Società Italiana di Fisica

106° Congresso Nazionale, Società Italiana di Fisica

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

Presentatore:

David Pelosi

Autori:

Pelosi D.
Tomassetti N.
Duranti M.

Istituti:

- Dipartimento di Fisica e Geologia, Università di Perugia
- Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – INFN – Sezione di Perugia

14 – 18 Settembre 2020

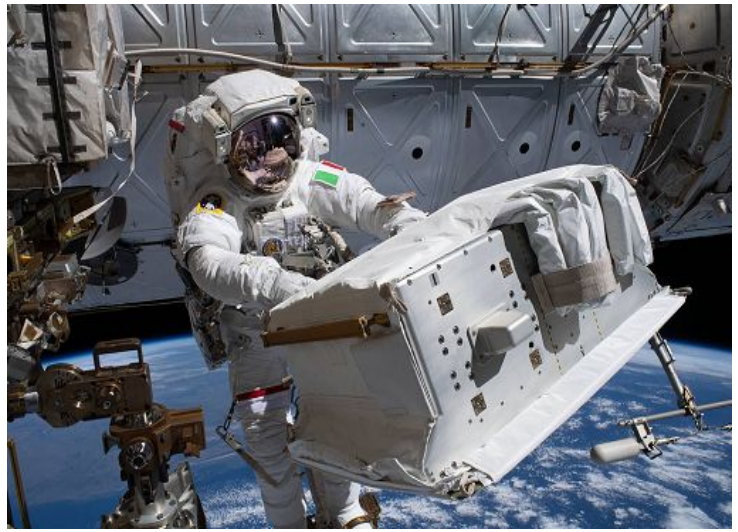
Introduzione

- Il flusso dei raggi cosmici nell'eliosfera è soggetto a variazioni temporali causate dal ciclo solare (**modulazione solare).**

- Dati di interesse:
  - **dati solari e interplanetari** (riflettono il ciclo solare e le condizioni dell'eliosfera);
  - **misure di raggi cosmici** a varie epoche (forniscono la variazione del flusso nel tempo).

- Obiettivi:
  - sviluppo del portale online **Heliophysics Virtual Observatory (HVO)**;
  - implementazione **modello real-time** per calcolo del flusso di raggi cosmici nello spazio.

- Applicazioni:
  - valutazione rischi di radiazione per satelliti ed esperimenti;
  - radioprotezione astronauti;
  - programmazione missioni spaziali a lungo termine (**Luna, Marte**).

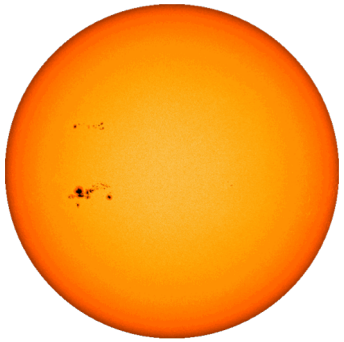


Dati solari e interplanetari

Macchie Solari (sunspots):

- **Sunspot Number (SSN)**

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

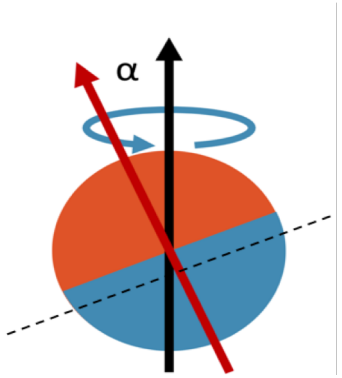


Vento Solare

- velocità radiale (V);
- densità protonica;

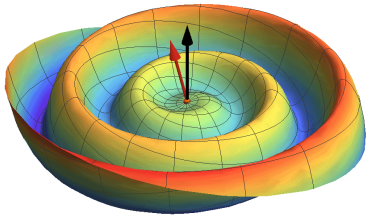
Campo Magnetico Solare (B):

- intensità e direzione del campo ai poli (N/S);
- angolo di tilt dell'asse magnetico α: 10° – 80°;



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.

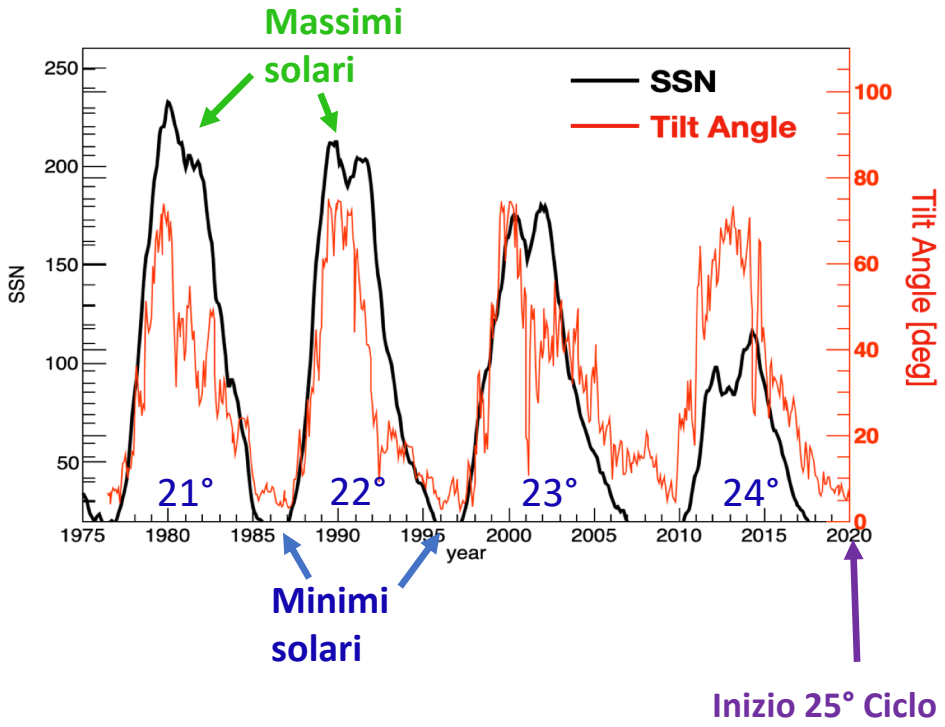


Ciclo solare

indicatori attività solare:

- SSN(t)
- α(t)

Periodo **ciclo solare** ≈ 11 *anni*



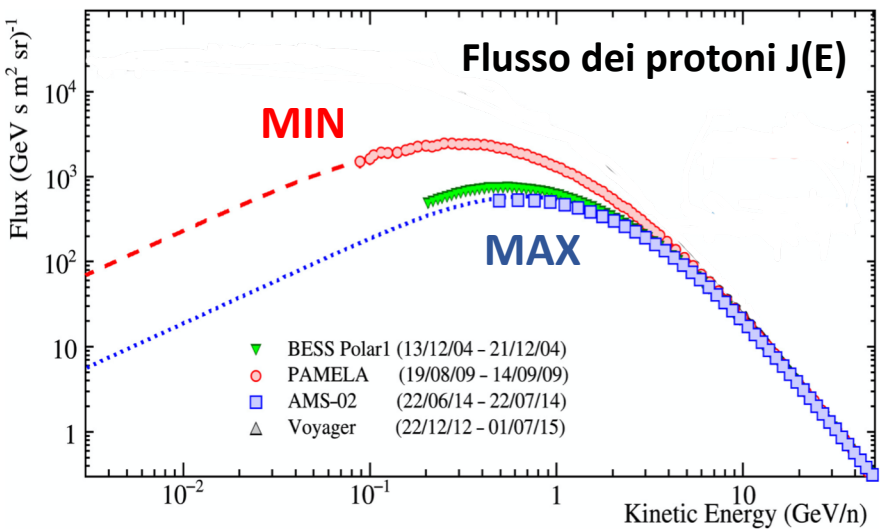
Dati di radiazione carica

Raggi Cosmici primari

Composizione:
- protoni ~ 90%
- He ~ 9%
- C, O, Fe ~ 1%
- antimateria < 0.1%

Origine:
- supernovae : E ≈ 10^{15}eV
- AGN, GRB e magnetar : E > 10^{15} eV
- origine Solare (SEP) : E < 10^{8} eV

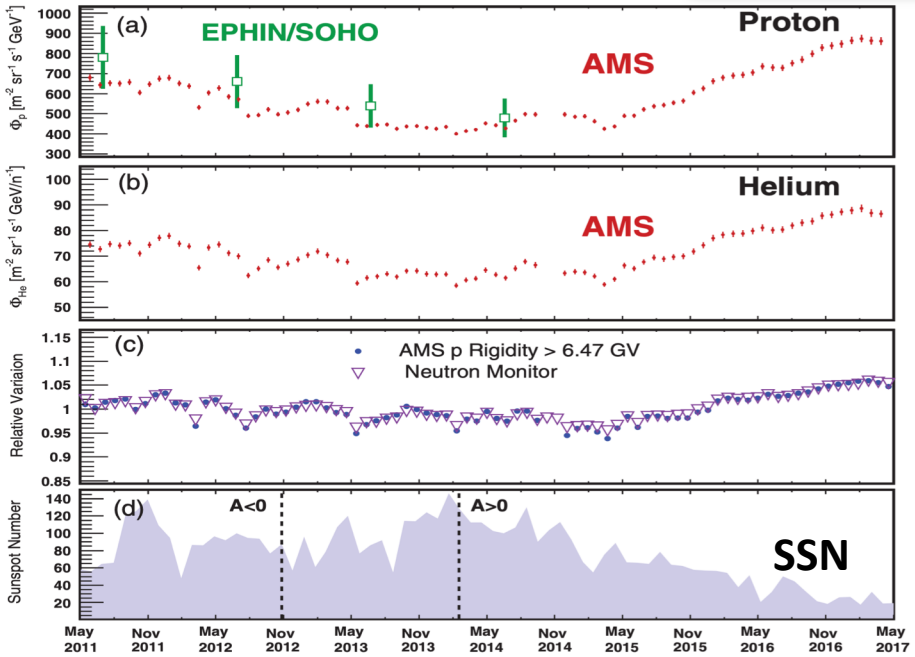
Flusso dei raggi cosmici: $$J(E) = \frac{dN}{dE \cdot dt \cdot dS \cdot d\Omega}$$



Raggi Cosmici secondari

Composizione:
- pioni;
- kaoni;
- elettroni;
- muoni.

Origine:
- interazione RC primari e atmosfera terrestre.



Modulazione solare:
anticorrelazione tra flusso di RC e attività solare.

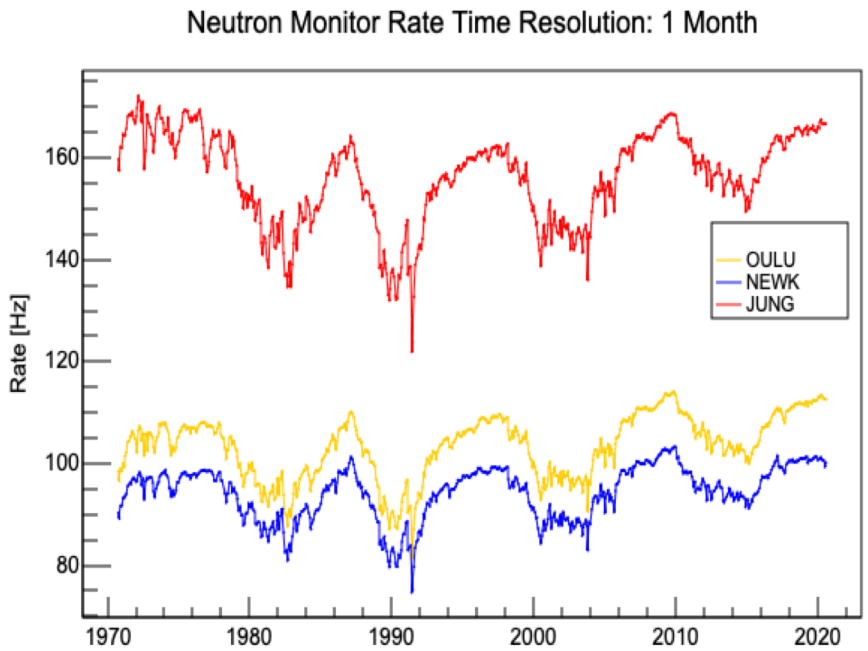
Neutron Monitor (NM)

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

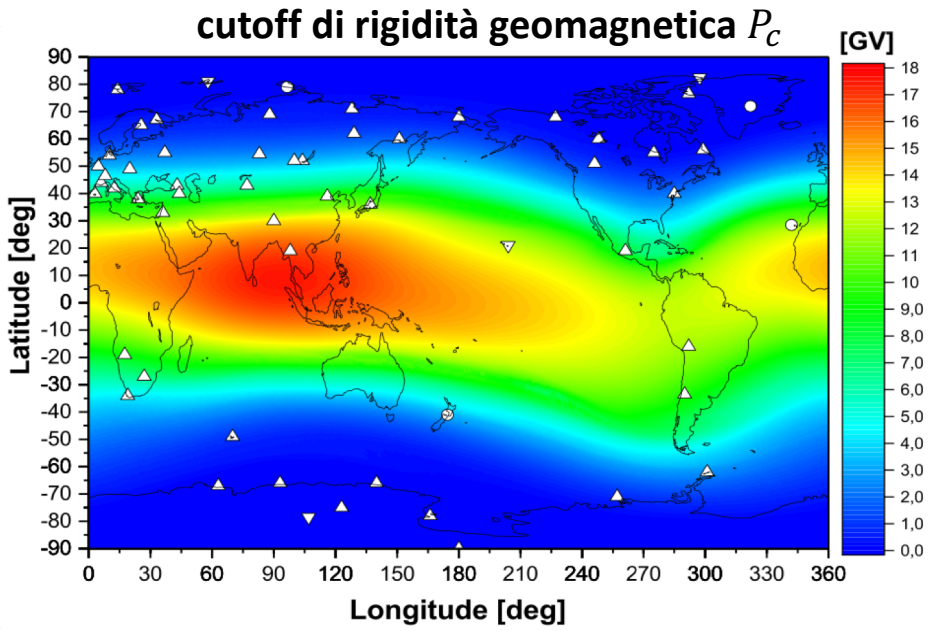
- i : specie di RC (90% protoni)
- E_c : dipende dal campo geomagnetico
- Y^d: funzione di risposta del rilevatore

} Dipendono dalla stazione NM

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



- 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

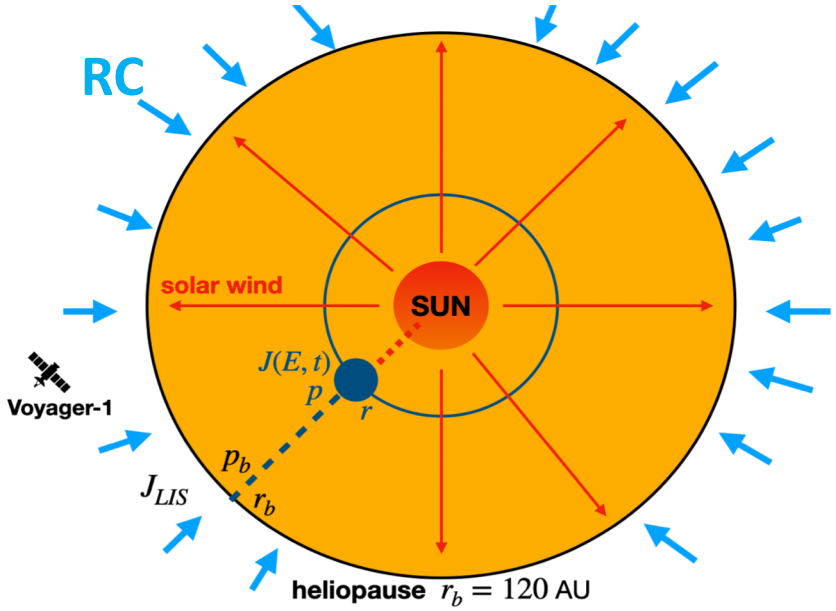
Il modello Force-Field

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

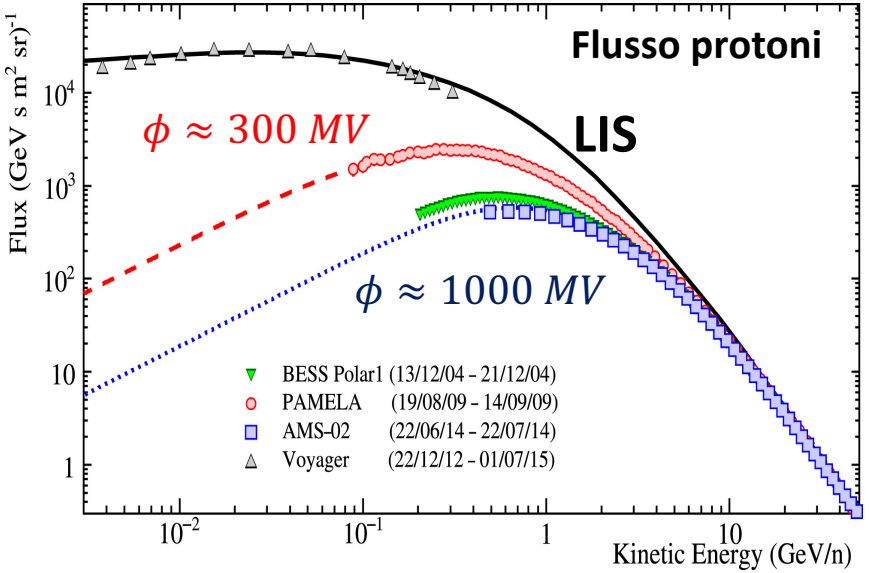
J_{LIS} : flusso di RC fuori dall'eliosfera.

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

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



- ϕ **potenziale di modulazione**,
- ϕ interpretato come la **perdita media di momento** delle particelle.
- 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 ϕ(t)

Determinazione di ϕ

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

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

Dai conteggi di NM in approssimazione Force-Field si ricava ϕ(t):

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

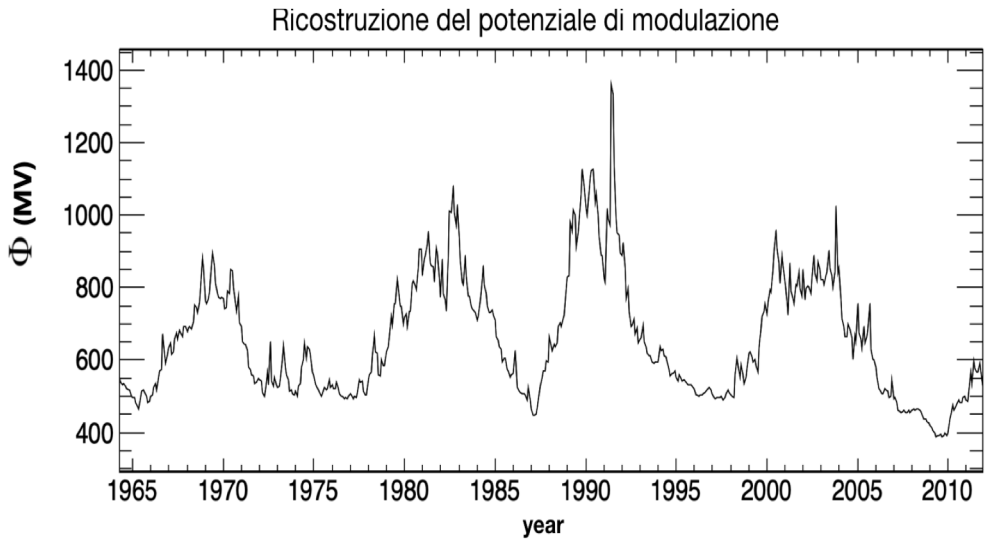
✓ <u>Usiamo un approccio efficace</u>

- 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

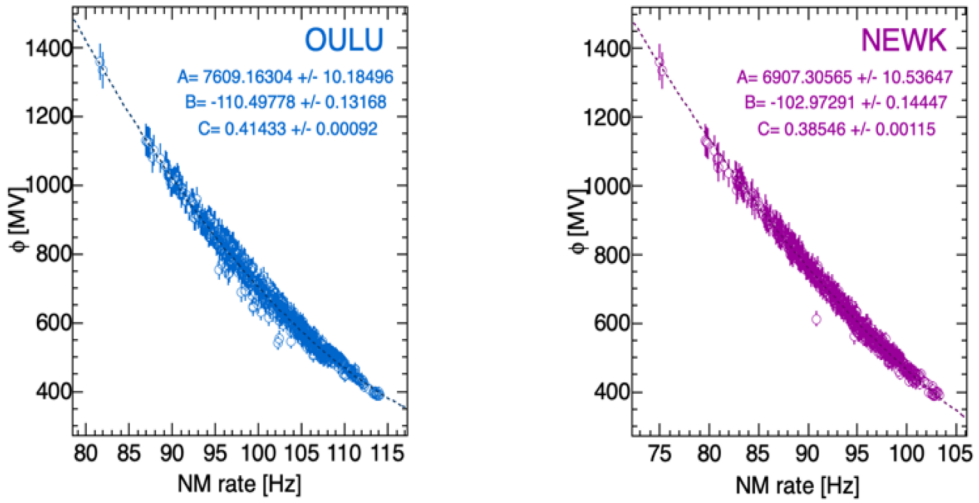
I dati di ϕ(t) e R(t), valutati in un intervallo temporale comune, sono ben descritti dalla relazione:

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

Ricostruzione di ϕ(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 $J(E,t)$

$$\boxed{t \longrightarrow R(t) \longrightarrow \phi(t) \longrightarrow J(E,t)}$$

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 di OULU, il flusso dei protoni J(E,t) è stato calcolato in due epoche t:

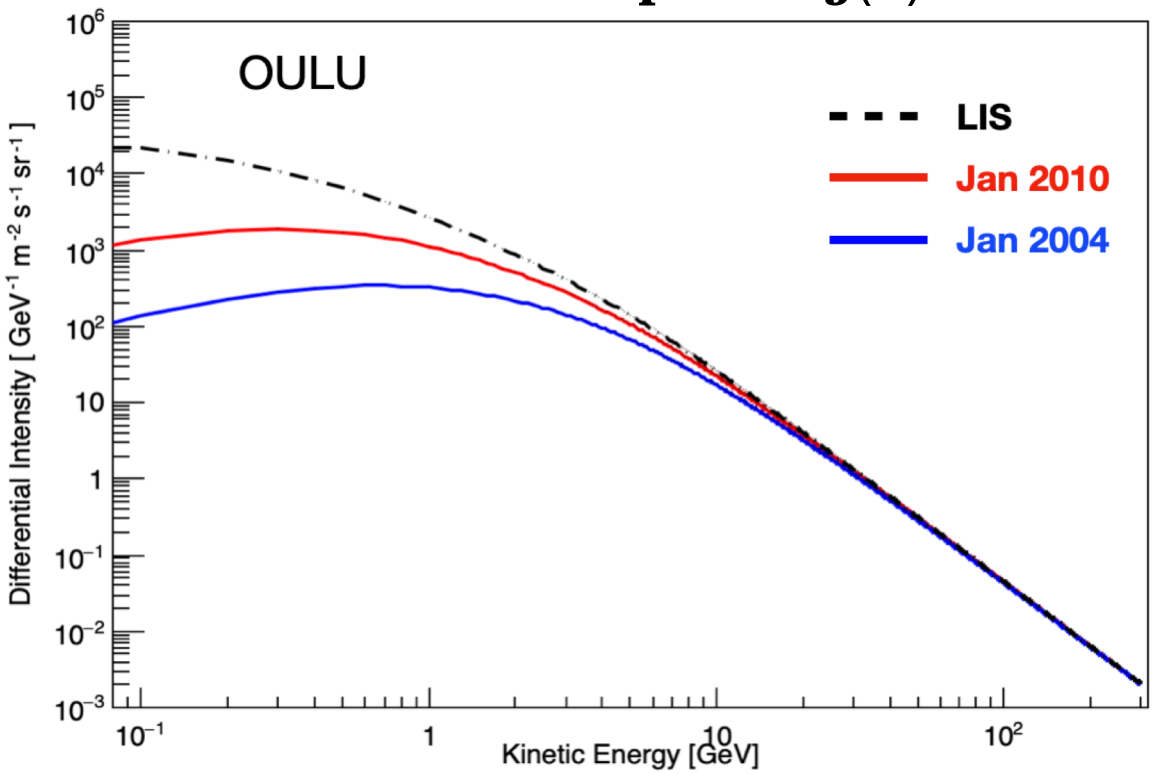
Gennaio 2010, nel minimo solare (SSN basso, flusso alto)
Gennaio 2004, nel massimo solare (SSN alto, flusso debole)

Usando altre stazioni si ottengono risultati compatibili

Stima "real-time" del flusso di protoni in alta atmosfera

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

Flusso di protoni J(E)



Heliophysics **V**irtual **O**bservatory (**HVO**)

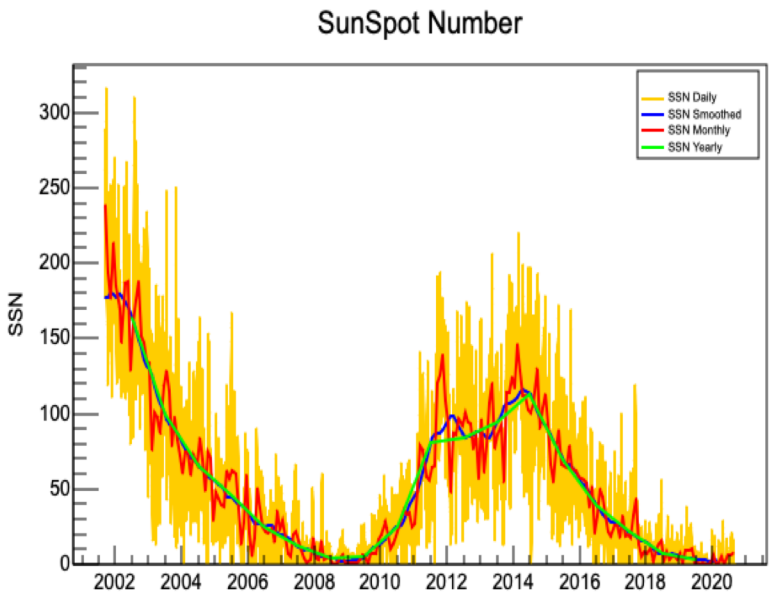
HVO è un portale online che raccoglie i dati di attività solare e radiazione carica da diversi database online. Archivia 50 anni di dati e si aggiorna a cadenza giornaliera. HVO inoltre implementa il modello di calcolo real-time del flusso di raggi cosmici.

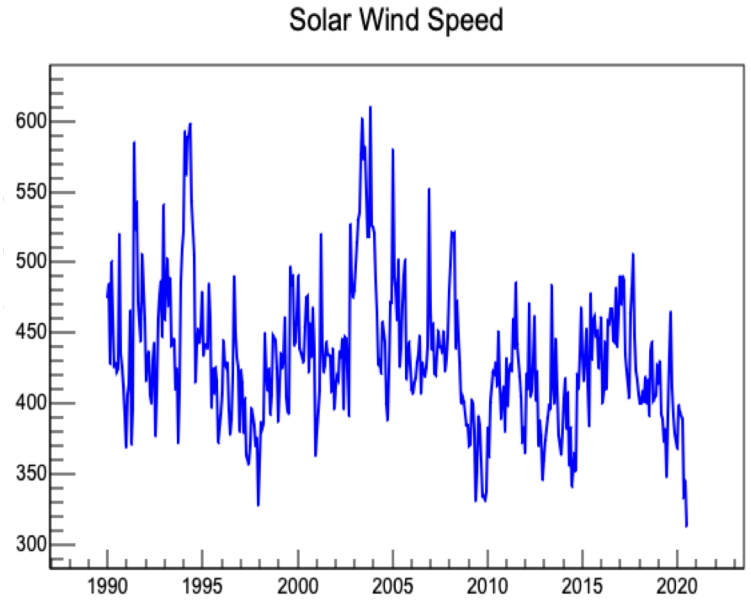
Funzionalità
- Estrazione
- Visualizzazione
- Aggiornamento
- Download

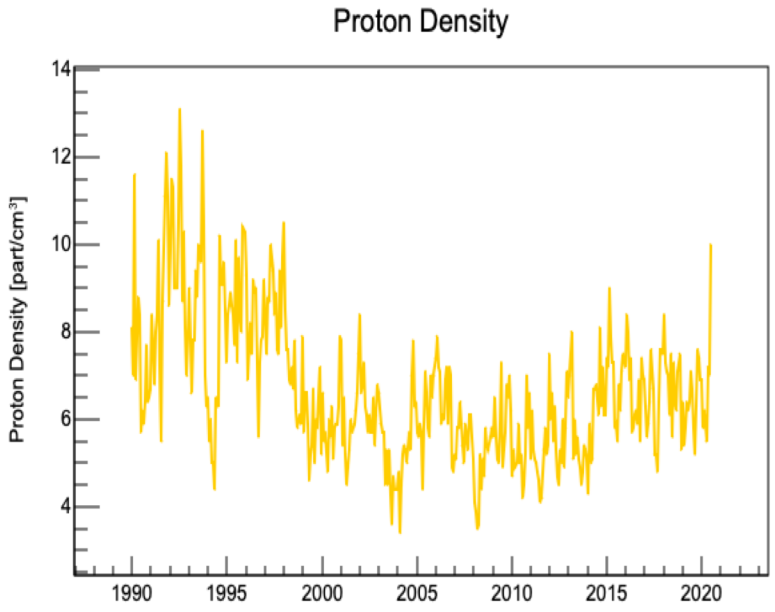
HVO è implementato su una macchina virtuale (VM) installata presso la server farm INFN dello **Space Science Data Center SSDC/ASI.**

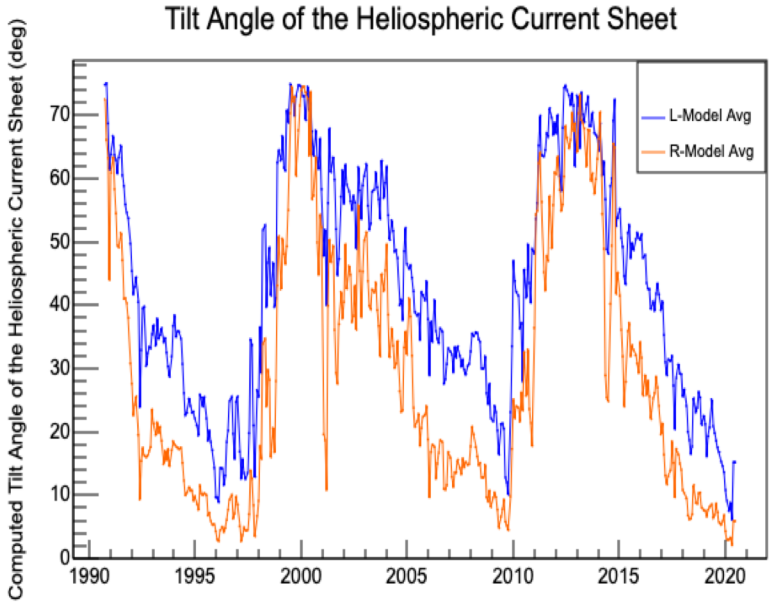
https://crisp.unipg.it/hvo

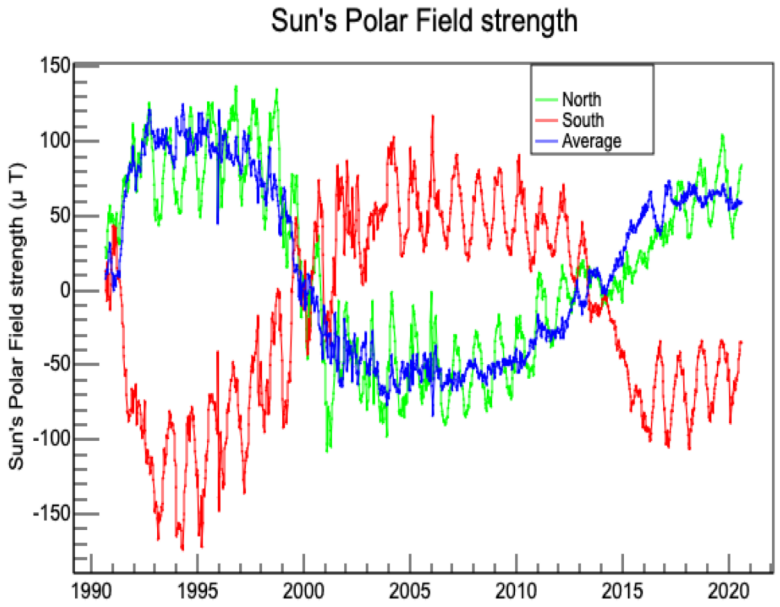
Implementazione
- HTML
- JSROOT (JavascriptROOT)
- Python
- PHP
- C++

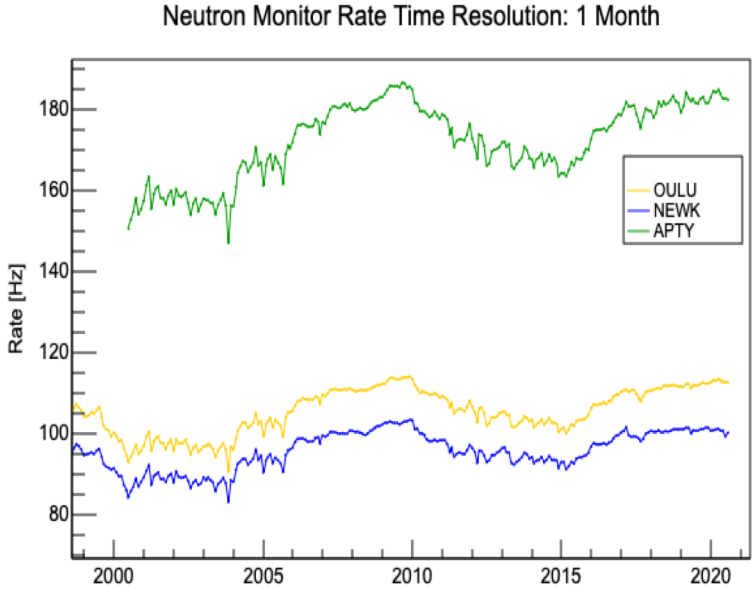

SunSpot Number
SSN
SSN Daily
SSN Smoothed
SSN Monthly
SSN Yearly


Solar Wind Speed


Proton Density
Proton Density [part/cm³]


Tilt Angle of the Heliospheric Current Sheet
Computed Tilt Angle of the Heliospheric Current Sheet (deg)
L-Model Avg
R-Model Avg


Sun's Polar Field strength
Sun's Polar Field strength (μ T)
North
South
Average


Neutron Monitor Rate Time Resolution: 1 Month
Rate [Hz]
OULU
NEWK
APTY

Implementazione Modelllo Force Field

Interfaccia per calcolo del flusso "real-time"

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

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

Neutron Monitor stations

OULU ☑ JUNG ☐ MXCO ☐
NEWK ☑ HRMS ☐
APTY ☑ MOSC ☐

Time Resolution of Neutron Monitor data 1 Month

Select Energy for Proton Flux Model [GeV]: 1

Select date range manually

Start Date 1990 9 15

End Date 2020 9 15

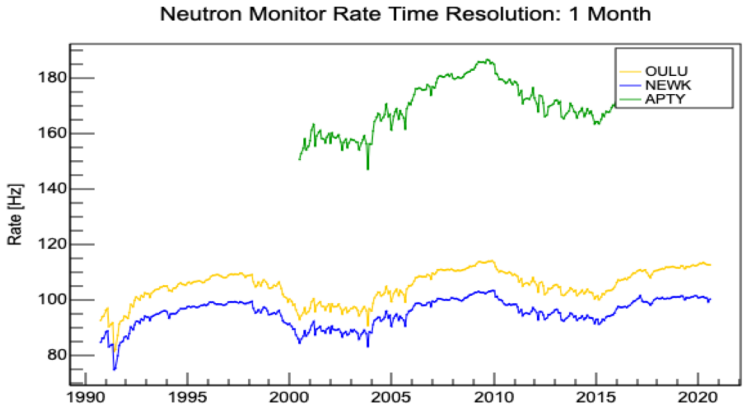
Submit

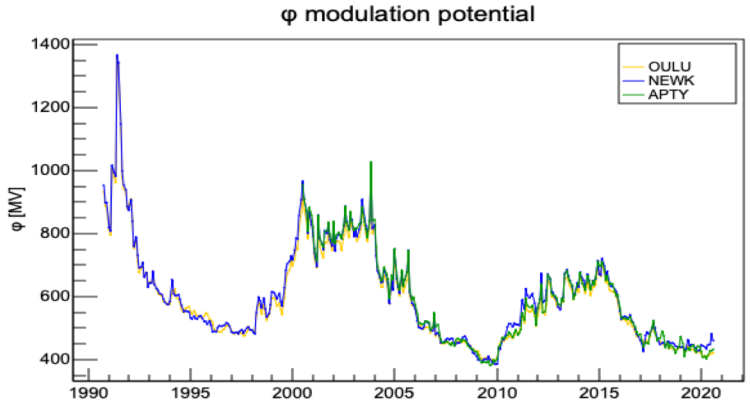
I rate dei NM sono estratti da Neutron Monitor Database NMDB

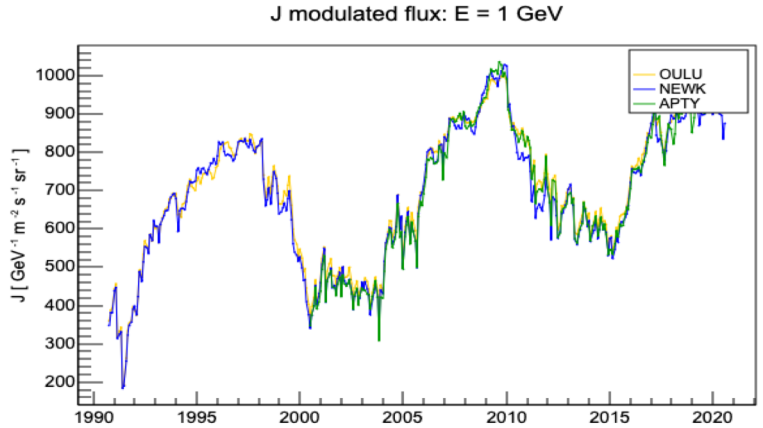
R(t)

ϕ(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

- 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.**