

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

DIPARTIMENTO DI FISICA

TESI DI LAUREA

in

Progetto di sistemi elettronici

TRIGGERS PER ATTIVITÀ DI TEST SU FASCIO DI PARTICELLE

**REALIZZAZIONE DI UN PROGETTO IN VHDL E
SINTETIZZAZIONE SU FPGA**

CANDIDATO:
Alessandro Bagnari

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Ignazio Giacomo Massa

CORRELATORI:
Chiar.mo Prof. Mauro Villa
Dott.ssa Laura Fabbri

Anno Accademico 2007/08

Sessione III

A Teta, Francesco,
Enrico, Aldo e Lucia

Ringraziamenti

Ringrazio tutti i colleghi del dipartimento di fisica e dell'INFN con cui ho avuto il piacere di collaborare: dott. Alessandro Gabrielli, dott. Filippo Maria Giorgi, dott. Alberto Mengarelli, dott.ssa Sara Valentinetti, dott.ssa Laura Fabbri.

Ringrazio i professori Arnaldo Uguzzoni, Roberto Guerrieri e, in particolar modo, Ignazio Giacomo Massa per i loro insegnamenti nel campo della fisica e della progettazione digitale.

Un grazie molto speciale al prof. Mauro Villa per avermi insegnato, supportato e sopportato in quel che è stata la mia prima esperienza lavorativa da ingegnere elettronico.

Indice

Introduzione

Capitolo 1. I rivelatori ATLAS e LUCID

- 1.1 Breve introduzione all'acceleratore LHC pag.9
- 1.2 L'esperimento ATLAS e i suoi obiettivi pag.17
- 1.3 Il rivelatore di luminosità LUCID pag.22

Capitolo 2. L'attività di beam test

- 2.1 Set up del beam test pag.26
- 2.2 Segnali ed elettronica per la lettura dei dati pag.31
- 2.3 Funzionamento dei fotomoltiplicatori pag.34

Capitolo 3. Il sistema di trigger per il beam test

- 3.1 Scopo e funzionamento del sistema di trigger pag.38
- 3.2 Realizzazione di triggerdevice e fit su ALTERA Cyclone EP1C20 pag.43
- 3.3 Sintesi su CAEN V1495 e verifica finale pag.56

Conclusioni

Bibliografia

Introduzione

Questa tesi è il frutto di una esperienza fatta collaborando con il gruppo di ricerca ATLAS-LUMI presso Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna ed utilizzando i laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.

Il gruppo ATLAS-LUMI è coinvolto nell'esperimento ATLAS, il rivelatore di particelle più grande finora mai costruito, il quale si trova nel complesso dell'acceleratore di protoni denominato Large Hadron Collider (LHC) al CERN. In particolare il gruppo di ricerca ha realizzato in ATLAS il luminometro dell'esperimento; si tratta di un rivelatore, denominato LUCID, basato sull'effetto Cherenkov (produzione di luce da parte di particelle ultrarelativistiche) con il quale si intende misurare la luminosità di LHC, cioè una quantità fondamentale (la seconda in ordine di importanza in un acceleratore) direttamente collegata al tasso di collisioni protone-protone che si riuscirà ad avere.

Ai fini di una ottimale comprensione del rivelatore LUCID, che presenta diversi aspetti innovativi, nel giugno 2009 il gruppo sottoporrà una copia del rivelatore ad un test su un fascio di protoni (Beam Test) al CERN. Obiettivo principale del beam test è di verificare in una situazione perfettamente controllata il funzionamento dei singoli elementi del rivelatore LUCID quando sono attraversati da singole particelle. Sul LUCID sono già stati effettuati alcuni Beam Test, ma alcune modalità con cui erano stati condotti, in particolare il monitoraggio del fascio e del sistema di trigger, non soddisfacevano completamente gli intenti del gruppo e per questo motivo si è proposto di migliorare sotto diversi aspetti la strumentazione utilizzata.

Uno di questi aspetti è l'acquisizione dei dati sperimentali che avviene per mezzo di dispositivi elettronici: l'operazione di acquisizione deve essere fatta con precisione e

seguendo particolari criteri per non incorrere in errori come per esempio campionare in un periodo sbagliato poiché la strumentazione non permette di conoscere con esattezza i tempi in cui effettuarla.

Si vuole perciò introdurre un sistema di trigger (sistema in grado di riconoscere un particolare evento e fornire di conseguenza segnali precisi per l'acquisizione dati) avanzato, flessibile e programmabile, basato su scheda CAEN V1495 che sfrutta la versatilità e la precisione dei Field Programmable Gate Array e la rende disponibile per elaborare segnali di tipo TTL.

Oggetto della presente tesi è appunto il progetto di un dispositivo di trigger in linguaggio VHDL che tenga conto delle variabili in gioco nel prossimo Lucid Beam Test; la sintesi su scheda e la verifica di perfetta funzionalità. Da questo progetto ci si aspetta un notevole miglioramento nella conduzione del Beam Test e di conseguenza una facilitazione per gli operatori che lo effettueranno e che dovranno poi interpretare dati di miglior qualità.

Nel Cap. 1 si illustrano a grandi linee il progetto e gli obiettivi dell'esperimento ATLAS, il rivelatore LUCID ed i principi di funzionamento per la misura della luminosità. Nel cap 2 si discute l'attività del Beam Test: apparato sperimentale, rivelatori coinvolti, segnali ed elettronica di acquisizione. Maggior dettaglio è dato ai fotomoltiplicatori che forniscono i segnali principali da elaborare per generare il segnale di trigger del beam-test.

Nel Cap. 3 si discute il progetto da me realizzato: dopo una stesura delle richieste funzionali vi è la descrizione del progetto VHDL nel suo complesso, come è organizzato, quali sono le principali entità e si discutono alcuni dei passi più importanti. La parte terminale del capitolo si occupa della sintesi del circuito e della verifica in laboratorio.

Capitolo 1.

I rivelatori ATLAS e LUCID

Il tentativo di scoprire nuove particelle subatomiche costituisce il fronte più avanzato non solo della ricerca scientifica ma anche tecnologica, poiché gli strumenti necessari agli esperimenti di fisica subnucleare sfruttano le tecnologie più avanzate, o addirittura richiedono tecnologie appositamente concepite. In questo capitolo si espongono alcune caratteristiche tecniche degli apparati impiegati al CERN in quel che viene definito “l'esperimento più importante della storia”.

1.1 Breve introduzione all'acceleratore LHC

A partire dagli inizi del XX secolo la fisica si è concentrata sullo studio dell'atomo e delle particelle di cui è composto, e col progredire delle scoperte è passata a quelle subatomiche. Di pari passo, anche gli strumenti di cui la fisica si è servita hanno subito un'evoluzione. Nello studio di particelle si ha a che fare con dimensioni inferiori all'Angstrom, il che comporta una notevole difficoltà nell'operazione di misura per un osservatore umano; per questo motivo è stato necessario studiare le particelle attraverso i risultati delle loro

collisioni.

Per esempio, nel 1909 Rutherford (in particolare Hans Geiger, suo collaboratore, e Ernest Marsden, un suo tirocinante) scoprì la natura del nucleo atomico grazie alla collisione di particelle α con una sottilissima lamina di oro, precisamente dall'osservazione degli impatti delle particelle α su uno "schermo" che circondava il punto di collisione con la lamina d'oro. Allo stesso modo, oggi, lo studio delle particelle subatomiche avviene attraverso l'osservazione di tracce che le particelle rilasciano su appositi "schermi" disposti attorno al punto di collisione. Ciò che è cambiato, in sostanza, è l'energia delle particelle in gioco, la quale deve essere sempre maggiore per poter "creare" sub-particelle sempre più elusive, di conseguenza la grandezza (sempre più grandi) degli apparati necessari per poter fornire alle particelle una tale energia, e la tecnologia degli "schermi" con cui è possibile vedere sub-particelle sempre più minute.

Presso il laboratorio di fisica CERN (acronimo di Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare), il quale si trova nella periferia di Ginevra, è stato costruito l'acceleratore di particelle più grande al mondo: il Large Hadron Collider (d'ora in poi LHC).

Un acceleratore di particelle è una macchina in grado di imprimere una certa velocità a particelle di vario tipo e mantenerle confinate su una precisa traiettoria. Successivamente queste particelle vengono fatte scontrare tra loro in punti ben precisi in cui, nelle immediate vicinanze, sono disposti particolari "schermi" di molteplici tipologie in grado di rilevare gli impatti o le traiettorie delle varie particelle scaturite dall'urto.

LHC è un acceleratore per adroni, ossia particelle subatomiche soggette all'effetto della forza nucleare forte; fanno parte di questa "famiglia" i protoni, i neutroni e i mesoni.

Nel LHC saranno principalmente utilizzati i protoni, i quali saranno accelerati fino ad ottenere un'energia di 7TeV: inizialmente i protoni sono da estrarre da un opportuno materiale, vengono poi accelerati dal LINAC2, un acceleratore lineare, fino ad ottenere un'energia di 50 MeV e, in successione, dal PSB, PS e SPS, tre sincro-ciclotroni (acceleratori circolari) che li portano rispettivamente ad un'energia di 1.4, 25 e 450GeV; solo allora vengono iniettati nell'anello del LHC il quale li porta a 7TeV (schema degli acceleratori in cascata in figura 1).

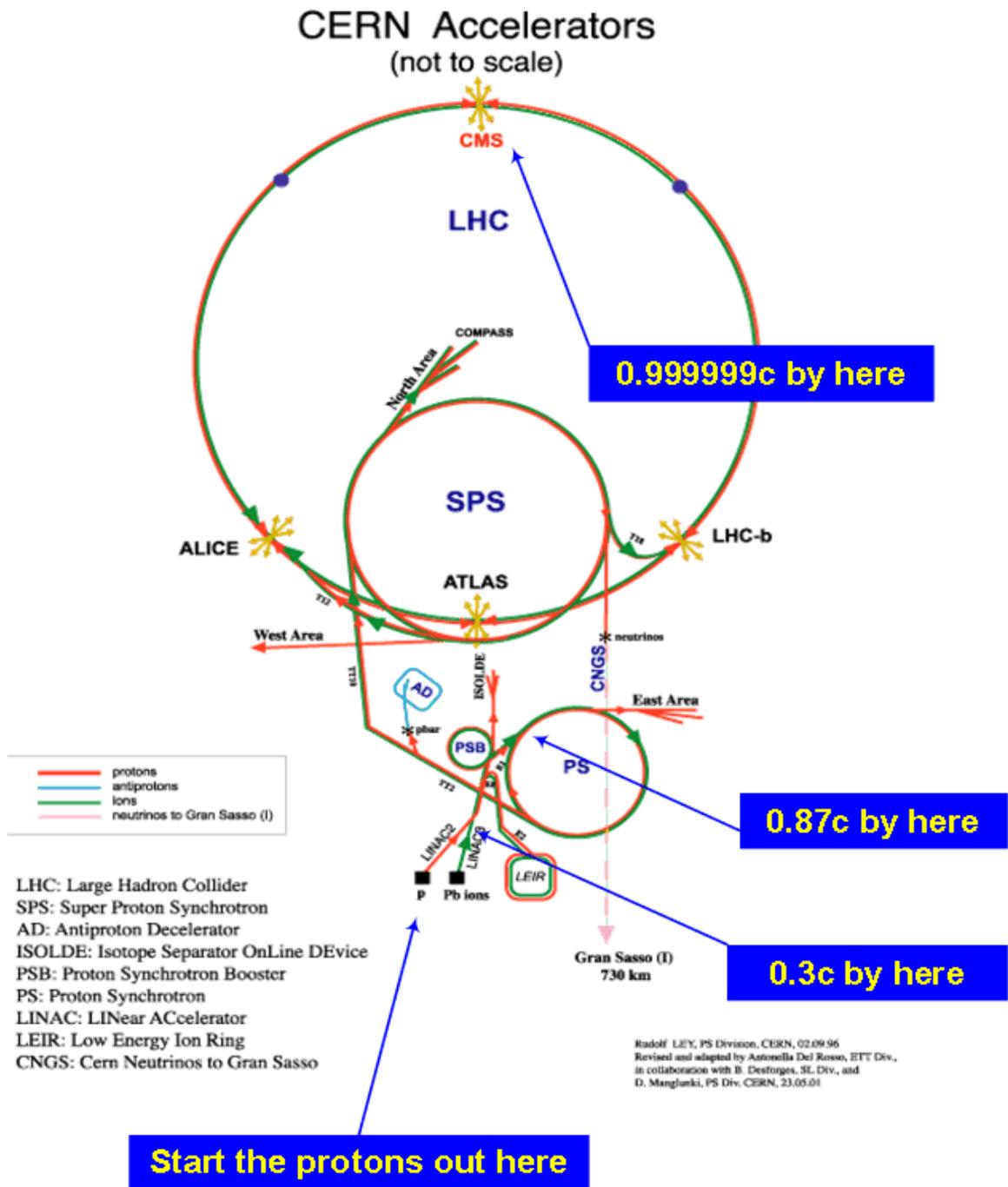


figura 1. Schema degli acceleratori del CERN con alcune indicazioni della velocità dei protoni.

Questo anello, lungo poco meno di 27Km, è costituito da due tubi a vuoto (*beam pipe*) inseriti in un tubo più grande (figura 2); in uno il fascio circola in senso orario, nell'altro in senso opposto, e in 4 punti del tracciato i fasci vengono fatti incrociare provocando collisioni ognuna tra due "pacchetti di protoni" a 7TeV di energia, per una energia complessiva nell'urto di 14TeV. Ogni fascio è costituito da 3564 pacchetti (*bunches*) distanziati l'uno dall'altro di 7.55m, e la frequenza con cui si verifica il loro passaggio è di 40MHz; di questi 3564 pacchetti, 2808 contengono un numero di protoni che si aggira intorno a $1.15 \cdot 10^{11}$, i restanti sono vuoti.



figura 2. *Segmento di tubo; all'interno le due beam pipe avvolte da magneti, cavi di alimentazione e sistema di raffreddamento.*

Mantenere protoni in circolo ad una velocità pressoché identica a quella della luce comporta l'impiego di ingenti forze in grado di accelerare, curvare e mantenere centrati sugli assi delle *pipe* i fasci. Per questo è necessario creare il vuoto all'interno dei tubi, e sfruttare la forza di Lorentz generata da elevati campi magnetici, $8 \sim 5T$.

I magneti in grado di fornire tale campo sono conduttori attraversati da correnti di 11700A tenuti in regime di funzionamento di superconduttore, cioè mantenuti ad una temperatura di 1.9K, da un sistema di raffreddamento criogenico ad elio liquido.

I magneti sono di due tipi diversi: dipoli (figura 3) e quadripoli (figura 4).

I dipoli sono responsabili della curvatura del fascio, mentre i quadripoli si occupano di contenerlo in una limitata sezione trasversale, cioè hanno un effetto focalizzante.



figura 3. Un dipolo magnetico del LHC; con un campo di 8.3T curva il fascio in modo che segua la forma circolare del LHC.

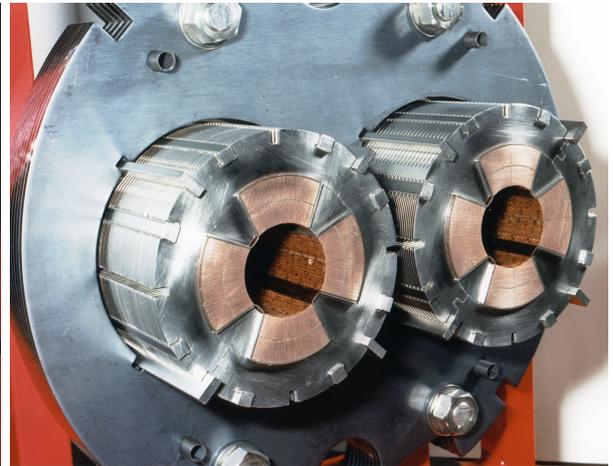


figura 4. Un quadripolo magnetico del LHC; con un campo di 6.8T impedisce al fascio di espandersi trasversalmente.

L'accelerazione è invece fornita da 8 cavità a radiofrequenza in lega di niobio mantenute allo stato di superconduttore e in grado di imprimere le accelerazioni ai protoni mediante un campo elettrico di 5.5MV/m (figura 5).

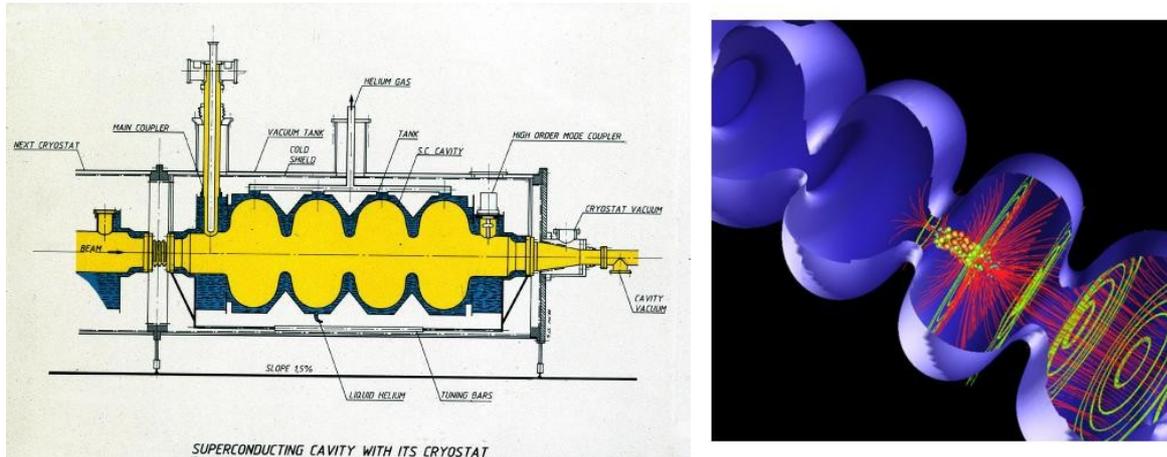


figura 5. A sinistra, schema di una cavità a radiofrequenza.
A destra, ricostruzione dell'effetto del campo elettrico sui protoni.

Nei punti di collisione occorre focalizzare maggiormente il fascio (figura 6), cioè renderlo ancor più ristretto di quanto è già nelle *beam pipe*, per ottenere un numero medio di 20 impatti protone-protone in ogni singola collisione.

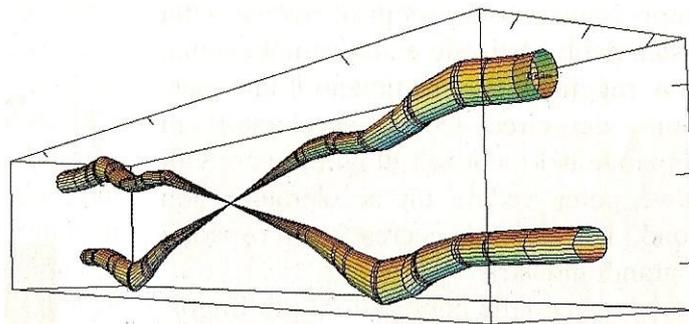


figura 6. Schema dei fasci in prossimità dei punti di collisione; prima dell'impatto, le dimensioni trasversali del fascio passano dal mm ai 20 μ m.

Sebbene un'energia di 7TeV, di per sé, non sia un'enormità (si pensi che è paragonabile a quella di una mosca in volo), il fatto che essa è concentrata nelle dimensioni di poche decine di μm la rende così particolare, tanto che il LHC è il primo acceleratore di particelle a raggiungere tale energia.

Veniamo ora agli “schermi” che permetteranno di vedere le particelle prodotte.

Nei 4 punti di collisione sono presenti 4 grandi esperimenti (figura 7) ognuno dei quali è un enorme rivelatore di particelle: ATLAS, ALICE, CMS, LHCb.

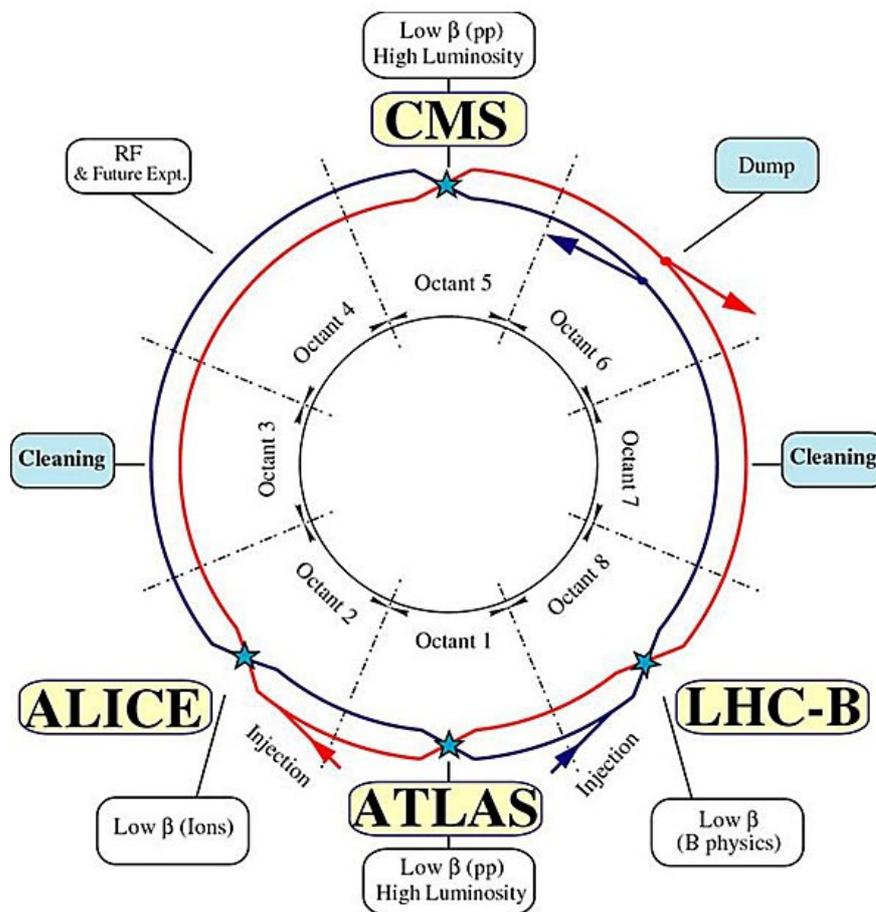


figura 7. Schema dell'anello del LHC e degli esperimenti posti lungo il percorso nei punti di collisione.

ATLAS e CMS sono rivelatori di particelle multi-purpose, ovvero in grado di rivelare e distinguere particelle di vario tipo; uno utilizza un metodo di rilevamento diverso dall'altro, in modo da poter effettuare misure in modo indipendente ed eventualmente confermare vicendevolmente le loro scoperte (le caratteristiche ed il funzionamento di ATLAS sono approfonditi nel paragrafo successivo). ALICE è un rivelatore realizzato specificamente per le collisioni tra ioni pesanti (ioni di piombo, per esempio) con l'obiettivo di studiare la materia in stato di quark-gluon plasma. In pratica la collisione di ioni pesanti crea una condizione simile a quella successiva al big-bang e permette di studiare il raffreddamento della materia. LHCb lavora a bassa luminosità studiando i quark b e la relazione tra materia e antimateria.

Un altro parametro importante del LHC è proprio la luminosità, la quale è data da

$$\text{Luminosità sperimentale} = \frac{n \cdot \text{urti singolo incrocio} \cdot \text{frequenza di incrocio}}{\text{sezione d'urto}}$$

dove la sezione d'urto è un parametro fondamentale che caratterizza la particella (l'altro parametro è la massa espressa in termini di energia; conoscendo massa e sezione d'urto, la particella si definisce nota). Dato che il numero di urti in un singolo incrocio e la frequenza sono noti, misurando la luminosità si ricava il valore della sezione d'urto, la quale ha dimensione di una di superficie (solitamente è espressa in barn) e fornisce una sorta di probabilità che ha la particella di urtare contro un'altra. La luminosità sperimentale è quindi un valore da rilevare sperimentalmente ad ogni incrocio.

D'altra parte vi è anche una luminosità nominale definibile secondo le caratteristiche dell'apparato. Nella seguente formula

$$\text{Luminosità nominale} = \frac{P_a \cdot P_c \cdot f}{4\pi \cdot \frac{\epsilon \cdot \beta}{\gamma}} \cdot F$$

P_a e P_c sono il numero di protoni soggetti alla collisione provenienti dall'una e dall'altra direzione, f è la frequenza di collisioni, F è un fattore che tiene conto di come i fasci vengono fatti incrociare (per esempio quanto sono focalizzati e inclinati), ϵ β γ sono parametri fissi del sistema. Il LHC lavorerà ad una luminosità di $2 \cdot 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ per alcuni anni, successivamente passerà ad un valore superiore, ovvero $2.3 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

A differenza di ATLAS, CMS e ALICE, LHCb lavora a luminosità ridotta.

Oltre a questi quattro, ci sono due ulteriori esperimenti minori: TOTEM che si occupa di controllare la sezione d'urto nei pressi di CMS; LHCf studia invece alcuni prodotti delle collisioni interpretandoli come una cascata di molteplici particelle create da raggi cosmici che colpiscono l'atmosfera; si trova nei pressi di ATLAS.

1.2 L'esperimento ATLAS e i suoi obiettivi

Come già detto al paragrafo precedente, ATLAS è un multi-purpose detector per le collisioni protone-protone in grado di rilevare le tracce rilasciate sui detectors dalle particelle che scaturiscono dalla collisione.

ATLAS è di forma cilindrica lungo 46m, diametro 25m e pesa circa 7000 tonnellate; al suo interno avviene uno scontro tra protoni a 7TeV per una energia complessiva d'urto di 14TeV. Una tale energia è necessaria poiché le particelle che si vogliono generare hanno massa superiore ai 114GeV ovvero il limite massimo di energia a cui il LEP (Large Electron Positron collider, predecessore del LHC) lavorava.

La principale particella finora non osservata che si vorrebbe scoprire con il LHC è il bosone di Higgs, il quale avrebbe (in via puramente teorica) una massa non superiore a 1TeV. Fornendo il LHC un'energia di 14TeV, il bosone di Higgs (ammesso che esista) dovrebbe essere generato.

Per essere più chiari, data la velocità costante con cui i protoni viaggiano a regime all'interno del LHC (pressochè identica a quella della luce), se si vuole generare una particella la cui massa è grande, occorre una grande energia, poiché

$$E = m \cdot c^2 \Rightarrow \frac{E}{m} = c^2 = \text{costante}$$

In sostanza, alla collisione di due *bunch* avviene che l'enorme quantità di energia concentrata in dimensioni ristrette è in parte convertita in materia; più precisamente, in

particelle che hanno una massa non superiore a E/c^2 , ma con probabilità diverse l'una dall'altra (figura 8).

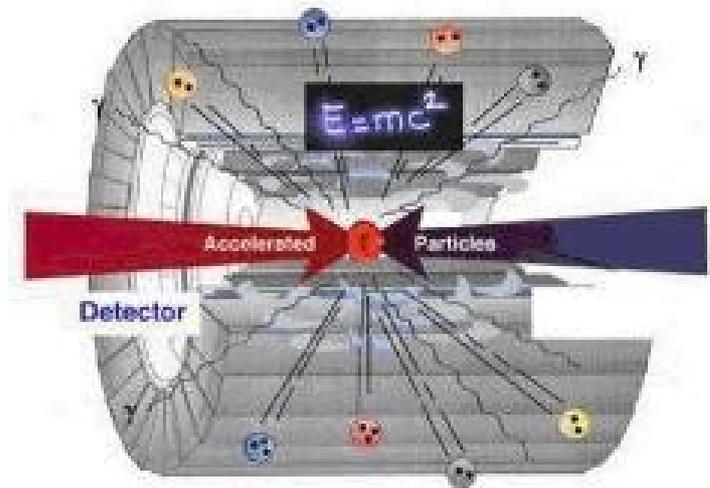


figura 8. Semplice rappresentazione di ciò che avviene all'interno di ATLAS.

Il bosone di Higgs sarebbe la particella che risponde alla domanda: “come mai le particelle hanno una precisa massa?”; esso è sensibile al campo di Higgs, di cui tutto l'universo è permeato, e dalla sua interazione con le altre particelle scaturisce il comportamento massivo della materia; finora la massa di una particella è determinata sperimentalmente, mentre con la verifica dell'esistenza del bosone di Higgs, la massa sarebbe individuabile deterministicamente.

Lo scopo principale di ATLAS è quello di rilevare nuovi tipi di particelle, qualunque esse siano, e tradurre queste scoperte in leggi fisiche; per esempio un certo tipo di particelle convaliderebbe la teoria supersimmetrica, altre spiegherebbero il problema della materia oscura, il bosone di Higgs scioglierebbe la finora misteriosa origine della massa.

ATLAS è l'acronimo di A Toroidal Lhc ApparatuS, difatti la sua caratteristica principale è il grande sistema di solenoidi che si trova al suo interno (figura 9) e che produce un campo magnetico dalla forma appunto toroidale.

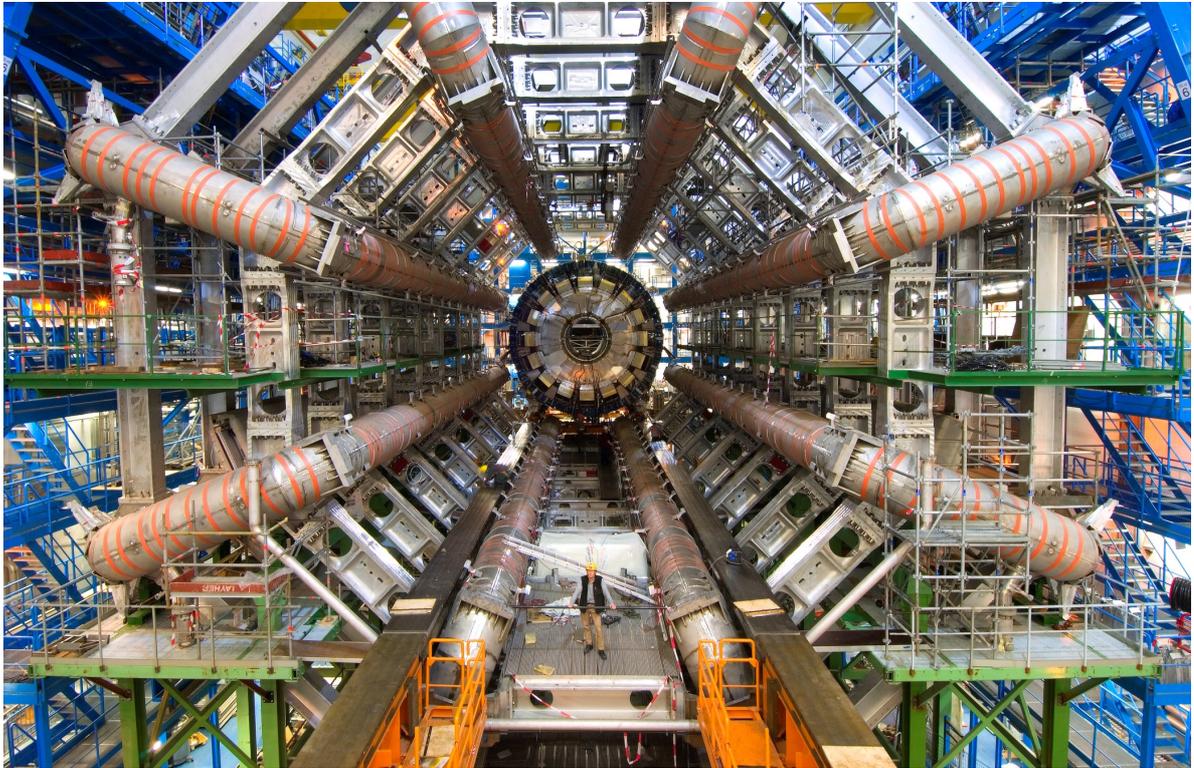


figura 9. Il sistema dei solenoidi di ATLAS (denominato Barrel Toroid) che creano il campo magnetico toroidale.

Al centro avviene la collisione e dato che non vi sono direzioni preferenziali con cui le particelle si dipartono dal punto di impatto, i rivelatori di cui è composto sono stati costruiti in modo che tutto l'apparato abbia simmetria centrale, con centro ovviamente il punto di collisione.

ATLAS è costituito da molteplici detectors (figura 10);

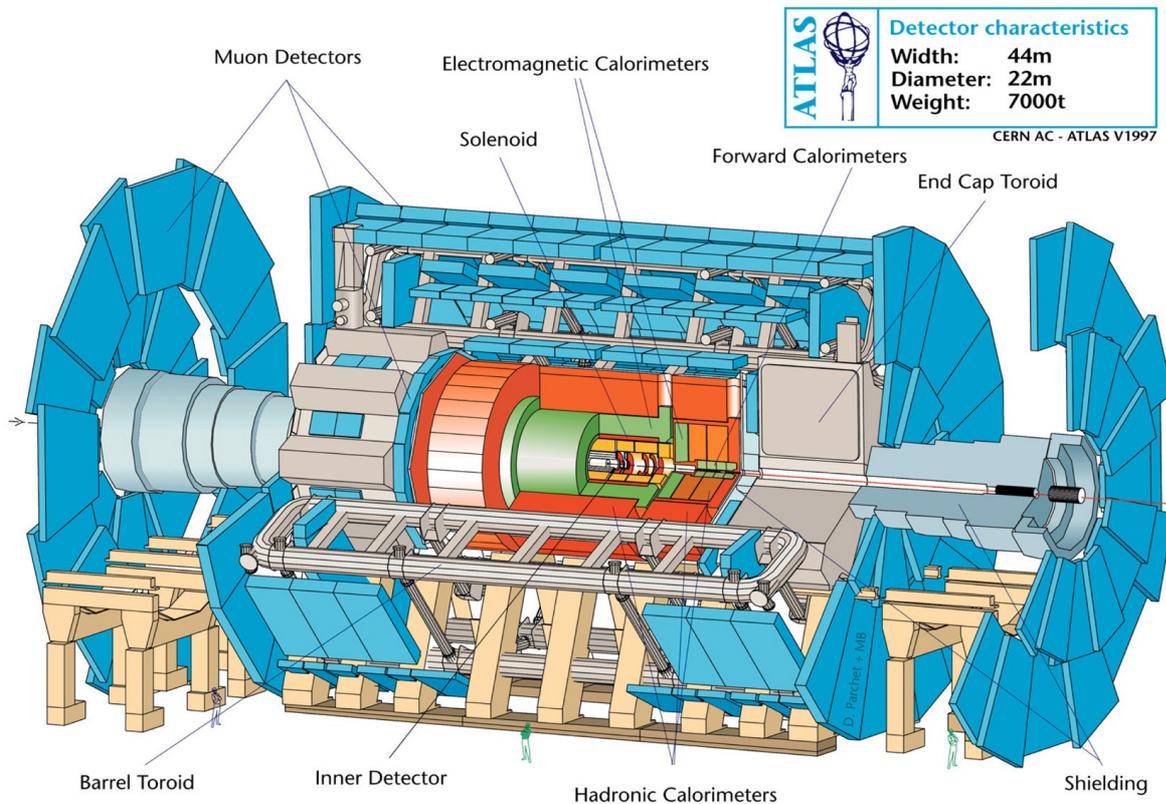


figura 10. *Struttura di ATLAS sezionata in cui è possibile vedere i vari detectors*

Il rivelatore più prossimo al punto di impatto è l'*Inner Detector* un cilindro lungo 7m e diametro di 1.15m; la parte interna, a soli 4cm dal punto di impatto, è interamente costituita da rilevatori a pixel (ricavati su wafer di silicio con tecnologie nanoelettroniche) in grado di individuare i punti in cui le particelle li attraversano con una precisione di 25 ~ 50 μm ; la parte esterna è costituita da *Tracker Tubes*, dei rilevatori a tracciamento continuo.

Combinando i dati dei *Pixel Detector* e dei *Tracker Tubes* si ottengono traiettoria e posizione della particella, quindi momento, momento trasverso e vertice. L'*Inner Detector* è completamente avvolto da un solenoide, costituito da una bobina metallica mantenuta in funzionamento di superconduttore, il cui campo magnetico dell'intensità di 2T è parallelo alla direzione assiale della struttura.

Proseguendo verso l'esterno si trova il *Calorimetro Elettromagnetico* il quale individua la traiettoria compiuta da particelle come elettroni, positroni e fotoni; esso è costituito da tre

parti: una centrale cilindrica che avvolge lateralmente il cilindro più interno (costituito dall'*Inner Detector* e dalla spira che lo circonda), e due parti circolari, denominate *End-Caps*, che chiudono davanti e dietro il cilindro in modo da avere copertura angolare ermetica, ovvero coprire tutti 4π dell'angolo solido attorno al punto di collisione a parte l'apertura sull'asse delle *beam pipe*. Il materiale sensibile di cui è costituito è argon liquido intervallato da elettrodi di kapton posti a distanza fissa l'uno dall'altro; gli elettroni, positroni e fotoni perdono energia nell'argon liquido e interagiscono con le piastre di kapton secondo gli effetti di bremsstrahlung, annichilazione, produzione di coppia elettrone-positrone, Compton, e fotoelettrico, creando così uno sciame di tracce catturate da un sistema di rilevamento elettronico; dopo alcune interazioni queste particelle si fermano.

Gli adroni, invece, attraversano completamente questo detector con una traiettoria singola. Per rilevarli, vi è il *Calorimetro Adronico* che avvolge a sua volta quello elettromagnetico con una struttura centrale cilindrica e due *End-Caps* laterali per la copertura angolare ermetica. Come materiali assorbitori si utilizzano i metalli (ferro, rame, tungsteno opportunamente disposti) intervallati da spessi strati di materiale scintillatore collegati al sistema elettronico di rilevamento.

Attorno al *Calorimetro Adronico* è presente il *Barrel Toroid*, fondamentale per tutti i detectors (tranne l'*Inner Detector*, che non ne è soggetto) poiché al loro interno il suo campo magnetico devia i diversi tipi di particelle secondo diverse traiettorie in base alla forza di Lorentz; dalla curvatura delle traiettorie i detector sono quindi in grado di calcolare l'impulso e discernere la tipologia di particella.

Il campo magnetico di 4T ha forma toroidale, ovvero avvolge come un cilindro l'intera struttura; il *Barrel Toroid* è composto da 8 bobine in lega di niobio-titanio mantenuto in regime di funzionamento di semiconduttore (4.8K di temperatura) dal sistema di raffreddamento criogenico ad elio liquido; a fianco del *Barrel Toroid* ci sono due *End-Caps Toroid* che chiudono le linee di campo magnetico lateralmente.

Il detector più esterno è la *Camera a Muoni* costituita da diversi dispositivi: le *RPC* (*Resistive Plate Chamber*) che sono inframmezzate alle bobine del *Barrel Toroid*, le *TGC* (*Thin Gap Chamber*) che si trovano lateralmente come *End-Caps*, le *CSC* (*Cathode Strip Chamber*) e *MDT* (*Monitored Drift Tube*) che hanno il compito di rilevare con precisione le tracce dei muoni. Questi dispositivi sono disposti in modo tale che ogni muone è obbligato

ad attraversarne almeno tre, ed in questo modo si garantisce una misura precisa del momento dei muoni.

1.3 Il rivelatore di luminosità LUCID

Alle estremità laterali di ATLAS, a qualche cm di distanza dall'asse del fascio e a 17m di distanza dal punto di collisione, vi è il sistema per la rilevazione della luminosità: il LUCID (*L*uminosity *m*asurement using *C*herenkov *I*ntegrating *D*etector).

Il rivelatore è composto da due bracci, ognuno dei quali è costituito da 20 tubi ad effetto Cherenkov, disposti in modo da avvolgere completamente l'asse delle *beam pipe*, in grado di raccogliere la luce prodotta dalle particelle generate dalla collisione che li raggiungono, e quindi di risalire al conteggio delle particelle.

Lo scopo del LUCID è quello di contare il numero di collisioni anelastiche protone-protone che avvengono ad ogni impatto.

Tra i tanti metodi e strumenti con cui questa operazione può essere effettuata (per esempio odoscopi, sotto-rivelatori, camere di ionizzazione), sono stati scelti proprio i tubi ad effetto Cherenkov poiché, a differenza degli altri, sono in grado di rimanere efficienti anche dopo molte ore di funzionamento sottoposti a forti radiazioni e sono in grado di rilevare un numero elevato di interazioni sovrapposte, quindi ottimi per lavorare nelle vicinanze di un punto di collisione del LHC.

Ogni tubo è costituito di alluminio altamente riflettente alla cui estremità finale è collocato un fotomoltiplicatore; esso ha una finestra di quarzo spessa 1mm attraverso la quale passano i fotoni che verranno poi rilevati e contati.

L'effetto Cherenkov consiste nella produzione di fotoni da parte della particella carica che attraversa il tubo. I tubi sono difatti mantenuti alla pressione atmosferica all'interno di un contenitore stagno riempito di gas C_4F_{10} il quale ha un indice di rifrazione $n=1.00137$; la particella carica proveniente dal punto di collisione entra in uno dei 20 tubi e lungo la sua

traiettoria interagisce con il gas producendo continuamente un cono di luce, quindi fotoni, che vengono consecutivamente riflessi in avanti fino al fotomoltiplicatore (figura 11).

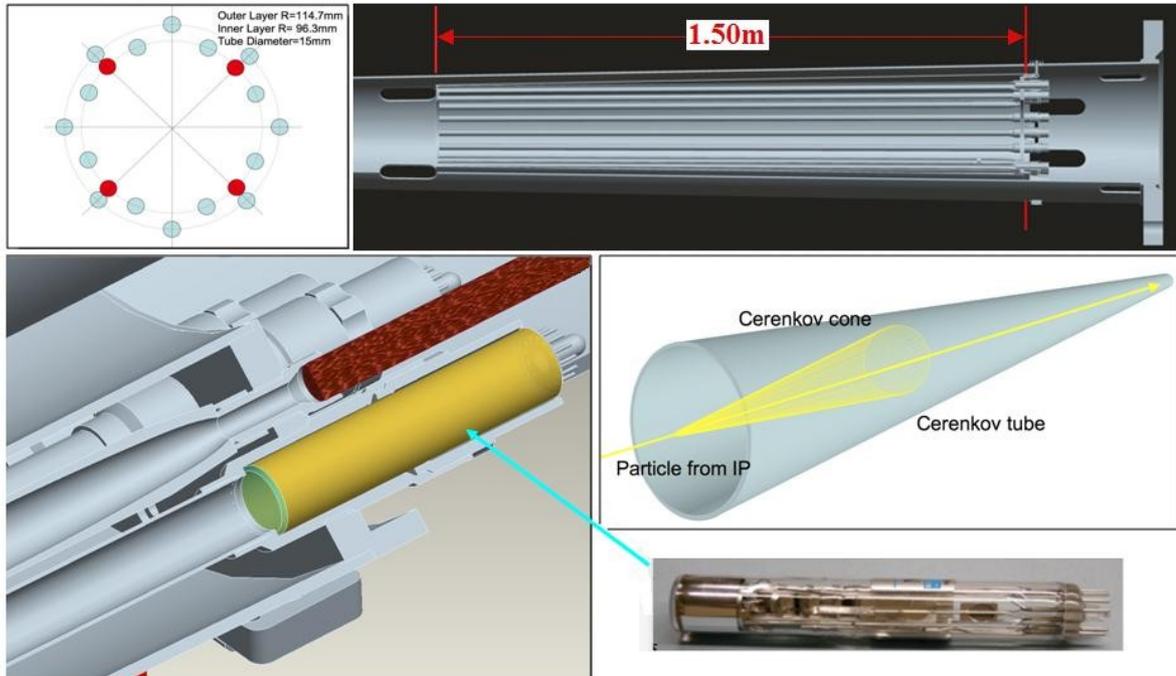


figura 11. *Disposizione dei tubi in sezione trasversale e assiale del dispositivo; particolare della connessione tubo-fotomoltiplicatore; cono di luce prodotto per effetto Cherenkov dalla particella carica che attraversa il tubo pieno di gas C_4F_{10} ; foto di un fotomoltiplicatore R762 Hamamatsu.*

In sostanza, per ogni particella che attraversa il tubo, il fotomoltiplicatore genera un segnale elettrico più o meno intenso, più o meno lungo a seconda dell'energia della particella (il funzionamento del fotomoltiplicatore è trattato nel capitolo successivo) che viene interpretato dal sistema elettronico di acquisizione ADC, il quale tiene il conteggio degli eventi. Da questi dati si può quindi risalire alla luminosità secondo la formula

$$Luminosità = \frac{n \cdot \text{urti singolo incrocio} \cdot \text{frequenza di incrocio}}{\text{sezione d'urto}}$$

Quindi LUCID fornisce dati per lo studio della luminosità e contemporaneamente controlla che LHC rimanga a regime, ovvero che tutte le collisioni presentino circa lo stesso numero di impatti protone-protone; inoltre i dati elaborati dal sistema di acquisizione di LUCID

sono impiegati per il sistema di trigger di ATLAS, ovvero un sistema in grado di selezionare un particolare evento, che presenta precise caratteristiche prestabilite, tra moltissimi altri eventi di minore importanza.

Capitolo 2.

L'attività di Beam Test

Per aver la possibilità di capire come i diversi rivelatori si comportano una volta installati si effettuano diverse prove di laboratorio in condizioni controllate. Una delle verifiche più stringenti è quella che consiste nel riprodurre all'interno dei rivelatori quei segnali che effettivamente ci saranno durante il funzionamento di LHC. Questo è possibile solo utilizzando fasci di particelle opportuni detti “test beam” (fasci di prova). L'attività di Beam Test precede e spesso segue l'attività di installazione di un set-up sperimentale.

In questo capitolo si espone l'attività di Beam Test del LUCID che ha lo scopo di controllare il funzionamento del detector, di tarare i parametri del dispositivo di acquisizione dati e di confrontare i dati di Beam Test con quelli ottenuti dalle simulazioni effettuate con un Monte Carlo dettagliato dell'apparato che riproduce il funzionamento del dispositivo stesso.

2.1 Set-up del Beam Test

Verso la fine di giugno 2009, in un'area del CERN, verrà effettuato il test sotto fascio di elementi chiave del rivelatore LUCID. Dato che il LUCID è inserito all'interno della struttura di ATLAS e quindi impossibile da rimuovere a meno di lunghi e complicati lavori di smontaggio, il beam test verrà effettuato su tubi ad effetto Cherenkov del tutto simili: al momento della realizzazione del LUCID, una cinquantina di fotomoltiplicatori furono testati e caratterizzati (procedimento di screening delle funzionalità atto a determinare la curva caratteristica I/V) uno per uno, successivamente furono selezionati i 40 migliori, venne effettuato un beam test su di essi e 32 di essi furono montati all'interno di ATLAS; per questo beam test verranno utilizzati i fotomoltiplicatori non installati, che sono del tutto identici come funzionamento, ma leggermente differenti nella caratterizzazione.

Essi verranno applicati al fondo di tubi in alluminio dalle caratteristiche riflettive leggermente differenti l'uno dall'altro, anch'essi precedentemente controllati e testati. Successivamente i tubi verranno inseriti in una struttura di supporto a *revolver* (figura 12), che li mantiene fissi e perfettamente allineati con l'asse del fascio da cui verranno attraversati; essi sono disposti in circolo proprio come i fori di un tamburo di pistola. Questo supporto è a sua volta contenuto in un cilindro, denominato *vessel*, a tenuta stagna poiché dovrà contenere un particolare gas e mantenerlo ad una pressione definita, ma variabile a seconda dei test tra 0 e 1.5 atm.

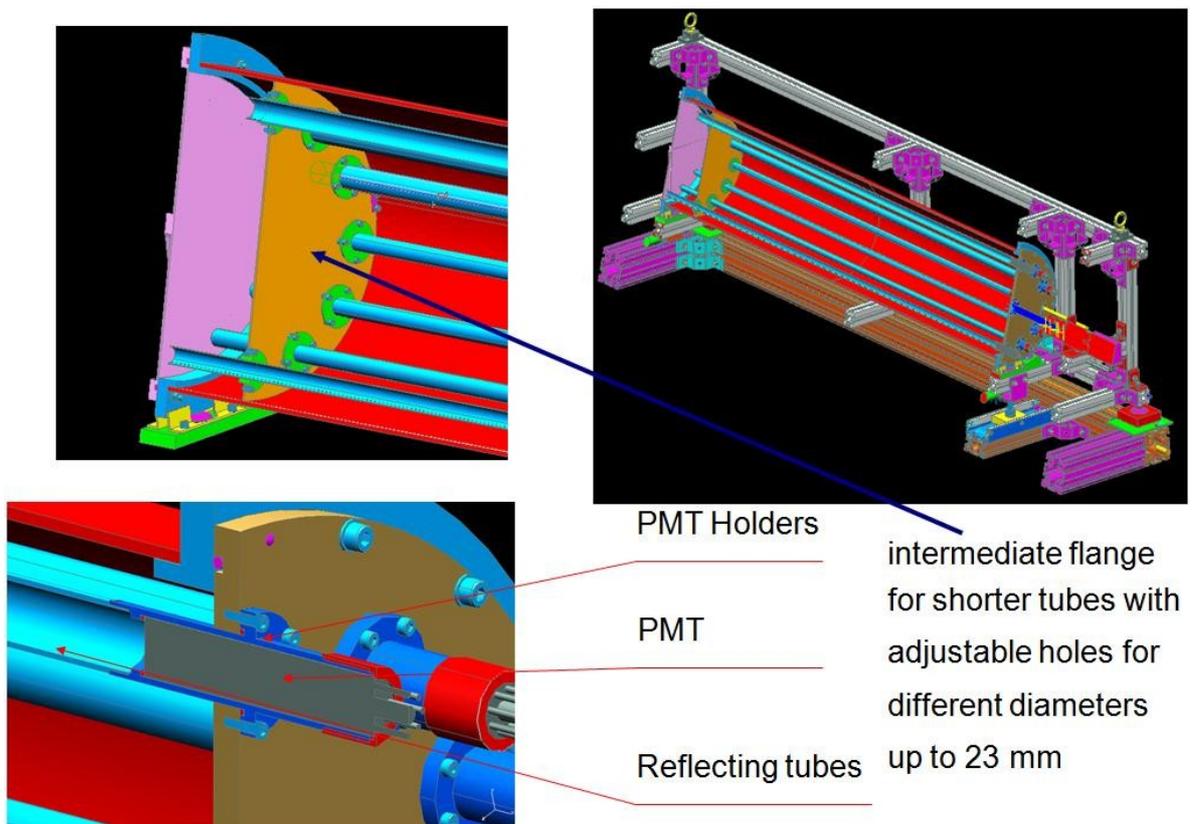


figura 12. Sezione assiale del vessel; in basso sezione di tubo con fotomoltiplicatore.

Le basi del *vessel* sono opportunamente dotate di pertugi da cui escono le estremità posteriori dei fotomoltiplicatori (da una, figura 12 in basso) ed entrano (dalla base opposta, figura 12 in alto a sinistra) le fibre che portano impulsi luminosi all'ingresso dei tubi; questi impulsi luminosi sono generati a seconda del bisogno e hanno la funzione di segnale di prova e di calibrazione (impulso LED).

Il *vessel* deve essere a sua volta supportato e mantenuto in posizioni perfettamente allineate al fascio; per fare ciò, il supporto è in grado di traslare in due direzioni mosso da motori elettrici con una precisione dei $10\mu\text{m}$, inoltre il *vessel* viene fatto ruotare intorno al proprio asse da un ulteriore motore in modo da cambiare di volta in volta il tubo sottoposto al test.

Completano il sistema due coppie di *camere a strip* e due coppie di *scintillatori* che vengono disposte una prima ed una dopo il *vessel* lungo la traiettoria delle particelle (figura 13).

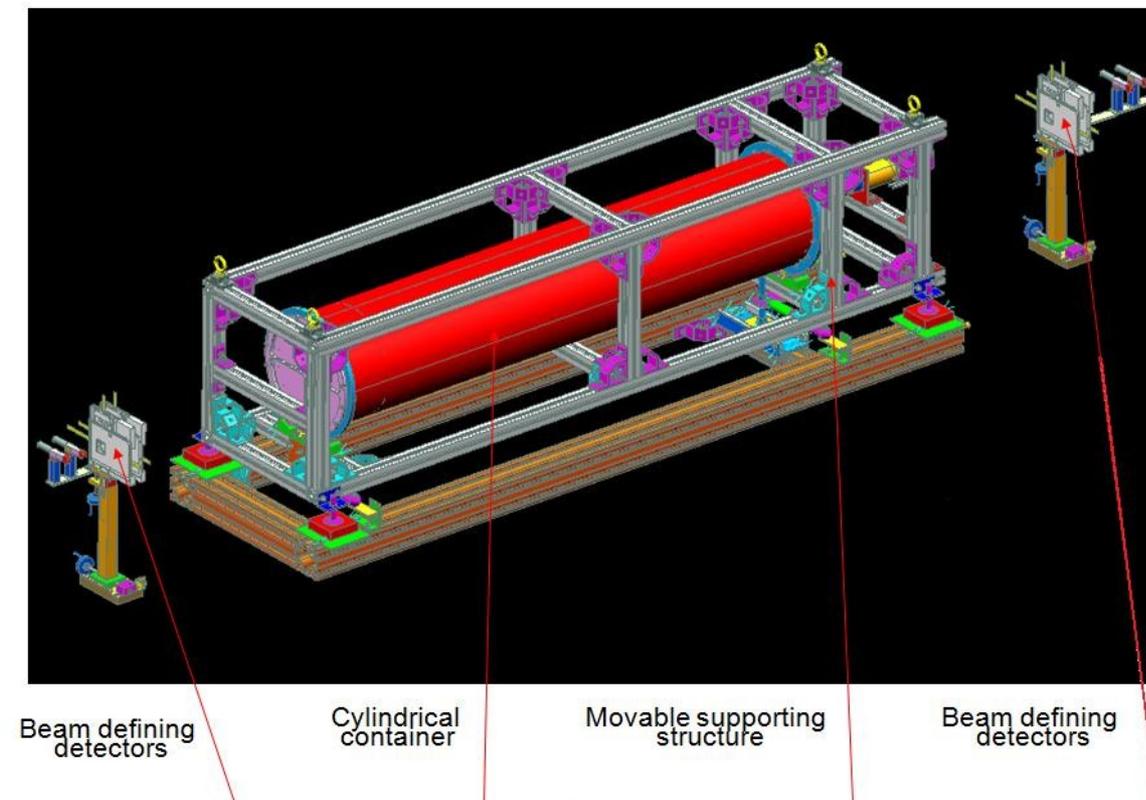


figura 13. Da sinistra verso destra si trovano allineati sulla linea di fascio 2 scintillatori, 2 rivelatori a strip, il vessel con il sistema di supporto, 2 rivelatori a strip e 2 scintillatori.

I rivelatori a strip sono supporti di silicio sulle cui facce sono incise microstrip per la rivelazione del passaggio di particelle. Ogni singolo rivelatore ha strip disposte nelle due direzioni ortogonali e la lettura in contemporanea delle due facce permette l'identificazione della posizione in cui la particella ha attraversato il rivelatore (figura 14).

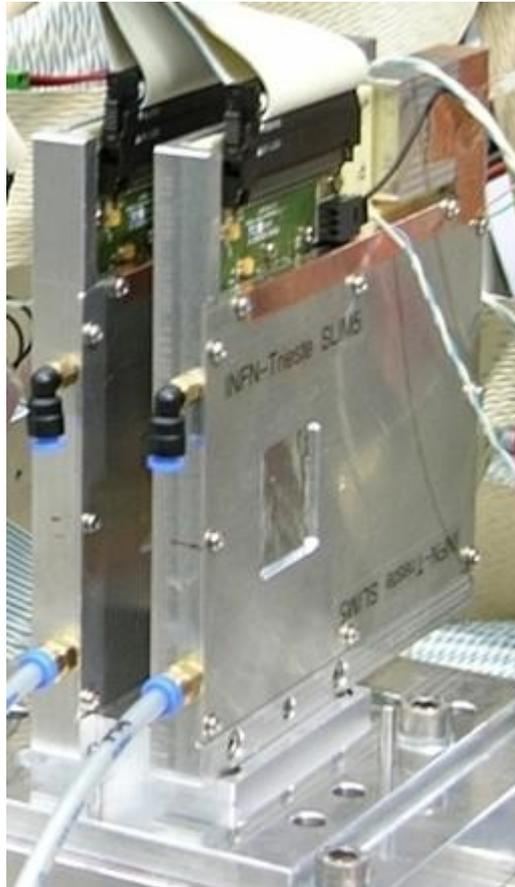


figura 14. Coppia di camere a strip con relativi cavi per l'uscita dati.

Gli scintillatori sono costituiti da un'estremità di materiale fotosensibile che quando viene attraversato da una particella carica emette fotoni, e da un fotomoltiplicatore (identico a quelli posti all'interno del *vessel*) che capta i fotoni emessi e genera un segnale elettrico con cui dichiara il passaggio della particella.



figura 15. Foto di uno scintillatore: all'estremità superiore è presente il fotoemettitore, a quella inferiore il fotomoltiplicatore da cui si dipartono i cavi di segnale e alimentazione; il tutto è avvolto in nastro isolante nero in modo da non far penetrare la luce.

L'intera struttura sarà attraversata da un fascio di particelle costituite principalmente da pioni di energia $E=180$ GeV. L'intensità del fascio sarà regolabile in un ampio intervallo, tipicamente da 100 Hz a 1 Mhz di particelle dentro un singolo tubo.

2.2 Segnali ed elettronica per la lettura dei dati

Ognuno dei dispositivi precedentemente descritto è collegato ad un sistema di acquisizione dei dati che lavora in maniera sincrona con una frequenza di 40MHz; a seconda dei segnali che provengono da *scintillatori* e *camere a strip*, viene effettuata o meno la lettura del segnale proveniente dall'interno del *vessel*. Il circuito elettronico che effettua questa selezione degli eventi è denominato *sistema di trigger* ed è ampiamente descritto nel capitolo successivo.

Per ora si vogliono analizzare le caratteristiche dei segnali prima del loro arrivo alla scheda di trigger.

I fotomoltiplicatori, il cui funzionamento è descritto nel paragrafo successivo, misurano la luce generata per effetto Cherenkov dalla particella che attraversa il tubo all'interno del *vessel*. All'uscita forniscono un segnale elettrico in corrente che viene poi convertito in tensione. Esso è chiaramente analogico, di forma impulsiva ed è tanto più ampio (negativamente) quanto è intensa la luce incidente.

In alcuni casi è necessario attivare a comando i fotomoltiplicatori dentro il *vessel* e per questo è stato predisposto un diodo led che, opportunamente stimolato, invia attraverso una fibra ottica un impulso luminoso all'ingresso dei tubi (figura 16).

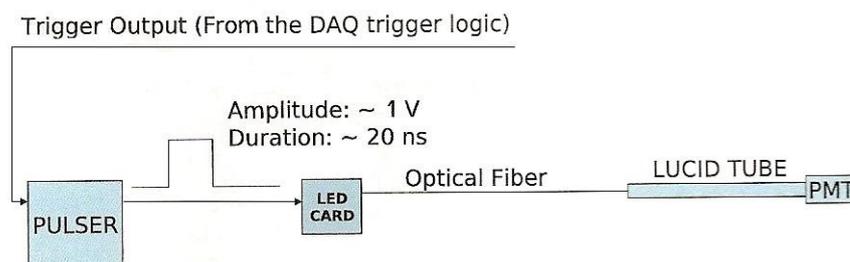


figura 16. Schema della stimolazione guidata del fotomoltiplicatore: dal trigger device arriva un segnale PULSE all'impulsatore; esso a sua volta fornisce un opportuno segnale al led che genera l'impulso luminoso.

Questa operazione serve per effettuare la calibrazione delle alimentazioni dei fotomoltiplicatori, il segnale inviato dal pulser al led è un impulso pressochè rettangolare di durata 25ns (figure 17 e 20) e la risposta del fotomoltiplicatore è del tutto simile a quella vista in precedenza (figure 18 e 20).

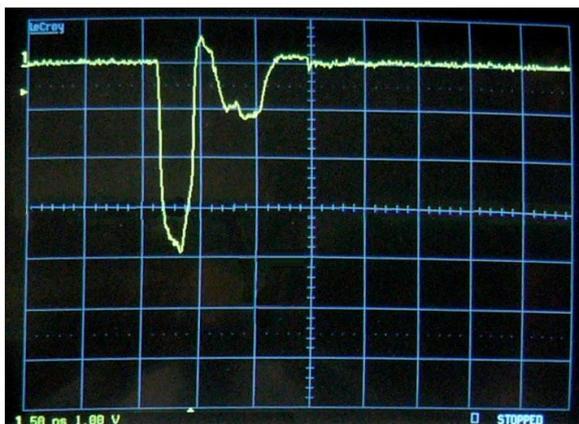


figura 17. Impulso elettrico che arriva al led; per disadattamento di impedenza, esso presenta due picchi, ma solamente il primo (ampiezza 4V e durata 30ns) supera la soglia d'attivazione del led.

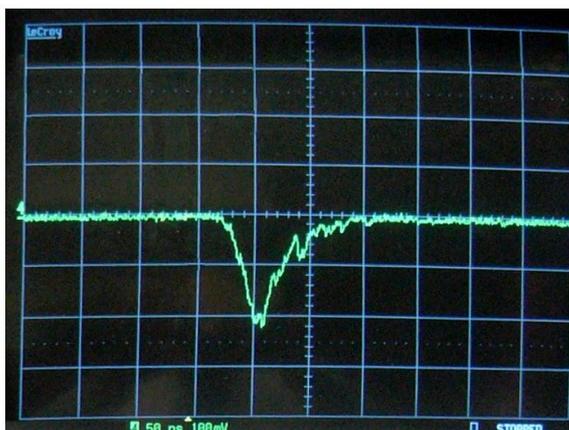


figura 18. Segnale in tensione (picco 200mV durata 50ns) all'uscita del fotomoltiplicatore stimolato dall'impulso luminoso del led.

Allo stesso modo il segnale proveniente dagli scintillatori sarà pressochè identico a questo poiché utilizzano lo stesso identico fotomoltiplicatore.

Le camere a strip invece, forniscono il dato in segnale digitale poiché hanno un circuito di readout integrato il quale è sincrono al clock di sistema di 40MHz. Le informazioni di posizione bidimensionali del punto in cui la particella attraversa le camere servono a ricostruire la traiettoria compiuta dalla particella stessa, e quindi a individuare il punto sulla sezione trasversale in cui imbocca il tubo.

I segnali di fotomoltiplicatori e scintillatori vengono raccolti da un dispositivo di *front-end* che si occupa di digitalizzarli; innanzitutto vi è un'amplificazione poiché, avendo percorso circa 20m di cavo dalla stanza del beam test alla stanza dove avviene la presa dati, la loro intensità è diminuita; poi vengono formati a impulsi rettangolari e resi sincroni al clock di

sistema (figure 19 e 20).

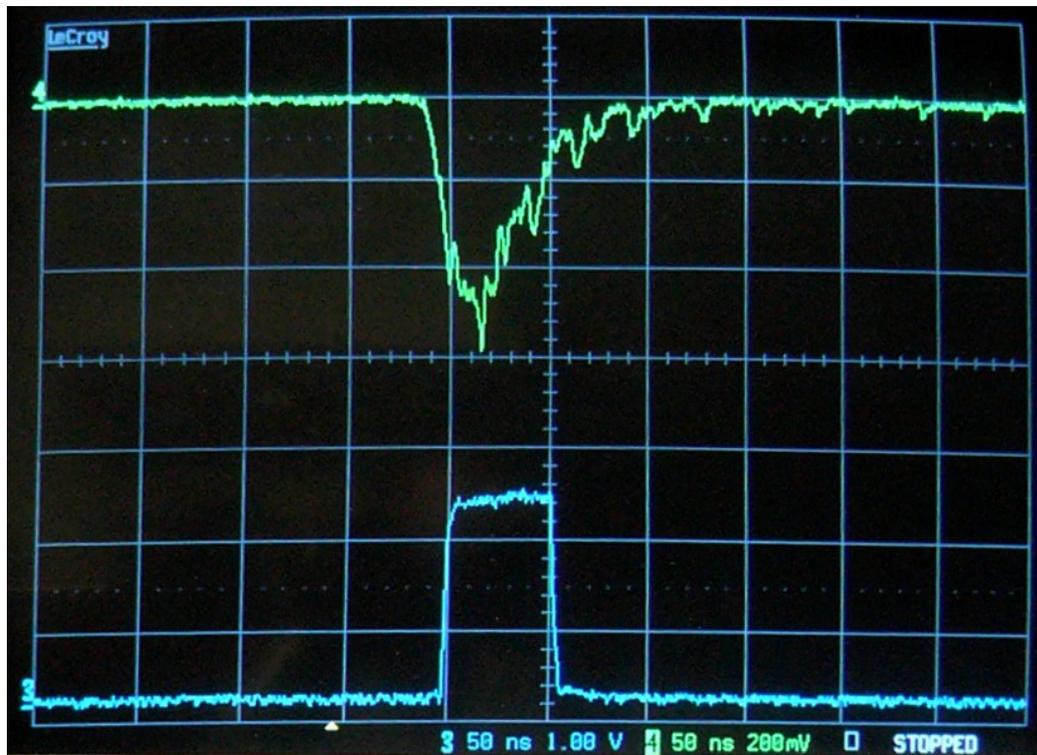


figura 19. Sopra la versione amplificata (ampiezza 500mV) del segnale di uscita dal fotomoltiplicatore; sotto la versione digitalizzata del segnale analogico soprastante.

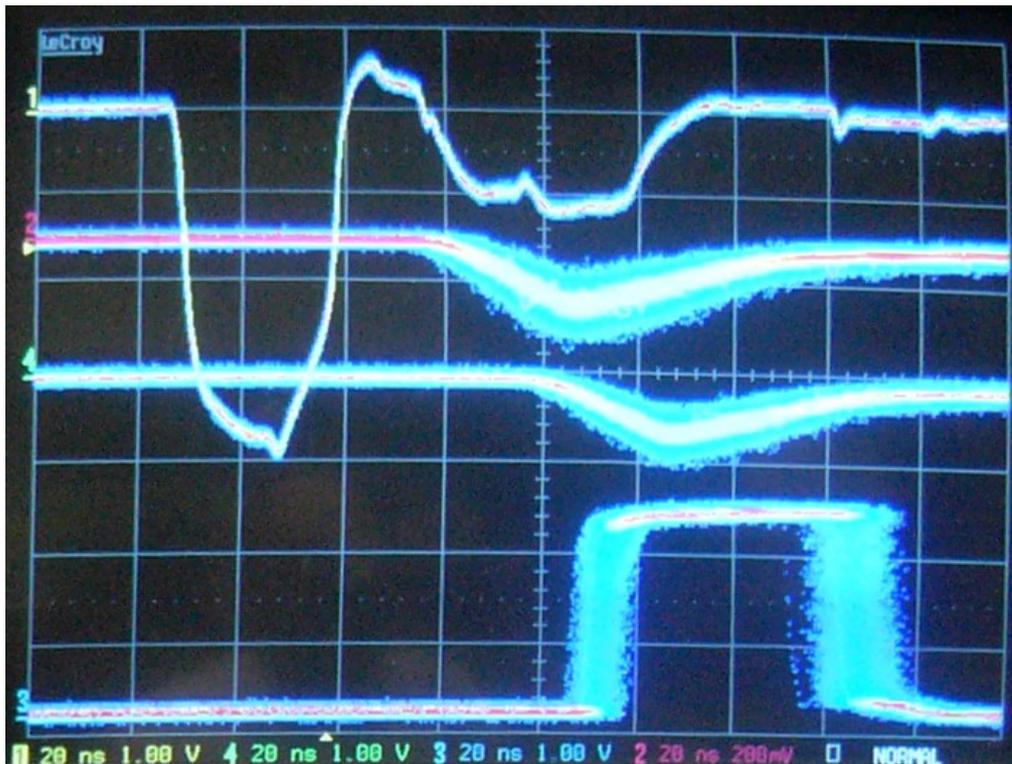


figura 20. Dall'impulso in ingresso ricevuto dal led alla formazione del '1' logico servito in ingresso alla scheda di trigger: la digitalizzazione introdotta dalla front-end board.

2.3 Funzionamento dei fotomoltiplicatori

Il fotomoltiplicatore è un dispositivo fotosensibile costituito alla sommità da una finestra di ingresso in quarzo leggermente convesso, attraverso la quale i fotoni vengono trasmessi all'interno. Il materiale di cui una finestra è costituita implica una certa trasparenza a seconda della lunghezza d'onda della luce incidente; da materiale a materiale cambia la lunghezza d'onda minima che riesce a trasmettere. Il quarzo, permettendo la trasmissione fino a lunghezze d'onda ultraviolette (200 nm) è adatto al tipo di luce che si genera nei tubi ad effetto Cherenkov, dominato dalle piccole lunghezze d'onda.

All'interno della finestra di ingresso vi è il fotocatodo, costituito da una deposizione metallica (bialcale) con un preciso coefficiente di estrazione e tipicamente tenuto a tensione nominale 0. Quando un singolo fotone colpisce un elettrone del fotocatodo, per effetto fotoelettrico, è possibile che tale elettrone si allontani dal fotocatodo ed entri nella regione interna del fotomoltiplicatore dove c'è un vuoto spinto ed un campo elettrico intenso. Tali elettroni vengono denominati *fotoelettroni*. Affinché avvenga questo effetto è necessario che il fotone sia dotato di una minima energia (solitamente pochi eV) appunto definita energia minima di estrazione. Il rapporto tra la luce incidente e il numero di elettroni emessi si definisce sensibilità del fotocatodo e varia a seconda della lunghezza d'onda della luce incidente.

Successivamente gli elettroni generati dal fotocatodo vengono accelerati da un campo elettrico verso un primo dinodo, tenuto a potenziale positivo (10-200 V). Tipicamente gli elettroni arrivano al dinodo con una energia cinetica sufficiente per estrarre ulteriori elettroni, in numero variabile a seconda della differenza di potenziale applicata tra dinodi; questo processo si ripete infatti numerose volte, poiché vi sono una decina di dinodi posti consecutivamente in modo da creare un effetto di amplificazione a valanga, efficace pure per segnali luminosi molto bassi. Più la luce è intensa, più fotoelettroni vengono prodotti, ma se la luce è debole, pochi sono i fotoelettroni prodotti e si rischia di non rilevare l'evento; è importante che un fotomoltiplicatore sia in grado di generare una minima quantità di elettroni sebbene il segnale luminoso sia debole, e questo implica che il rilascio degli elettroni da parte dei dinodi avvenga in maniera mirata.

Il rapporto tra la quantità di fotoelettroni prodotti dal fotocatodo e la carica misurata dopo le successive moltiplicazioni è definito guadagno; tanto più è alto il guadagno tanto è migliore il fotomoltiplicatore poiché è possibile discernere tra un segnale dovuto a particella che attraversa il tubo da un segnale dovuto a successive emissioni secondarie.

Infine l'ultimo dinodo è un anodo, posto a potenziale dell'ordine di 800-2500 V, da cui si preleva la corrente.

I fotomoltiplicatori del LUCID sono R762 Hamamatsu (fare riferimento alla figura 11) i quali hanno una buona trasmittanza tra i 160nm e i 650nm, con picco di sensibilità sui 420nm. Hanno 10 dinodi al loro interno e il tempo di risposta è di 2.5ns (ottimo valore per lavorare alla frequenze di collisioni di 40MHz); si può applicare al fotocatodo una tensione molto alta, fino a 1250V e con un valore di 1000V ha un guadagno di $9.5 \cdot 10^5$.

Come accennato in precedenza, ognuno di questi esemplari è stato testato e caratterizzato prima di sottoporlo all'attività di beam test, per poter avere la chiave di lettura con cui interpretare i dati.

Questa operazione si svolge con l'utilizzo di un led alimentato da un dispositivo che genera un impulso noto; il suo segnale luminoso è portato a breve distanza dalla finestra di ingresso del fotomoltiplicatore per mezzo di una fibra ottica il quale risponde con una certa corrente di uscita. La tensione applicata al fotocatodo viene fatta variare lentamente e si tiene traccia delle variazioni della risposta in corrente del fotomoltiplicatore. I valori riscontrati, posti in un grafico corrente/tensione, costituiscono la curva caratteristica.

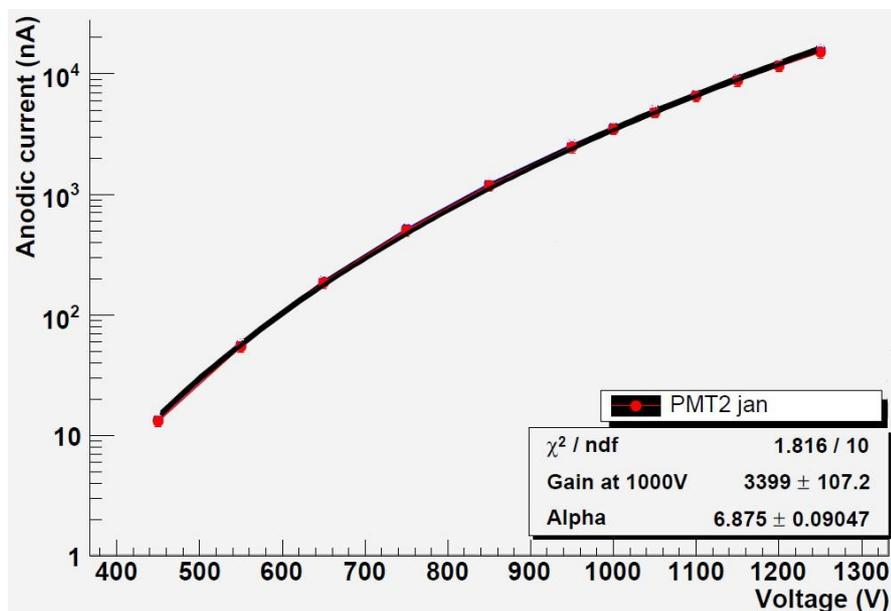


figura 20. Curva caratteristica di un fotomoltiplicatore: corrente in risposta all'impulso led al variare della tensione di fotocatodo.

Questo procedimento è stato ripetuto per ogni fotomoltiplicatore in modo da avere le caratterizzazioni di ognuno, che, ovviamente, non sono completamente identiche, ma differiscono per valori minimi (a meno di difetti di costruzione). Inoltre tale procedimento è stato effettuato al buio completo poiché i fotocatodi mantenuti a tensioni molto elevate devono funzionare con intensità di luce bassa; se fossero esposti ad una luce troppo elevata si guasterebbero. Per questo motivo l'operazione viene eseguita all'interno di una black box appositamente realizzata (figura 21).

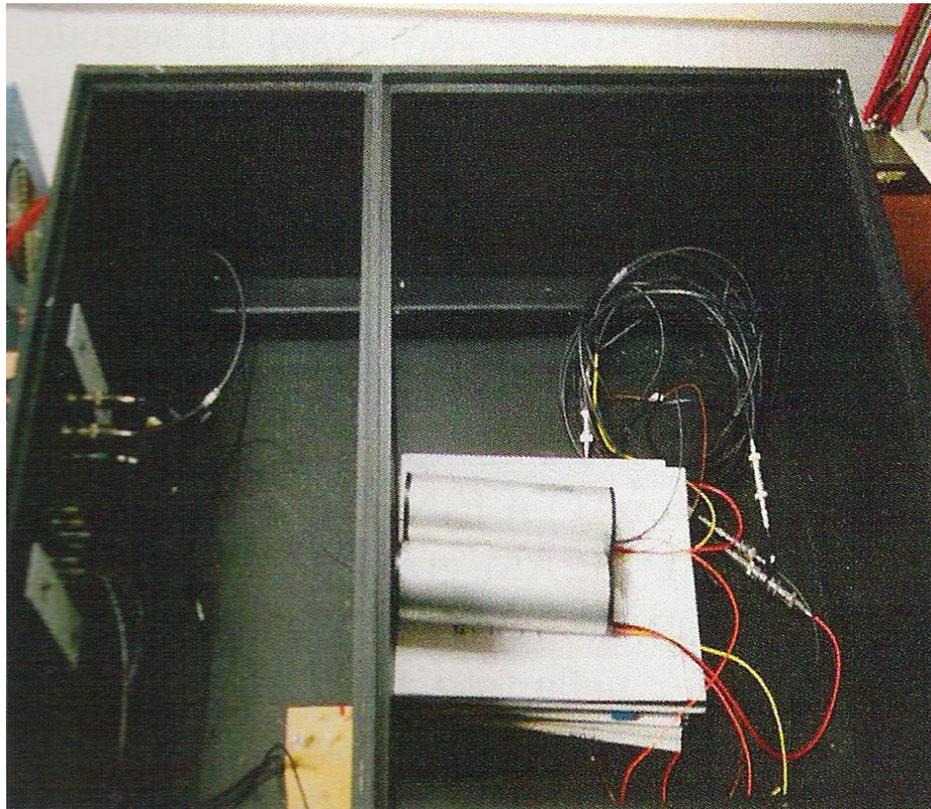


figura 21. Camera oscura per la caratterizzazione dei fotomoltiplicatori; i fotomoltiplicatori sono all'interno dei tubi di alluminio nei quali entra una fibra ottica che porta l'impulso luminoso.

Capitolo 3.

Il sistema di trigger per il Beam Test

Un sistema di trigger ha il compito di riconoscere, secondo regole preimpostate, un determinato tipo di eventi tra i tanti che gli si presentano in ingresso.

In questo capitolo si spiega innanzitutto come opera il sistema di trigger, appositamente concepito per il *beam test* del LUCID, da un punto di vista generale; successivamente si scende nei particolari di funzionamento, componente per componente; infine si verifica l'effettivo funzionamento della scheda.

3.1 Scopo e funzionamento del sistema di trigger

Come già detto in precedenza, le particelle che saranno utilizzate nel beam test sono pioni a 180 GeV di energia; essi viaggiano in linea retta incontrando diversi dispositivi (si faccia riferimento alle figure 12 e 13); nell'ordine: due scintillatori, due camere a strip, la prima parete del vessel, il gas contenuto nei tubi e nel vessel, il fotomoltiplicatore al termine del tubo, due camere a strip e due scintillatori.

Il pione a 180 GeV ha una probabilità di interazione con la materia molto bassa ma non nulla e perciò è soggetto al fenomeno di scattering multiplo (diffusione) per cui viene deviato e perde energia. Quando ciò accade, non si è sicuri che la particella abbia percorso il tubo lungo il suo asse, quindi sono presenti le camere a strip per poter avere le 4 posizioni spaziali bidimensionali in cui la particella lo attraversa (due prima e due dopo il vessel); i loro dati vengono confrontati e, se risultano ordinati lungo una precisa retta, allora si è sicuri della traiettoria della particella.

Questo procedimento però ha tempi di risposta più lunghi (1 μ s) se confrontati con i tempi caratteristici di un fotomoltiplicatore (decine di nanosecondi) ed in definitiva questo sistema non può essere usato per la selezione dei dati da acquisire, né per la lettura dei dati provenienti dal fotomoltiplicatore nel vessel.

Si risolve il problema con l'utilizzo degli scintillatori che non fanno altro che inviare un impulso nel caso vengano attraversati dalla particella; il ritardo in questo caso è contenuto nella decina di nanosecondi.

La scheda di trigger ha in ingresso la versione digitale delle uscite degli scintillatori che controlla costantemente; in base a due parametri impostabili in fase di set-up, che sono il numero minimo di eventi sugli scintillatori e il numero massimo di periodi in cui essi devono verificarsi, il dispositivo di trigger genera o meno un segnale che avvia l'acquisizione dei dati provenienti dai fotomoltiplicatori nel vessel e dalle camere a strip.

In questo modo la presa dati non viene fatta ad ogni singolo evento (il che comporterebbe la lettura di molti dati che sarebbero poi da scartare), ma solamente nei casi in cui si verifica la coincidenza di segnali davanti e dietro al singolo tubo da provare. I dati vengono letti da un sistema di acquisizione (d'ora in poi *DAQ*) che confronterà l'effettivo allineamento delle posizioni fornite dalle camere a strip e discernerà tra particelle con traiettorie lineari all'interno del tubo e non.

Il dispositivo di trigger ha anche altre funzioni tra cui quella di generare periodicamente un segnale *PULSE* che verrà tradotto in impulso luminoso dal sistema composto da impulsatore e diodo led visto al capitolo precedente (si faccia riferimento alla figura 16).

In sostanza i compiti della scheda di trigger possono essere così sintetizzati:

- campionare i segnali degli scintillatori in ingresso e preparare un segnale di trigger

sulla coincidenza (gestione dei PMT)

- fornire segnali di trigger opportunamente formati, ritardati e NON sovrapposti
- generare il trigger solo quando tutti i rivelatori coinvolti nell'acquisizione sono pronti per riceverlo (gestione dei BUSY)
- generare in maniera random un segnale di trigger a scopi di test
- generare il segnale di LED
- contare gli eventi interessanti e fornire informazioni ausiliarie.

Interamente, il sistema di acquisizione dei dati di Beam Test è composto da più schede: una QDC (QDigitalCounter) che integra la carica accumulata sul fotomoltiplicatore del tubo in fase di test; una FADC (FlashAccumulatorDigitalCounter) che acquisisce la forma d'onda del segnale in tensione in uscita dal fotomoltiplicatore del tubo in fase di test campionandolo ogni 4ns; una TDC (Time to Digital Converter) che misura l'ampiezza temporale.

Tutte queste schede ricevono un proprio segnale di trigger il quale deve essere appositamente formato a seconda del bisogno; anche le camere a strip ne hanno uno comune. Segue uno schema esemplificativo (figura 22) delle schede, degli strumenti e delle connessioni che assieme formano il sistema di presa dati.

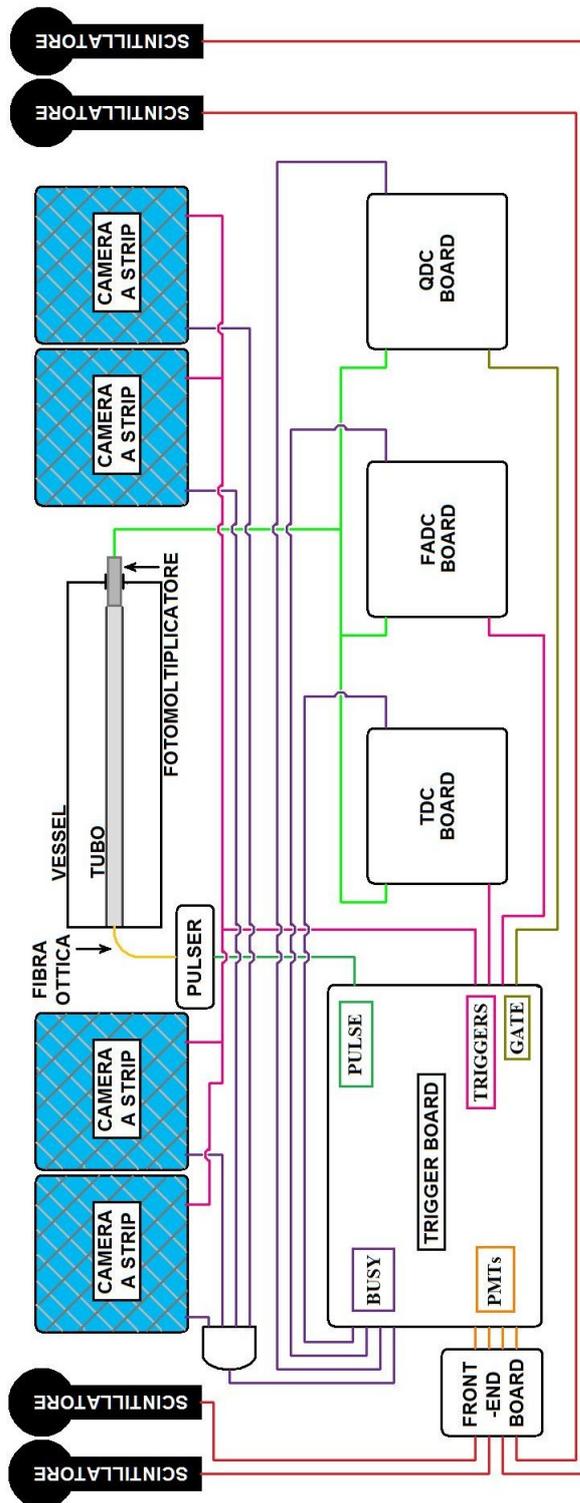


figura 22. Schema dell'intero complesso del sistema di presa dati.

3.2 Realizzazione di triggerdevice e fit su ALTERA Cyclone EP1C20F400C6

Il dispositivo triggerdevice è composto principalmente da 5 entity (figura 23):

- *fsm* (macchina a stati finiti) il cui compito è di gestire il reset e l'enable per gli altri componenti;
- *trg* (generatore di trigger) si occupa di generare un impulso di *MAINTRIGGER* se si verificano determinate richieste sui segnali di ingresso;
- *bge* (busy generator) genera il segnale *clrDYEN* che permette o meno la generazione di *MAINTRIGGER*;
- *del* (delayer) a partire dal segnale *MAINTRIGGER* fornisce in uscita 4 copie modificate secondo parametri preimpostati;
- *pul* (pulser) genera il segnale *PULSE* (segnale che va in ingresso all'impulsatore-led) secondo parametri preimpostati;

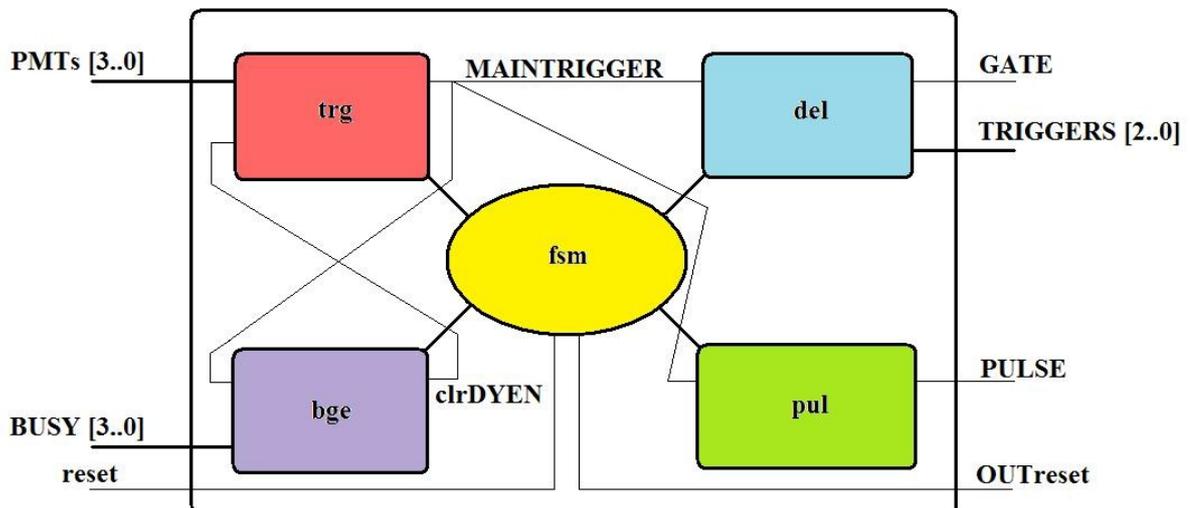


figura 23. Schema dei componenti di triggerdevice e segnali principali.

completano il dispositivo una batteria di contatori da 32 bit che hanno il compito di contare

il numero di transizioni a '1' di diversi segnali e una fifo da 2048 elementi che memorizza alcuni dati di funzionamento ad ogni evento a '1' di *MAINTRIGGER*.

I segnali di ingresso/uscita riportati in figura 22 arrivano direttamente dalle/alle porte TTL della scheda; gli altri input sono invece scritti su registri di configurazione mediante ciclo di scrittura su bus VME; allo stesso modo gli altri output saranno letti mediante cicli di lettura su bus VME.

Macchina a stati finiti

Gli stati sono cinque: IDLE, CLEARING, WAITING, RUNNING, STOPPING.

Un impulso del segnale di reset porta la macchina in stato IDLE, dal quale passa a quello di CLEARING per un opportuno valore del registro *RWFSM*; durante questa transizione (figura 24) la fsm genera in uscita un impulso di 100ns su *DQRESET* (reset interno, servito a tutti gli altri dispositivi del triggerdevice) dopodichè avviene il set-up di tutti i parametri nei registri di configurazione via VME; un altro valore di *RWFSM* provoca il passaggio allo stato WAITING in cui si rimane per un numero di periodi di clock definito nel registro di configurazione *WAltimeRUN* (figura 25); si passa successivamente in fase RUNNING in cui è attivo alto il segnale *DQRUNNING* ovvero l'enable per tutti i registri e contatori dell'intero triggerdevice; in questa fase avviene il passaggio dei pioni attraverso il dispositivo di beam test; una volta terminato l'arrivo dei pioni, un altro valore di *RWFSM* porta la fsm nello stato STOPPING e il segnale *DQRUNNING* ritorna basso congelando così tutte le informazioni di registri e contatori; anche STOPPING è uno stato temporizzato e il valore contenuto nel registro *STOtimeCLE* indica il numero di periodi di clock da attendere; si torna quindi in fase di CLEARING in cui si svuota la fifo e si leggono tutte le informazioni rimaste congelate nei registri e contatori. Infine occorre transitare allo stato IDLE con un altro valore di *RWFSM* e ripetere il procedimento dal principio per effettuare un altro run.

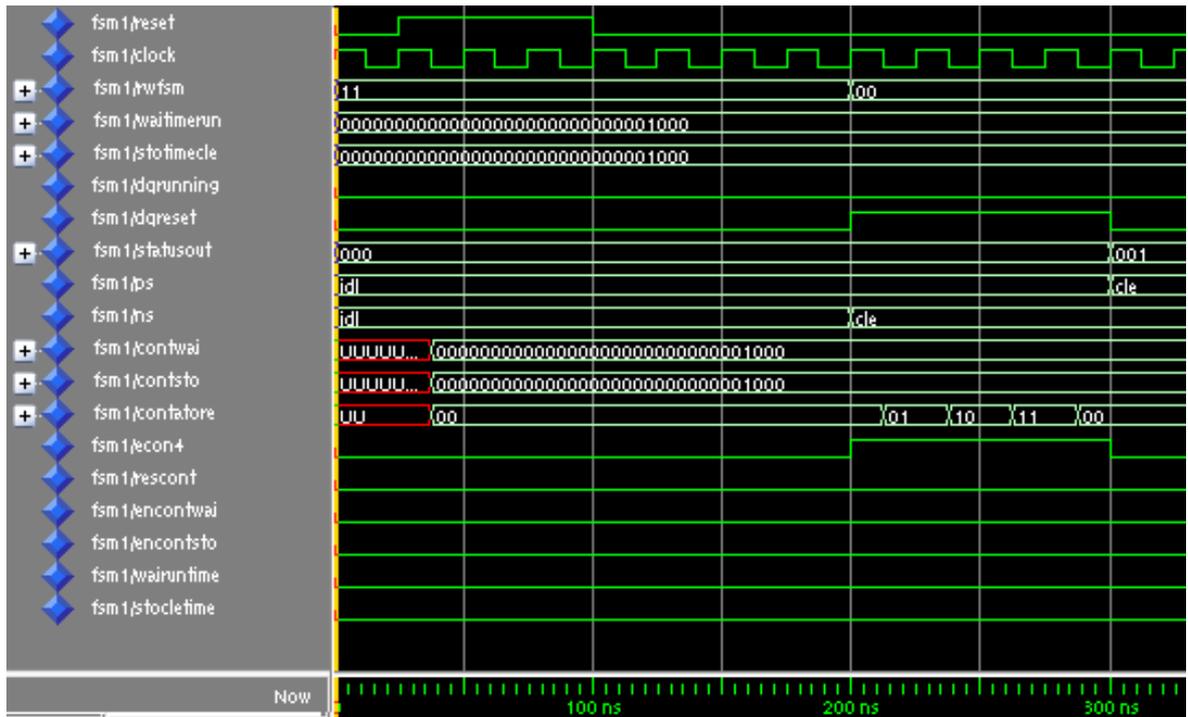


figura 24. Transizione di stato IDLE-CLEARING; DQRESET rimane alto per 100ns.

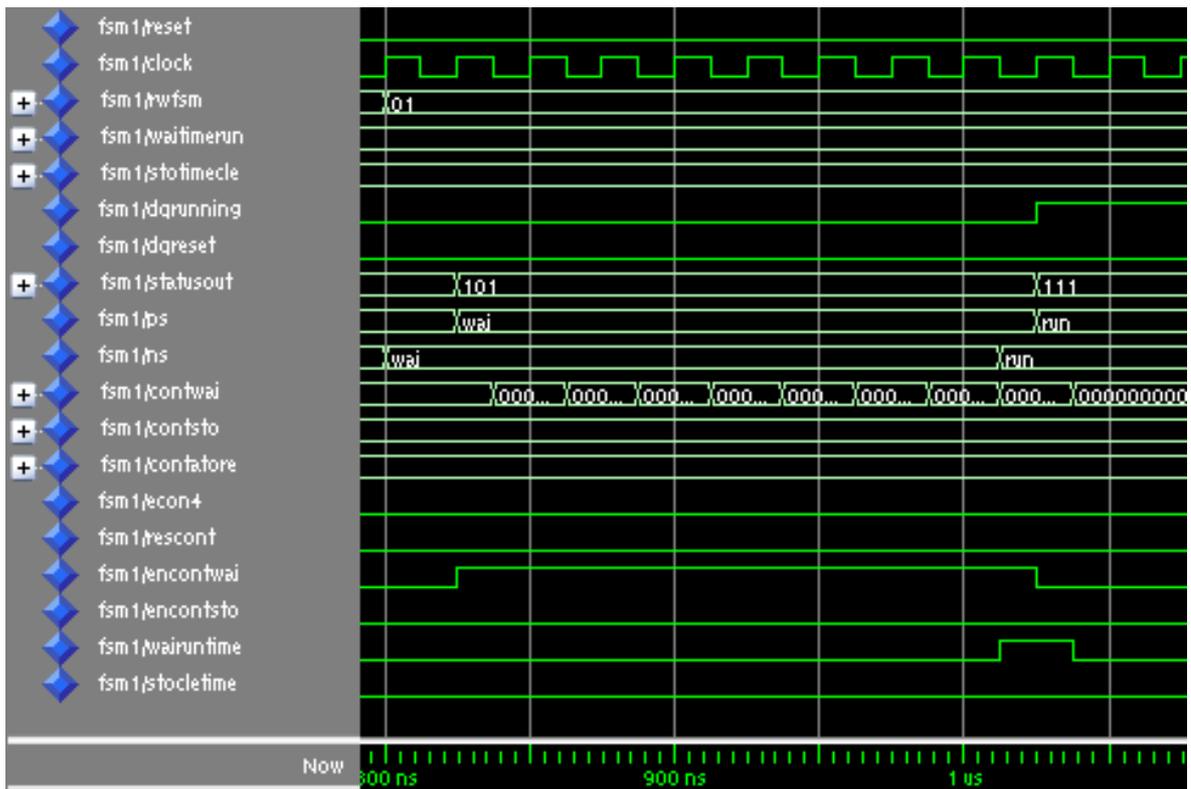


figura 25. Transizioni di stato comandata da registro di configurazione e transizione di stato temporizzata

Trigger generator

Questo componente riceve in ingresso i segnali dei fotomoltiplicatori (*PMTs*) i quali, per prima cosa, vengono interpretati secondo logica positiva o negativa a seconda dei valori presenti nel registro di configurazione *PLOGI*, poi vengono selezionati secondo quanto indicato nel registro *PMASK* (che mi indica quali scartare). Dopo questa elaborazione, i segnali vengono costantemente controllati alla ricerca di un evento definito secondo i parametri dei registri di configurazione *cEVEN* e *cTIME*.

cEVEN indica il numero minimo (da 1 a 4) di fotomoltiplicatori “scattati” per poter generare il segnale di trigger, mentre *cTIME* indica il numero massimo (da 1 a 4) di periodi di clock entro i quali essi devono verificarsi (figura 27).

Se entrambe le condizioni sono soddisfatte allora viene generato un '1' sul segnale *PMTtrg*. Contemporaneamente al controllo del segnale *PMTs* il trigger generator conta i periodi di clock; quando ne sono trascorsi una quantità pari al registro di configurazione *RAND*, allora genera un '1' sul segnale *PMTran*; in altre parole genera un impulso lungo un periodo di clock in maniera periodica con periodo impostabile. I segnali *PMTtrg* e *PMTran* sono forzati a zero (figura 26) dal segnale *clrDYEN* posto a '1' (una sorta di clear per i registri che li generano) proveniente dal busy generator. Per poter contare gli eventi a '1' dei segnali *PMTtrg* e *PMTran* anche se forzati a zero esistono le loro versioni insensibili a tale clear denominate *TRIGGERPMT* e *RANDOMPMT*.

Il segnale *MAINTRIGGER* non è altro che l'OR dei segnali *PMTtrg* e *PMTran*.

Si ha quindi un evento a '1' sul segnale di *MAINTRIGGER* nel caso che una particella passi attraverso i fotomoltiplicatori con una certa modalità impostabile tramite registri, oppure, indipendentemente da questo, periodicamente con periodo indicato dal registro *RAND*.

Latenza di trigger generator 1 periodo di clock.

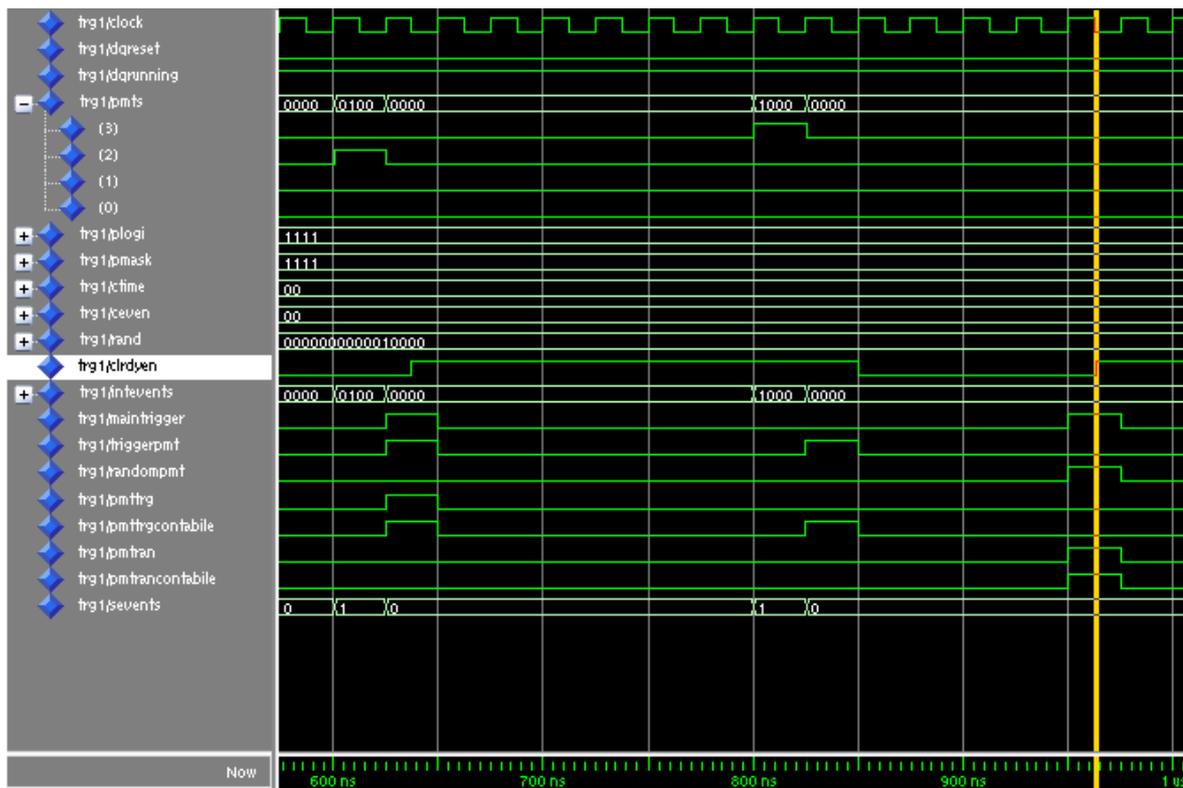


figura 26. MAINTRIGGER può essere generato solamente in assenza di clrDYEN.

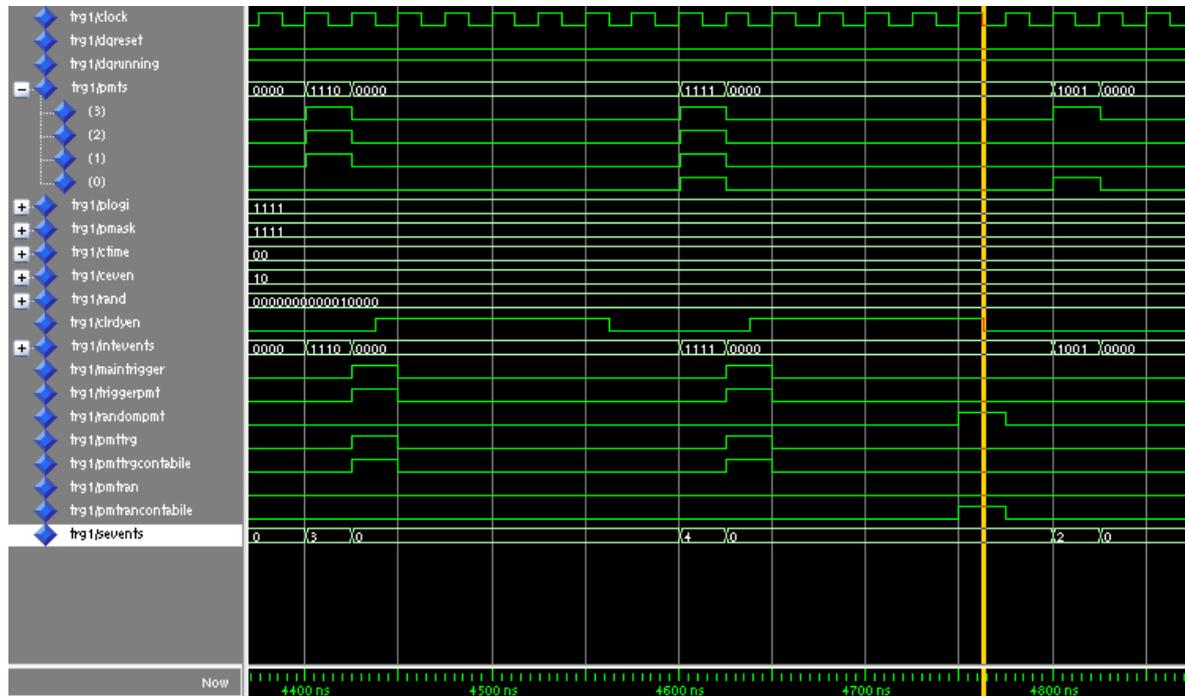


figura 27. Evento richiesto 3 impulsi in un unico periodo di clock.

Busy generator

Gli ingressi *BUSY* provengono dal sistema *DAQ* e segnalano la disponibilità o meno al campionamento dei dati. Anche essi possono essere sia in logica positiva, sia negativa, perciò vengono inizialmente processati assieme ai registri di configurazione *BLOGI* che mi dice se interpretarli in logica positiva o negativa, e *BMASK* che mi dice quali tenere conto e quali escludere. Fatto ciò, se tutti e quattro i segnali processati sono falsi, allora *clrDYEN* rimane a '0', altrimenti viene posto a '1'. Con *clrDYEN* a '0' il triggergenerator è libero di generare eventi a '1' sul segnale di *MAINTRIGGER*, nel caso contrario *MAINTRIGGER* è forzato a '0' (figura 29).

In altre parole non è possibile effettuare il campionamento dei dati se lo stato del sistema *DAQ* non soddisfa le caratteristiche di prontezza precaricate nel registro *PMASK*.

I segnali di *BUSY* non sono i soli ad attivare il *clrDYEN*; il *MAINTRIGGER* stesso in ingresso al busy generator appena scatta a '1' pone il *clrDYEN* a '1' (figura 28). Questo serve appositamente per garantire che il segnale *MAINTRIGGER* non stia mai a '1' per più di un periodo di clock, difatti per poter servire in ingresso al trigger generator il segnale *clrDYEN* in tempo utile, esso viene generato sui fronti di discesa del clock a differenza di tutti gli altri segnali, in modo che già al fronte positivo immediatamente successivo abbia effetto sul *MAINTRIGGER*.

Il segnale *MAINTRIGGER* in ingresso al busy generator viene allungato un certo numero di periodi di clock secondo quanto è indicato nel registro di configurazione *TDELAY* questo per far sì che *clrDYEN* rimanga alto per più periodi di clock a seconda delle necessità. Anche il segnale di *MTBOR* (l'OR tra i quattro segnali di *BUSY* e del *MAINTRIGGER* allungato) viene a sua volta opportunamente allungato secondo il valore del registro di configurazione *BDELAY*.

Semplicemente il busy generator impedisce il campionamento dei dati per una durata impostabile tramite registri se il sistema di acquisizione non è pronto come si richiede oppure se è appena avvenuto un campionamento.

Latenza di busy generator mezzo periodo di clock.

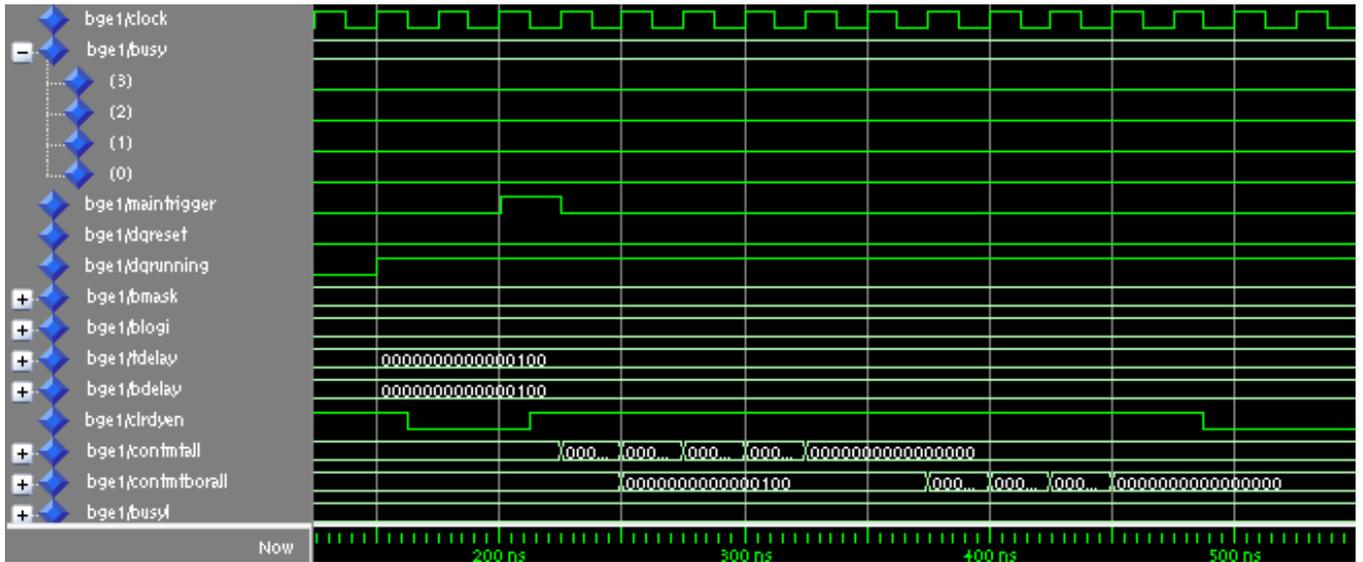


figura 28. Il segnale di MAINTRIGGER genera il clrDYEN dopo solo mezzo periodo di clock; il clrDYEN è allungato di due quantità definite nei registri di configurazione BDELAY e TDELAY.

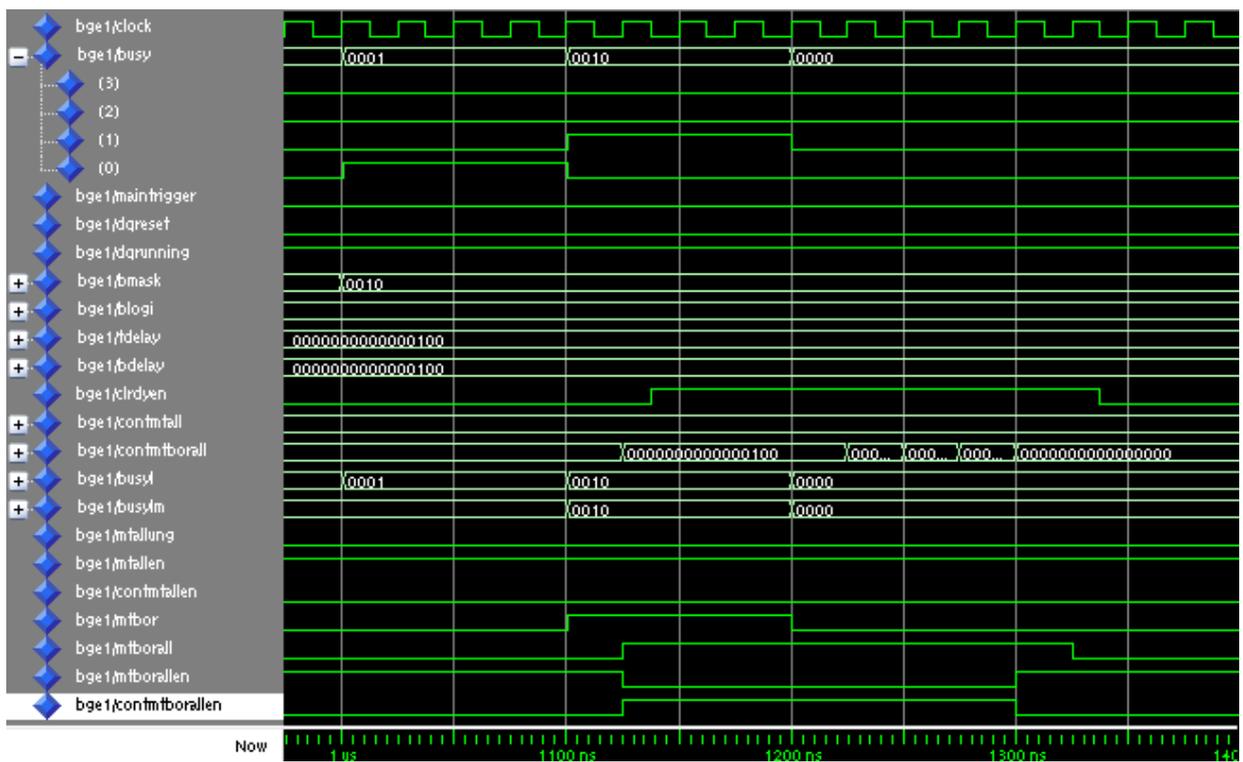


figura 29. Generazione di clrDYEN da parte dei BUSY (il primo ignorato poichè mascherato); in questo caso il clrDYEN è allungato solamente del tempo indicato da BDELAY.

Delayer

Il segnale *MAINTRIGGER* in ingresso al Delayer è il principio della formazione del vero e proprio segnale di presa dei dati: esso viene difatti riprodotto in quattro formati diversi denominati *GATE* (1bit) *TRIGGERS*(3bit) (nella figura 30 il segnale che corrisponde a *GATE* è *dealTRIGGER*). Ognuno di questi quattro segnali è una versione opportunamente ritardata e allungata, di quantità definite nei rispettivi registri di configurazione *ALLUNg*, *RITARg*, *ALLUN0*, *RITAR0*, *ALLUN1*, *RITAR1*, *ALLUN2*, *RITAR2* (nella figura 30 i segnali che corrispondono a *RITARg* e *ALLUNg* sono *TDELAY* e *TALLUN*).

Latenza di delayer 1 periodo di clock.

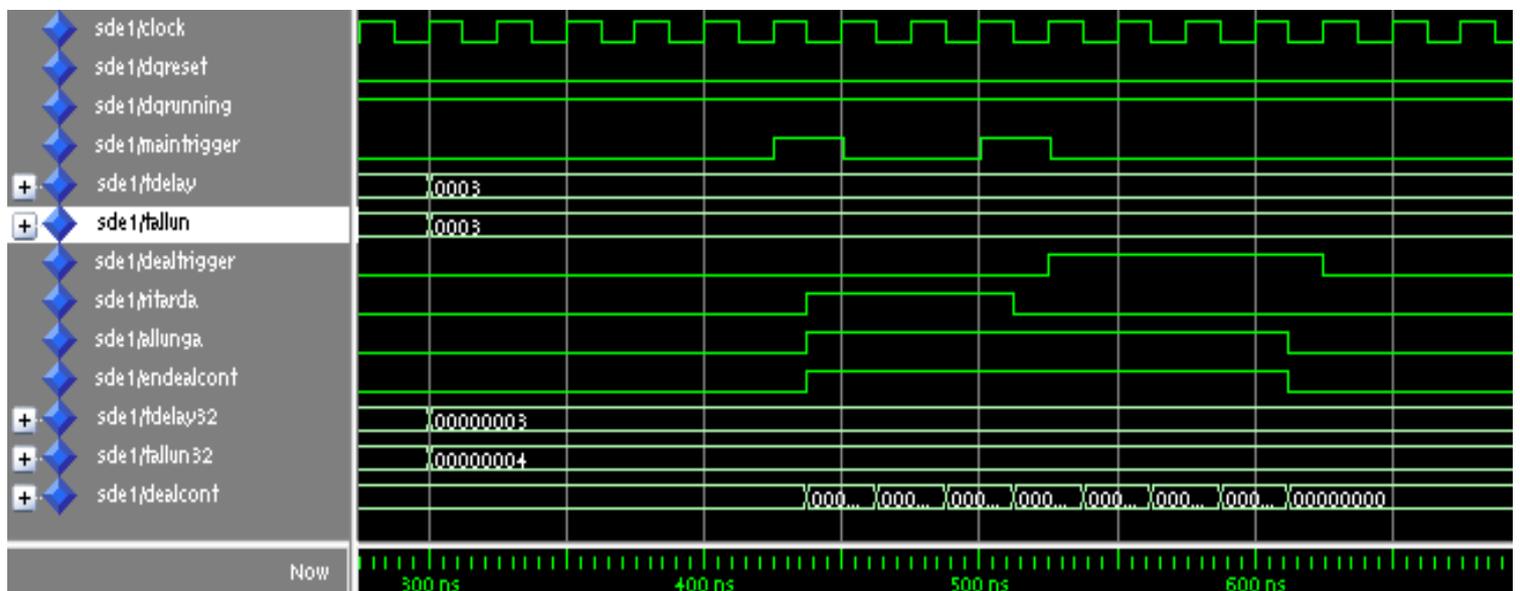


figura 30. Il primo *MAINTRIGGER* genera il segnale *dealTRIGGER* (versione allungata e ritardata secondo quanto è indicato dai registri *TDELAY* e *TALLUN*); il secondo *MAINTRIGGER* è giustamente ignorato per garantire che due eventi non si sovrappongano. Queste forme d'onda si riferiscono ad un dispositivo che genera un solo segnale di *TRIGGER*; il delayer è l'unione di quattro dispositivi siffatti.

Pulser

Pulser è un dispositivo che genera un segnale *TIMEpuls* a '1' per un numero di periodi di clock indicato dal registro di configurazione *TIMEdura* e ripetuto periodicamente secondo quanto indicato in un altro registro *TIMEperi*; viene definito come segnale di impulso temporizzato.

Pulser genera anche un altro segnale *PRESpuls* a '1' per un numero di periodi di clock indicato dal registro *PREScdura*; viene generato dopo che si sono verificati un certo numero di eventi (indicato dal registro *PREScmain*) sul segnale *MAINTRIGGER* e, nel caso sia attivo il *clrDYEN*, ritardato al momento in cui *clrDYEN* ritorna a '0'. Si definisce *PRESpuls* segnale di impulso prescalato.

Il segnale *PULSE*, in uscita dal Pulser è la versione temporizzata o prescalata a seconda dell'indicazione fornita dal registro di configurazione *TIMEPRES* da 1bit: se è a '1' viene selezionata la versione temporizzata (figura 31), altrimenti quella prescalata.

Pulser è in grado di produrre altri due segnali in uscita *SPARE1* e *SPARE2*, che per ora non sono impostati; verranno impostati direttamente al beam test se e solo se i segnali *PRESpuls* e *TIMEpuls* risultassero inadatti. Latenza di Pulser 1 periodo di clock.

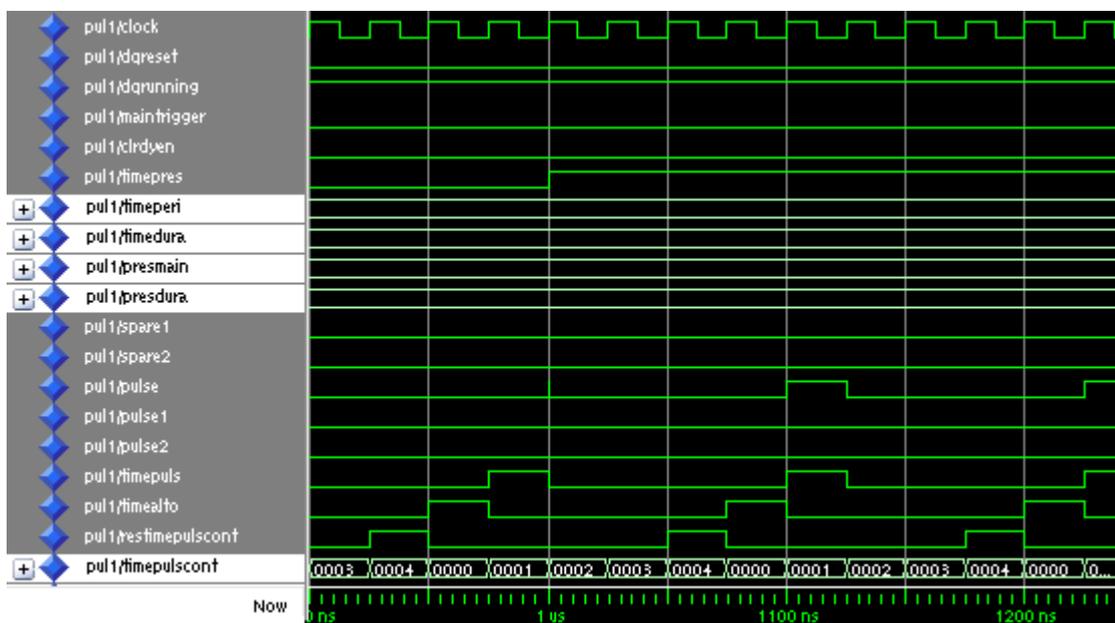


figura 31. Il segnale *PULSE* è impostato in modalità temporizzata quando $TIMEPRES='1'$;

Segue un esempio di funzionamento del dispositivo di trigger nel caso di evento riscontrato (figura 32).

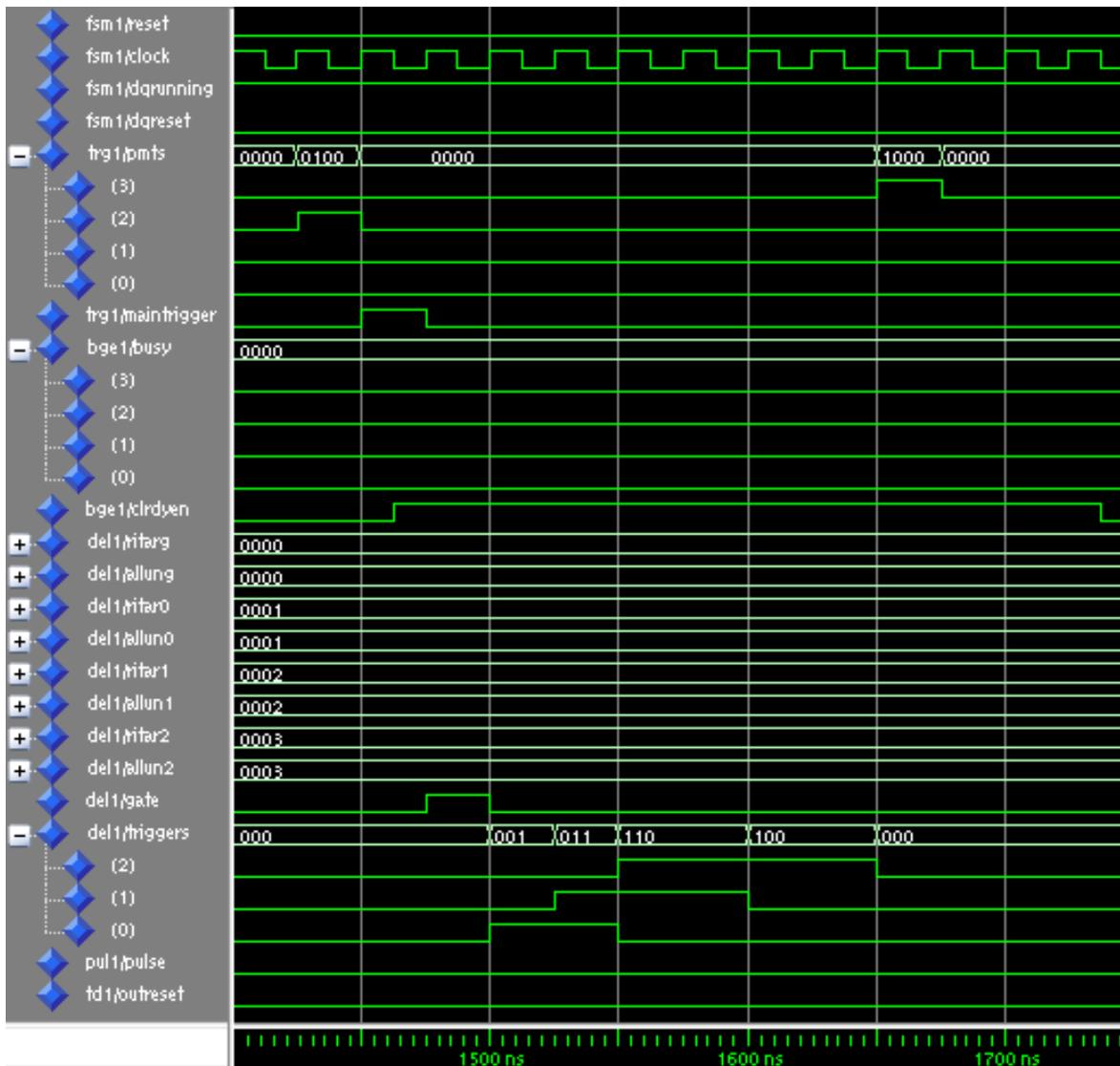


figura 32. Esempio di rilevamento di un evento sui segnali PMTs e conseguente generazione di MAINTRIGGER; immediata generazione di clrDYEN che impone MAINTRIGGER a '0' già al periodo di clock successivo. In conseguenza del MAINTRIGGER, in uscita sono generati i segnali di GATE e TRIGGERS di forma e durata impostata attraverso i registri di configurazione. Infine il secondo evento sui PMTs non genera MAINTRIGGER sebbene soddisfi le richieste poichè clrDYEN è ancora alto.

Counters

Il dispositivo di trigger è dotato di numerosi accumulatori che tengono il conto degli eventi sui vari segnali: alla fine di un run serve sapere quante volte è si è verificato un dato evento, per esempio quanti impulsi il Pulser abbia prodotto.

Per fare ciò sono stati creati contatori a 32bit di tipo bare e di tipo gated.

I gated contano gli eventi solamente in assenza di *clrDYEN*, i bare invece in ogni caso.

Entrambi i tipi sono attivi solamente nella fase RUNNING e vengono congelati non appena si passa alla fase STOPPING; viene letto ognuno con due cicli di lettura su bus VME poiché il registro *DOUT* attraverso il quale il dato è fatto passare sul bus è da 16bit.

Vi è un contatore bare per il clock, *RANDOMPMT*, *MAINTRIGGER*, *clrDYEN*, *PULSE* e per ogni bit di *PMTs* e *BUSY*. Quello del clock ci fornisce informazioni sulla durata del RUN e ritorna utile per i dati che si devono salvare nella fifo.

Per ognuno dei contatori bare, vi è la versione gated che tiene conto solamente degli eventi in assenza di *clrDYEN*, a meno di quello per *clrDYEN* che ovviamente rimarrebbe a zero.

Il contatore gated del clock ci dice per quanto tempo il sistema è stato libero di effettuare la presa dati. La differenza tra il contatore bare e il rispettivo gated (di qualunque segnale) ci dice quanti di essi sono stati ignorati per via del *clrDYEN*.

Vengono tutti resettati dal segnale *DQRESET* a '1' il che avviene per 100ns quando la macchina a stati transita dallo stato IDLE allo stato CLEARING.

Fifo

Il dato in ingresso alla fifo è di 136 bit; a partire dall'indice più alto è così composto:

- numero progressivo di *MAINTRIGGER* (valore del contatore gated di *MAINTRIGGER*), 32bit;
- configurazione del segnale di ingresso *PMTs* che lo ha generato, 4bit;
- configurazione del segnale di ingresso *BUSY* che gli ha permesso di essere generato, 4bit;
- valore temporale assoluto (valore del contatore bare del clock), 32bit;

- tempo trascorso dall'ultimo evento di *MAINTRIGGER*, 32 bit;
- tempo trascorso dall'ultima abilitazione per *MAINTRIGGER* (l'ultima transizione di *clrDYEN* da '1' a '0'), 32 bit;

Per avere il penultimo dato occorre salvare il valore del tempo assoluto in due registri (uno in coda all'altro) su fronte di salita di *MAINTRIGGER* e farne la differenza.

Per avere l'ultimo dato occorre catturare il fronte di discesa del *clrDYEN* ed utilizzarlo per campionare il valore di tempo assoluto e farne la differenza con il valore del tempo assoluto bloccato dall'ultimo *MAINTRIGGER*.

La fifo ha una profondità di 2048 dati, e viene usata solamente in scrittura durante il run; una volta terminato si procede alla lettura e quindi allo svuotamento.

Una volta verificato il corretto funzionamento mediante molteplici simulazioni funzionali con il programma ModelSim, si è passati al fitting con l'ausilio del programma Quartus.

Il dispositivo su cui il firmware sarà sintetizzato è un FPGA ALTERA Cyclone EP1C20F400C6; esso è dotato di 20060 elementi logici, 301 pins disponibili per segnali Input/Output, 64 elementi di memoria RAM da 4K, 2 PLL ed è sostanzialmente composta da LUT a quattro ingressi. Segue il sommario di compilazione di Quartus (figura 33).

Flow Summary	
Flow Status	Successful - Mon Mar 16 16:19:57 2009
Quartus II Version	7.2 Build 151 09/26/2007 SJ Full Version
Revision Name	TRIGGER1495LUCID
Top-level Entity Name	TRIGGER1495LUCID
Family	Cyclone
Device	EP1C20F400C6
Timing Models	Final
Met timing requirements	Yes
Total logic elements	4,347 / 20,060 (22 %)
Total pins	275 / 301 (91 %)
Total virtual pins	0
Total memory bits	276,528 / 294,912 (94 %)
DSP block 9-bit elements	N/A until Partition Merge
Total PLLs	1 / 2 (50 %)
Total DLLs	N/A until Partition Merge

figura 33. Flow Summary report che conferma la riuscita collocazione della logica sul dispositivo; il dispositivo risulta essere molto sfruttato in quanto a pin e a memoria (fifo da 2048 elementi).

3.3 Sintesi su CAEN V1495 e verifica finale

Una volta che le simulazioni funzionali (ottenute con l'ausilio del programma ModelSim) avevano verificato il corretto funzionamento del dispositivo e la sintesi (effettuata con l'ausilio del programma Quartus) ha confermato la possibilità di operare con clock a 40MHz, il firmware è stato caricato sulla scheda CAEN V1495 (figura 34).

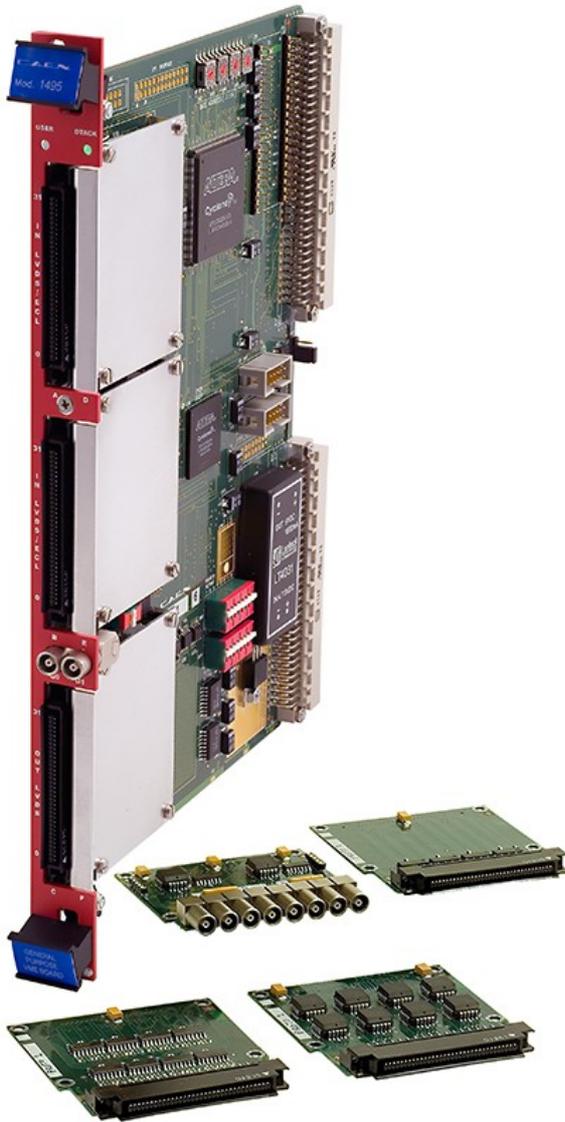


figura 34. Scheda CAEN V1495

La scheda CAEN V1495 è realizzata dall'azienda CAEN di Viareggio, ed è stata concepita proprio per essere utilizzata in esperimenti di fisica nucleare come sistema di trigger.

Essa (figura 34) presenta nella parte frontale 6 ingressi: 3 sono di tipo LVDS fisse (2 in ingresso per un totale di 64bit e una in uscita per un totale di 32bit), le altre 3 (impostabili come ingresso o come uscita) possono essere di diverso formato (LVDS, NIM, TTL, ECL) in quanto sono costituite da mezzanine boards intercambiabili

E' una scheda VME 6U, larga 1U equipaggiata con una FPGA ALTERA della famiglia Cyclone: la EP1C20F400C6 (nella foto è quella piccola al centro). Essa è interfacciata alla scheda tramite tecnologia Flip Chip e riceve/fornisce i segnali direttamente dalle tre porte fisse LVDS e dalle mezzanine; inoltre è collegata con il bus VME attraverso un proprietary local bus da 16bit e un'altra FPGA (nella foto è quella grande in alto) che ha

funzione di bridge; attraverso il bus VME è possibile programmarla direttamente dal calcolatore (“on the fly”) senza dover ricorrere ad altri strumenti esterni; questo aspetto risulta di estrema utilità poiché in fase di verifica del funzionamento è possibile effettuare modifiche al codice dal calcolatore che riprogrammare l'FPGA in pochi minuti. L'altro fondamentale aspetto del collegamento con bus VME è che si possono passare i parametri di funzionamento al dispositivo di trigger direttamente da calcolatore, con un semplice comando; in pratica possiamo interagire dinamicamente con l'FPGA anche in fase operativa.

Alla sommità del pannello frontale sono presenti due led: il primo segnala ogni accesso in lettura o scrittura su bus VME; il secondo è invece impostabile ed è stato programmato per rimanere acceso per tutto il tempo in cui la fsm si trova nello stato RUNNING.

Nelle porte di espansione sono state applicate le mezzanine con ingressi di tipo TTL e sono stati effettuati i collegamenti per testarla in laboratorio (figura 35).

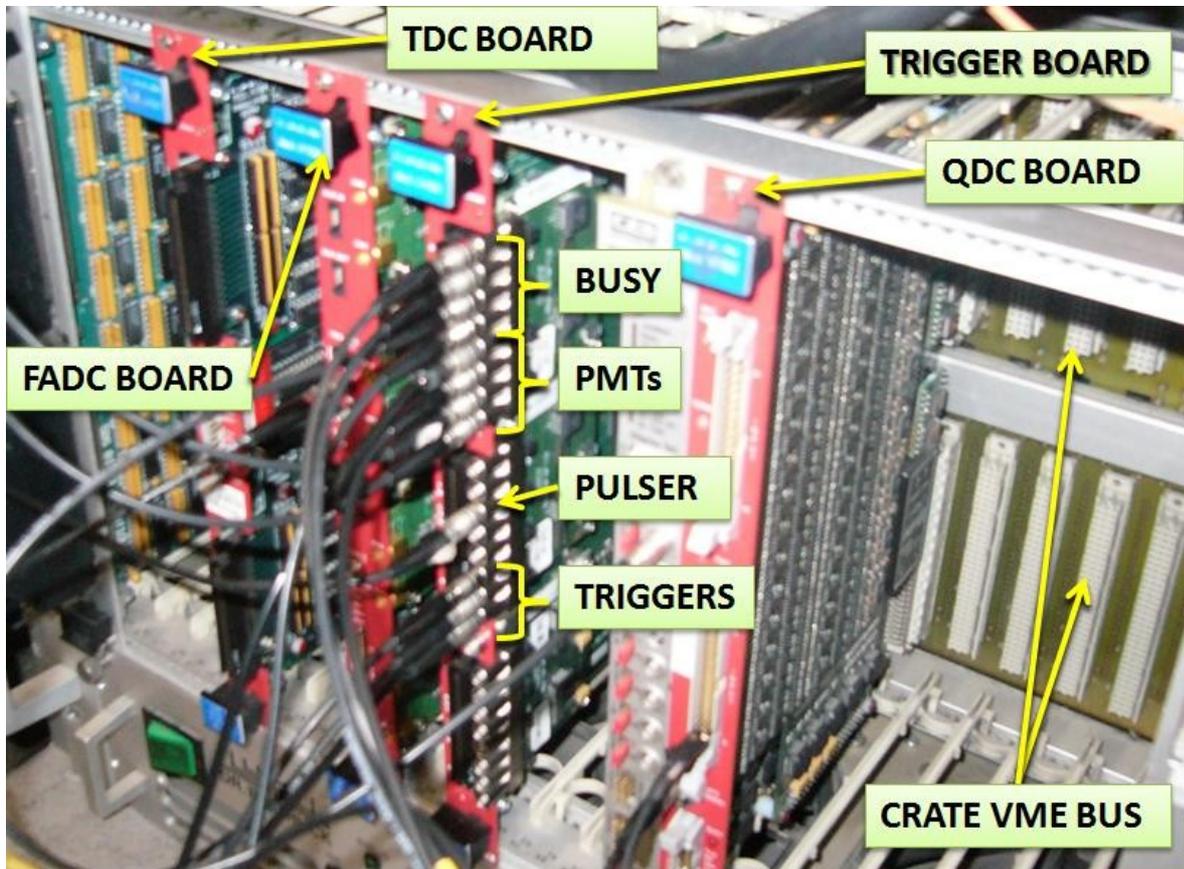


figura 35. Crate VME bus con le VME board di DAQ e la trigger board collegata opportunamente; si effettua la verifica sperimentale dell'effettivo corretto funzionamento della sceda di trigger.

Le uscite dei fotomoltiplicatori (i quali stanno all'interno della black box) sono collegate alla scheda di front-end che digitalizza i segnali e li serve in ingresso (segnale PMTs) alla scheda di trigger; i BUSY invece vengono dalle altre schede di acquisizione (quello proveniente dalle camere a strip viene simulato da un formatore d'onda). I segnali GATE e PULSE vengono visualizzati su un oscilloscopio assieme alle versioni analogiche amplificate dei segnali PMTs. I fotomoltiplicatori vengono stimolati direttamente con il segnale PULSE inviato all'impulsatore-led all'interno della black box.

Il test ha confermato il corretto funzionamento della scheda in ogni sua funzionalità.

Successivamente è stata presa in considerazione la possibilità di aumentare la frequenza di clock. La scheda fornisce un clock da 40MHz (frequenza richiesta nelle specifiche di progetto), ma è possibile ricavare da esso un ulteriore segnale di clock a diversa frequenza grazie ad un PLL, un componente in grado di generare un forma d'onda periodica precisa dati in ingresso un segnale di clock e le necessarie indicazioni di fase frequenza e duty cycle.

L'FPGA in questione è dotata di due PLL, uno dei quali è stato programmato per generare un clock specifico solo per la parte più interna del dispositivo (si tratta di triggerdevice ovvero solo la parte di logica che processa i segnali diretti); la parte di logica di dialogo con il bus VME rimane ad una frequenza di lavoro di 40MHz.

Portato il clock di triggerdevice ad 80MHz, si è effettuato il fitting senza alcun problema, e l'analisi temporale ha confermato il corretto funzionamento; l'FPGA è stata riprogrammata e ritestata con successo.

Infine il clock è stato portato a 120MHz, il fitting è risultato positivo, ma non l'analisi temporale. Il problema è stato presto individuato e sono stati migliorati alcuni percorsi critici nel componente Delayer; una volta ottenuta conferma dall'analisi temporale e riprogrammata l'FPGA, si è effettuato il test con i fotomoltiplicatori.

Seguono ora alcune foto particolarmente commentate delle forme d'onda visualizzate dall'oscillatore nel test con clock di logica interna a 120MHz; esse sono prova del corretto funzionamento del dispositivo e della sua precisione.

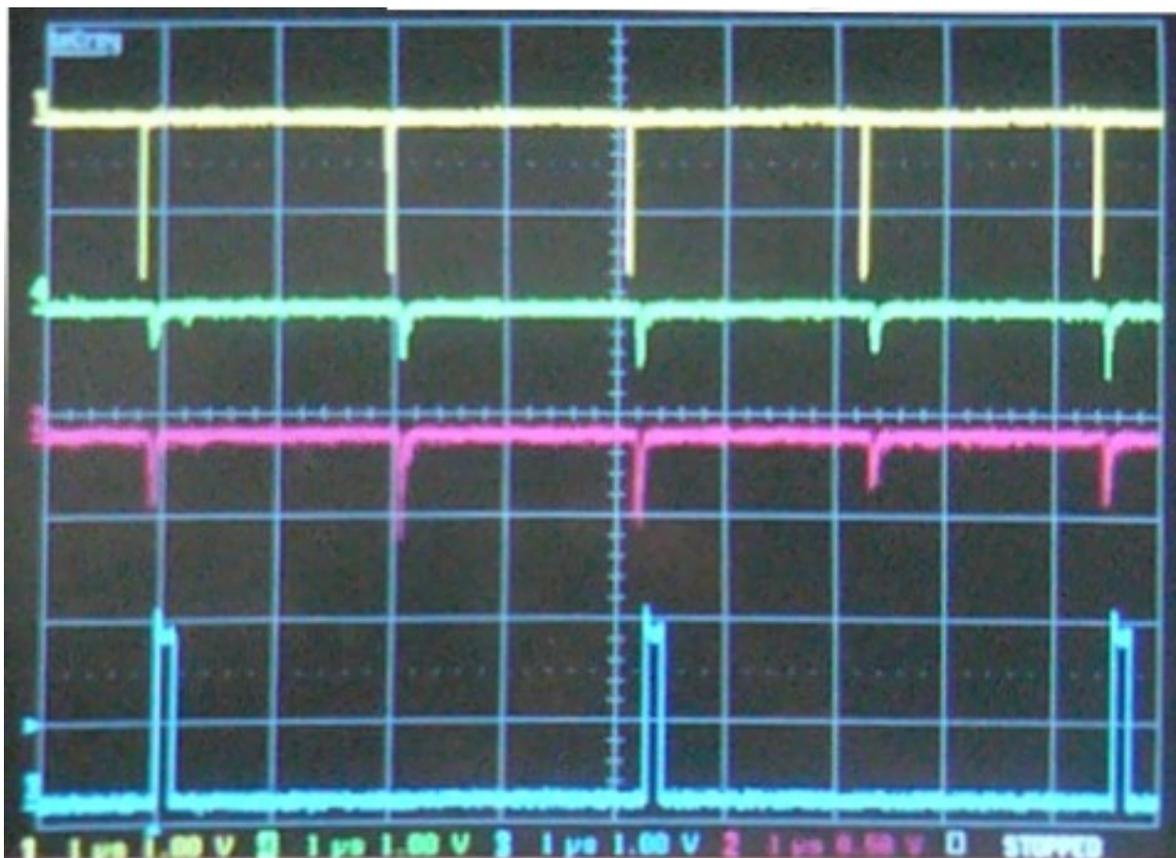


figura 36. Il segnale periodico giallo è il segnale PULSE che stimola il diodo-led che stimola 2 fotomoltiplicatori. Essi rispondono con impulsi (verdi e rosso) che vengono digitalizzati dalla scheda di front-end e serviti in ingresso alla trigger board come segnali PMTs. I parametri impostati per la generazione di trigger sono soddisfatti quindi viene generato un segnale GATE (azzurro); il parametro di allungamento di clrDYEN è compreso tra 1 e due volte il periodo di PULSE perciò, correttamente, il segnale di GATE viene generato solamente una volta ogni due.

Da notare la precisione e la flessibilità con cui il segnale di GATE può essere formato attraverso semplici comandi da tastiera anche a funzionamento in corso (8ns di sensibilità);

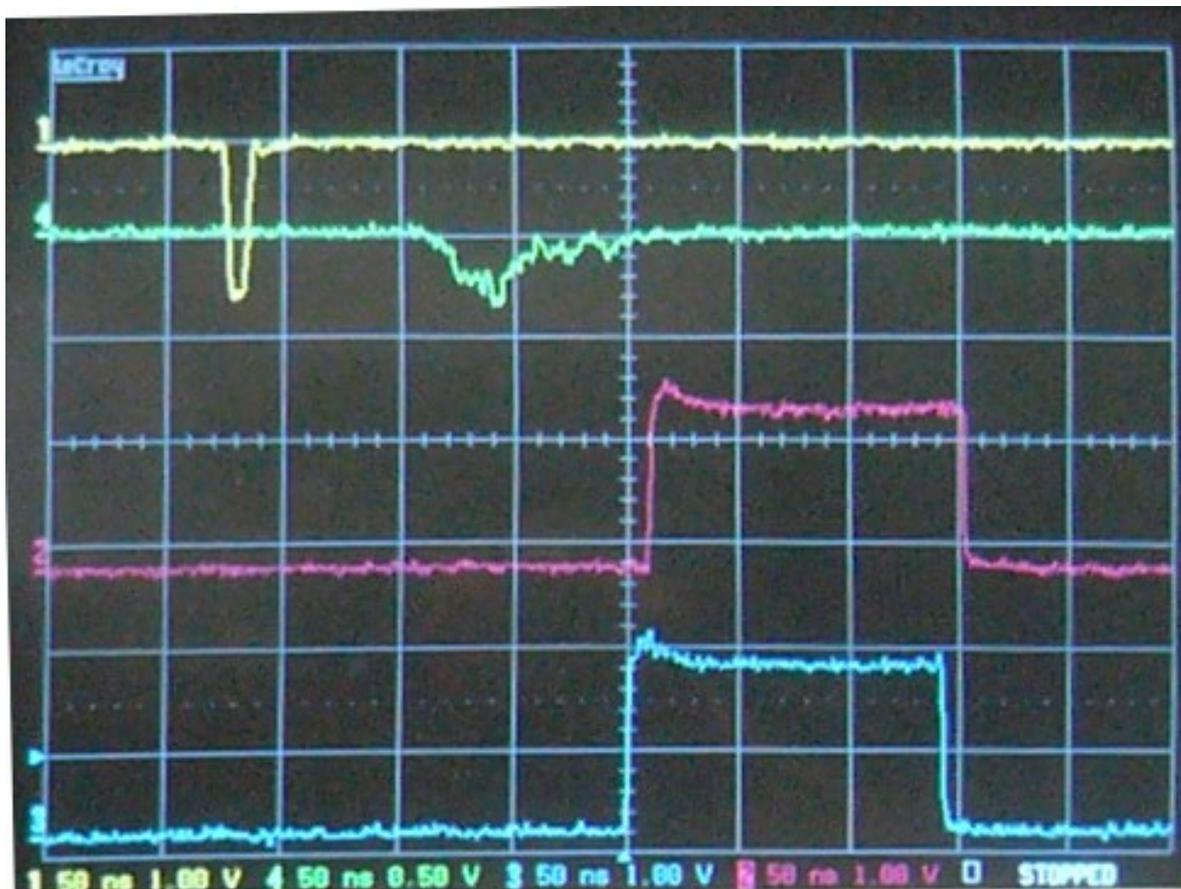


figura 37. Il segnale giallo è il segnale PULSE negato; quello verde è l'uscita del fotomoltiplicatore; il rosso e il blu sono un segnale di TRIGGER e il segnale GATE. I loro parametri di ritardo differiscono per un'unità, ovvero per un solo periodo di clock (8ns).

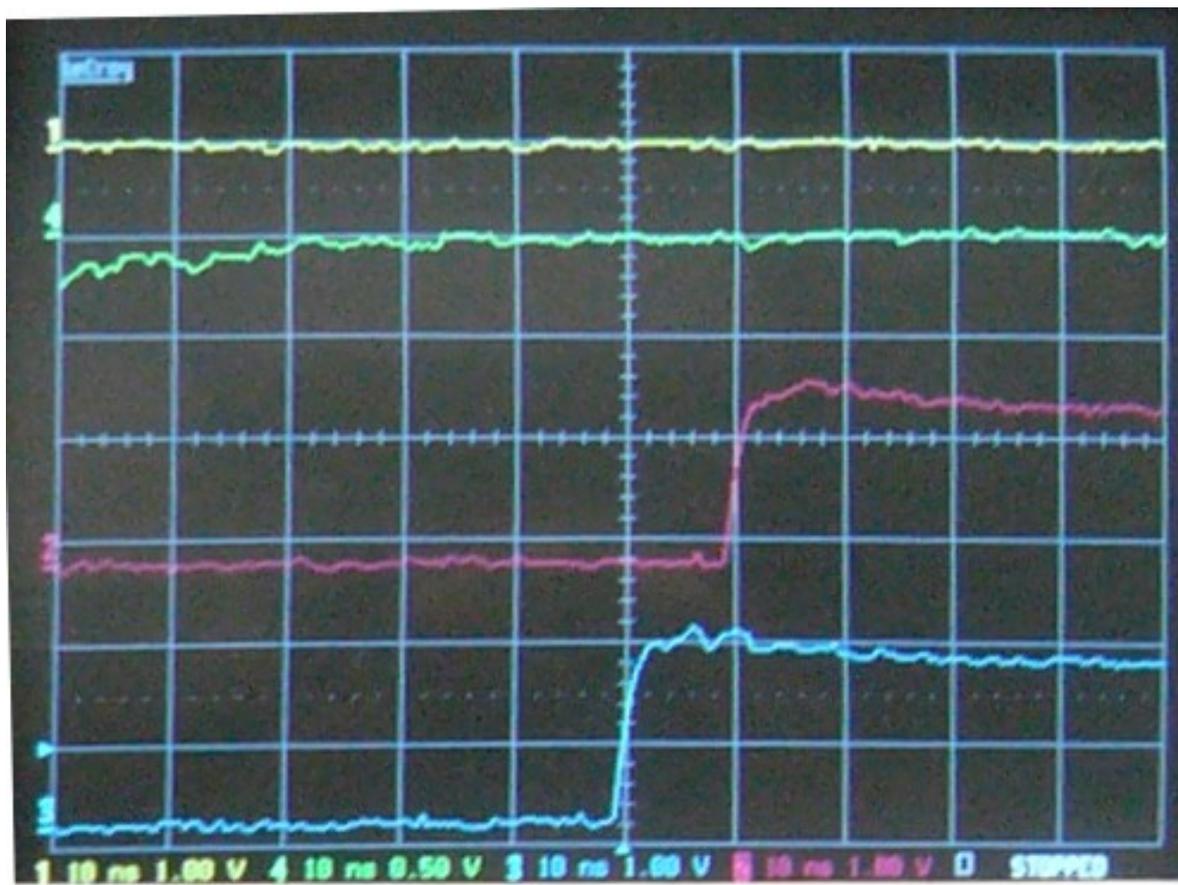


figura 38. Versione ingrandita dell'immagine precedente; particolare del ritardo tra l'uno e l'altro nella transizione a '1' dei segnali.

Le seguenti foto fanno capire chiaramente il miglioramento ottenuto in termini di complessità e gestione del sistema per l'acquisizione dati.

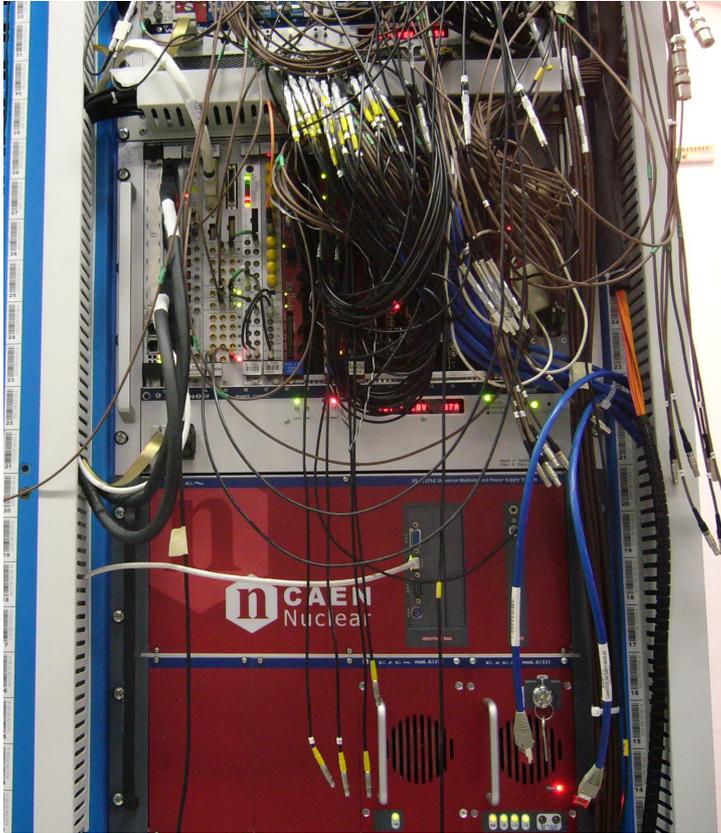


figura 39.

Elettronica NIM utilizzata nei precedenti Beam Test.

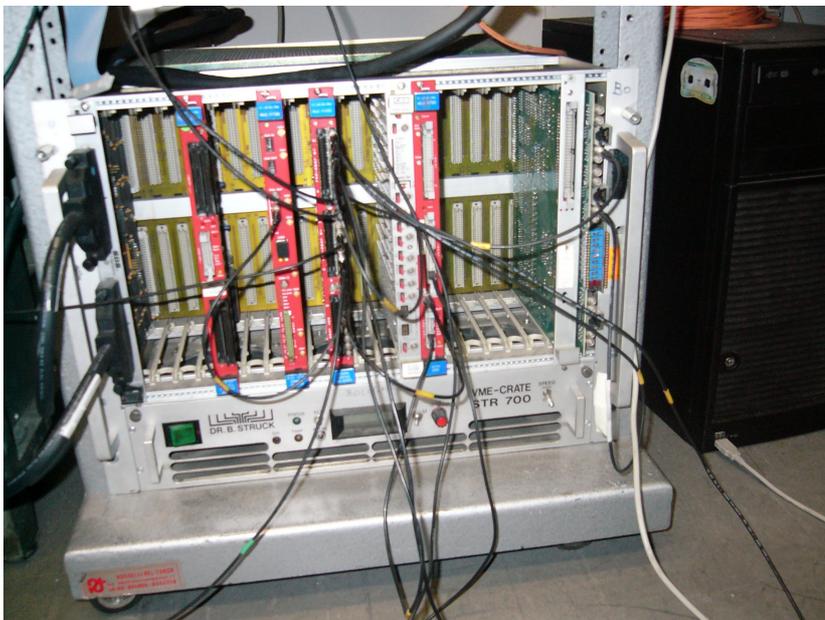


figura 40.

Elettronica che si utilizzerà nel futuro Beam Test di giugno 2009.

Conclusioni

In linea con gli obiettivi preposti, è stato realizzato con successo un progetto in VHDL volto a fornire il segnale di trigger per il Lucid Beam Test. Essa è in grado di discernere gli avvenimenti che si presentano al suo ingresso su 8 segnali diversi e individua senza alcun errore (requisito fondamentale) gli eventi richiesti in base ai parametri che le vengono caricati sui registri di configurazione e genera diversi segnali logici in uscita.

Vi è un sistema di generazione degli impulsi per un LED utilizzato nella calibrazione dei fotomoltiplicatori, che è migliorato notevolmente rispetto alle condizioni passate: esso ora è sincrono, e programmabile tramite i registri di configurazione, a differenza del passato in cui la sua generazione era completamente slegata dal sincronismo della presa dati.

L'aspetto più importante però è la generazione del segnale di trigger, il quale ora è facilmente impostabile e modificabile (anche runtime, tramite PC). È possibile selezionare la molteplicità dei segnali dei fotomoltiplicatori coinvolti, effettuare coincidenze in un certo intervallo, generare segnali di trigger in uscita con ritardo e durata programmabile in un ampio intervallo (durata tra 8 ns e 520 ms) e con una sensibilità di 8 ns. La generazione di trigger in sequenza è controllata attraverso una logica che inibisce la generazione di trigger per un periodo definibile a piacere (tra 8 ns e 520 ms) dopo il primo trigger.

Dal punto di vista di frequenze di lavoro e granularità temporale, la logica implementata soddisfa ampiamente le attese: la richiesta di progetto era di 40MHz in modo da assicurarsi una sensibilità di 25ns per la formazione del segnale di trigger e una latenza massima di 50ns. Il progetto realizzato è in grado di funzionare a 120 Mhz, fornendo una precisione sugli intervalli temporali di 8 ns ed ha una latenza minima di 16 ns. Per la realizzazione di tali funzionalità non sono state utilizzate tutte le risorse disponibili nella FPGA. Si sono quindi utilizzate le risorse rimanenti, ed in particolare la memoria, per aggiungere nuove

funzionalità, non richieste inizialmente, che permettono di avere un maggior controllo su tutta la presa dati: sono stati inseriti diversi contatori sui segnali di fotomoltiplicatore, di trigger, di busy ed è stato possibile memorizzare localmente in FIFO opportune informazioni temporali su ogni segnale di trigger generato. Tali informazioni possono essere lette dal sistema di acquisizione dati a completamento delle informazioni sui canali del LUCID sotto test.

L'intero progetto in VHDL è stato caricato sulla FPGA e provato in laboratorio su segnali di fotomoltiplicatori. Sono state provate tutte le configurazioni fondamentali ed il sistema sta funzionando secondo le specifiche (o addirittura meglio), come hanno mostrato diverse immagini prese all'oscilloscopio.

Confrontando il sistema attuale con quello che era disponibile in precedenza, l'aumento di funzionalità, flessibilità e controllo del sistema è impressionante. In precedenza la generazione del solo segnale di trigger avveniva utilizzando diversi elementi di logica NIM (moduli con discriminatori, coincidenze, logica digitale elementare, fan-in/fan-out, ritardi) che venivano cablati in zona sperimentale e controllati sull'oscillografo prima delle prime misure. La tracciabilità della configurazione era affidata ad una descrizione su carta e la programmabilità era assente. Ora non solo tutto è perfettamente tracciabile e controllabile via computer, ma le funzionalità sono state enormemente ampliate, rendendo più sicura la presa dati e facilitando le fasi successive al beam test: l'analisi dei dati.

E' attualmente in fase avanzata la scrittura di codici per l'utilizzo completo della scheda nell'infrastruttura di acquisizione che verrà utilizzata nel beam test (parte di questa è già disponibile ora ed è stata usata nei primi tests). Già a partire dalla prossima settimana è in programma una campagna di misure sui fotomoltiplicatori che vedranno la scheda v1495 ed il mio progetto come protagonisti nella generazione dei segnali di trigger.

Bibliografia

1. La fabbrica delle particelle

V. Vagnoni e A. Vitale QN (2008);

2. ATLAS Technical design report

ATLAS COLLABORATION CERN/LHCC/99-14;

3. Cyclone FPGA Family Data Sheet

Altera Corporation (2008);

4. Technical Information Manual MOD. V1495

CAEN (2009);