

# RICERCA DI SCIAMI ESTESI NEI RAGGI COSMICI: SINCRONIZZAZIONE DEI TEMPI DI TRIGGER IN DIVERSI RIVELATORI

Carmelo Sgrò

INFN-Pisa

17 aprile 2015

# INTRODUZIONE

- ▶ Lo scopo del lavoro: **sincronizzare i clock di due o più dispositivi remoti**
- ▶ Caso scientifico (perché ci interessa tutto ciò): **ricerca di sciami estesi nei Raggi Cosmici**
- ▶ I dispositivi sono (saranno) rivelatori indipendenti di particelle
  - ▶ Emettono un segnale (trigger) quando sono attraversati da radiazione
  - ▶ Salvano il tempo di arrivo della particella
- ▶ Vogliamo selezionare i casi in cui due o più rivelatori scattano insieme
  - ▶ Il tempo registrato deve essere assoluto o almeno sincronizzato
  - ▶ Migliore è la sincronizzazione, minore è il rumore
    - ⇒ migliore risoluzione nella ricerca di sciami

# I RAGGI COSMICI

- ▶ [http://it.wikipedia.org/wiki/Raggi\\_cosmici](http://it.wikipedia.org/wiki/Raggi_cosmici)
- ▶ La Terra è costantemente colpita da particelle cariche, composte soprattutto da protoni: i **Raggi Cosmici**
- ▶ L'atmosfera fa da bersaglio (e da schermo) a questa radiazione
  - ▶ Le particelle interagiscono con gli atomi dell'atmosfera e formano cascate di particelle secondarie
  - ▶ Una parte di prodotti secondari delle cascate vive abbastanza da raggiungere il suolo
  - ▶ L'effetto che osserviamo al suolo è una pioggia continua di particelle



# I RAGGI COSMICI AL SUOLO

- ▶ Sec 28.3 di “The Review of Particle Physics” <http://pdg.lbl.gov/>
- ▶ La maggior parte delle particelle che osserviamo sulla superficie sono muoni ( $\mu$ )
  - ▶ Il cugino “pesante” dell’elettrone
  - ▶ Massa di  $106 \text{ MeV}/c^{2*}$
  - ▶ Vita media  $2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
- ▶ Riescono ad attraversare lunghe distanze prima di decadere
  - ▶ In atmosfera perdono energia gradualmente per ionizzazione
  - ▶ L’energia media è di  $\approx 4 \text{ GeV}$
- ▶ Quanti ne osserviamo?
  - ▶ L’intensità di  $\mu$  verticali al livello del mare è  $\approx 70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
  - ▶ Più comunemente  $I \approx 1 \text{ cm}^{-1}\text{min}^{-1}$  per un rivelatore orizzontale
  - ▶ La distribuzione angolare è  $\approx \cos^2(\theta)$

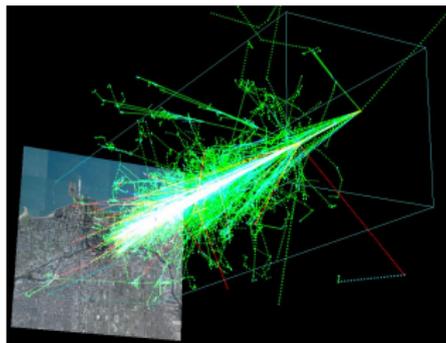
---

\* $10^6$  elettronvolt, unità di misura di energia, comunemente si utilizzano i suoi multipli come keV, MeV, GeV, TeV – <http://it.wikipedia.org/wiki/Elettronvolt>

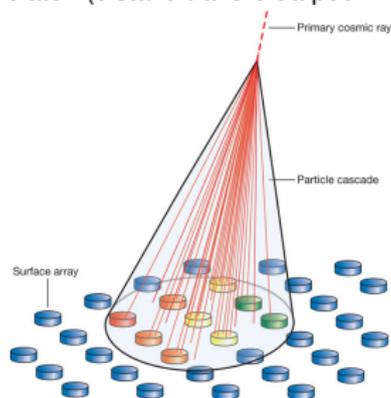
## GLI SCIAMI ESTESI

- ▶ Insieme al flusso incoerente di particelle secondarie, si osservano anche gli sciami di singoli raggi cosmici
- ▶ Per i raggi cosmici più energetici, la cascata è sufficientemente densa da arrivare a terra tutta insieme
- ▶ L'effetto è un fronte coerente di particelle che possono essere rivelati contemporaneamente su rivelatori distanti tra loro

Simulazione d'interazione di un protone di 1 TeV a 20 km di altitudine:



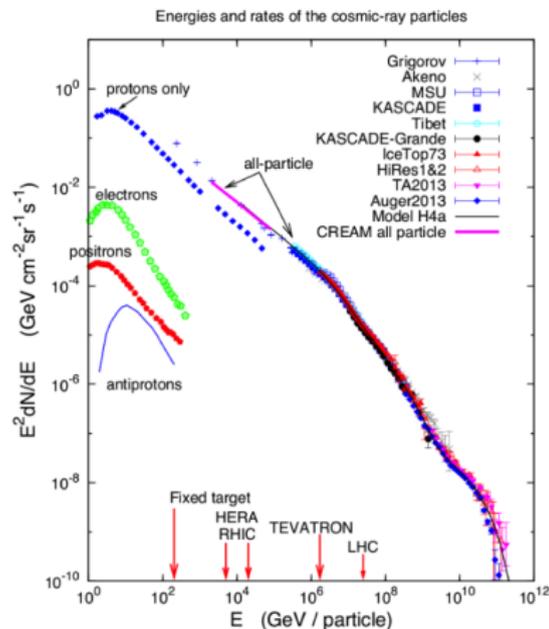
Un modo per osservare gli sciami estesi è utilizzare array di rivelatori (distanti tra loro da pochi m a km):



# LA FISICA DEI RAGGI COSMICI

Dopo più di 100 anni di studi, ci sono molte cose che non sappiamo:

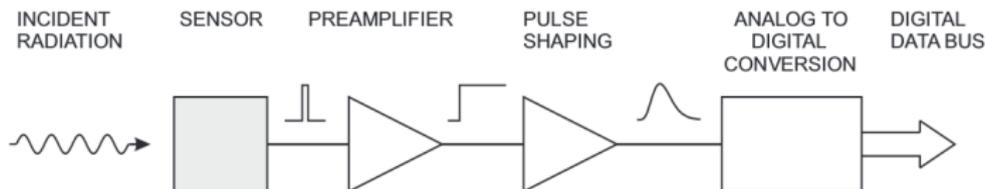
- ▶ Dove vengono prodotti?
  - ▶ Sono di origine galattica o extragalattica?
- ▶ Come fanno ad arrivare ad energie così alte?
  - ▶ In quali sorgenti vengono accelerati?
- ▶ Come fanno ad arrivare fino a noi?
  - ▶ Propagazione nella Galassia
  - ▶ Interazioni nel mezzo interstellare
- ▶ Sono tutti protoni?
  - ▶ O c'è un'altra componente che diventa importante ad alta energia?
- ▶ ...



da <http://arxiv.org/abs/1311.7346>

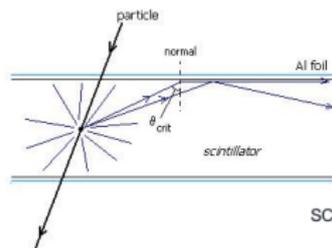
# RIVELATORI DI PARTICELLE

- ▶ Pensiamo ad uno strumento in grado di emettere un impulso elettrico nel momento in cui il suo volume attivo (sensore) è attraversato da una particella
  - ▶ Come è fatto il segnale elettrico (ampiezza, forma, durata, etc.) dipende dal dettaglio del tipo di rivelatore
  - ▶ Non discuteremo i meccanismi di interazione radiazione–materia, nè entreremo nel dettaglio delle tecniche di rivelazione
- ▶ Il segnale è condizionato e letto da una sistema elettronico che salva le informazioni rilevanti:
  - ▶ Tempo di arrivo, ampiezza del segnale, etc...
  - ▶ Spesso si utilizza un amplificatore a basso rumore per formare il segnale nella maniera più conveniente (front–end)
  - ▶ Nel caso più semplice basta un discriminatore per registrare il passaggio di una particella

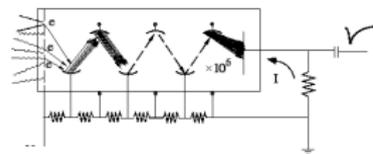


# UN ESEMPIO: UNO SCINTILLATORE

La radiazione rilascia energia nel mezzo, che, in risposta, emette un un lampo di luce

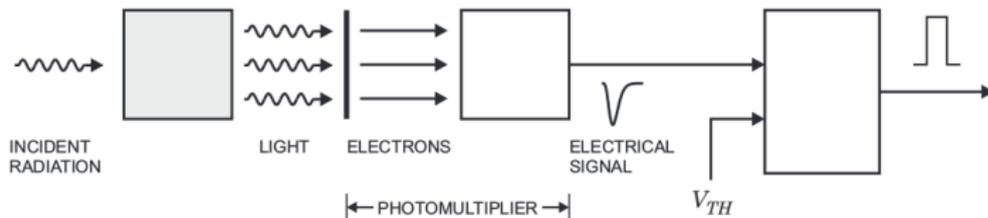


Un tubo fotomoltiplicatore trasforma la luce raccolta in un impulso elettrico



SCINTILLATOR

PHOTOCATHODE

ELECTRON  
MULTIPLIERTHRESHOLD  
DISCRIMINATOR

Questo è solo un esempio di una possibile implementazione del rivelatore. La tecnologia che verrà usata non è ancora stata scelta...

# IL DAQ: IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI

- ▶ Insieme al sensore è necessario un sistema che:
  - ▶ “Decide” quando è successo qualcosa (trigger)
  - ▶ Legge il sensore quando necessario (readout) – il segnale di trigger e di readout possono anche coincidere
  - ▶ Comprime le informazioni rilevanti in formato digitale (processing)
  - ▶ Salva l'evento su disco (storage)
- ▶ Di solito sono sistemi complessi per apparati complessi, nel nostro caso è un semplice microcontrollore:
  - ▶ Il trigger è un interrupt su un pin del controllore
  - ▶ Il segnale è il trigger stesso
  - ▶ Ci interessa salvare solo il tempo di arrivo, codificato dal controllore stesso, e trasmetterlo ad un pc (anche non in tempo reale)
- ▶ Una scheda tipo Arduino o Tmote potrebbe fare al caso nostro

## L'ANALISI DATI OFFLINE

- ▶ L'analisi dati vera e propria viene di norma fatta offline
  - ▶ Conversione dei dati grezzi in quantità fisiche (calibrazione)
  - ▶ Ricostituzione degli eventi
  - ▶ Ricerca del segnale – sciame di raggi cosmici nel nostro caso
- ▶ Cerchiamo i casi in cui diversi rivelatori scattano insieme
  - ▶ Ovvero all'interno di una finestra temporale fissata
- ▶ La larghezza della finestra dipende principalmente dalla risoluzione temporale
  - ▶ Effetti strumentali trigger time walk e jitter...
  - ▶ ...e ovviamente l'incertezza nella sincronizzazione dei rivelatori
- ▶ Il fondo è legato al rumore del rivelatore (trigger falsi) e muoni da raggi cosmici casualmente in coincidenza
- ▶ Una buona risoluzione temporale aiuta a:
  - ▶ Migliorare il rapporto segnale/fondo
  - ▶ Fare studi più approfonditi, ad esempio misurare la direzione di arrivo dalla differenza dei tempi dei vari rivelatori

## LE COINCIDENZE CASUALI

- ▶ Quando cerchiamo eventi simultanei tra due o più rivelatori dobbiamo considerare il “fondo” di coincidenze casuali:
- ▶ Consideriamo due rivelatori indipendenti con rate di conteggi  $N_1$  e  $N_2$
- ▶ Assumendo statistica di Poisson\*, la probabilità che il rivelatore 2 registri almeno 1 evento dopo un intervallo  $\tau$  dal un impulso nel rivelatore 1 è:  $P = 1 - e^{-N_2\tau}$ 
  - ▶ Di solito  $N_2\tau \ll 1$  quindi si può approssimare  $P \approx N_2\tau$
- ▶ Consideriamo in coincidenza anche se il rivelatore 2 registra un evento nell'intervallo  $\tau$  precedente all'impulso del rivelatore 1, il rate totale di coincidenze casuali è:  $R = 2N_1N_2\tau$
- ▶ Nel caso generale di  $q$  rivelatori indipendenti, il rate di coincidenze casuali nell'intervallo  $\tau$  diventa:

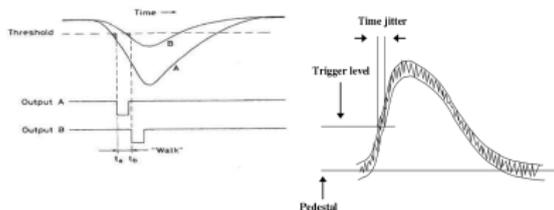
$$R = qN_1N_2\dots N_q\tau^{q-1}$$

---

\*[http://it.wikipedia.org/wiki/Distribuzione\\_di\\_Poisson](http://it.wikipedia.org/wiki/Distribuzione_di_Poisson)

# FLUTTUAZIONE DEI TEMPI DI TRIGGER

- ▶ Variazione del tempo di generazione dell'impulso di trigger (nel circuito logico del front-end)
  - ▶ Time walk per la variazione dell'ampiezza del segnale analogico (fluttuazioni nell'energia rilasciata nel sensore)
  - ▶ Trigger jitter legato al rumore elettronico
- ▶ Il tempo di reazione del DAQ può fluttuare
  - ▶ Quanto è veloce la risposta di un microcontrollore ad un interrupt?
  - ▶ Come è legato alla frequenza di clock?
- ▶ Questi effetti si sommano alla capacità di sincronizzare i clock dei vari rivelatori per avere un tempo assoluto
- ▶ Sono veramente contributi importanti?
  - ▶ Il rise-time tipico di un di un fotomoltiplicatore è  $\sim$  ns, un amplificatore "lento"  $\sim$   $\mu$ s
  - ▶ Un clock tipico di microcontrollori è  $\sim$  16MHz

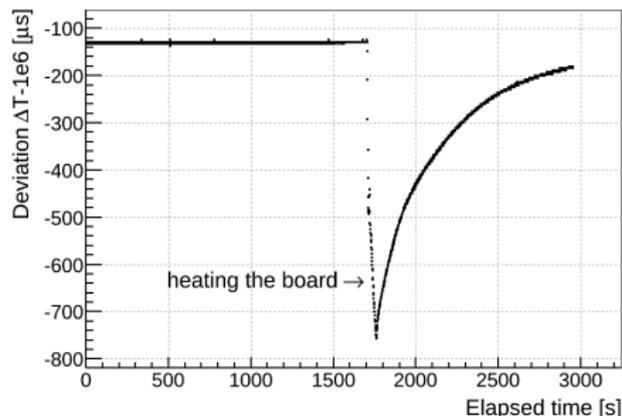


# SINCRONIZZAZIONE DEI TEMPI: CLOCK “COMUNE”

- ▶ Ogni rivelatore assegna un tempo ad un evento usando il suo clock interno
  - ▶ **Serve un riferimento per i tempi assoluti**
- ▶ I clock dei moduli sono tutti leggermente diversi dal valore nominale
  - ▶ E sono molto sensibili alla temperatura
    - ▶ E.g. cicli giorno-notte
- ▶ **È necessario “calibrare” i rivelatori**
  - ▶ E.g. contando i cicli di clock tra due 1-PPS di un GPS (o un clock comune)

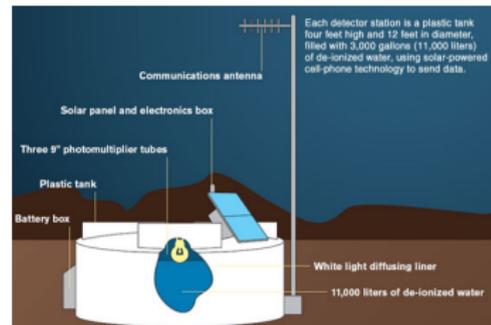
Ecco un esempio di test di un Arduino sfruttando il 1-PPS di un GPS:

- ▶ La media è spostata di  $127\mu s$
- ▶ L'RMS è  $\sim 2\mu s$  (il timer usato ha una risoluzione di  $4\mu s$ )



# ESEMPI DI ESPERIMENTI: PIERRE AUGER OBSERVATORY

- ▶ <https://www.auger.org/>
- ▶ Un esperimento per lo studio dei raggi cosmici di altissima energia
- ▶ Due tipo di rivelatori per sciami estesi:
  - ▶ Rivelatori di fluorescenza
  - ▶ **Array di rivelatori di superficie**  $\implies$
- ▶  $\sim 1600$  stazioni distanti  $\sim 1.5$  km tra loro
- ▶ Ogni stazione è equipaggiata con un ricevitore GPS
  - ▶ **Il tempo del 1-PPS viene acquisito come un normale trigger**
  - ▶ Il time-stamp degli eventi viene ricostruito interpolando i tempi del GPS
    - ▶ In pratica il GPS fornisce una calibrazione continua dei clock



## CONCLUSIONI: LO SCOPO DI QUESTO PROGETTO

- ▶ Abbiamo visto una veloce introduzione alla problematica sperimentale
- ▶ È importante avere una sincronizzazione dei tempi migliore possibile
  - ▶ Incertezza sui tempi condiziona la finestra temporale di ricerca degli sciami
- ▶ Lo scopo di questo progetto è quindi
  - ▶ Trovare il sistema migliore per sincronizzare più rivelatori “lontani”
  - ▶ Studiare l'incertezza nel tempo assoluto che si riesce ad ottenere
- ▶ Questo lavoro è solo il primo passo di un progetto più completo
  - ▶ È il primo tentativo di sync dei tempi via radio!
  - ▶ Il vostro contributo sarà fondamentale