



Variazioni giornaliere (e non solo) nel flusso dei raggi cosmici

F.Riggi

UniCT, INFN CT & Centro Fermi

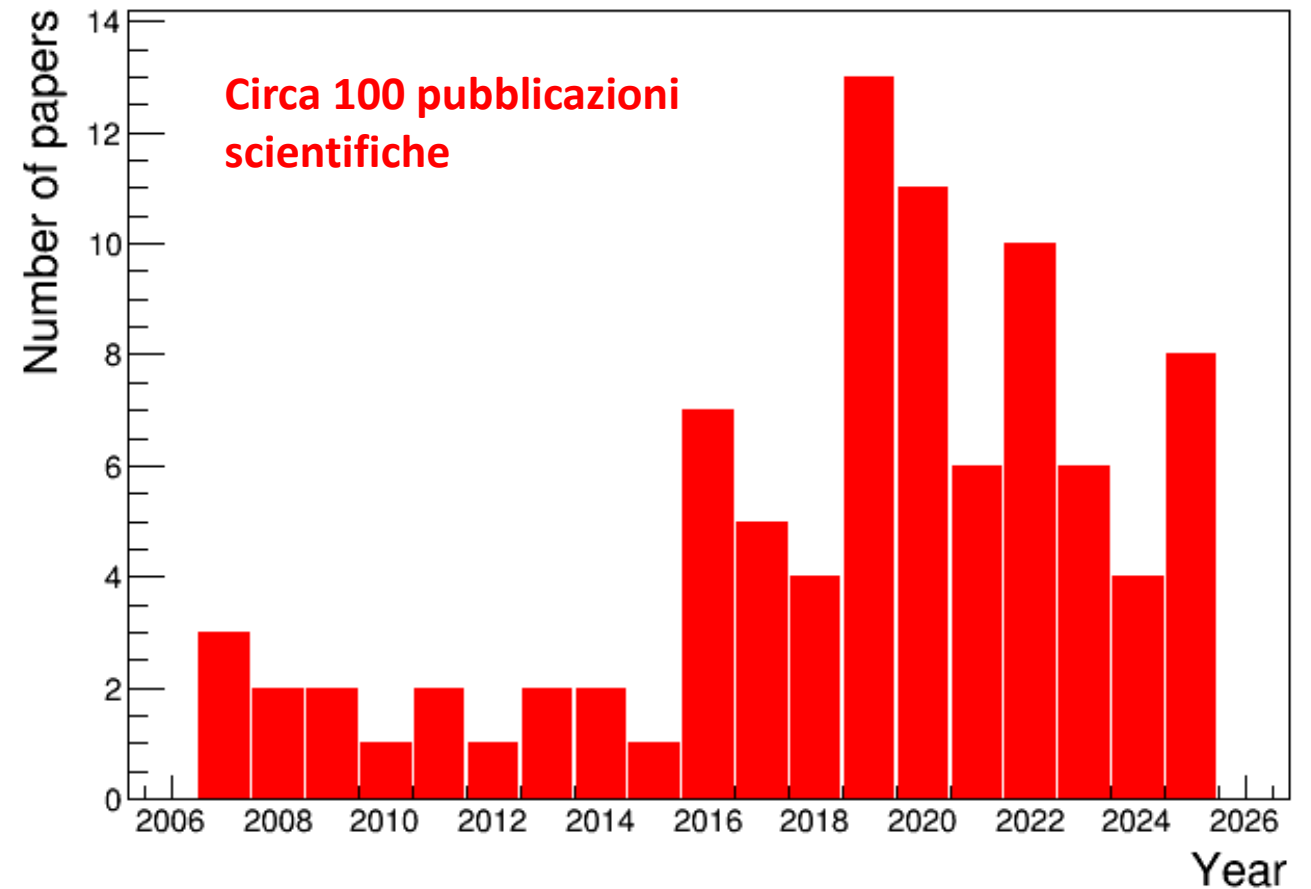
Run Coordination Meeting, 27 Maggio 2026

Recenti attività di analisi in EEE

- Andamento del flusso dei cosmici con la latitudine con varie campagne di misura
 - A bordo del battello Nanuq (latitudini polari)
 - Sulla nave Amerigo Vespucci (Adriatico e Tirreno)
 - In varie località lungo l'Italia
 - In auto dall'Italia alla Norvegia
- Studio del flusso dei muoni underground
 - Misure sotto le colline di Trento
- Studio della modulazione annuale del flusso dei cosmici a latitudini elevate
- Studio degli effetti della temperatura dell'alta atmosfera
- Studio delle variazioni Forbush
- Studio delle variazioni giornaliere

Recenti attività di analisi in EEE: pubblicazioni scientifiche

- Questi studi, pubblicati su importanti riviste scientifiche, riportano i ringraziamenti a studenti e docenti scolastici coinvolti in EEE, riconoscendone il contributo in tutte le fasi delle attività.
- Sommario complessivo delle attività EEE nel periodo 2004-2024 recentemente pubblicato sul Giornale di Fisica e distribuito a tutte le scuole.



Variazioni nel flusso dei raggi cosmici

Il flusso dei raggi cosmici nell'eliosfera e alla sommità dell'atmosfera terrestre è soggetto a variazioni nel tempo, di natura periodica o transiente.

Lo studio di queste variazioni è stato di interesse per i fisici fin dalla loro scoperta, oltre un secolo addietro.

Esempi di variazioni transienti:

Variazioni Forbush

Ground Level Enhancement (GLE)

Esempi di variazioni periodiche:

Variazioni a lungo termine (11 / 22 anni, legate ai cicli solari)

Variazioni stagionali (1 anno circa)

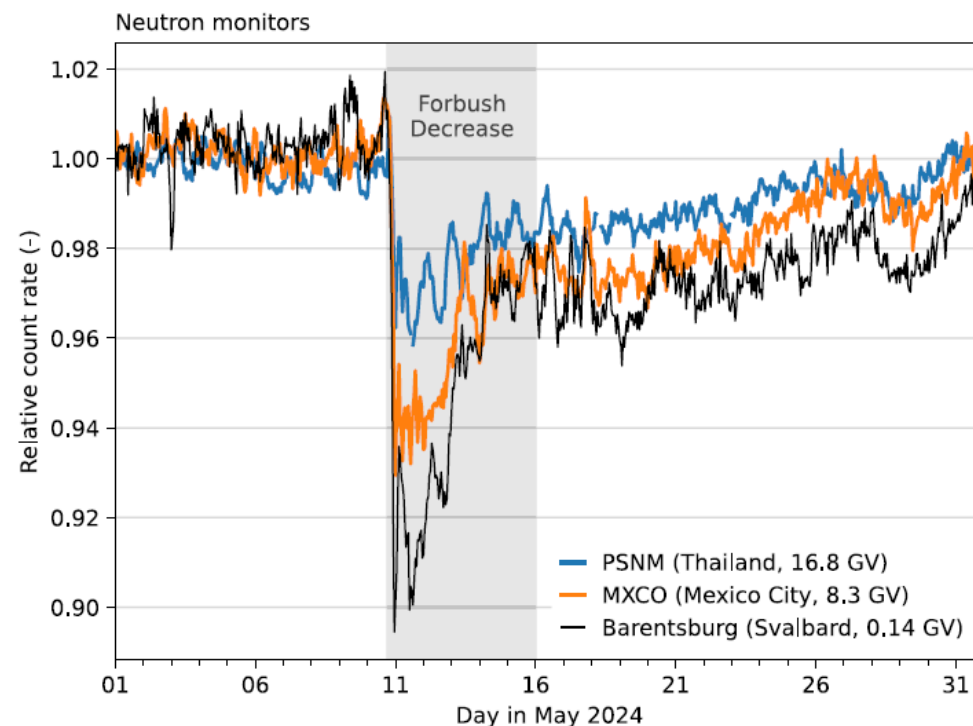
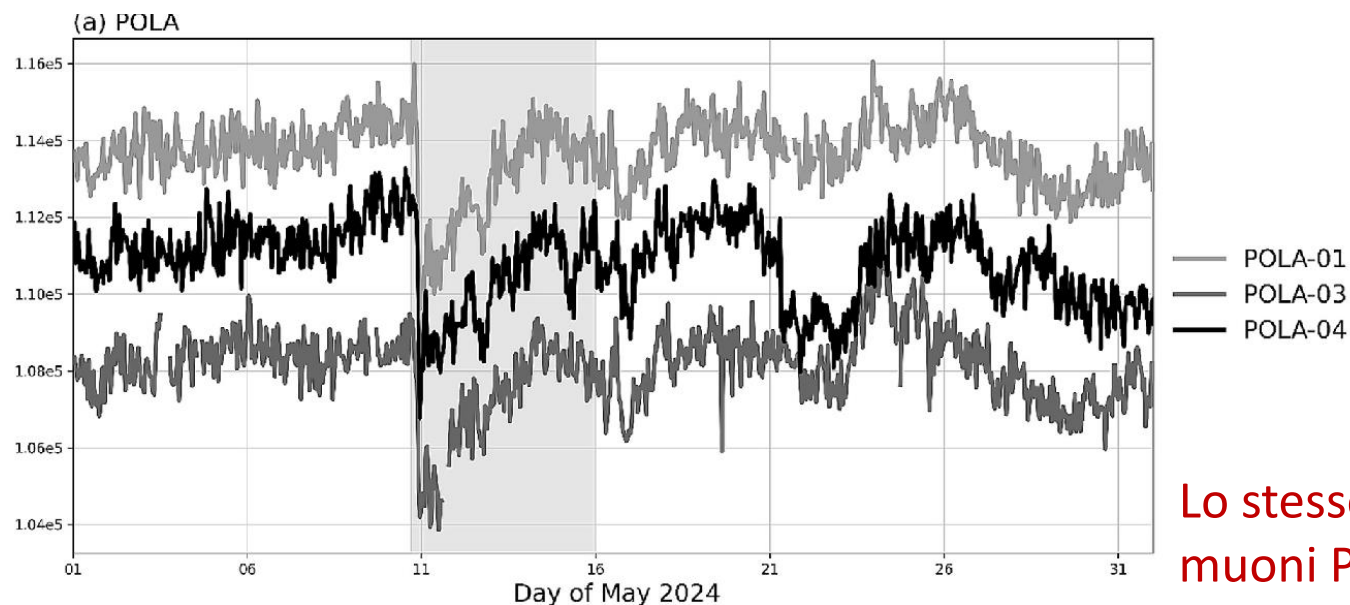
Variazioni a medio termine (27 giorni, periodo di rotazione medio del Sole)

Variazioni giornaliere

Tutte queste variazioni sono influenzate da molti fattori, tra cui l'attività solare, il campo magnetico interplanetario e l'attività geomagnetica terrestre

Variazioni transienti (Forbush)

- Una rapida diminuzione del flusso dei cosmici (nell'arco di poche ore), seguita da una fase di ripristino (nell'arco di alcuni giorni)
- Generalmente associate a eventi catastrofici solari (solar flares intensi, accompagnati da espulsione di massa coronale, CME)
- Ampiezza di questa variazione da qualche percento fino al 20%
- Osservato a terra sia con i neutroni che con i muoni

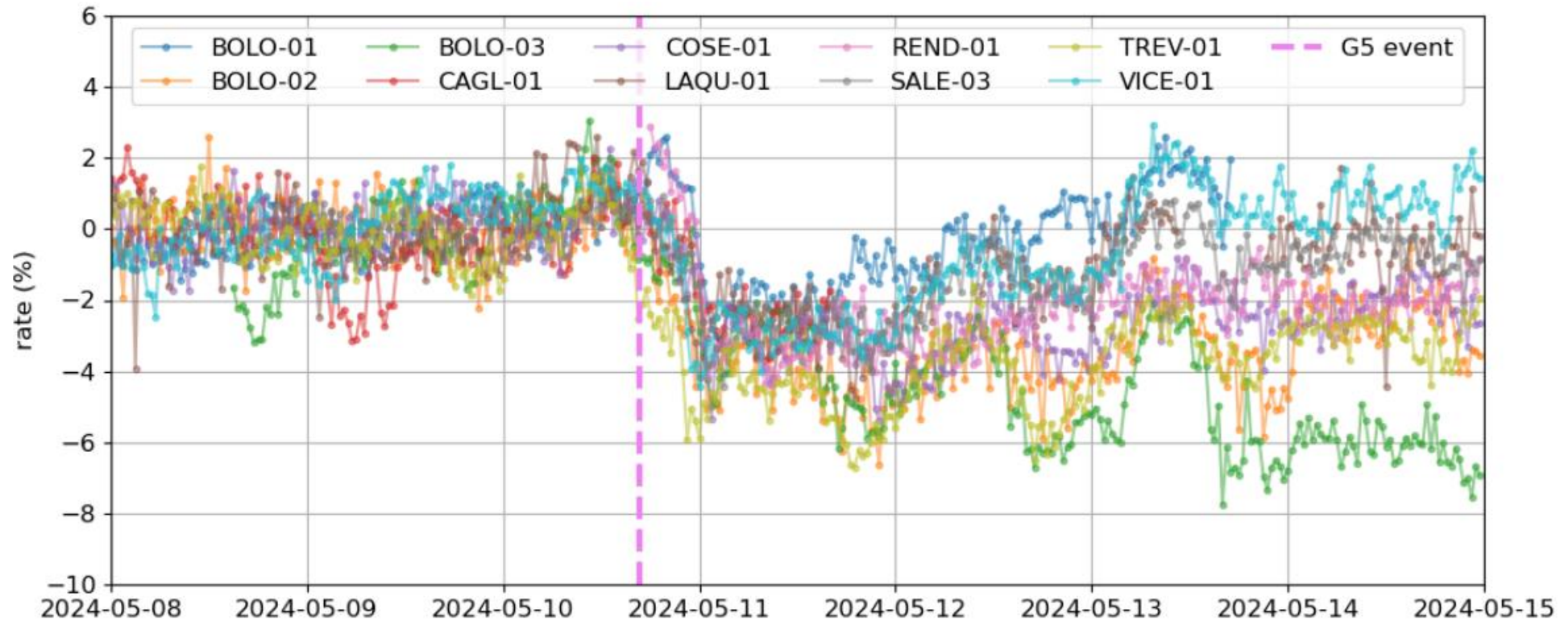


Variazione Forbush osservata a Maggio 2024 da alcuni rivelatori di neutroni

Lo stesso evento osservato dai rivelatori di muoni POLA-R alle Svalbard

Variazioni transienti (Forbush)

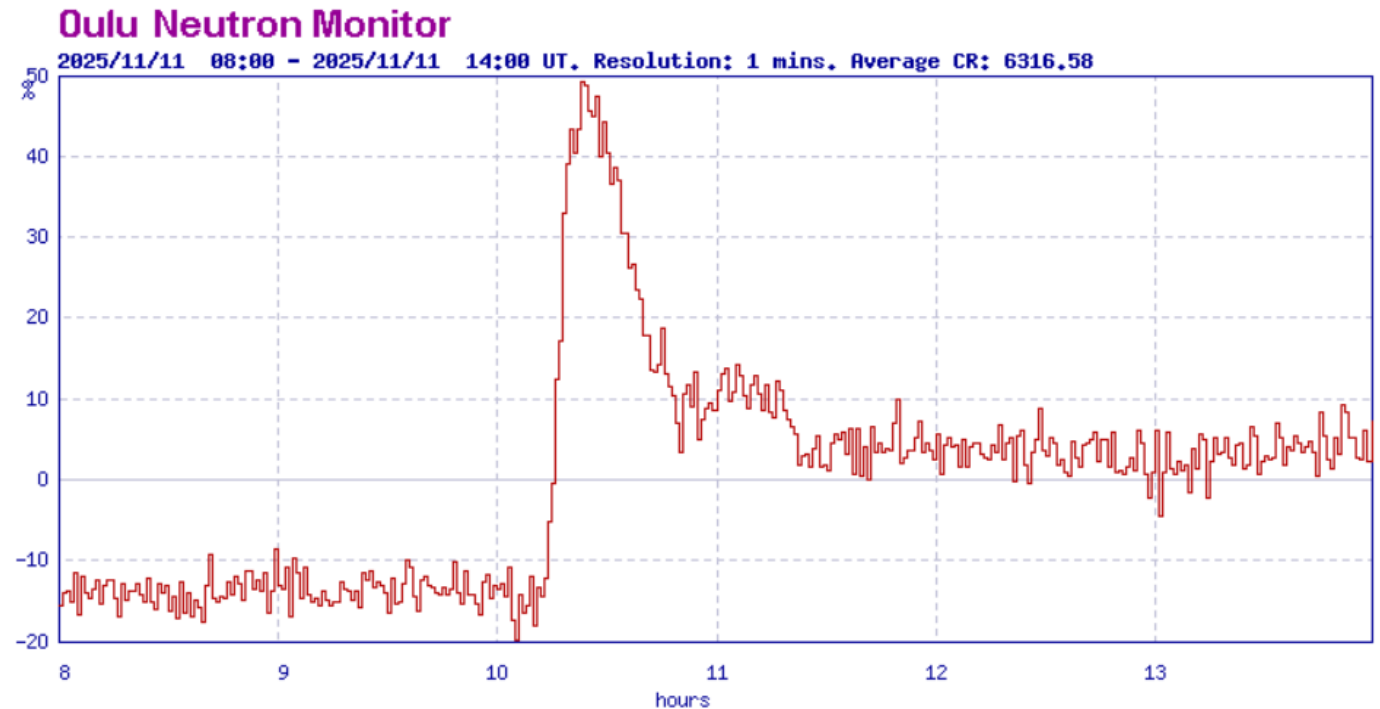
.. E ancora lo stesso evento osservato dai rivelatori MRPC di alcune sedi del progetto EEE



Variazioni transienti (Ground Level Enhancement)

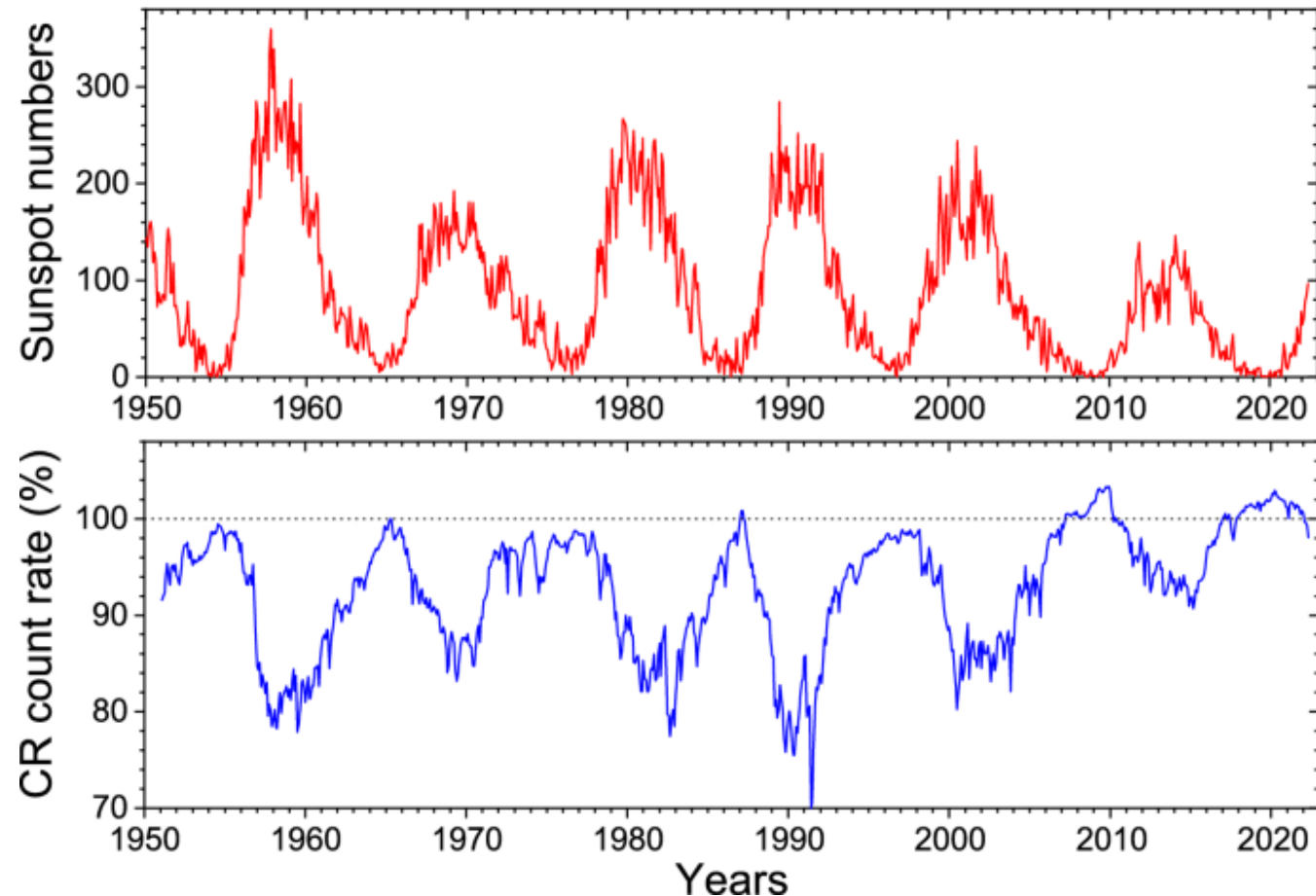
- Una rapida variazione in aumento (durata complessiva dell'ordine di un'ora) del flusso dei cosmici osservato sulla Terra.
- Associata ad emissione di particelle di alta energia (GeV) dal Sole (normalmente dal Sole vengono emesse solo particelle con energia dei MeV/decine di MeV).
- Eventi molto rari, dal 1940 ad oggi (85 anni) solo 77 eventi osservati

GLE#77 (11 Novembre 2025)
osservato dal rivelatore di
neutroni di Oulu



Variazioni periodiche (Ciclo 11-anni)

- L'attività del Sole (numero di macchie solari) è soggetta a variazioni periodiche (periodo di 11 anni circa).
- La fase di inversione non è istantanea ma dura circa 1-2 anni.
- In questo periodo (2024-2026) stiamo attraversando proprio questa fase.

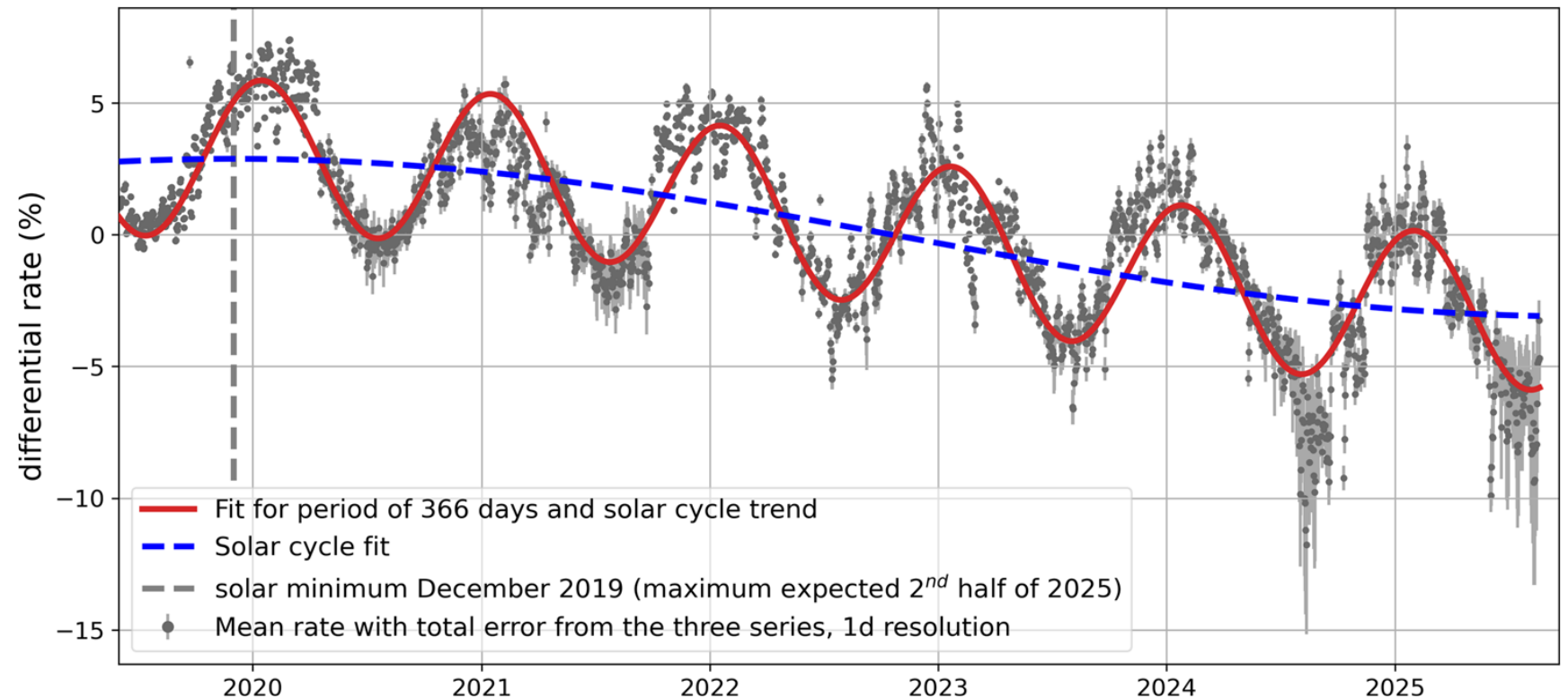


Correlazione (negativa) tra abbondanza di macchie solari e flusso di cosmici sulla Terra

Variazioni stagionali (Periodo circa 1 anno)

Le variazioni con periodo di circa 1 anno sono dovute essenzialmente a

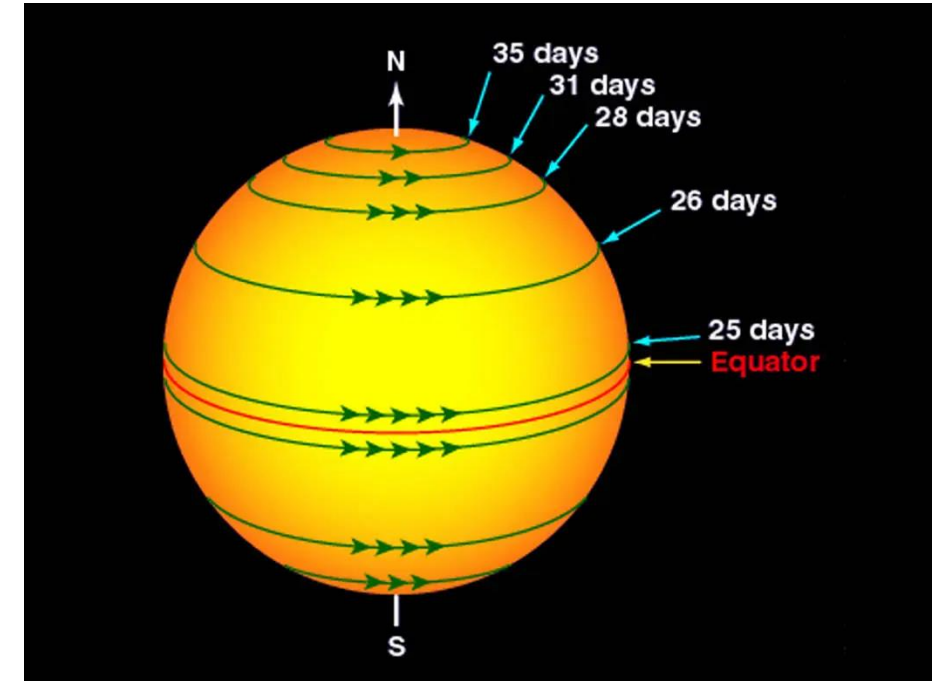
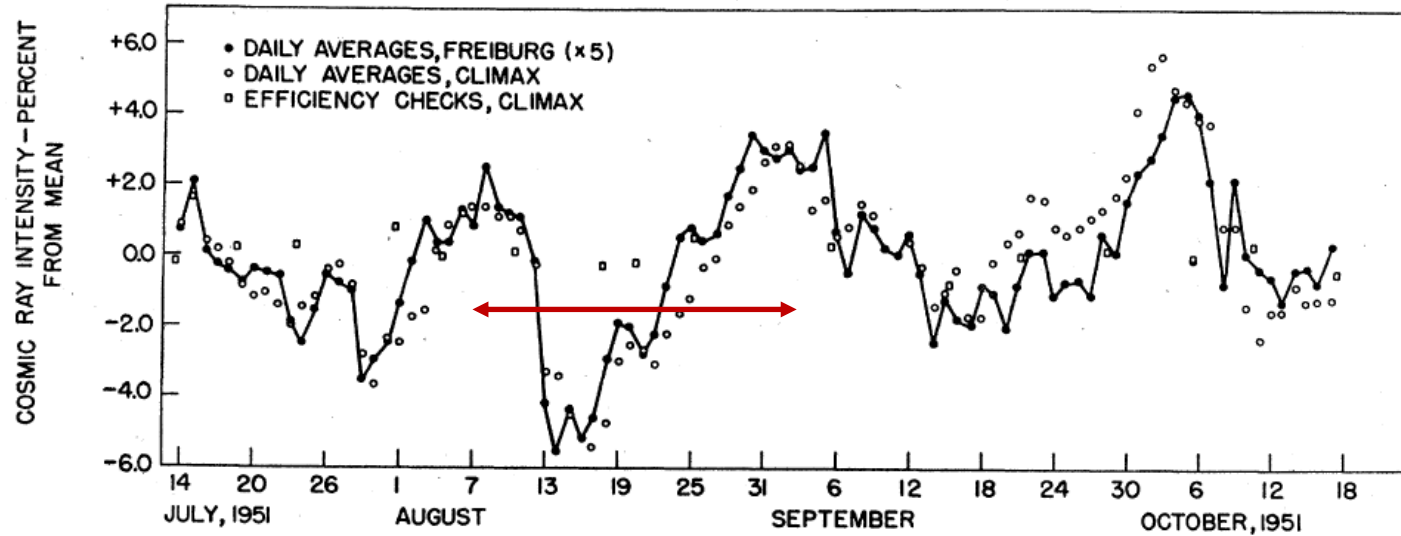
- Variazioni stagionali nella temperatura e densità dell'alta atmosfera terrestre
- Maggiore/minore distanza Terra-Sole durante l'orbita ellittica, con variazioni nel campo magnetico interplanetario



Flusso dei cosmici misurato dai rivelatori POLA-R negli ultimi 6 anni.

Variazioni a medio termine (27 giorni)

Legate al periodo di rotazione medio del Sole
(all'equatore circa 25 gg, ai poli circa 35 gg)



Flusso di neutroni (Fonger, 1953)

... e infine, anche variazioni giornaliere

- Esistono anche variazioni giornaliere di piccola entità (<0.1 %) nel flusso dei cosmici (muoni/neutroni)
- Sono associate alle variazioni del campo magnetico interplanetario e terrestre

Ancora oggi un campo di indagine interessante

Caratteristiche dettagliate dipendono da

- Coordinate del luogo di osservazione (Lat, Long, Alt.)
- Ciclo solare e anno (trend a lungo termine)
- Polarità magnetica del Sole
- Particelle secondarie rivelate (neutroni/muoni)

Ampiezza di queste variazioni ($<0.1\%$)

Che problemi comporta osservare variazioni dello 0.1% (cioè 1 su 1000 o inferiori) ?

Alcuni esempi:

- La lunghezza di una barra metallica cambia dell'1 per mille con una variazione di temperatura di 100 gradi. Una rotaia da 12 m può modificare la sua lunghezza anche di 1 cm.
- L'accelerazione di gravità cambia dell'1 per mille salendo in altitudine di circa 300 m.
- In questi casi, con misure di precisione, possiamo riuscire a notare la variazione. Ma non sempre è facile...

Ampiezza di queste variazioni (<math><0.1\%</math>)



Effetti dell'1 per mille nella vita pratica non sono facili da osservare e vengono spesso trascurati



Una possibile analisi con i dati di EEE?

Necessario un dataset stabile e molto lungo di dati

Candidati ragionevoli: Rivelatori POLA-R alle Svalbard

- Relativamente stabili per lunghi periodi
- 6 anni di presa dati pressoché continua
- 3 Rivelatori indipendenti nello stesso sito
- Discreto tasso di conteggio (circa 30 eventi/s)
- Particolare location a latitudini elevate



Rivelatori POLA-R

Telescopio di scintillatori 40 cm x 60 cm

Lettura del segnale di scintillazione mediante coppie di Silicon photomultipliers

Il sito osservativo: Ny-Alesund (79° N), archipelago Svalbard



Condizioni di osservazione

Possibile osservare una variazione dell'1 per mille o inferiore, cioè < 0.03 eventi al secondo?

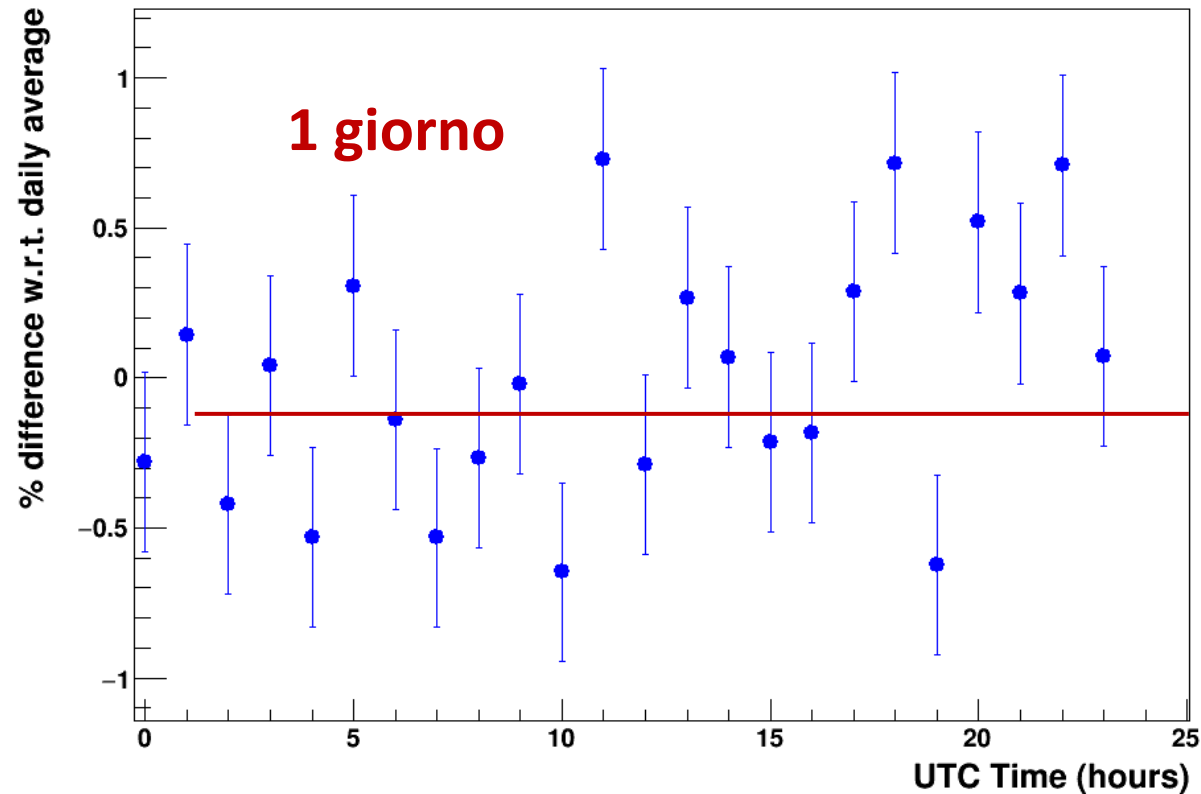
Alcune considerazioni statistiche..

- In un'ora (3600 secondi) misuriamo circa $(30 \text{ eventi/s}) \times (3600 \text{ s}) = 108000$ eventi
- L'incertezza su questo numero è la radice quadrata, dunque 328, pari a 0.3% (o 3 per mille)
- Se volessimo vedere una variazione dello 0.1% dovremmo avere incertezze $< 0.1 \%$

Numero di eventi	Incertezza statistica
100	10 %
10000	1 %
1 milione	0.1 %

Strategia di analisi

- Media giornaliera (selezionando giorni con presa dati completa)
- Differenze orarie rispetto alla media giornaliera

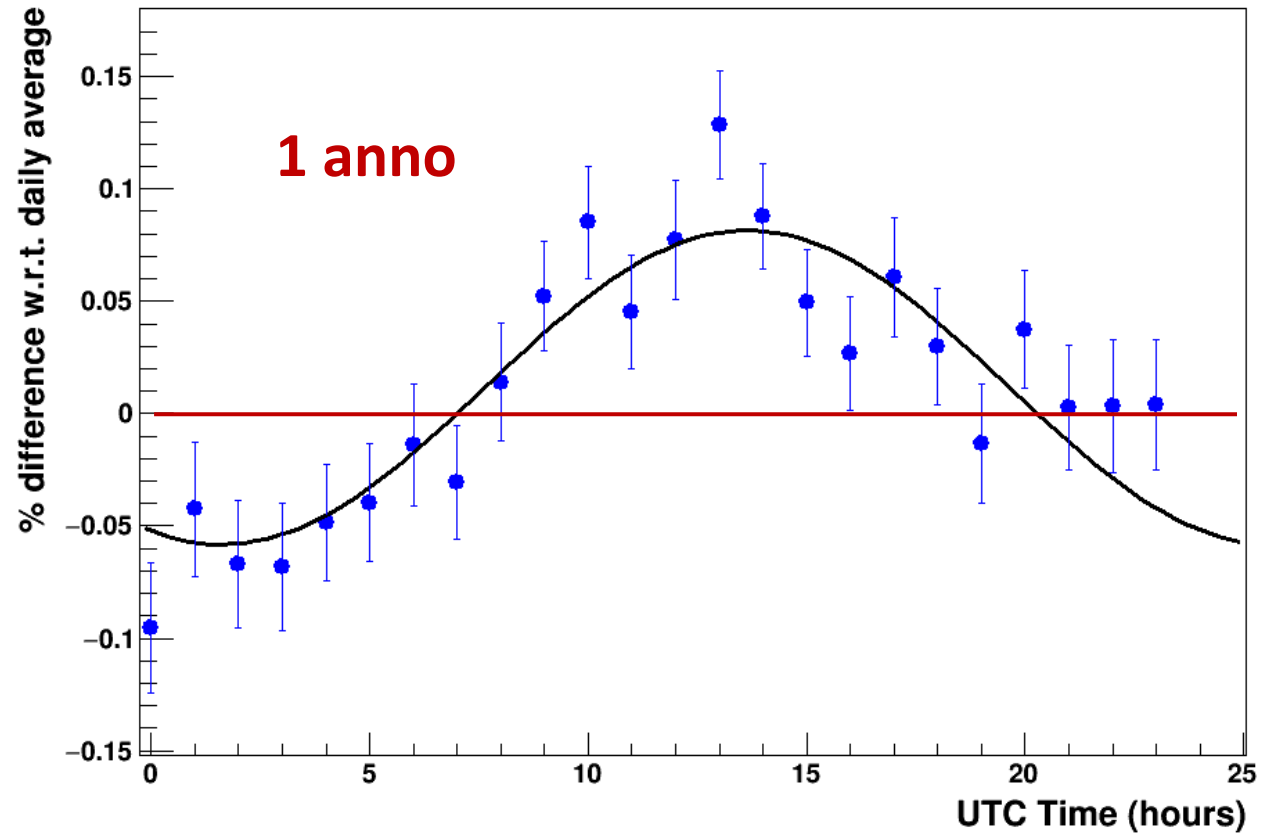
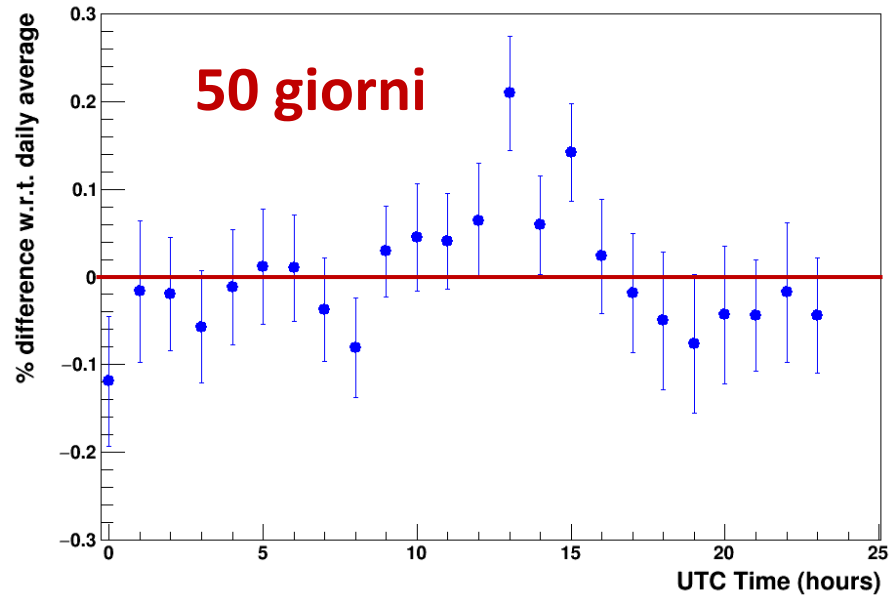
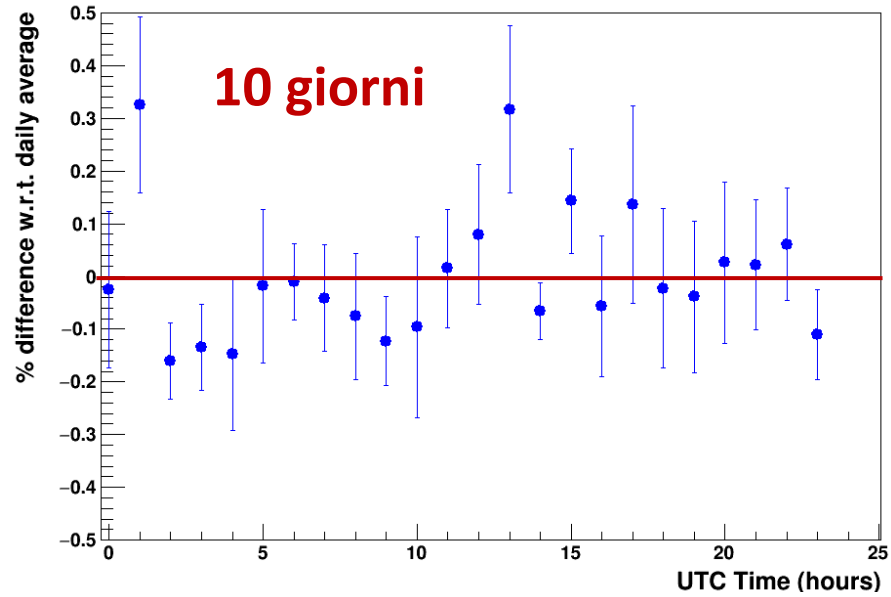


- Fluttuazioni statistiche per ciascun punto dell'ordine di 0.3-0.5% (circa 100k eventi in 1 ora)
- Nessun trend apparente osservato



Aumentare la statistica sommando più giorni

Aumentare la precisione statistica



Caratterizzare questa variazione diurna: ampiezza e fase

Ampiezza e fase estratti da un fit armonico

$$F(t) = A + B \cos(\omega(t - \phi))$$

$$\omega = 2\pi/24, \phi \text{ in ore}$$

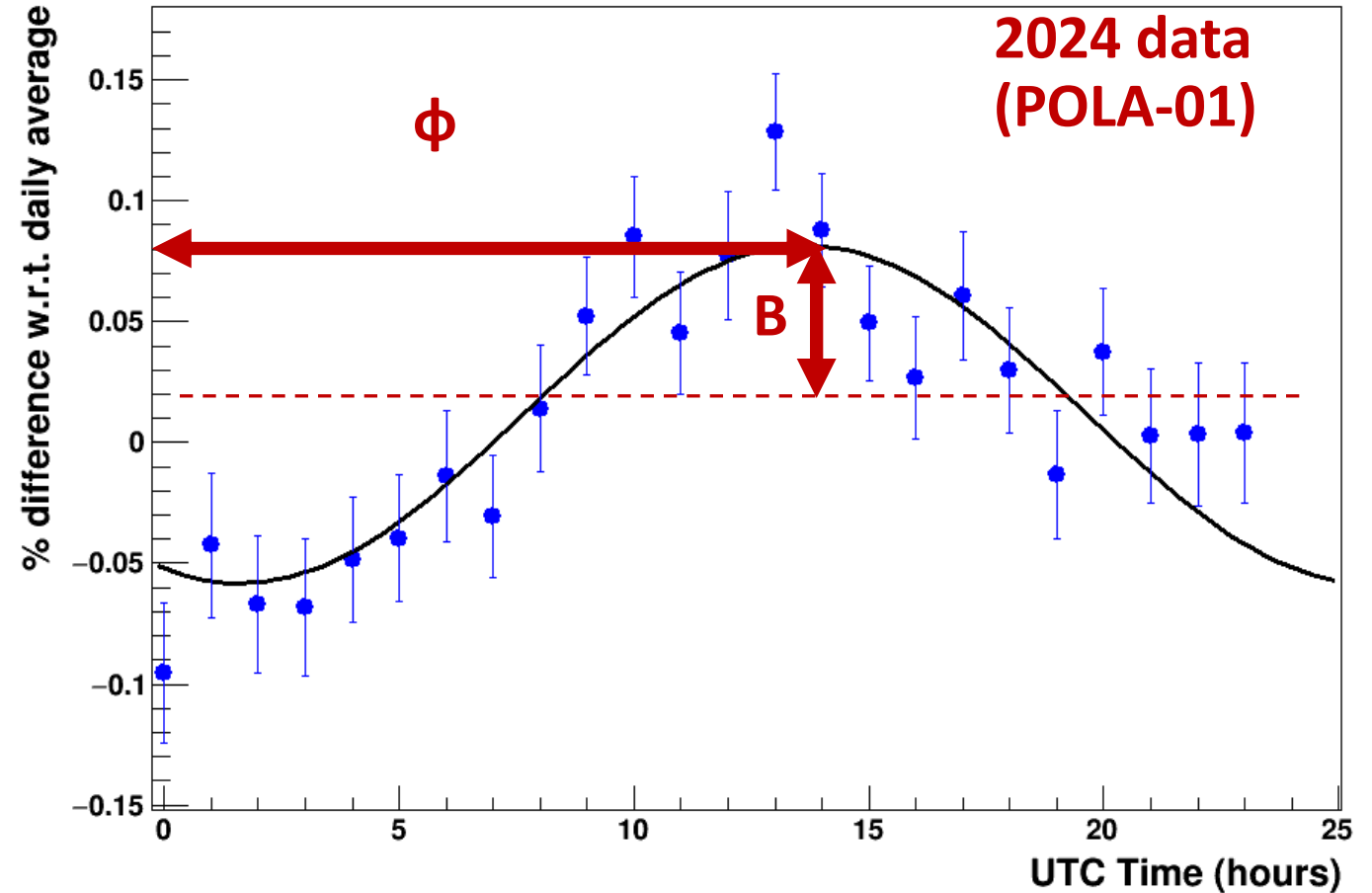
Per POLA-01 (2024):

Ampiezza $B = (0.070 \pm 0.007) \%$

Fase $\phi = (13.6 \pm 0.4)$ tempo UTC

Tempo locale $\sim 14\text{h } 25'$

(in base alla longitudine del luogo)



Confronto con il comportamento dei neutroni

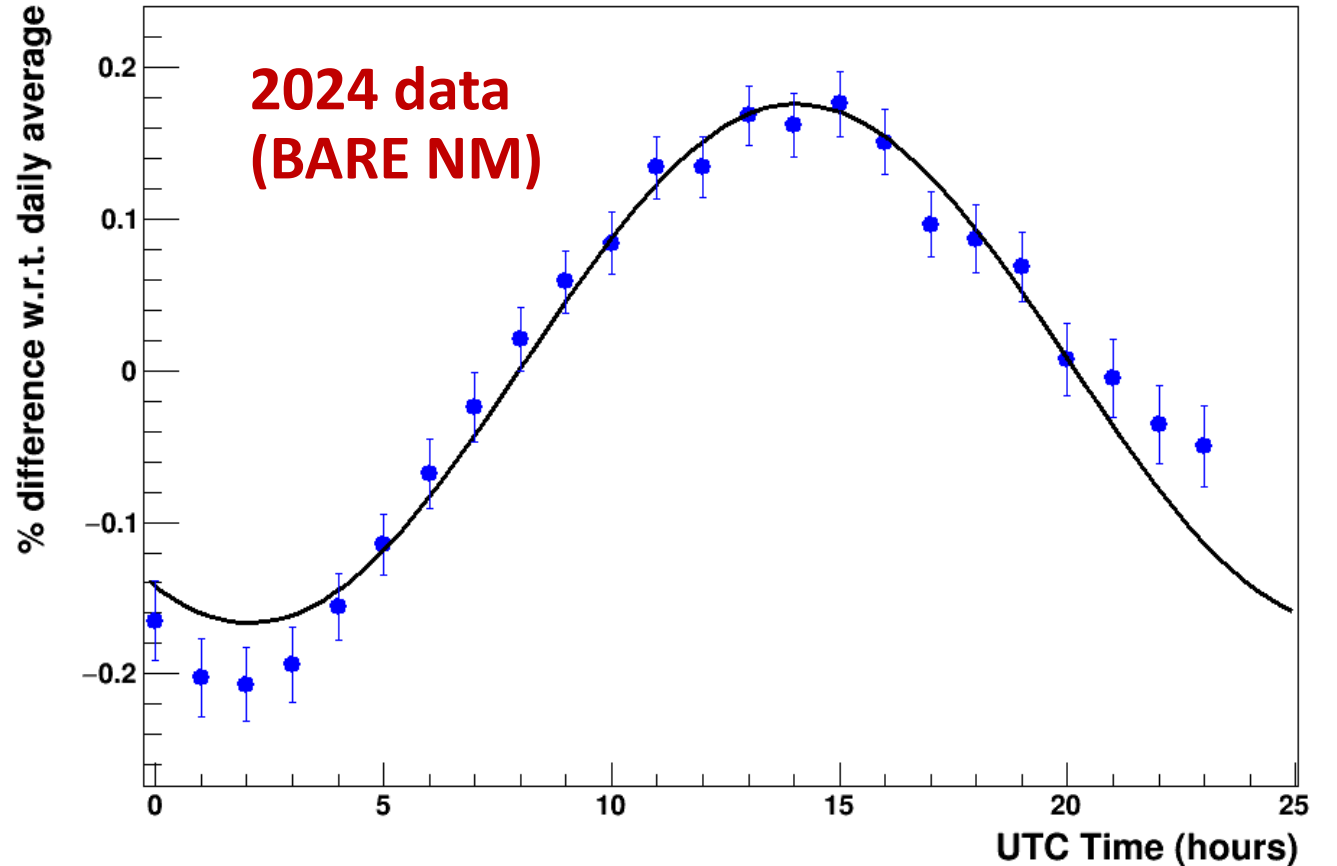
Dati dal Barentsburg Neutron Monitor
(non lontano dai POLA-R)

Stessa strategia di analisi

Ampiezza $B = (0.171 \pm 0.006) \%$

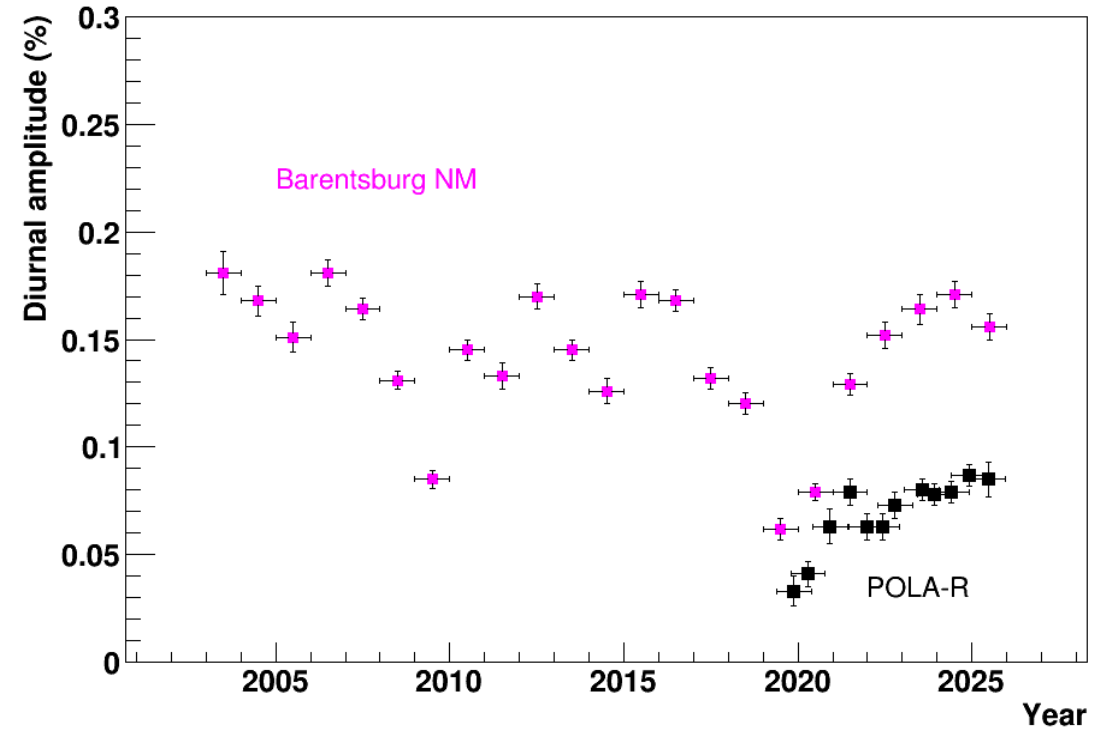
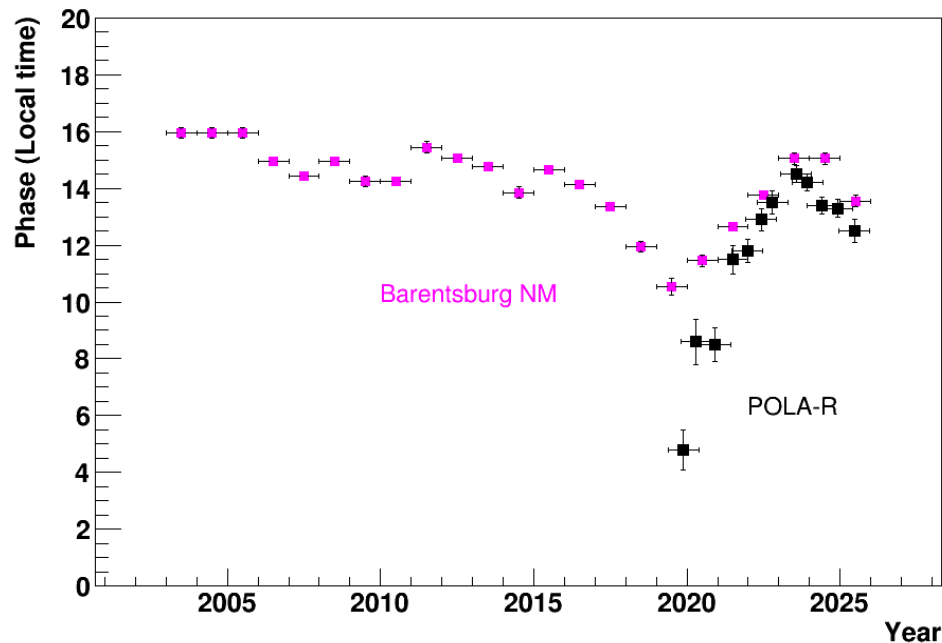
Fase = (14.1 ± 0.2) Tempo UTC

Tempo locale $\sim 15h 10'$



Confronto con il comportamento dei neutroni

- Ampiezze generalmente più alte per i neutroni (0.1-0.2 %) rispetto ai muoni (0.05-0.1%)
- Trend periodico con ciclo 11 anni



Variazione della fase lungo gli anni
(ciclo di 22 anni?)

Le analisi di questo (e di altri) risultati di fisica attualmente in corso dimostrano che l'esperimento EEE, nelle sue varie attività, è in grado di effettuare anche misure di precisione in fisica dei raggi cosmici e dunque contribuire non solo agli aspetti didattici ma anche a quelli scientifici.