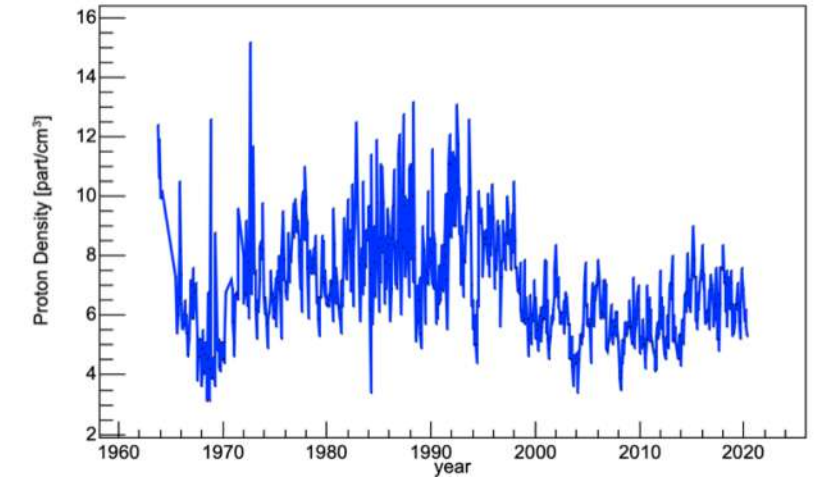
 ROOT File → ROOT file download button

Numero di macchie solari giornaliero, mensile e smoothed.
Estratti dalla piattaforma [SILSO](https://silso.oma.be/) del *Royal Observatory of Belgium*.

Solar Wind Speed



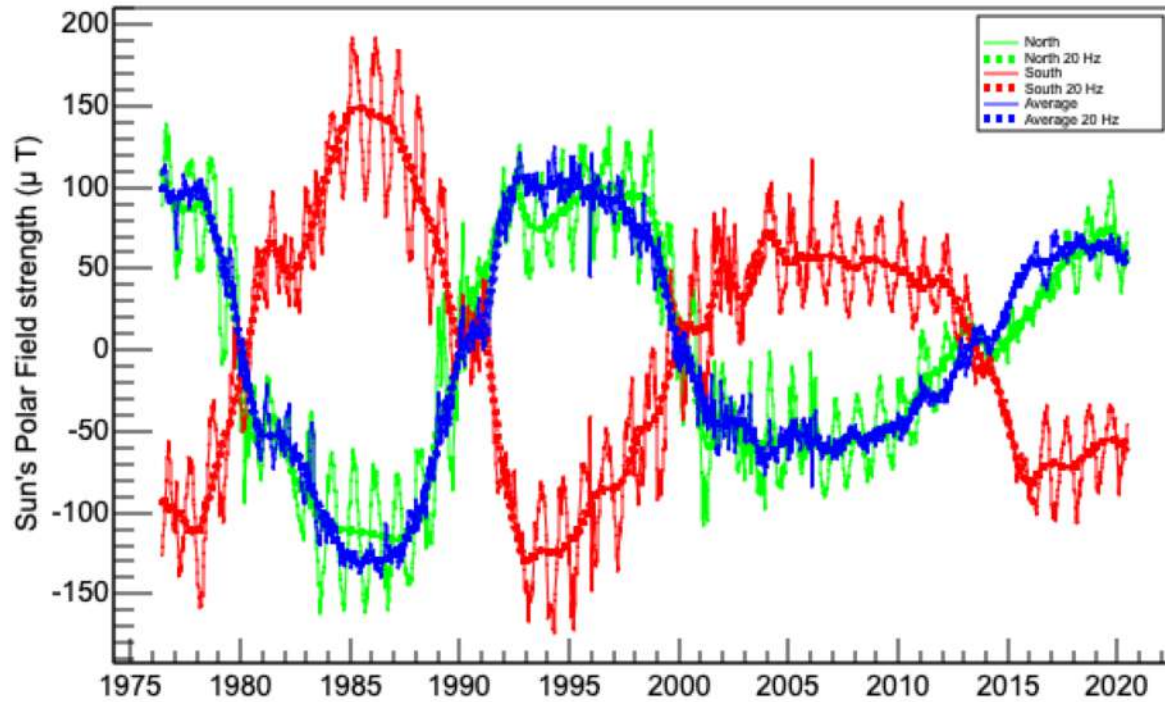
Proton Density



Velocità del vento solare e densità della sua componente protonica. Dati forniti da NASA aggiornati ~ ogni 27 giorni. Sonde spaziali [ACE](#), [ISEE-3](#) e [WIND](#).

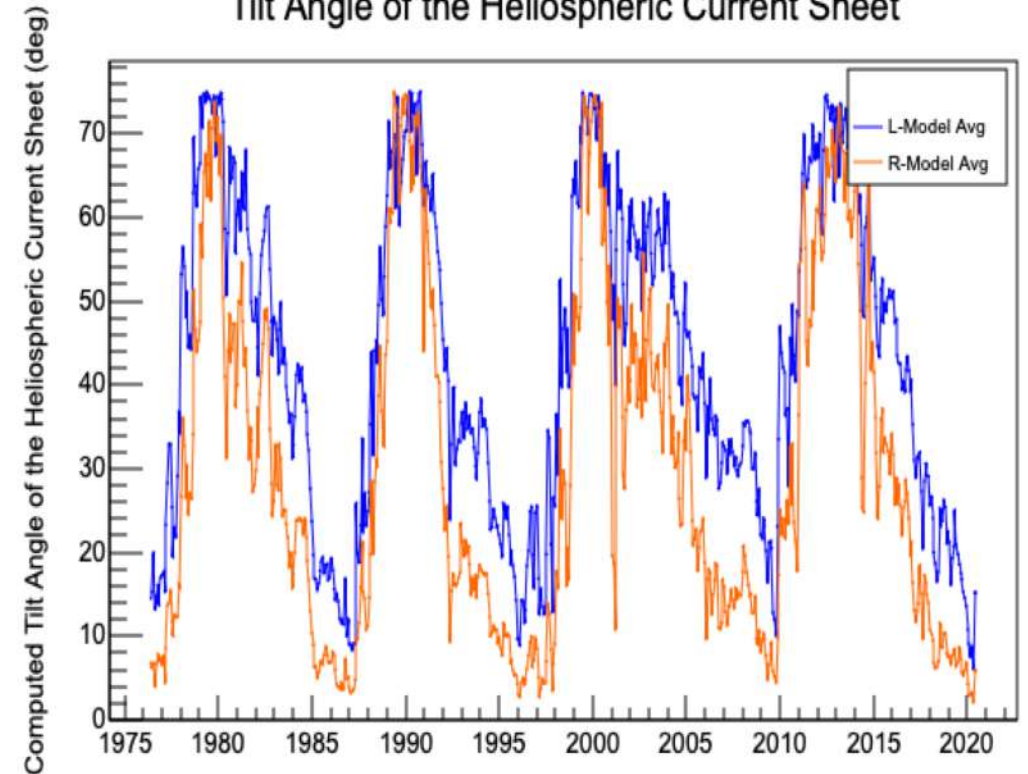
Sezioni di HVO (2)

Sun's Polar Field strength



Campo magnetico solare nell'emisfero Nord (N), Sud (S), valore medio ($Avg = (N - S)/2$) e corrispondenti valori "smoothed". Estratti da [Wilcox Solar Observatory](https://www.wilcox-solar-observatory.org/), Stanford, USA.

Tilt Angle of the Heliospheric Current Sheet



Angolo di tilt della corrente eliosferica diffusa, ricostruito secondo il modello classico (L) e il modello radiale (R). Estratti da [Wilcox Solar Observatory](https://www.wilcox-solar-observatory.org/), Stanford, USA

Sezioni di HVO (3)

Interfaccia per calcolo del flusso "real-time"

- Selezione della stazione NM
- Impostazione dell' energia di riferimento
- Selezione dell'intervallo temporale

$$J^p(E, t) = \frac{(E + M_p)^2 - M_p^2}{(E + M_p + \phi(t))^2 - M_p^2} J_{\text{lis}}^p(E + \phi(t)),$$

PARAMETERS SETTING

Select Neutron Monitor stations

☒ OULU ☒ NEWK ☒ JUNG
☐ APTY ☐ ROME ☐ MOSC
☐ HRMS ☐ MXCO

Select Energy for Proton Flux Model [GeV]: 1

Select date range manually

Start Date 1965 5 25

End Date 2020 5 25

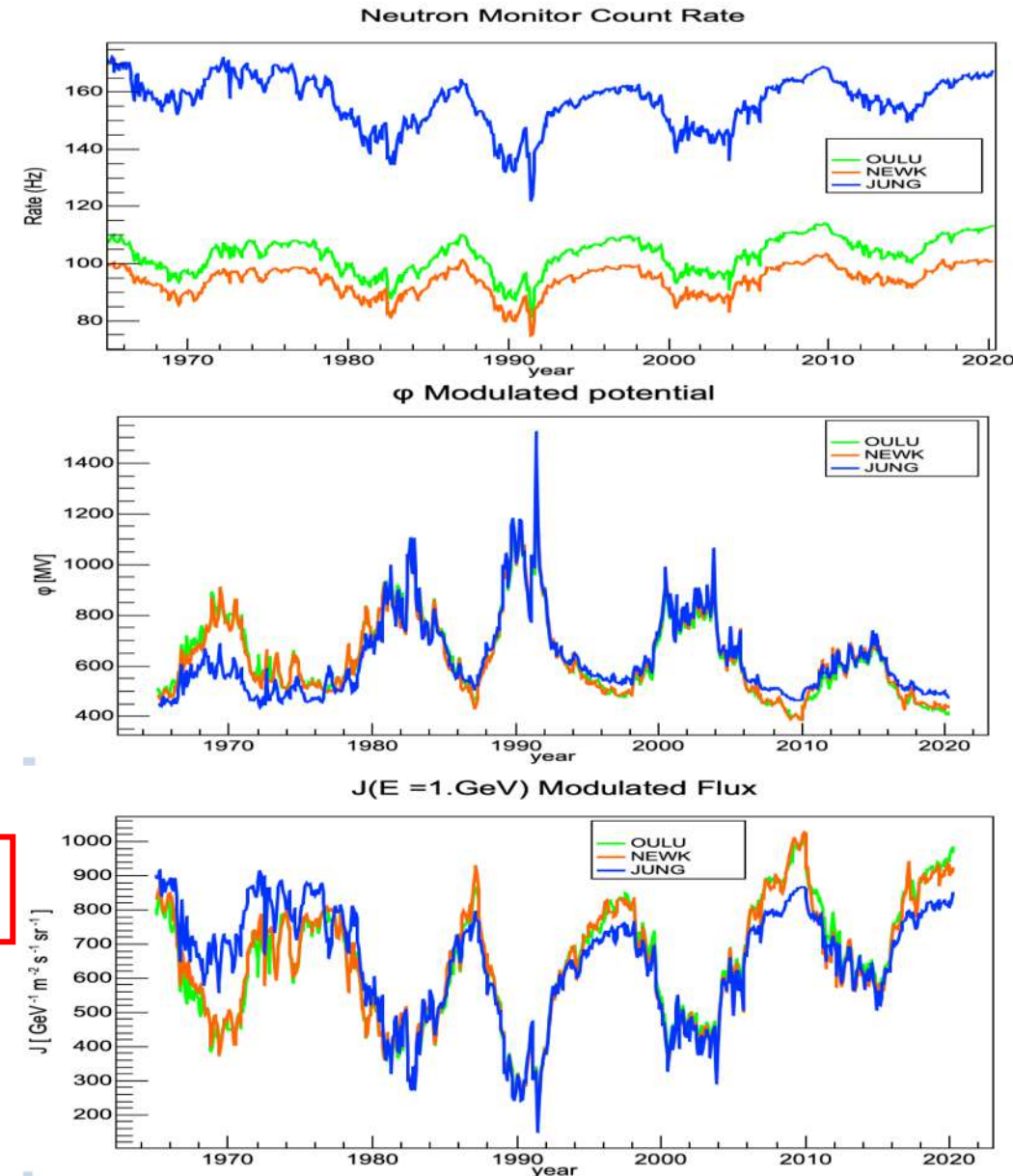
Submit

I rate dei NM sono estratti da *Neutron Monitor Database* [NMDB](https://nmdb.noaa.gov/)

$R(t)$

$\phi(t)$

$J(E, t)$



Conclusioni

È stato implementato il portale **HVO** :

- ✓ aggrega dati di attività solare e radiazione carica;
- ✓ archivia 50 anni di dati e si aggiorna a cadenza giornaliera;
- ✓ modello efficace per il calcolo *real time del flusso di RC* (nowcasting);



<https://crisp.unipg.it/hvo>

Possibili sviluppi di HVO

Tecnici

- accessibilità da rete pubblica;
- bilanciamento del carico;
- applicazioni di *Content Management System*;
- esportabilità dell'infrastruttura;

Scientifici

- **ulteriori dati** (SEP, CME) e **monitoraggio magnetosfera**;
- **implementazione di modelli numerici più precisi e sofisticati**;
- estensione del calcolo “real time” del flusso ad altre specie cariche di raggi cosmici e in altre zone dell'eliosfera;
- localizzazione e tracking di satelliti e sonde spaziali;
- **analisi delle correlazioni tra i vari dati solari/RC**;

Grazie per l'attenzione