

Studio delle prestazioni dei rivelatori MicroMegas per l'upgrade dello spettrometro per muoni dell'esperimento ATLAS a LHC

Alessandra Betti

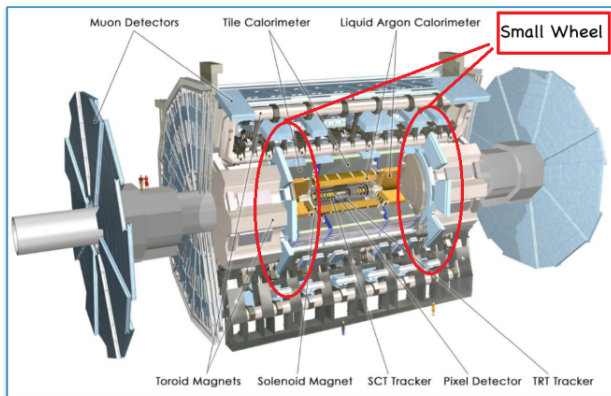
XV IFAE 2016
Università di Genova

01/04/2016



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA





LHC: collider adronico p-p
energia di design nel c.m.:
14 TeV
luminosità di design:
 $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
upgrade $\rightarrow 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Esperimento per misure di
precisione del Modello Standard
e ricerca di nuova fisica

- Simmetria cilindrica, diviso longitudinalmente in 3 parti: corpo centrale (barrel) e due zone in avanti (end-cap)
- Struttura a strati: tracciatore interno, calorimetri elettromagnetico e adronico, spettrometro per muoni
- **Spettrometro per muoni**: campo magnetico fornito da 3 grandi toroidi superconduttori in aria, **camere per tracciamento di precisione (MDT e CSC) e camere di trigger (RPC e TGC)**
- **Small Wheel**: **prima stazione dello spettrometro per muoni negli end-cap** \rightarrow verrà sostituita con la **New Small Wheel** nel LS2 in vista dell'aumento di luminosità di LHC per mantenere le attuali prestazioni di trigger e tracciamento ad alte rate di particelle

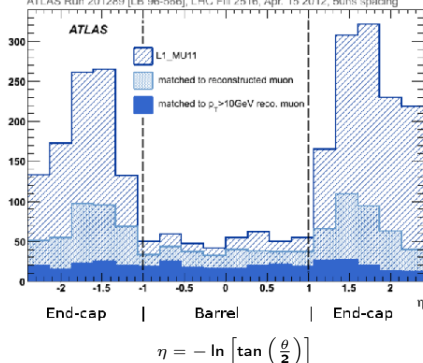
Motivazioni per la New Small Wheel

Due problemi principali legati alle alte rate di particelle attese con l'aumento di luminosità:

- 1) **Aumento della rate di trigger nelle regioni in avanti (end-cap $1 < |\eta| < 2.7$)**

ATLAS-TDR-20-2013

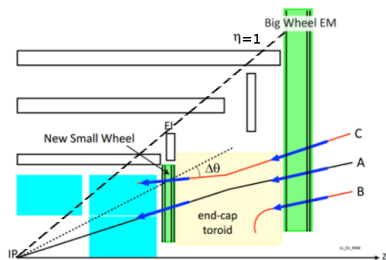
ATLAS Run 2012R9 [LB 96-566], LHC Fill 2516, Apr. 15 2012, 60ns spacing



- massima rate di trigger per i muoni accettabile dal sistema di readout: $\approx 20 \text{ kHz}$
- senza NSW rate attesa per $p_T > 20 \text{ GeV}$: 60 kHz
- con NSW rate attesa per $p_T > 20 \text{ GeV}$: $\approx 20 \text{ kHz}$ grazie alla riduzione dei trigger fake nelle Big Wheel nelle regioni degli end-cap

Distribuzione in η della rate di trigger per i muoni:

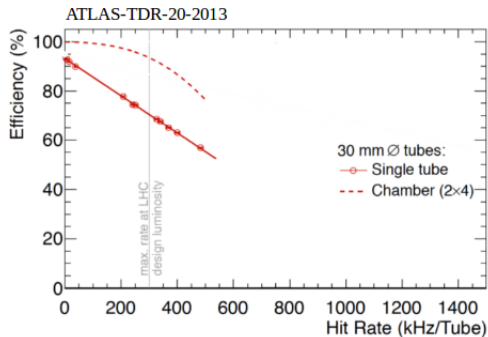
più del 90% della rate di trigger proviene dalle regioni degli end-cap e la maggior parte degli oggetti triggerati non vengono ricostruiti come muoni offline (background)



→ non necessario alzare la soglia a $p_T > 40 \text{ GeV}$ che ridurrebbe l'efficienza per i canali con muoni da W e Z (ad es. canale di decadimento $H \rightarrow 4\mu$)

Motivazioni per la New Small Wheel

- 2) Riduzione dell'efficienza delle attuali camere MDT con l'aumento della rate di particelle



Efficienza del singolo tubo a drift in funzione della rate di hit sul singolo tubo:

l'efficienza decresce linearmente all'aumentare della rate di particelle: per rate maggiori di 300 kHz/tubo (rate attesa alla luminosità di design) inefficienze di singolo tubo già maggiori del 35%

⇒ La Collaborazione ATLAS ha deciso di sostituire le Small Wheel del suo rivelatore in vista dell'aumento di luminosità di LHC

⇒ Le camere Micromegas verranno installate nella New Small Wheel di ATLAS per sostituire le attuali camere di tracciamento (MDT e CSC)

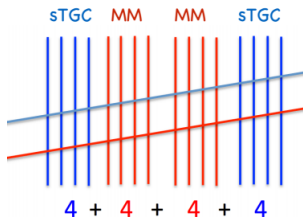
Richieste sui nuovi rivelatori e progetto della New Small Wheel

Le prestazioni dei nuovi rivelatori devono essere ad alta luminosità almeno uguali a quelle degli attuali rivelatori a bassa luminosità:

- **risoluzione spaziale migliore di $100 \mu\text{m}$ per piano** per avere risoluzione sull'impulso migliore del 10% per $p_T \simeq 1 \text{ TeV}$
- **efficienza di ricostruzione delle tracce maggiore del 97%** per $p_T > 10 \text{ GeV}$ per uguagliare quella attuale

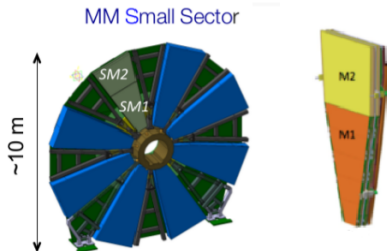
Rivelatori scelti per la NSW di ATLAS:

- **small strip-Thin Gap Chambers (sTGC)** per il trigger
- **MicroMegas (MM)** per le misure di precisione



Camere nella NSW: 4 multilayers con 4 piani di rivelatori ciascuno

Configurazione dei multilayer: **sTGC-MM-MM-sTGC** fornisce un sistema completo di trigger e tracciamento



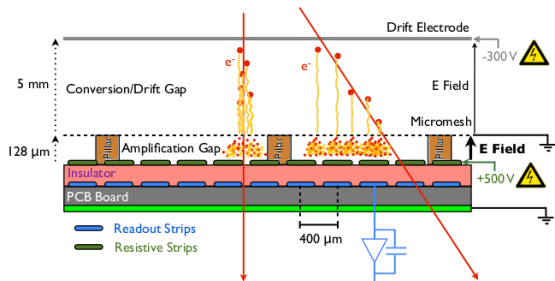
Camere con dimensioni $2 - 3 \text{ m}^2$

MM usate per la prima volta in camere così grandi

Organizzate in 8 settori piccoli dal lato del punto di interazione e 8 settori grandi dal lato opposto

Ogni camera è divisa in due parti: M1 e M2

Micromegas (MICRO MESH GASeous Detector): introdotte negli anni 90' da Charpack e Giomataris per la loro capacità di liberare velocemente il rivelatore dagli ioni positivi prodotti nel processo di moltiplicazione a valanga ($\simeq 100$ ns)

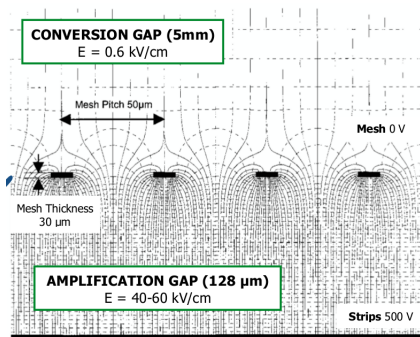


- elettrodo planare di drift
- gap di ionizzazione e drift $\simeq 5$ mm con campo elettrico basso ($\simeq 500$ V/cm)
- mesh maglia metallica posta a massa sostenuta da pillars
- gap di amplificazione $\simeq 100$ μm con campo elettrico elevato ($\simeq 50$ kV/cm)
- pannello di readout con strip di readout protette da strip resistive (introdotte per ridurre la probabilità di scarica) con larghezza $\simeq 300$ μm e pitch $\simeq 400$ μm

- le particelle cariche ionizzano il gas nella gap di drift e gli elettroni prodotti driftano verso la mesh
- gli elettroni passano attraverso la mesh e il segnale viene amplificato nella gap di amplificazione
- gli elettroni vengono raccolti sulle strip resistive mentre gli ioni positivi si muovono in direzione opposta e vengono velocemente raccolti sulla mesh (in $\simeq 100$ ns)
- il segnale viene letto per accoppiamento capacitivo sulle strip di readout

Configurazione del campo elettrico

Campi elettrici nelle gap di ionizzazione e amplificazione circa uniformi con intensità molto diverse



La **trasmissione degli elettroni** attraverso la mesh, **transparency (T)**, dipende dal rapporto tra i due campi elettrici (R):

$$R = \frac{E_{amp}}{E_{drift}}$$

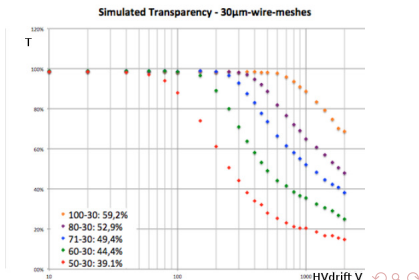
- **basso R**: la maggior parte delle linee di campo di drift finisce sulla mesh → **bassa transparency**
- **alto R**: la maggior parte delle linee di campo di drift arriva sulle strip → **alta transparency**
- **alto R**: la maggior parte delle linee di campo di amplificazione va sulla mesh → **veloce svuotamento del rivelatore dagli ioni positivi**

Simulazione della T in funzione di HV_{drift} con HV_{amp} fissata per diverse tipologie di mesh:

con mesh con distanza tra i fili maggiore si raggiunge il plateau di T a valori maggiori di HV_{drift} , quindi a R minore. Per $R > 50 - 100$ si ha $T > 95\%$ per tutte le mesh

La **carica raccolta (Q)** dipende dalla combinazione di attachment (A), transparency (T) e guadagno (G):

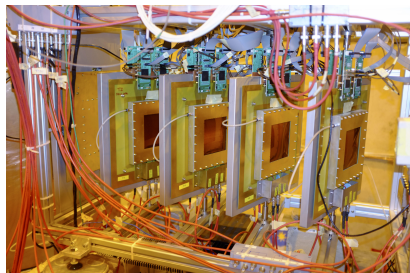
$$Q = q_e \cdot N_e \cdot (1 - A) \cdot T \cdot G$$



Studio delle prestazioni delle camere MicroMegas per l'upgrade di ATLAS

La Collaborazione ha portato avanti un programma di analisi delle prestazioni delle camere MM per la NSW di ATLAS usando dati raccolti in test beam con diversi prototipi di camere in diverse condizioni di lavoro per:

- misurare proprietà di base come **guadagno** e **transparency** e trovare il punto di lavoro ottimale (HV_{amp} e HV_{drift})
- caratterizzare le performance in termini di **efficienza** e **risoluzione**
- verificare le prestazioni in campo magnetico
- sviluppare e ottimizzare la strategia e il software di ricostruzione delle tracce



gap	5 mm
gas mixture	Ar : CO ₂ 93 : 7
amp gap	128 μm
HV_{amp}	$\simeq 570$ V
HV_{drift}	300 V

bulk: tecnologia originale per camere piccole, mesh integrata nei pillars nel pannello di readout

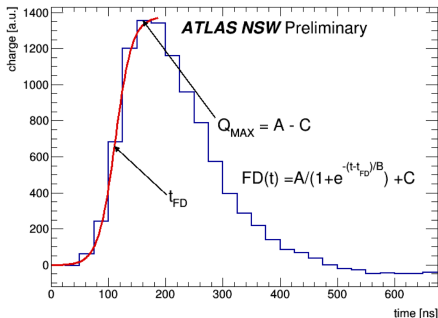
floating mesh: nuova tecnologia per le camere finali di grandi dimensioni, mesh appoggiata sui pillars e tenuta in posizione dalla tensione meccanica e dalle forze elettrostatiche

Camera	Tipologia	Dimensioni [cm ²]	Letture	Strip pitch [μm]
T	bulk	10 \times 10	1 coordinata	400
Tmm	bulk	10 \times 10	2 coordinate	250
ExMe	floating mesh	40 \times 40	1 coordinata	450
MSW	floating mesh, multilayer	70 \times 70	1 coordinata	415

Nelle Micromegas al passaggio di una particella carica si hanno gruppi di strip accese

Cluster = gruppo di almeno due strip consecutive accese

Per ogni **strip** si misura la **carica** raccolta e il **tempo** di arrivo del segnale



Segnale di una strip

letto con elettronica di lettura APV25 che fornisce il valore della carica raccolta in funzione del tempo con campionamento ogni 25 ns

→ **fit con funzione Fermi-Dirac sul fronte di salita dei segnali delle strip**

per ricavare la carica raccolta Q_{max} , il tempo di arrivo del segnale t_{FD} (punto di flesso della Fermi-Dirac) e il tempo di salita del segnale B
($\simeq 6B$ dal 5% al 95% dell'ampiezza, tempo tipico $\simeq 100$ ns)

Misura della posizione

Le camere MM verranno usate per la ricostruzione delle tracce dei muoni nella NSW di ATLAS

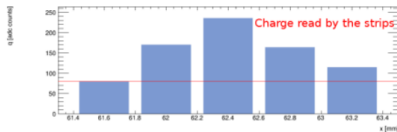
La misura di posizione può essere fatta con due diversi metodi

Centroide di carica:

posizione del cluster ricostruita calcolando il baricentro della carica raccolta dalle strip

$$x_i = \text{pitch} \cdot \text{strip index}$$

$$x_{\text{centroid}} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot q_i}{\sum_{i=1}^N q_i}$$



Centroide di carica: migliore per tracce circa perpendicolari che generano cluster piccoli

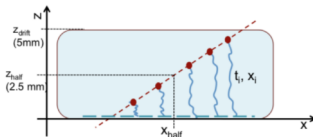
μ TPC: migliore per tracce inclinate che generano cluster grandi

μ TPC:

ricostruzione locale della traccia nella gap di drift tramite la misura dei tempi di arrivo dei segnali delle strip e l'uso della velocità di drift degli elettroni ($V_d = 4.7 \text{ cm}/\mu\text{s}$)

$$x_i = \text{pitch} \cdot \text{strip index}$$

$$z_i = V_{\text{drift}} \cdot t_i \rightarrow z_{\text{fit}} = mx + q$$

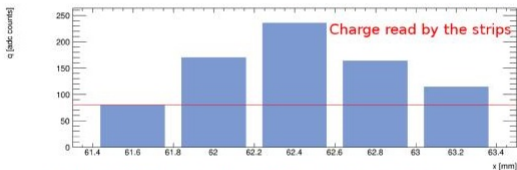
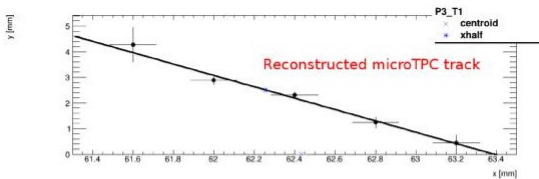


misura della posizione del cluster data dalla coordinata x_{half} che corrisponde tramite il fit all'altezza a metà gap z_{half} :

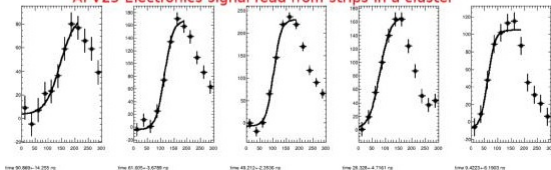
$$x_{\text{half}} = \frac{z_{\text{half}} - q}{m} = \frac{2.5 \text{ mm} - q}{m}$$

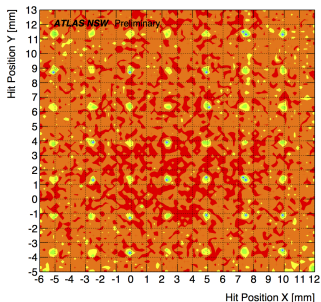
Event display di un cluster composto da 5 strip

ATLAS Work in Progress



APV25 Electronics signal read from strips in a cluster



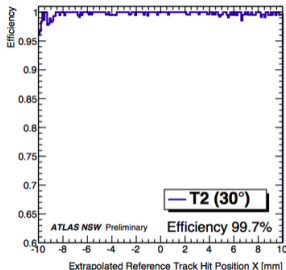
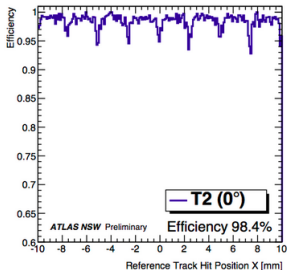


Usando un telescopio di almeno tre camere si possono fare **misure di efficienza** di una quarta camera

Mapa 2D della posizione dei cluster ricostruiti per tracce perpendicolari su una camera Tmm (lettura di due coordinate)

⇒ visibile la struttura dei pillars nei punti di inefficienza ogni 2.5 mm

Efficienza di cluster in funzione della posizione estrapolata per tracce perpendicolari e inclinate di 30° su una camera T

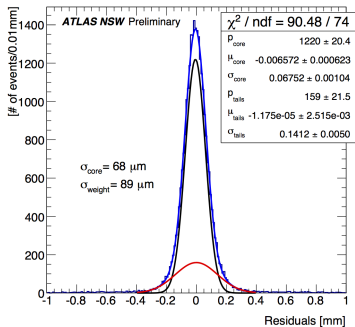


⇒ la struttura dei pillars influisce sull'efficienza solo per tracce perpendicolari e non per tracce inclinate

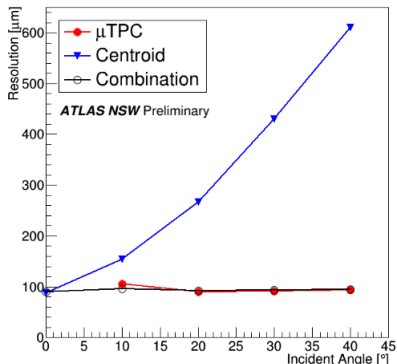
⇒ Nel punto di lavoro scelto ($HV_{amp} \simeq 550 \text{ V}$ $HV_{drift} = 300 \text{ V}$ $R \simeq 72$) $\epsilon \simeq 1$ indipendentemente dalla posizione

Risoluzione misurata tramite la differenza tra le posizioni misurate da due camere MM vicine

Fit bigaussiano sulla distribuzione dei residui per tenere conto delle code

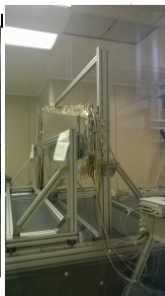
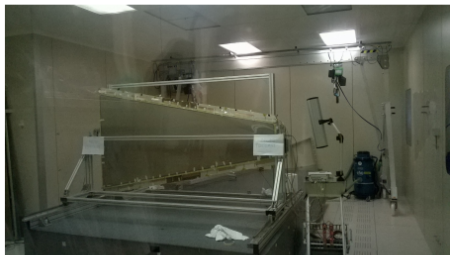


Single Plane Spatial Resolution



- **Centroide di carica**: risoluzione migliore per tracce perpendicolari che generano cluster di piccole dimensioni
- **μTPC** : risoluzione migliore per tracce inclinate che generano cluster con maggior numero di strip
- Nella NSW di ATLAS le tracce avranno **angoli di inclinazione $8^\circ - 32^\circ$**
 \Rightarrow con la combinazione dei due metodi **risoluzione $\simeq 100 \mu\text{m}$** in tutto l'intervallo

- Effettuati numerosi test su prototipi di camere di piccole dimensioni ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) e grandi dimensioni (fino a $1 \times 0.5 \text{ m}^2$), sempre più vicini alla configurazione finale in struttura e dimensioni, anche in presenza di campo magnetico
- I risultati ottenuti mostrano prestazioni che soddisfano le richieste per la NSW di ATLAS: **risoluzione spaziale di $\simeq 100 \mu\text{m}$ e efficienza superiore al 97% per piano**
- Attualmente la Collaborazione è impegnata nella **costruzione del Modulo-0**, la prima camera con le caratteristiche e le dimensioni che avranno le camere della NSW di ATLAS, con cui verranno raccolti dati nei prossimi test beam per verificarne le prestazioni



Contributo italiano alla
NSW di ATLAS:
costruzione di 1/4 del
rivelatore,
32 quadrupletti di tipo
SM1 con superficie di
 $\simeq 2 \text{ m}^2$

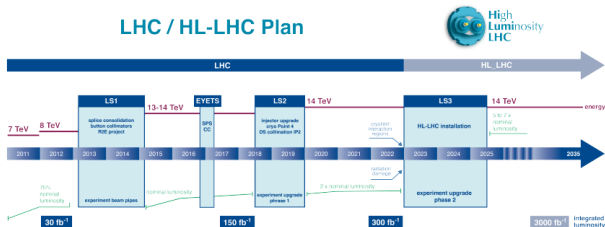
⇒ camera in fase di
assemblaggio ai LNF

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

Back-up slides

Programma di lavoro di LHC e upgrade di ATLAS

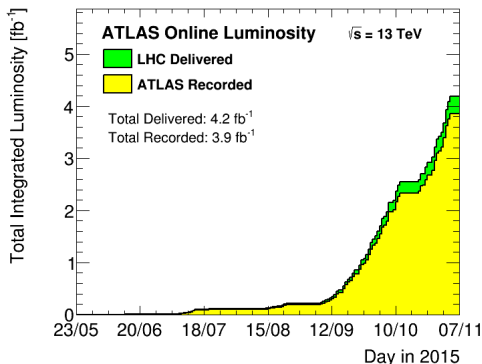
LHC ha iniziato a lavorare nel 2010 e il suo programma di lavoro prevede diverse fasi di aggiornamento per permettere agli esperimenti di estendere il programma di fisica



- 2010-2012: **Run I** $E_{CM} = 7 - 8 \text{ TeV}$, $L = 6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ → **scoperta del bosone di Higgs**
- **oggi** → 2015-2018: **Run II** $E_{CM} = 13 - 14 \text{ TeV}$, $L = 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, energia e luminosità di design
- 2018-2019: **LS2** preparazione per il Run III
- 2020-2022: **Run III** $L = 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ⇒ 2025: **HL-LHC**: $L = 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Aumento di luminosità ⇒ **LS2**: Sostituzione della prima stazione dello spettrometro per muoni in avanti dell'esperimento ATLAS (Small Wheel) per mantenere le attuali prestazioni di trigger e tracciamento in condizioni di alte rate di particelle

⇒ Le camere Micromegas verranno installate nella New Small Wheel del rivelatore ATLAS per sostituire le attuali camere di tracciamento (MDT e CSC)

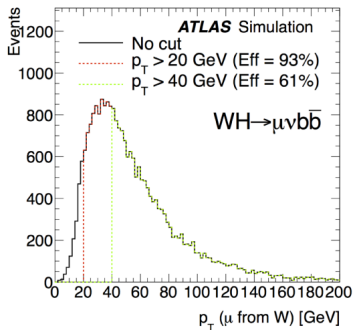
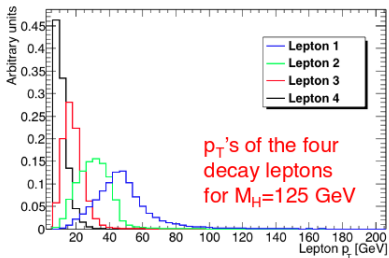


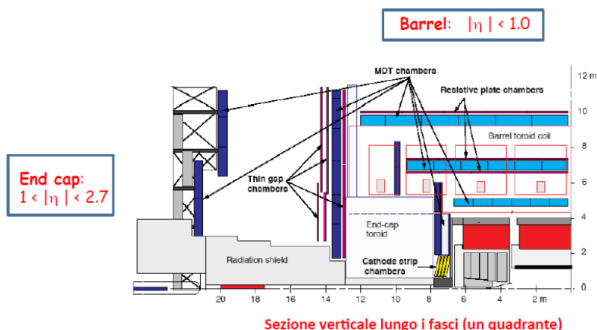
Ci si aspetta che ATLAS raccolga complessivamente una luminosità integrata di $\simeq 3000 \text{ fb}^{-1}$

L1MU threshold (GeV)	Level-1 rate (kHz)
$p_T > 20$	60
$p_T > 40$	29
$p_T > 20$ barrel only	7
$p_T > 20$ with NSW	22

p_T dei muoni dalla produzione associata WH con decadimento $WH \rightarrow \mu\nu b\bar{b}$

p_T dei muoni dal decadimento $H \rightarrow 4\mu$

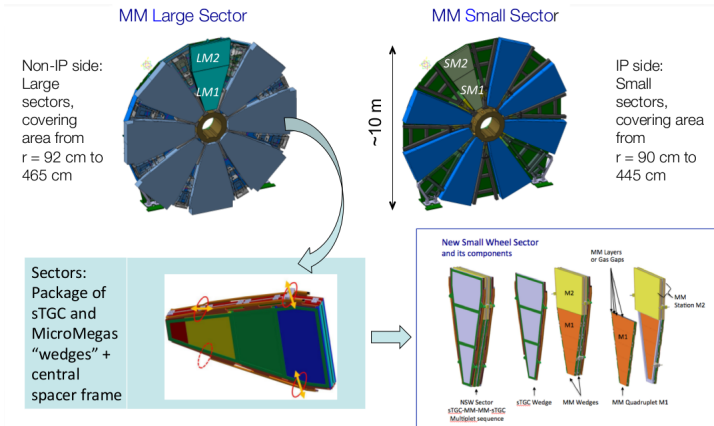


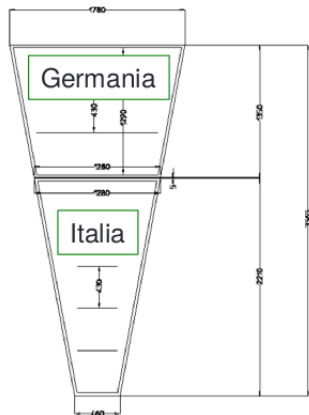


- rivelatori posti su tre dischi (Wheel) perpendicolari all'asse dei fasci
- esterni al magnete toroidale → forniscono le stazioni di misura dell'impulso tramite la misura dell'angolo di deviazione della traccia
- camere MDT per le misure di precisione nelle tre Wheel
- TGC sui lati interno ed esterno della Wheel centrale per il trigger
- CSC nella Small Wheel per le misure di precisione ad angoli piccoli

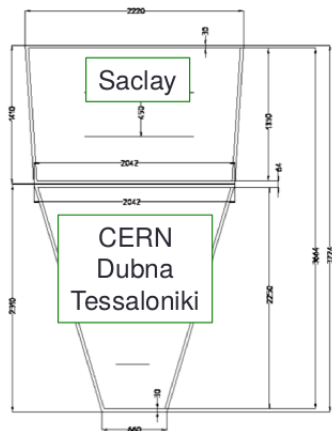
Progetto della New Small Wheel

- 8 settori grandi dal lato NON-IP
- 8 settori piccoli dal lato IP
- Micromegas divise in LM1 e LM2 per i settori grandi e SM1 e SM2 per i settori piccoli





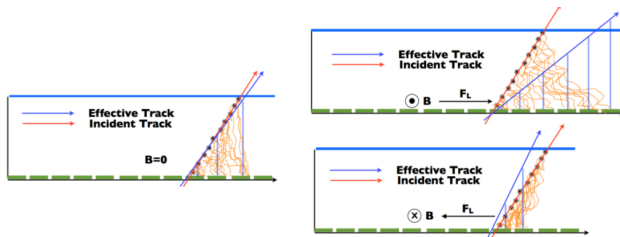
Small sectors



Large sectors

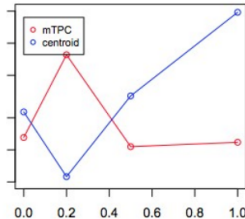
Funzionamento in campo magnetico

Le camere Micromegas nella NSW di ATLAS dovranno operare in un campo magnetico di intensità fino a 0.3 T

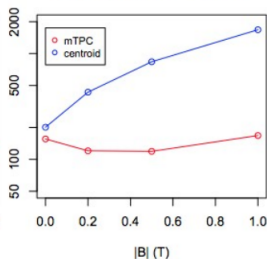


- angolo di Lorentz e variazione di V_{drift}
- bias sulla misura di posizione μTPC e centroide
- configurazione defocusing e focusing

Resolution (-10 deg. data)



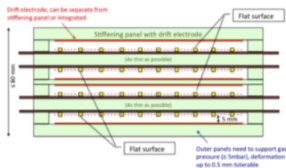
Resolution (+10 deg. data)



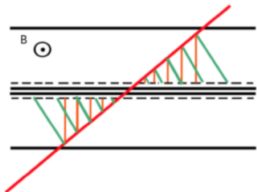
Configurazione delle Micromegas nella New Small Wheel

camere composte da 4 multilayers: 2 di sTGC e 2 di MM nella configurazione sTGC-MM-MM-sTGC

in ogni multipletto ci saranno quattro piani di rivelatori



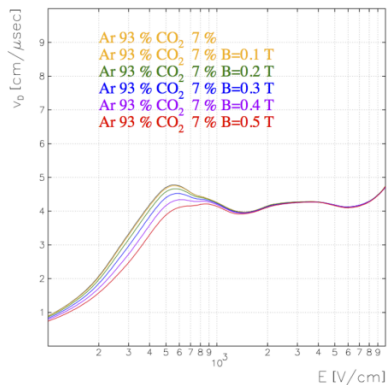
raggruppati in due coppie di rivelatori posti in configurazione back-to-back:



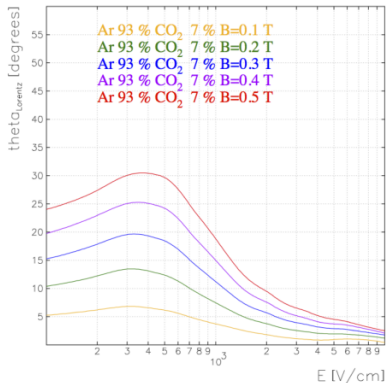
così la deviazione degli elettroni dovuta al campo magnetico avviene in direzione opposta nelle due camere e si compensa
→ combinando le misure delle due camere la posizione misurata non risulta deviata dal campo magnetico

Vdrift e angolo di Lorentz

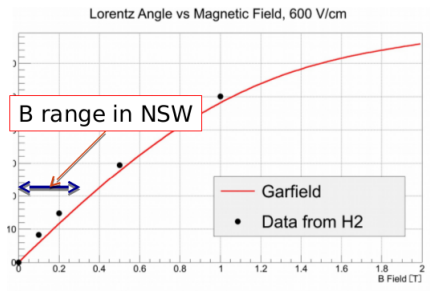
Drift velocity along E



Lorentz-angle



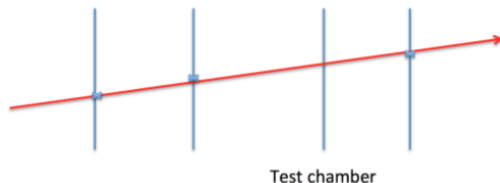
Angolo di Lorentz misurato



→ buon accordo con quanto atteso dalle simulazioni

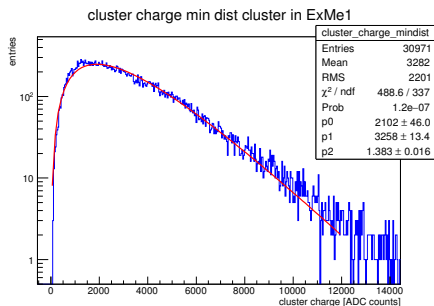
Si usa un telescopio costituito da almeno 3 camere per selezionare gli eventi con traccia:

- esattamente 1 cluster nelle tre camere
- traccia sulla posizione dei centroidi delle camere esterne
- cluster nella camera interna vicino alla posizione estrapolata (entro $\pm 5\sigma$)



Tre tipi di efficienza:

- Efficienza hardware: frazione di eventi selezionati con almeno una strip accesa
- Efficienza di cluster: frazione di eventi selezionati con almeno un cluster ricostruito
- Efficienza software: frazione di eventi selezionati con un cluster ricostruito vicino alla posizione estrapolata (ad es. entro $\pm 5\sigma$)



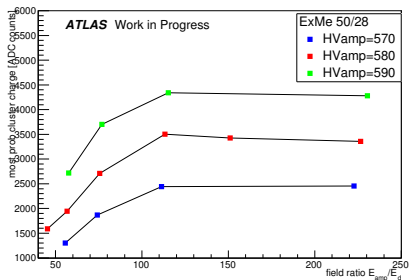
Fit con funzione Polya sulla distribuzione di carica dei cluster:

$$f_P \left(\frac{Q}{\langle Q \rangle}, \beta \right) = C \left(\frac{Q}{\langle Q \rangle} \right)^\beta e^{-(1+\beta) \frac{Q}{\langle Q \rangle}}$$

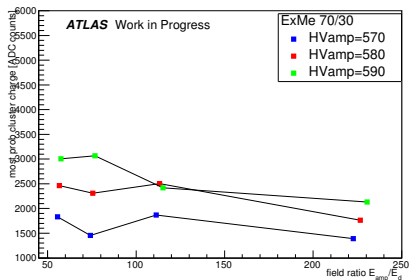
per ricavare il valore medio $\langle Q \rangle$, il valore più probabile $Q_{mostprob} = \langle Q \rangle \cdot \frac{\beta}{1+\beta}$ e le fluttuazioni relative di guadagno $f = \frac{1}{1+\beta}$

Studio in funzione di HV_{amp} e HV_{drift} con la camera ExMe

most prob cluster charge ExMe 50/28



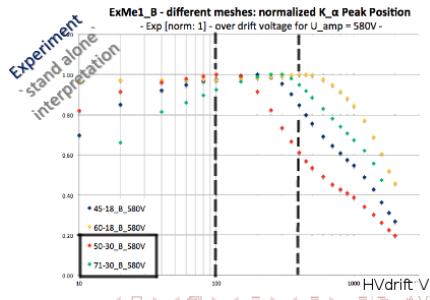
most prob cluster charge ExMe 70/30



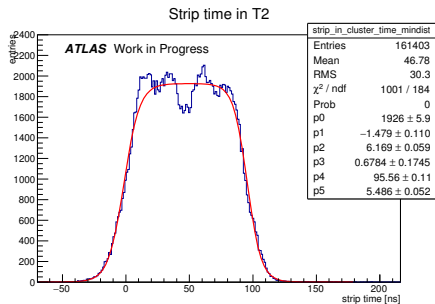
- carica maggiore con HV_{amp} maggiore → G maggiore
- mesh 50/28: la carica aumenta e raggiunge un plateau all'aumentare di R
- mesh 70/30: la carica diminuisce all'aumentare di R

⇒ andamento della carica in funzione di R legato alla combinazione di T e A: entrambi aumentano con R ma sono dominanti in regioni diverse, T domina a basso R e A domina ad alto R

⇒ la carica aumenta e poi diminuisce con R, ma in regioni diverse con diverse mesh



Distribuzione dei tempi misurati dalle strip



Fit con funzione bi-Fermi-Dirac sulla distribuzione dei tempi misurati dalle strip:

$$f_{bFD} = \frac{A}{\left(1 + e^{\frac{-(t-T_0)}{S_0}}\right) \left(1 + e^{\frac{(t-T_{max})}{S_{max}}}\right)} + B$$

per ricavare il tempo minimo T_0 , il tempo massimo T_{max} e le relative slope di salita e discesa della distribuzione S_0 e S_{max} che sono legate alla risoluzione temporale della camera

La misura del tempo minimo T_0 viene usata per la calibrazione dei tempi di tutte le camere

Dalla misura della larghezza della distribuzione si può misurare la velocità di drift degli elettroni:

$$V_{drift} = \frac{d}{T_{max} - T_0} = \frac{5 \text{ mm}}{T_{max} - T_0}$$

Irradiation with	Charge Deposit (mC/cm ²)	HL-LHC Equivalent	Results
X-Ray	225	5 HL-LHC years equivalent	No evidence of ageing
Neutron	0.5	10 years HL-LHC years equivalent	No evidence of ageing
Gamma	14.84	10 years HL-LHC years equivalent	No evidence of ageing
Alpha	2.4	5 x 10 ⁸ sparks equivalent	No evidence of ageing