

RELAZIONE DI FINE ANNO SULL' ATTIVITÀ DIDATTICA-SCIENTIFICA **2014**

SCUOLA DI DOTTORATO IN FISICA (XXIX ciclo) – I ANNO

Università degli Studi di Bari “Aldo Moro”

Titolo programma di ricerca: *Studio e sviluppo di rivelatori a GEM per applicazioni in adroterapia*

Dottoranda: Palma Rita Altieri

Tutor: Dott.ssa Anna Colaleo

Attività di ricerca

- Introduzione

Gli effetti biologici degli adroni suscitano un interesse sempre crescente per la cura delle patologie oncologiche. L'adroterapia costituisce la nuova frontiera per la cura dei tumori, dal momento che il rilascio di una elevata energia alle cellule del bersaglio tumorale fa sì che si inneschino effetti radiobiologici tali da danneggiare il DNA, con conseguente distruzione delle cellule cancerose. Rispetto alla radioterapia convenzionale, l'utilizzo di fasci di adroni (soprattutto protoni e ioni di carbonio), date le superiori proprietà balistiche di questi rispetto ai fotoni ed agli elettroni, consente di poter irradiare tumori profondi favorendo il rilascio di una dose conforme alla dimensione del *target*, con basso impatto sui tessuti sani circostanti. La sempre maggiore diffusione del metodo di somministrazione della dose basato sulla tecnica della scansione attiva del fascio (*Active Scanning System*) e la necessità di sincronizzare il fascio stesso con il movimento di alcuni organi bersaglio (i polmoni per esempio), richiede un controllo temporale dettagliato della distribuzione della dose per preservare la precisione intrinseca della radioterapia con adroni. I fasci utilizzati in adroterapia sono caratterizzati da correnti elevate (l'intensità tipica di un fascio di protoni è di 10^9 protoni \cdot cm⁻² \cdot s⁻¹), per questo è richiesta una nuova generazione di rivelatori dotati di elevata risoluzione spaziale (\ll 1 mm) e temporale (dell'ordine del ns), e di linearità nella risposta su un ampio *range* dinamico. La prerogativa importante per un tale rivelatore è che sia “mini-invasivo”, tale cioè da interferire ed alterare nella minore misura possibile il fascio terapeutico, allo scopo di minimizzare le incertezze su posizione, energia, *range* e stabilità del fascio.

I rivelatori a GEM (GEM – *Gas Electron Multiplier*) sono ampiamente utilizzati dal 1997 per il tracciamento delle particelle cariche negli esperimenti di Fisica delle alte Energie, attualmente si stanno studiando possibili applicazioni in altri campi, per esempio in ambito medico per la diagnostica (*imaging*) e la terapia (adroterapia). La mia attività di ricerca è finalizzata allo studio e realizzazione di un rivelatore a GEM di ultima generazione da impiegare come monitor di fascio per adroterapia in grado di fornire, oltre al profilo del fascio, la distribuzione bidimensionale e la misura della dose nella fase di pretrattamento.

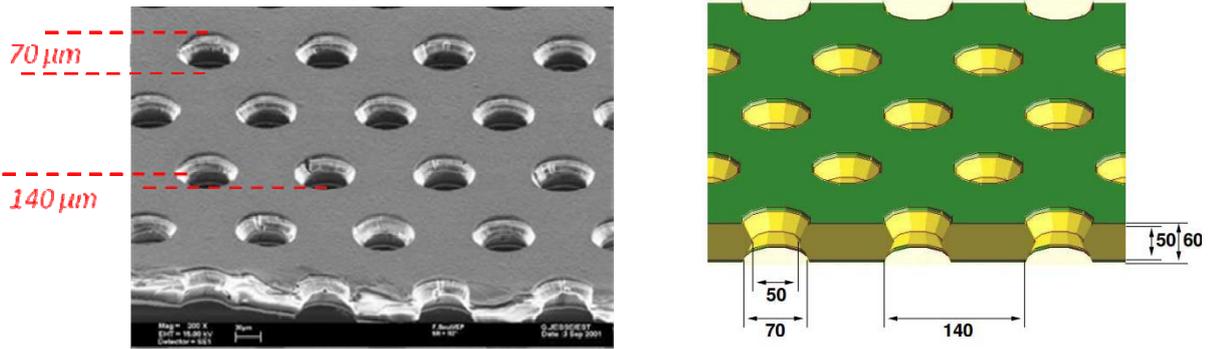


Figura 1. A sinistra l'immagine ingrandita di un foglio GEM, a destra una sezione del foglio GEM.

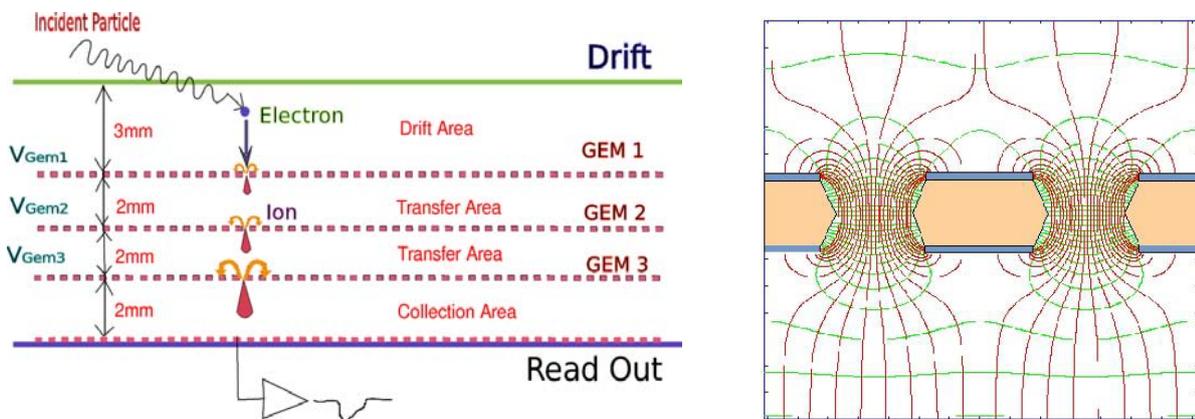


Figura 2. A sinistra lo schema di funzionamento di una camera con tre fogli GEM, a destra la rappresentazione delle linee del campo elettrico in corrispondenza di un foglio GEM.

Un rivelatore a GEM è costituito da uno o più fogli di kapton (Figura 1. a sinistra) dello spessore di $50 \mu\text{m}$ con un deposito di rame di $5 \mu\text{m}$ su entrambe le superfici; sul foglio vengono realizzati micro-fori ad alta densità (fino a 100 per mm^2) attraverso l'impiego di moderne tecniche fotolitografiche, i fori agiscono come canali di moltiplicazione elettronica. A sua volta ciascun foro è caratterizzato da una struttura biconica con diametro esterno di $70 \mu\text{m}$ e diametro interno di $50 \mu\text{m}$ (schema in Figura 1. a destra); la scelta dei suddetti parametri geometrici e la tecnologia impiegata per la realizzazione dei fogli GEM rappresenta un compromesso tra esigenze costruttive e corretto funzionamento del rivelatore. Applicando una differenza di potenziale ai due strati di rame ($300\div 500 \text{ V}$) gli elettroni primari, prodotti nel volume sensibile della camera dalla radiazione incidente per effetto della ionizzazione del gas presente, si muovono sotto l'effetto di un campo elettrico (Figura 2. a destra) che diventa particolarmente intenso nelle buche (fino a valori di 100 kV/cm), con la conseguente moltiplicazione a valanga della carica. Il principio di funzionamento di un rivelatore a GEM è schematizzato in Figura 2. a sinistra. Il segnale di corrente indotto sul piano anodico dalla carica prodotta viene elaborato mediante l'elettronica di *read-out*.

I rivelatori ad amplificazione a GEM sono caratterizzati da buona risoluzione spaziale ($\sim 100\mu\text{m}$ [strip pitch/sqr(12)]), buona risoluzione temporale (4-5 ns), alta efficienza di rivelazione ($> 98\%$) e resistenza a elevati flussi di radiazione. Tali rivelatori sono inoltre dotati di robustezza, flessibilità e versatilità, ragione per cui si stanno cercando nuove loro possibili applicazioni.

La mia attività di ricerca durante il primo anno di dottorato ha riguardato sia lo sviluppo di codici di simulazioni Monte Carlo, che test di laboratorio su un prototipo del rivelatore.

- Simulazione Monte Carlo del rivelatore a tripla GEM

Il primo passo di questo lavoro è stato lo studio dettagliato della camera a GEM mediante simulazioni basate sul metodo Monte Carlo; in generale tali simulazioni si rivelano uno strumento fondamentale per:

- ✓ progettare ed ottimizzare le prestazioni di nuovi rivelatori;
- ✓ comprenderne il comportamento;
- ✓ confrontare i risultati con i dati ottenuti dalle misure sperimentali.

Come si vedrà più avanti, nel caso in esame, le simulazioni Monte Carlo di un rivelatore a GEM sono state impiegate per effettuare studi sui processi di ionizzazione, trasporto e moltiplicazione in diverse miscele del gas, sulla risoluzione spaziale, sul guadagno, sulla formazione del segnale indotto sul piano di *read-out* e per stimare la *cluster size*. La simulazione del rivelatore è stata implementata utilizzando la combinazione di *software* differenti, illustrati brevemente di seguito.

GARFIELD++

Garfield++ è un codice di simulazione Monte Carlo (*open source*) scritto in linguaggio C++ e sviluppato al CERN dalla collaborazione RD51, a partire dal 1984, per la dettagliata simulazione di rivelatori a gas. Lo schema della struttura del codice che utilizza le migliori tecniche di approssimazione e la migliore modellizzazione dei processi fisici nel gas è mostrata in Figura 3. Il *toolkit* consente il tracciamento di particelle primarie e secondarie ed inoltre, grazie alla funzione **MagBoltz** vengono calcolate le proprietà del gas (es. coefficienti di diffusione e velocità di deriva) e la perdita di energia per ionizzazione, e grazie alla funzione **HEED** vengono simulati il processo di ionizzazione delle molecole del gas ed il trasporto della carica. Il codice permette anche di simulare il comportamento delle particelle sotto l'influenza del campo magnetico, oltre che di quello elettrico.

ROOT

Garfield++ è stato interfacciato a ROOT, il *framework* sviluppato al CERN per l'analisi dei dati, per utilizzarne l'interfaccia grafica e le librerie. ROOT è stato anche utilizzato nella fase di *post-processing* per l'analisi e la rappresentazione dei dati.

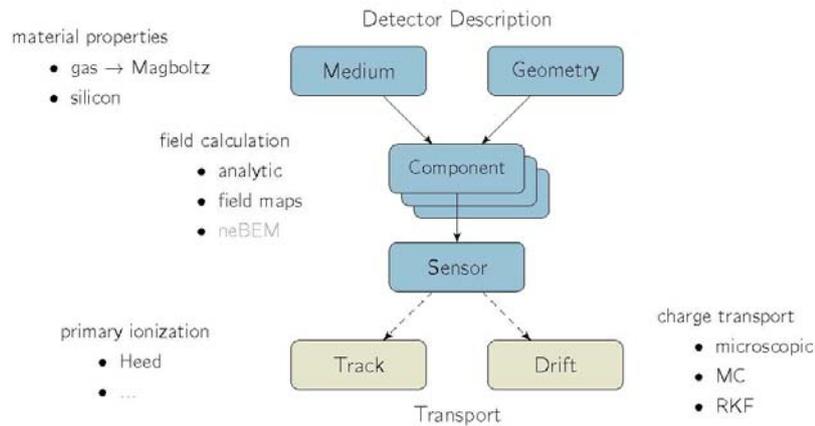


Figura 3. Schema della struttura di Garfield++ e delle principali classi.

ANSYS

Il *toolkit* Garfield++ permette la riproduzione di campi elettrici e magnetici per geometrie relativamente semplici, come fili o piani sottili. La simulazione di rivelatori a GEM richiede invece campi elettrici generati in geometrie complesse, per cui è necessario utilizzare *software* esterni in grado di “mappare” opportunamente il campo; uno di questi è ANSYS, *software* ingegneristico che, grazie al metodo degli elementi finiti (FEM – *Finite Element Method*), è in grado di simulare il campo elettrico di un rivelatore a GEM.

Dopo uno studio dei suddetti *toolkit* sono passata alla implementazione vera e propria dei codici, a partire dal modello geometrico, nel *software* ANSYS per la produzione dei file da importare successivamente nel codice Garfield++. In Figura 4. è riportato lo schema della camera riprodotta dove è possibile individuare il catodo, i tre piani GEM e l’anodo segmentato in strip (ampiezza pari a 600 μm e passo pari a 800 μm) ed il supporto isolante (FR4). In Figura 5. a destra è raffigurato il modello geometrico (*CAD model*) costruito nello *script* di input in linguaggio FORTRAN, richiesto dal *software* ANSYS, a partire dalla cella elementare, mostrata in Figura 4. a sinistra. Una volta completato il modello geometrico del rivelatore, si assegnano le proprietà elettriche (costante dielettrica e resistività) ai materiali dei singoli volumi; successivamente si impostano opportunamente i valori delle tensioni di polarizzazione sui piani GEM ed i valori del campo elettrico (nelle regioni di deriva, trasferimento e induzione), per la produzione della mappa. Sulla base del metodo degli elementi finiti (FEM), nella fase detta di *meshing* la struttura viene approssimata con una rete di nodi sulla base della quale, dopo il calcolo del potenziale, viene prodotta la mappa 3D del campo elettrico (ossia un file in formato .lis leggibile da Garfield++) dove sono riportati i valori del campo elettrico e del potenziale in tutti i nodi.

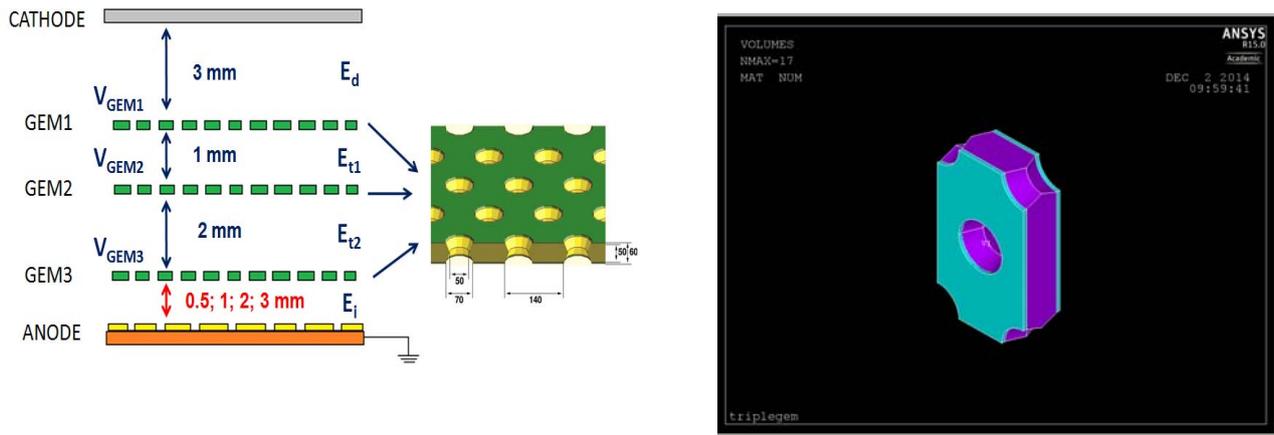


Figura 4. Schema della camera a GEM (a sinistra) e modello e cella elementare del foglio GEM simulata in ANSYS.

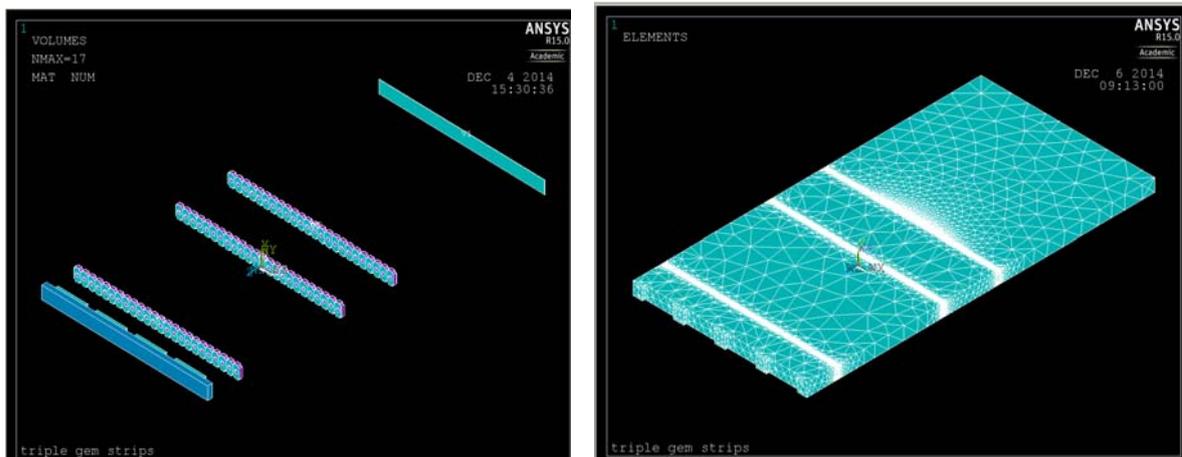


Figura 5. A sinistra volume elementare del piano GEM (*CAD model*), a destra l'effetto del *meshing* in ANSYS.

Insieme alla mappa vengono importati nel codice Garfield++ altri file prodotti, relativi alla struttura geometrica (nodi ed elementi) ed alle proprietà dei materiali. Nella Figura 5. a sinistra è anche mostrato l'effetto del *meshing*. E' importante precisare che, in base al teorema di Shockley-Ramo, la produzione in Garfield++ del segnale indotto dagli elettroni sulle strip richiede che vengano prodotti mediante ANSYS anche i campi pesati; questi sono stati ottenuti ponendo a potenziale 0 V tutti i conduttori e, di volta in volta, a potenziale 1 V ciascuna strip, le mappe relative ai campi pesati di ogni strip sono state ugualmente importate nel codice Garfield++. Il modello geometrico può essere modificato per ottenere configurazioni diverse dei piani GEM o, per esempio, per variare ampiezza e passo delle strip, per ottimizzare la granularità del *read out*. Una volta definito il volume elementare in ANSYS il codice Garfield++ è in grado di riprodurre volumi di dimensioni realistiche, mediate operazioni di replica per simmetria o periodicità.

Il codice Garfield++ è stato finalizzato e testato per:

- 1) eseguire l'ispezione del campo elettrico prodotto mediante ANSYS (un esempio di campo nel piano x-z è mostrato in figura 6.) e verificarne la correttezza;
- 2) utilizzare miscele diverse di gas (Ar-CO₂ in percentuali 70:30, 80:20 e 90:10);
- 3) ottenere tutte le informazioni spaziali e temporali della carica prodotta, in modo particolare degli elettroni prodotti, dalle tracce che attraversano il rivelatore, per stimare il guadagno (parametro principale che descrive la qualità dell'amplificazione e che deve essere ottimizzato), e la risoluzione spaziale;
- 4) simulare l'impulso di corrente prodotto sull'anodo per stimare la distribuzione spaziale della carica raccolta sul piano di lettura e sulla *cluster size*, ossia dell'accensione di più strip adiacenti da parte della particella incidente.

Lo studio della formazione del segnale indotto sulle strip ha richiesto particolare attenzione, dal momento che esiste una interazione nella regione *inter-strip* tra i bordi delle strip adiacenti ed un accoppiamento di tipo induttivo e capacitivo che produce un segnale di corrente, detta di “*cross-talk*”, che si sovrappone al segnale indotto dalla carica prodotta dalla radiazione incidente.

E' importante notare che i limiti delle simulazioni basate sul metodo Monte Carlo sono la richiesta di elevata potenza di calcolo ed i lunghi tempi di esecuzione, questo si traduce in una certa difficoltà ad accumulare sufficiente statistica per predire il *trend* delle proprietà del *detector* oggetto di studio. Per rendere le simulazioni più precise riducendo i tempi di calcolo prevedo di utilizzare a breve le nuove tecnologie computazionali basate sul calcolo parallelo e/o distribuito.

A seguire vengono mostrati alcuni *plot* relativi ai risultati preliminari.

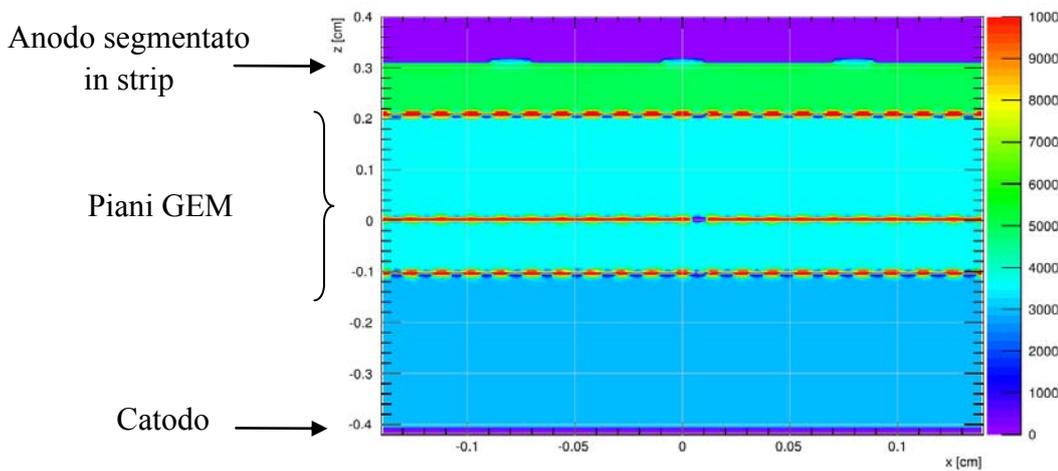


Figura 6. Campo elettrico nel piano x-z ANSYS

Trasporto della carica, amplificazione e risoluzione spaziale

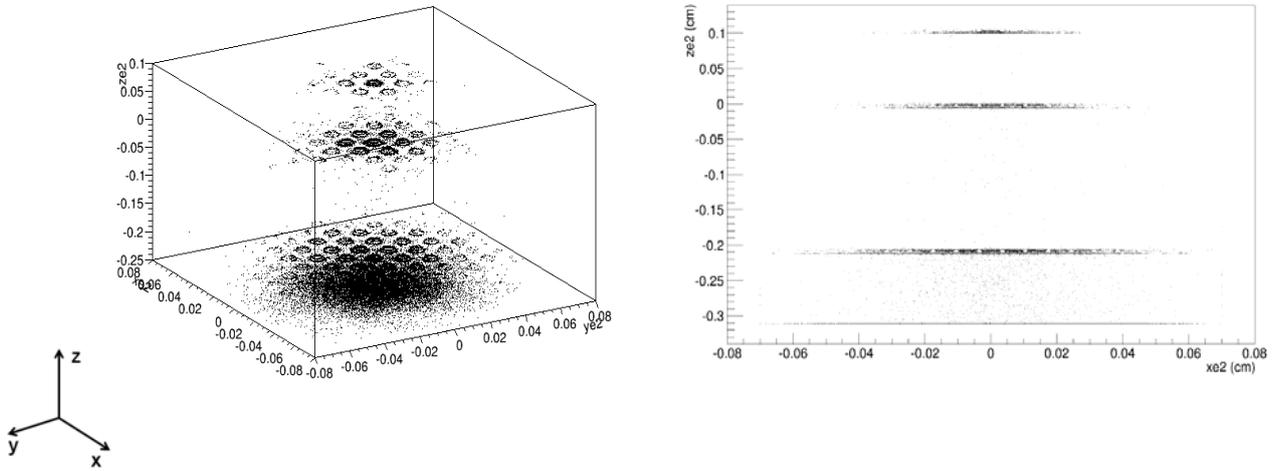


Figura 7. A destra l'effetto della moltiplicazione della carica nei tre piani GEM in seguito al passaggio di un muone di energia 100 GeV simulata in Garfield++. A sinistra una proiezione bidimensionale nel piano x-z.

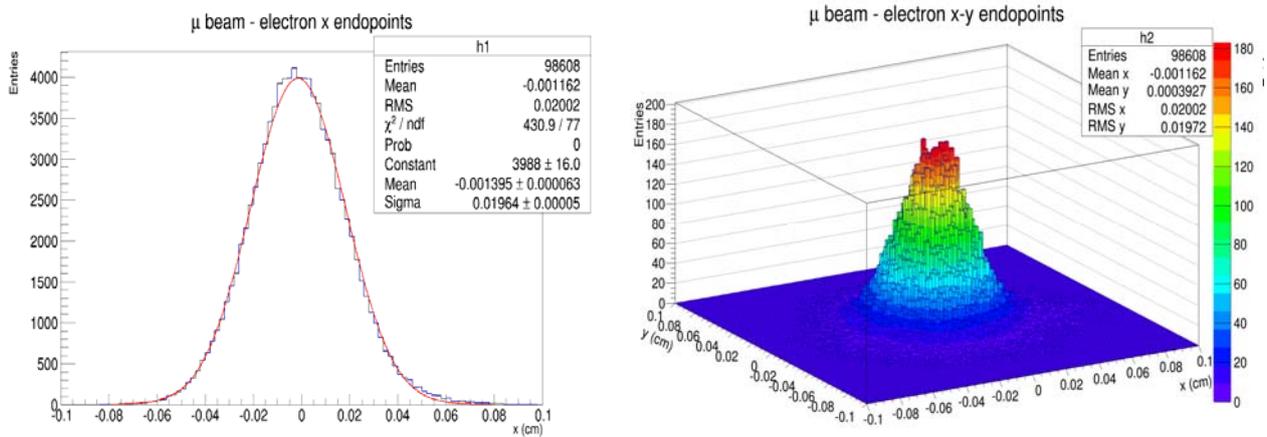


Figura 8. A destra la risoluzione spaziale lungo l'asse con un *fit* Gaussiano, a sinistra il profilo bidimensionale della carica nel piano x-y.

Guadagno effettivo

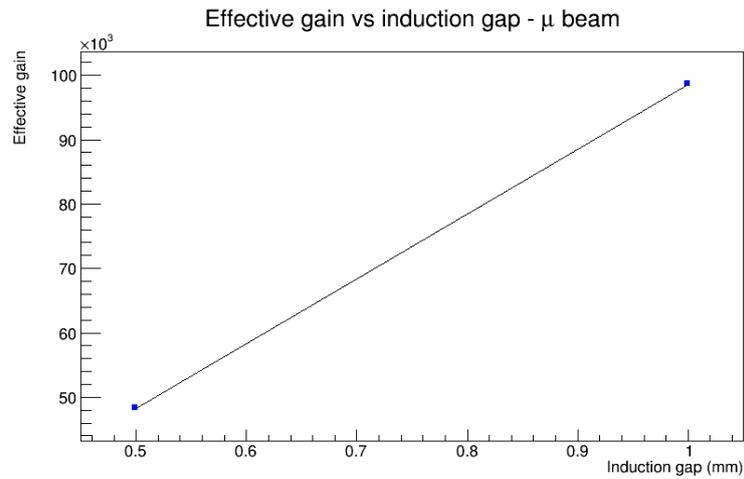


Figura 9. Guadagno effettivo del rivelatore a tripla GEM calcolato per ampiezza della regione di induzione pari a 0.5 ed 1 mm.

Effetto Penning e risoluzione spaziale

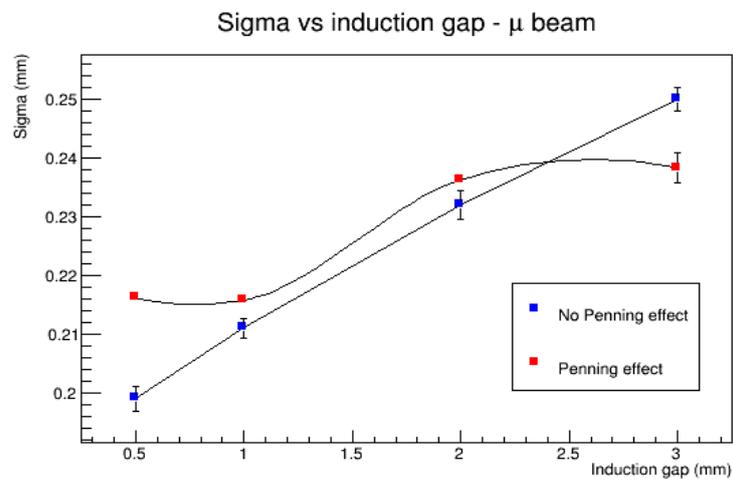


Figura 10. Andamento della risoluzione spaziale con e senza effetto Penning in funzione dell'ampiezza della regione di induzione.

Segnale indotto sulle strip

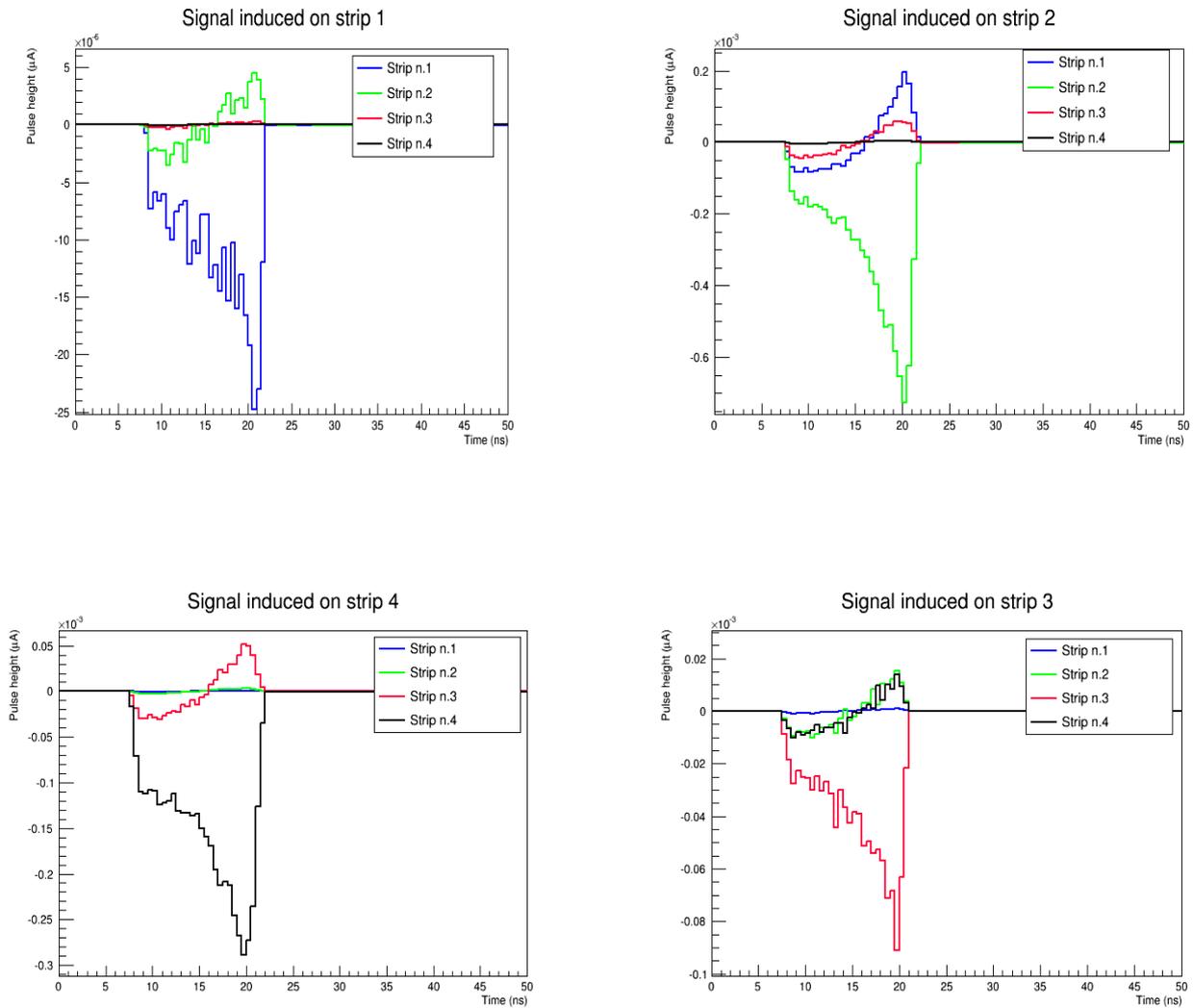


Figura 11. Dall'alto a sinistra in senso orario sono mostrati i segnali indotti sulle strip del piano anodico da un elettrone che si muove nella gap di induzione in direzione corrispondente al centro di ciascuna strip. In ogni plot è possibile distinguere il tipico segnale indotto sulla strip direttamente colpita ed il segnale di *cross-talk* prodotto sulle strip adiacenti (anche dette "spettatrici").

Cluster size

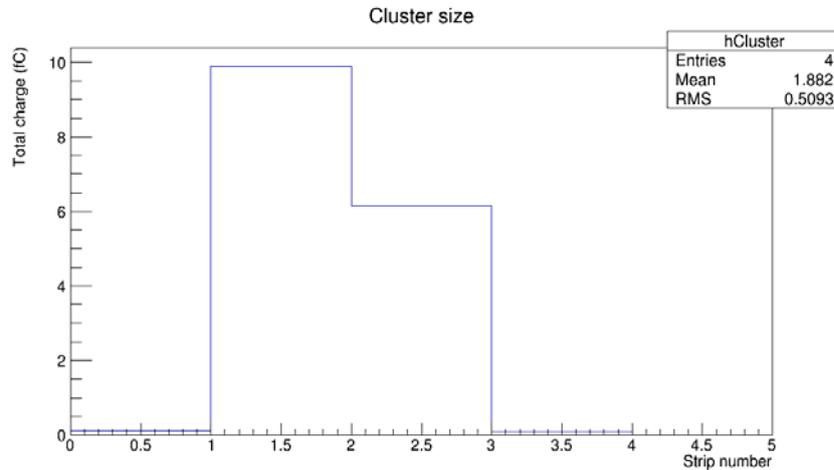


Figura 12. Cluster size.

Il *framework* di simulazione sviluppato, e comprendente i codici ANSYS, Garfield++ e ROOT, può essere utilizzato per modificare il *set-up* del rivelatore e per studiare quindi nuove geometrie di *read-out* estendendo il piano anodico da 1 a 2 dimensioni e per effettuare ulteriori studi, per esempio di efficienza e dipendenza della *cluster size* dall'angolo di incidenza del fascio. Inoltre il codice Garfield++ potrà essere interfacciato con il *toolkit* di simulazione Monte Carlo GEANT4 (*GEometry ANd Tracking*) per simulare condizioni di irraggiamento realistiche sul rivelatore e analizzare grandezze fisiche, quali la dose e la fluenza all'uscita del rivelatore. Il segnale indotto dagli elettroni sulle strip viene definito "raw" (cioè "grezzo"), in Garfield++ può essere scritto in file di dati che possono essere processati con software come PSpice per studiarne l'elaborazione dalla elettronica di lettura.

Infine sarà utile confrontare i risultati ottenuti dalla simulazione con le misure sperimentali eseguite sul rivelatore nella fase di caratterizzazione e *test beam*.

- Test del rivelatore a tripla GEM

Oltre alla simulazione Monte Carlo del rivelatore a tripla GEM ho partecipato alla attività di laboratorio per la caratterizzazione del rivelatore in termini di carica, *timing* e guadagno; per le misure sono state utilizzate una sorgente di Fe-55 ed una di Cs-137 e miscela del gas Ar-CO₂.

Ho partecipato al *test beam* sulla camera a tripla GEM presso il ciclotrone dell'Université Catholique de Louvain a Louvain-la-Nueve (Belgio), per studi sulla sensitività. Il test è stato effettuato su un fascio di neutroni (energia da 5 a 50 Mev), attualmente si stanno analizzando i dati raccolti che verranno confrontati successivamente con i risultati della simulazione Monte Carlo.

Attività didattica

L'attività didattica da me svolta comprende i seguenti corsi obbligatori, seminari, scuole e partecipazione a conferenze.

Corsi obbligatori della scuola di dottorato

- LabView (42 ore) - docenti: Dott. F. Gargano, Dott. P. Patimisco;
- How to prepare a technical speech in English (16 ore) - docente: Prof.ssa C. White;
- Modulo di gestione aziendale (16 ore) - docente: Prof. P. Lapecorella;
- Fenomenologia delle interazioni fondamentali (32 ore) - docente: Prof. P. Colangelo;
- Rivelatori di particelle innovativi e loro applicazioni (32 ore) - docenti: Dott. E. Radicioni, Dott. S. My, Dott. F. Loparco.

Seminari

- *“Measurements of Higgs Boson Properties at the LHC - Moriond results”*, Bari – Dipartimento interateneo di Fisica, 03/04/2014, Dott. Nicola De Filippis;
- *“Tecniche nucleari in Fisica Medica”*, Trento – Giornate di studio sul piano triennale INFN, 8/11/2014, Prof. Marco Durante;
- *“Particles that fight cancer: the use of protons and carbon ions in cancer therapy”*, Ginevra - CERN Main auditorium, 20/11/2014, Prof. Roberto Orecchia, Prof. Hirohiko Tsujii, Prof. Jens Overgaard.

Partecipazione a scuole e conferenze

- *“IX Seminar on Software for Nuclear, Subnuclear and Applied Physics”*, Alghero, 25-30 Maggio 2014;
- *XXVI Seminario Nazionale di Fisica Nucleare e Subnucleare “Francesco Romano”*, Otranto, 4-11 Giugno 2014;
- *“International Workshop on LHC, Astrophysics, Medical and Environmental Physics”*, Shkodra (Albania), 6-8 Ottobre 2014;
- *“Fisica e Medicina. Verso un futuro di integrazione”*, Giornate di studio sul piano triennale 2015-2017 INFN -Trento, 6-7 Novembre 2014.

Presentazione a conferenza internazionale

- *“Introduction to Hadron therapy”*, *“International Workshop on LHC, Astrophysics, Medical and Environmental Physics”*, Shkodra (Albania), 6-8 Ottobre 2014.

Publicazioni

- “*Performance of a Large-Area GEM Detector Prototype for the Upgrade of the CMS Muon Endcap System*”, D. Abbaneo et al. [CMS GEM Collaboration], 2014 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. (N50-5); arXiv:1126499 [physics.ins-det];
- “*Upgrade of the muon system in the high eta region of CMS experiment at LHC with the GEM*”, D. Abbaneo et al. [CMS GEM Collaboration], International Conference On Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR14), submitted to Journal of Instrumentation (JINST);
- “*Large-size triple GEM detectors for the CMS forward muon upgrade*”, D. Abbaneo et al. [CMS GEM Collaboration], 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2014), submitted to Nuclear Physics B;
- “*Motivation of the CMS Muon System Upgrade with Triple-GEM detectors*”, D. Abbaneo et al. [CMS GEM Collaboration], 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2014), submitted to Nuclear Physics B;
- “*Physics Studies for the CMS Muon System Upgrade with Triple-GEM detectors*”, D. Abbaneo et al. [CMS GEM Collaboration], C. Caputo Corresponding Author, 10th International Conference on Position Sensitive Detectors (PSD10), submitted to Journal of Instrumentation (JINST).