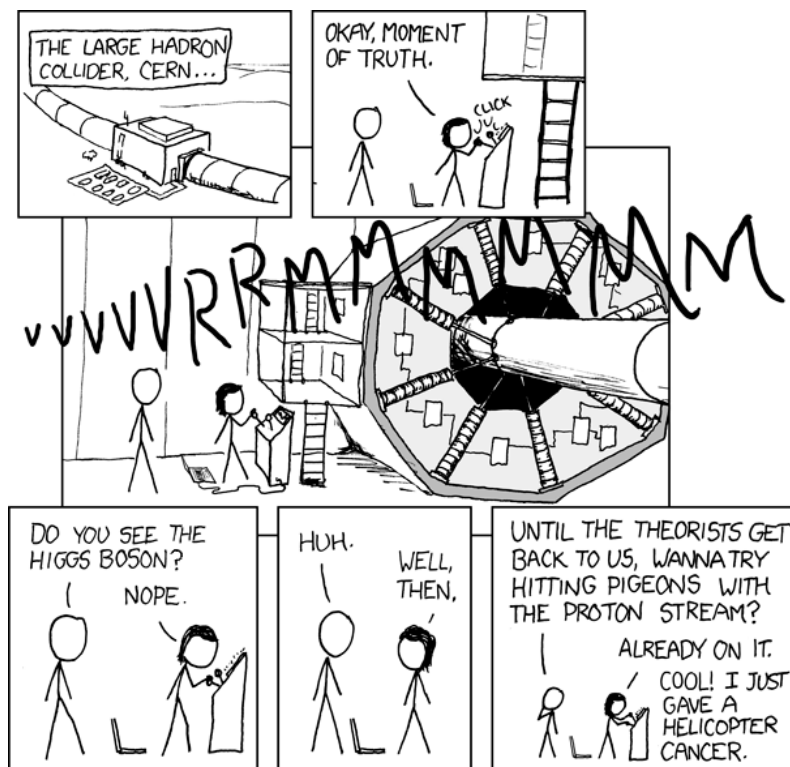


Introduzione ai concetti base di Trigger e Data Acquisition (TDAQ) (come li prendo questi dati??)



Questa dispensa è rivolta agli studenti della laurea triennale che intendono partecipare al tirocinio sulle tecniche di trigger ed acquisizione dati in fisica nucleare e subnucleare. Si tratta di concetti base che saranno sviluppati nei corsi della laurea magistrale. Il tirocinio è comunque propedeutico per chi volesse preparare una laurea di tipo tecnologico nell'ambito dell'esperimento ATLAS.

Nella prima parte si cercherà di familiarizzare con i problemi legati alla manipolazione e registrazione dei segnali estratti dai rivelatori di particelle, attraverso esercitazioni di laboratorio che utilizzano dei sistemi semplici. Nella seconda parte si acquisiranno ed interpreteranno dati relativi ad eventi generati da muoni cosmici utilizzando il software di acquisizione dati effettivamente usato dall'esperimento ATLAS.

Le eventuali tesi di laurea saranno prevalentemente orientate allo sviluppo di software in C++ (plugins per la gestione di schede di acquisizione o monitor online dei dati acquisiti in laboratorio) per il sistema di acquisizione del luminometro LUCID di ATLAS

I Rivelatori di particelle: interazione radiazione-materia

Le particelle che si studiano presso gli acceleratori non si vedono a occhio nudo. Eppure, possiamo inferirne la presenza osservando gli effetti che esse producono nella materia che attraversano, nello stesso modo in cui possiamo dire se c'è vento, o meno, guardando fuori dalla finestra (purché ci sia qualche pianta, o una bandiera, o dei panni stesi).

Un rivelatore di particelle non è altro che un insieme di materiali adatti a far interagire le particelle (analogamente a piante, bandiere, o panni stesi per il vento) e a fotografarne gli effetti (nel caso del vento i nostri occhi, o una macchina fotografica).

Le interazioni tra radiazione e materia sono prevalentemente riconducibili alla forza elettromagnetica. In particolare per le particelle cariche abbiamo:

- 1) Ionizzazione (uno o più elettroni sono strappati da uno o più atomi del materiale. Ioni ed elettroni tendono a ricombinarsi)
- 2) In determinate condizioni, emissione di luce (scintillazione, luce Cherenkov, radiazione di transizione)

Per i fotoni:

- 1) effetto fotoelettrico (assorbimento del fotone da parte di un elettrone atomico e sua estrazione dall'atomo)
- 2) scattering Compton (scattering tra un fotone e un elettrone "libero", o meglio con energia di legame trascurabile rispetto all'energia del fotone)
- 3) produzione di coppie (trasformazione di un fotone in una coppia elettrone-positrone)

I neutroni e gli altri adroni neutri interagiscono invece con i nuclei atomici attraverso la forza forte (rottura dei nuclei, cattura e successiva emissione di fotoni e/o particelle cariche, etc)

Praticamente in tutti i casi utili l'effetto finale dell'interazione è la generazione di cariche libere (in caso di luce cherenkov, scintillazione o radiazione di transizione si userà un fotoconvertitore). Per poterle osservare, esse devono essere separate (ed eventualmente moltiplicate) attraverso l'applicazione di campi elettrici, e raccolte su uno o più elettrodi.

L'effetto finale del passaggio della radiazione nel materiale del rivelatore è quindi la generazione di un impulso (di corrente o di tensione) in un circuito elettrico collegato agli elettrodi del rivelatore/sensore.

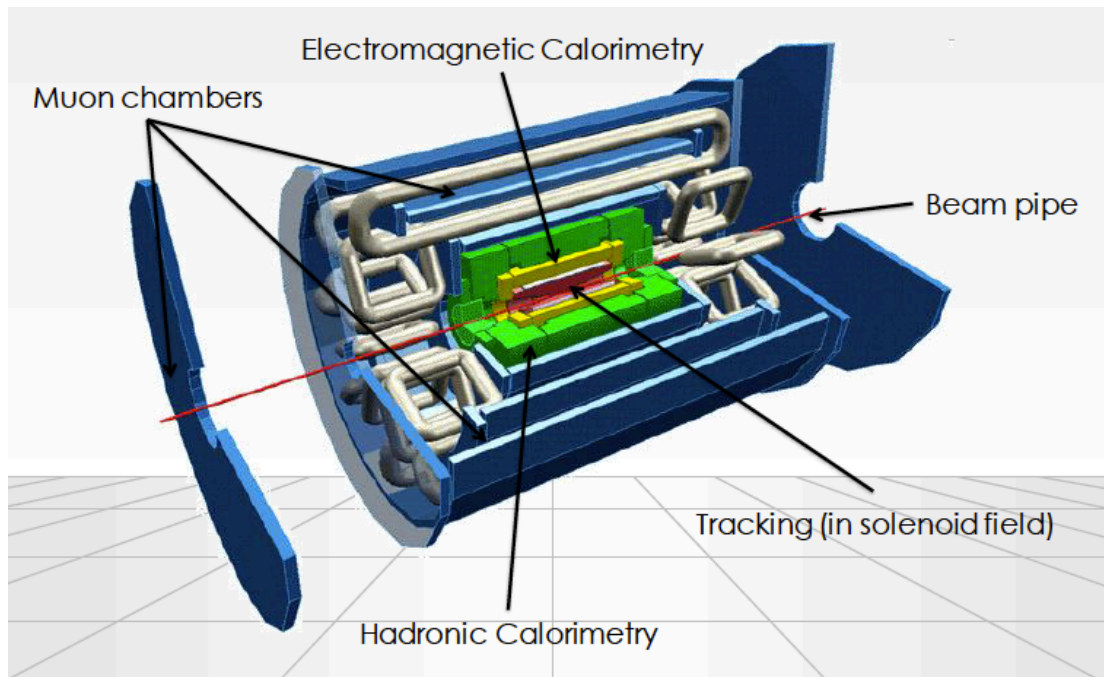
Benché esistano molti tipi diversi di rivelatore, tutti rispondono alle stesse esigenze. In particolare devono misurare:

- 1) la presenza di un segnale (l'efficienza può dipendere da una soglia minima sul segnale generato)
- 2) L'ampiezza del segnale (con quale risoluzione?)
- 3) Il tempo di arrivo.

La qualità della risposta di tutti i rivelatori è sensibile a

- 1) ampiezza del segnale
- 2) fluttuazioni nel segnale
- 3) rumore (in generale di cerca di massimizzare il rapporto segnale/rumore)

Il Rivelatore ATLAS



Il rivelatore ATLAS ha la tipica struttura cilindrica dei rivelatori “general purpose”: La parte interna è immersa in un campo magnetico solenoidale ed è dedicata al tracciamento delle particelle cariche. Proseguendo verso l'esterno si incontrano un calorimetro elettromagnetico, un calorimetro adronico e, infine, uno spettrometro a muoni immerso in un campo magnetico toroidale.

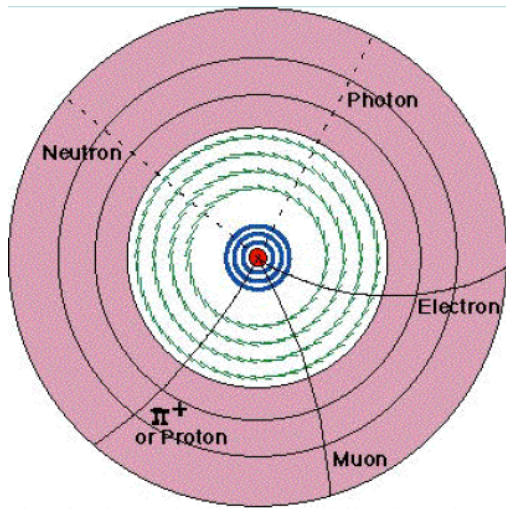
Il tracciatore deve interferire il meno possibile con le particelle che lo attraversano. Esso è costituito da diversi piani con elettronica di lettura a segmentazione fine (nei moderni rivelatori si tratta tipicamente di rivelatori a semiconduttore con elettrodi a pixel nei piani più interni e a strip in quelli più esterni). La ionizzazione rilasciata in ciascuna cella di ciascun piano è utilizzata per ricostruire la traiettoria delle particelle cariche. Dalla misura del raggio di curvatura delle tracce ricostruite, noto il campo magnetico B , è possibile ricavare sia il segno della carica che l'impulso (sul piano perpendicolare all'asse del fascio) delle particelle che attraversano il rivelatore.

Il calorimetro elettromagnetico ha lo scopo di misurare l'energia di elettroni e fotoni. Durante il processo di misura, elettroni e fotoni sono (quasi) completamente assorbiti nel material del calorimetro. Analogamente, il calorimetro adronico ha lo scopo di misurare l'energia degli adroni, assorbendoli. Le misure calorimetriche sono quindi di tipo *distruttivo*.

I muoni sono le uniche particelle in grado di attraversare i calorimetri senza essere assorbite (al di sopra di una soglia minima di energia che, in ATLAS, è di circa 4 GeV). Grazie alla loro lunga vita media, possono percorrere decine di

metri prima di decadere. Per questo motivo lo spettrometro a muoni si trova nello strato più esterno del rivelatore. Dovendo ricoprire aree considerevoli, gli spettrometri per muoni sono spesso costituiti da piani di rivelatori a gas. I muoni ionizzano il gas nel punto di passaggio rilasciandovi un segnale. In ATLAS si parla di spettrometro a muoni perchè la presenza del campo magnetico permette, ancora una volta, di misurare il segno della carica e l'impulso dei muoni a partire dalla curvatura delle traiettorie ricostruite dallo spettrometro.

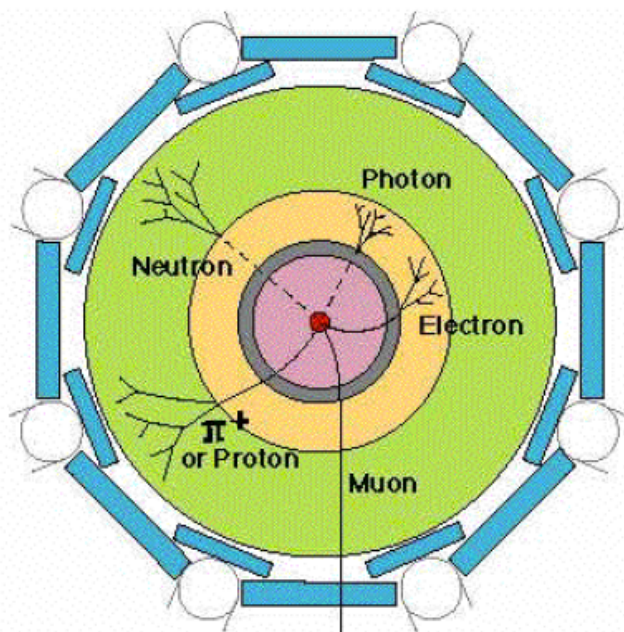
Schema del rivelatore a tracce di ATLAS nel piano perpendicolare all'asse dei fasci



3 piani di rivelatore a pixel (blu)
 4 piani di rivelatore a strip (verde)
 rivelatore a radiazione di transizione (rosa)

Fotoni e neutroni non rilasciano alcun segnale

Schema del rivelatore ATLAS nel piano perpendicolare all'asse dei fasci



La presenza di un segnale nel calorimetro elettromagnetico (giallo) senza un corrispondente segnale nel calorimetro adronico (verde) suggerisce la presenza di un fotone o un elettrone. La presenza di una traccia nel tracciatore, nella direzione del deposito calorimetrico, permette di distinguere gli elettroni dai fotoni.

Un segnale nello spettrometro a muoni (blu) identifica la presenza di un muone.

Sistemi di acquisizione

L'effetto finale del passaggio della radiazione nel materiale del rivelatore è la generazione di un impulso di corrente, o di tensione, in un circuito elettrico collegato agli elettrodi del rivelatore.

Le caratteristiche notevoli dei segnali sono:

- 1) La baseline: il livello di tensione o corrente in assenza di segnale
- 2) La polarità degli impulsi (positiva, negativa, bipolare)
- 3) L'ampiezza: è la distanza tra il massimo del segnale e la baseline
- 4) La larghezza: di solito si intende la larghezza a metà altezza
- 5) I cosiddetti leading/falling edges: inizio e fine dell'impulso
- 6) I tempi di salita e discesa: tempo in cui il segnale passa dal 10% al 90% della sua ampiezza e viceversa.

Ciascuna delle caratteristiche dell'impulso generato nel rivelatore può essere significativa, dalla sua mera presenza ai dettagli della sua ampiezza o forma. In generale, i segnali analogici possono assumere un numero infinito di stati (forme). La loro trasmissione da un punto all'altro, attraverso cavi e circuiti, è soggetta a distorsioni di vario tipo (attenuazione, aggiunta di rumore, etc) che possono alterarne l'informazione.

I segnali logici o digitali, al contrario, possono assumere un numero finito di stati (per es vero/falso). Benché un segnale digitale possa trasportare meno informazione di un segnale analogico, la sua trasmissione è assai più affidabile in quanto il suo valore di verità non dipende strettamente dalla sua forma.

Si tende quindi a trasformare i segnali analogici in segnali logici il più presto possibile, possibilmente già a livello di front-end.

Standard NIM (Nuclear Instrument Module) per segnali veloci: polarità negativa

	Valore di tensione (V)
Logic 0	0
Logic 1	Tra -0.8 e -1.0

Standard TTL (Transistor-Transistor Logic): polarità positive

	Valore di tensione (V)
Logic 0	Tra 0 e 0.8
Logic 1	Tra 2 e 5

L'elettronica di Front-End è l'elettronica direttamente connessa al rivelatore.

Deve essere dimensionata in modo da tener presenti:

- 1) l'ampiezza del minimo segnale da registrare (va amplificato?)
- 2) l'intervallo di ampiezze possibili
- 3) la frequenza di arrivo dei segnali
- 4) la (in)sensibilità alla forma del segnale

Tipicamente l'elettronica di acquisizione è costituita da schede costruite seguendo certi standard, che possono eseguire operazioni su segnali analogici (come amplificatori, filtri, comparatori), o su segnali logici (coincidenze, somme, conteggi etc). Nei rivelatori più moderni, come quelli degli esperimenti presso gli acceleratori di particelle, l'elettronica di front-end è spesso costituita da schede custom che digitizzano le informazioni appena possibile. Nel nostro laboratorio abbiamo sistemi un po' più *antichi*, ma concettualmente non cambia nulla. Alla fine, l'impulso analogico proveniente dal rivelatore è sempre trasformato in una informazione digitale (un numero che rappresenti un'ampiezza, una carica o altro). Tale informazione è poi immagazzinata da qualche parte (buffer in RAM, disco) per elaborazioni successive (off-line).

Negli esperimenti di fisica nucleare e subnucleare si usano fondamentalmente due tipi di schede di elettronica: quelle che compiono operazioni passive e non necessitano di programmazione (moduli NIM) e quelle pilotate e lette da computer (moduli VME o altri standard).

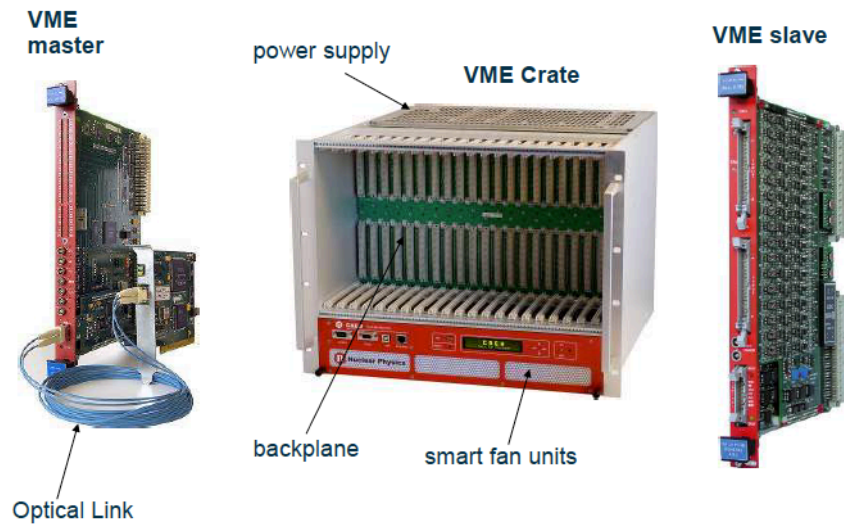
Lo standard NIM (acronimo di Nuclear Instrumentation Methods) fu stabilito nel 1964 per gli esperimenti di fisica nucleare e sub-nucleare. Lo scopo era promuovere un sistema che permettesse interscambio di moduli. I moduli NIM hanno dimensioni standard in modo da essere alloggiati in una scatola (crate) standard che fornisce livelli di tensione a loro volta standard.



Ingressi ed uscite di queste schede sono dei segnali analogici e/o digitali collegati tramite cavi coassiali lemo, con impedenza 50 ohm. Usando questi standard si evitano vari problemi di trasmissione e riflessione dei segnali alle interfacce tra elementi diversi.

Le schede VME (VERSA Module Euro card) sono alloggiati in un crate VME. A differenza del crate NIM, il crate VME non si limita a fornire l'alimentazione alle schede che alloggia, ma permette anche di accedere al loro spazio di memoria o, in altre parole, trasferire dati, tramite un bus che si trova sul fondo del crate stesso (backplane). Il bus VME ha un'architettura master-slave.

Il VME è uno standard industriale introdotto nel 1981 ed utilizzato per applicazioni industriali, commerciali e militari. L'interesse della comunità scientifica ha portato alla creazione di due standard oggi utilizzati negli esperimenti di fisica nucleare e sub-nucleare: uno a 32 bit (1990) e uno a 64 bit (1998)



Nel nostro laboratorio il VME master è un Single Board Computer (SBC) , ma in generale è possibile controllare il bus VME da remoto con un PC standard via un link ad alta velocità e una scheda apposita.

Schede VME disponibili in laboratorio

CAEN V1190 (Time to Digital Converter)

CAEN V792 (Charge integrator)

CAEN V1495 (scheda di trigger con FPGA programmabile)

CAEN V1720 (Flash ADC)

Il Trigger

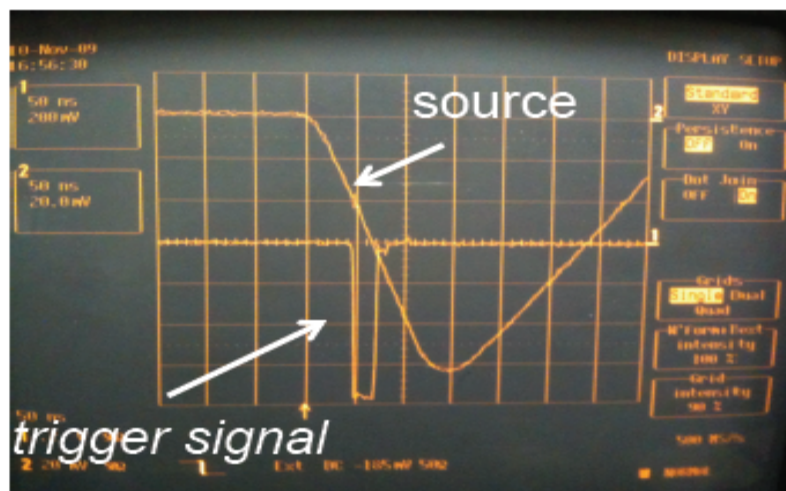
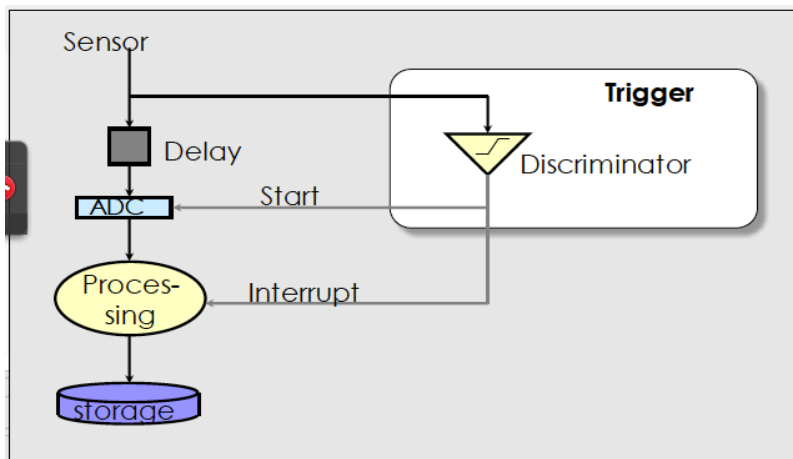
Nel campo dei rivelatori di particelle è un sistema più o meno complesso, tipicamente implementato in HW o con almeno uno stadio HW (se è a più livelli), per decidere

- 1) **quando** acquisire un dato, se il momento del suo arrivo non è noto (caso del nostro laboratorio)
- 2) **quale** dato acquisire, quando la frequenza dei dati è più elevata della capacità di lettura/immagazzinamento del sistema di acquisizione (caso di LHC)

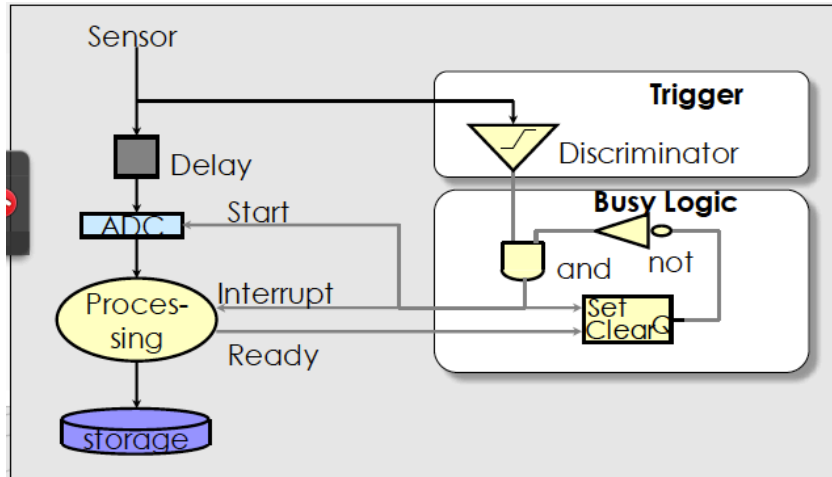
Il sistema di trigger più semplice:

Un segnale analogico è sdoppiato (con una T lemo o un linear fan-in/fan-out) ed inviato a un discriminatore e a un integratore. Il discriminatore riceve il segnale in input e lo confronta con un livello di soglia.

L'output del discriminatore è un segnale logico NIM (segnale presente se sopra soglia, assente se sotto soglia) utilizzato per far partire l'acquisizione dati.:



Ogni processo di acquisizione richiede un minimo di tempo; nel nostro esempio, il tempo di processamento del segnale (integrazione, lettura del campionamento immagazzinata in una FIFO, o altro) . Che succede se un trigger è generato quando il sistema è occupato (busy)? La logica di busy evita la generazione di trigger durante il processamento di un evento



L'esistenza di un tempo di busy implica che il sistema di acquisizione ha un tempo morto , cioè esiste una frazione del tempo di acquisizione durante la quale nessun evento può essere registrato (tipicamente dell'ordine di pochi %)

Chiamiamo R_T il rate (numero di eventi al secondo) con cui si presentano gli eventi a cui siamo interessati, T_d il tempo necessario ad acquisire un evento ed R il rate di acquisizione del nostro sistema.

In ogni secondo avremo un tempo morto di $R * T_d$.

Analogamente, la frazione di secondo in cui il sistema è attivo è $1 - R * T_d$ e quindi il rate di acquisizione R è dato da $(1 - R * T_d) * R_T$

L'efficienza del nostro sistema di trigger trigger è quindi

$$\frac{R}{R_T} = \frac{1}{1 + R_T T_d}$$

e sarà tanto migliore quanto è piccolo T_d .

Il software TDAQ di ATLAS

Il software TDAQ di ATLAS è scritto principalmente in C++ e gira su computer con sistema operativo Linux.

Il framework include tutte le funzionalità necessarie a un sistema di acquisizione: trigger (fino a tre livelli), lettura delle informazioni fornite dai vari sottorivelatori via link ottici (custom S-Link) o via VME, costruzione dell'evento totale, monitoraggio online dei dati acquisiti, scambio di messaggi tra processi, comunicazione di errori ed eventuale loro recupero, configurazione e controllo dei processi, scrittura dei dati su supporto permanente (disco).

Data la sua flessibilità può essere utilizzato (ed è utilizzato), oltre che nell'esperimento ATLAS, in vari beam tests e in piccoli laboratori come questo.

Poichè l'elettronica di front-end cambia da un sistema all'altro, il software di lettura va sviluppato per ciascuna applicazione, anche se all'interno di oggetti predefiniti (tipicamente, un oggetto di tipo *ReadoutModule* per ogni tipo di scheda hardware). L'utilizzatore della TDAQ di ATLAS dovrà quindi scrivere i plugins specifici per la propria elettronica, se non già disponibili, usando le interfacce fornite dal framework.

Anche la frequenza degli eventi e il volume dei dati possono variare enormemente da sistema a sistema, con ripercussioni sulla configurazione, sull'hardware e sul software del sistema di trigger. Infine, il monitoraggio della qualità dei dati che si acquisiscono dipende fortemente dal sistema. Ogni utilizzatore può aggiungere parti di software per creare e mostrare gli istogrammi che ritiene più significativi.

Dal punto di vista del SW la TDAQ è un sistema di applicazioni che girano su hosts diversi, ma interagiscono le une con le altre.

ATLAS Utilizza più di 3000 computers in cui girano oltre 50000 applicazioni tra loro interconnesse

Ogni applicazione ha un "genitore" e può avere uno o più "figli". Questa gerarchia può essere rappresentata da un diagramma ad albero il cui nodo iniziale si chiama *Root Controller*. Su ciascun host i processi sono fatti partire e terminate da un server (Process Manager o PMG).

Ogni sessione di acquisizione dati è caratterizzata da

- 1) Un *Partition Name* (identifica univocamente una parte del sistema che può funzionare indipendentemente)
- 2) Un *run number* (identifica univocamente una sessione di acquisizione all'interno di ciascuna partizione)

L'acquisizione è controllata dal *RunControl* che è un'applicazione basata su una Final State Machine (una macchina a stati finiti è un sistema o modello che può trovarsi in un numero finito di stati e, in ciascun momento, in uno solo di tali stati. I passaggi di stato sono chiamati *transizioni* e sono provocati da eventi prefediniti.)

L'operatore interagisce con il Run Control attraverso una GUI (Graphical User Interface)

The screenshot displays the ATLAS Run Control GUI. The interface is divided into several sections:

- Run Control State:** Shows the current state as "RUNNING".
- Run Control Commands:** A set of buttons for managing the run, including SHUTDOWN, ROOT, UNCONFIG, CONFIG, STOP, START, HOLD TRG, and RESUME TRG. A red box highlights these buttons, with the label "FSM transitions" pointing to them.
- Run Control Settings:** A panel for configuring the run, including Run type (Physics), Run number (143657), Super Master Key (690), LHC Clock Type, Recording (Enabled), Start time (20-Jan-2010 21:27:04), Stop time, and Total time (13 h, 56 m, 19 s). A red box highlights this panel, with the label "Settings" pointing to it.
- Run Control Tree:** A hierarchical tree view showing the structure of the Run Control system, including RootController, TDAQpp, RPC, and various monitoring and control applications. A red box highlights this tree, with the label "RunControl tree" pointing to it.
- Log Panel:** A table at the bottom showing the system's log, including time, severity, application, name, and message.

Cliccando sulle apposite TABs si mandano comandi al Root Controller che li distribuisce a tutti i figli. Le transizioni di stato sono possibili solo quando tutte le applicazioni hanno terminato la transizione precedente. Applicazioni e segmenti software possono essere abilitati/disabilitati dalla GUI. Altri parametric della sessione di

acquisizione come il numero di eventi, il RunType etc possono sempre essere definiti dalla GUI PRIMA di passare allo stato Running.

Esercitazioni di Laboratorio

In laboratorio utilizzeremo alcuni scintillatori plastici accoppiati direttamente (per contatto) ad altrettanti fotomoltiplicatori. Quando la radiazione attraversa lo scintillatore ne eccita gli atomi e le molecole causando l'emissione di un breve flash di luce. Questo è trasmesso al fotomoltiplicatore, dove è convertito in una debole corrente di fotoelettroni, che è poi amplificata dallo stesso PMT.

L'evoluzione temporale del processo di emissione di luce dallo scintillatore può essere descritta da una legge esponenziale, con una o due componenti, di cui una veloce e una più lenta. Gli scintillatori più diffusi, grazie alla facilità con cui vi si possono dare dimensioni e forme diverse, sono quelli plastici, caratterizzati da una costante di tempo dell'ordine di qualche ns (veloci!). La luce emessa ha un picco attorno ai 400 nm. La migliore descrizione matematica della forma dell'impulso è la convoluzione di una gaussiana con un'esponenziale:

$$N(t) = N_0 G(\sigma, t) \exp(-t/\tau)$$

I fotomoltiplicatori sono tubi elettronici che convertono la luce in una corrente elettrica misurabile. Sono costituiti da un fotocatodo, da cui gli elettroni sono estratti per effetto fotoelettrico, e una catena di amplificazione. L'efficienza di conversione dei fotomoltiplicatori varia con la frequenza della luce incidente. Il rapporto tra il numero di elettroni emesso dal fotocatodo e il numero di fotoni incidenti si chiama *quantum efficiency* e dipende fortemente dalla frequenza della luce incidente e dal tipo di fotocatodo. I PMT più adatti per convertire la luce di scintillazione proveniente da scintillatori plastici hanno il fotocatodo formato da uno strato di materiale semiconduttore. L'efficienza quantica è massima a lunghezze d'onda di circa 400 nm, dove vale circa il 25%. Dopo l'emissione dal fotocatodo, gli elettroni sono focalizzati sul primo stadio della catena di moltiplicazione. Il fattore di guadagno di quest'ultima ha valori tipici di 10^6 - 10^7 (dipende dalla tensione applicata al PMT).

Un sistema scintillatore+fotomoltiplicatore può essere usato per misurare l'energia della radiazione: oltre una soglia minima, per la maggior parte degli scintillatori la quantità di luce emessa è approssimativamente proporzionale all'energia depositata dalla radiazione incidente. I rivelatori a scintillazione sono veloci, nel senso che il loro tempo di risposta e recupero è breve rispetto ad altri rivelatori. Poichè il tempo morto è limitato, gli scintillatori possono essere utilizzati per conteggi ad alto rate. Con certi tipi di scintillatore è possibile discriminare tra diversi tipi di particelle incidenti analizzando la forma del segnale emesso: particelle con diverso potere di ionizzazione, infatti, possono determinare l'eccitazione di meccanismi di fluorescenza diversi.

Attività in laboratorio:

Esercizio 1: Costruzione di un sistema di trigger semplice

Materiale a disposizione: 3 scintillatori equipaggiati con 3 fotomoltiplicatori, un oscilloscopio, un alimentatore per i fotomoltiplicatori, un crate NIM con diversi moduli: coincidenze, discriminatori, fan-in/fan-out, scalers.

Cavetti lemo di diverse lunghezze.

Scopo: valutare il numero di conteggi di ciascun scintillatore, in singola e in coincidenza (di due e di tre), al variare della loro distanza e dell'inclinazione rispetto alla verticale.

Dare un'interpretazione fisica qualitativa del risultato.

Procedimento: alimentare uno dei PMT ed osservare gli impulsi con un oscilloscopio. Aggiustare la soglia del discriminatore. Visualizzare su un canale dell'oscilloscopio il segnale del PMT, su un altro il segnale discriminato (il segnale va prima sdoppiato: attenzione a riflessioni e problemi di matching di impedenza).

Sovrapporre gli altri PMT e procedure nello stesso modo.

Creare la coincidenza dei tre segnali discriminati, e valutare con lo scaler la sua frequenza

Esercizio 2:

Preparazione istogrammi di monitoring (programmazione in C++ di uno o più metodi per una classe preesistente)

Materiale a disposizione: il sistema precedente e un crate VME con un SBC, un QDC, un FADC e un TDC. Un PC con installato il software utilizzato dal sistema di TDAQ di ATLAS. Una partizione già pronta per la gestione dell'acquisizione dati dal QDC, dal FADC e dal TDC.

Un insieme di classi per il monitoring online.

Scopo: monitorare la forma dei segnali e i tempi di arrivo dei segnali uno rispetto all'altro.

Esercizio 3:

Elaborazione dei dati registrati su disco.

Materiale a disposizione: il sistema di acquisizione descritto sopra.

Un programma per la trasformazione dei dati grezzi in una ntupla di root.

Scopo: ripetere le valutazioni dell'esercizio 1 utilizzando i dati registrati e scrivere un report.

Esercizio 4:

Confrontare rate di acquisizione e banda dati del nostro sistema in laboratorio con quello dell'esperimento ATLAS.