

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

Carmelo Sgrò

INFN-Pisa

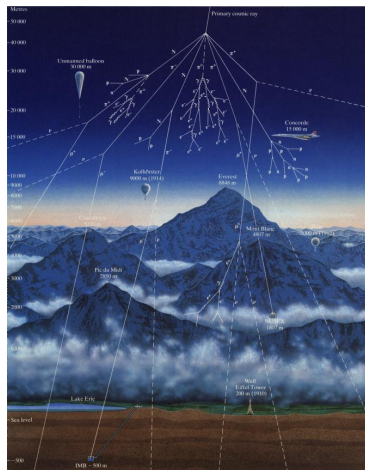
17 aprile 2015

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
- ▶ 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

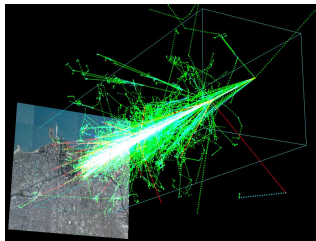
- ▶ Sec 28.3 di “The Review of Particle Physics” <http://pdg.lbl.gov/>
- ▶ La maggior parte delle particelle che osserviamo sulla superficie sono muoni (μ)
 - ▶ Il cugino “pesante” dell’elettrone
 - ▶ Massa di $106 \text{ MeV}/c^{2*}$
 - ▶ Vita media $2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
- ▶ Riescono ad attraversare 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 μ 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>

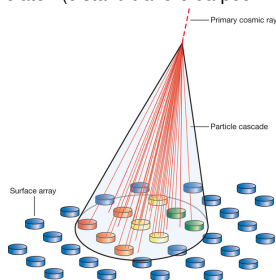
GLI SCIAMI ESTESI

- ▶ 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:



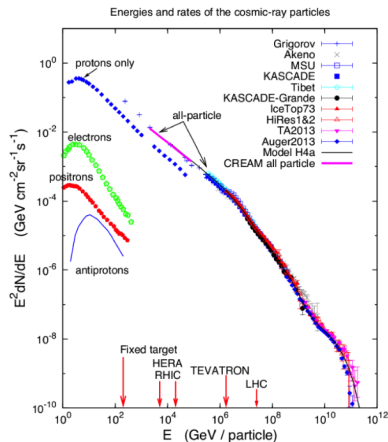
Un modo per osservare gli sciami estesi è utilizzare array di rivelatori (distanti tra loro da pochi m a km):



LA FISICA DEI RAGGI COSMICI

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

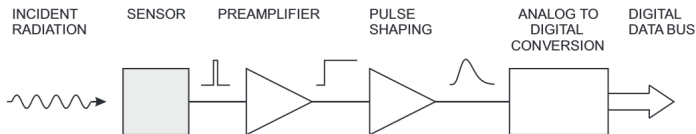
- ▶ Dove vengono prodotti?
 - ▶ Sono di origine galattica o extragalattica?
- ▶ Come fanno ad arrivare ad energie così alte?
 - ▶ In quali sorgenti vengono accelerati?
- ▶ Come fanno ad arrivare fino a noi?
 - ▶ Propagazione nella Galassia
 - ▶ Interazioni nel mezzo interstellare
- ▶ Sono tutti protoni?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



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

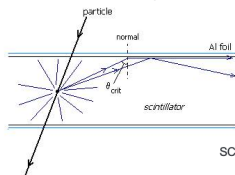
RIVELATORI DI PARTICELLE

- ▶ 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

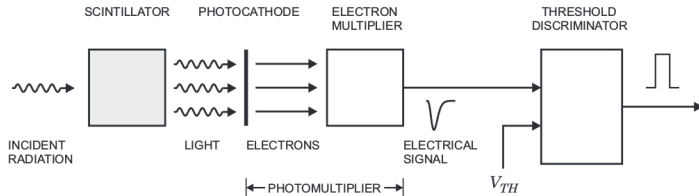
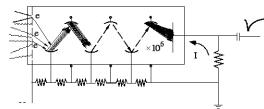


UN ESEMPIO: UNO SCINTILLATORE

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



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
 - ▶ Compone 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

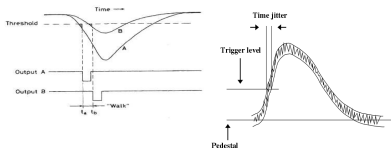
- ▶ Quando cerchiamo eventi simultanei tra due o più rivelatori dobbiamo considerare il “fondo” di coincidenze casuali:
- ▶ Consideriamo due rivelatori indipendenti con rate di conteggi N_1 e N_2
- ▶ Assumendo statistica di Poisson*, la probabilità che il rivelatore 2 registri almeno 1 evento dopo un intervallo τ 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 τ 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 τ diventa:

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

*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 μ s
 - ▶ Un clock tipico di microcontrollori è \sim 16MHz

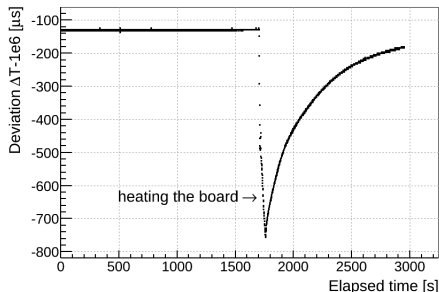


SINCRONIZZAZIONE DEI TEMPI: CLOCK “COMUNE”

- ▶ 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)

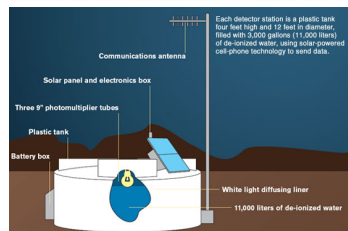
Ecco un esempio di test di un Arduino sfruttando il 1-PPS di un GPS:

- ▶ 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
- ▶ ~ 1600 stazioni distanti ~ 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