

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Ottimizzazione della miscela di gas in un rilevatore a muoni per tomografia muonica basato su tubi a deriva

Relatore

Prof. Marco Zanetti

Correlatore

Dr. Paolo Checchia

Laureando

Luca Castelli

Anno Accademico 2018/2019

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Premesse e obbiettivo	1
1.2	Apparato sperimentale	1
2	Analisi Preliminare	3
2.1	Miscela Ar-Co ₂ 85-15 %	3
2.2	Rumore	4
2.3	Mixaggio manuale	5
2.4	Miscela Ar-Co ₂ 90-10 %	6
2.5	Miscela Ar-Co ₂ 95-5 %	8
2.6	Miscela multigas	8
2.7	Miscela multigas pronta	10
3	Analisi Finale	13
3.1	Acquisizioni con trigger	13
3.2	Ricostruzione delle tracce	15
3.3	Acquisizioni senza trigger esterno	16

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Premesse e obiettivo

Lo scopo di questa tesi è ottimizzare la miscela di gas all'interno di una camera a deriva per tomografia muonica[1][6]. La tomografia muonica è una tecnica di indagine che sfrutta i muoni provenienti dai raggi cosmici per generare immagini tridimensionali di oggetti contenuti all'interno di materiali spessi. Un chiaro esempio è lo studio di contenitori di stoccaggio di combustibile nucleare esausto. Il fatto che tale tecnica sfrutti muoni cosmici ha un'importante conseguenza: a differenza di quanto accade, ad esempio, in un collisore di particelle, non si hanno informazioni esterne sull'istante preciso in cui il muone attraversa il rivelatore. Tale istante, detto t_0 deve essere ricavato tramite un processo di fit, poiché il rivelatore studiato è "auto-trigger", ovvero non c'è un sistema hardware che registri il passaggio del muone e lanci l'acquisizione dei dati. Per questa ragione siamo interessati a trovare una miscela di gas che renda uniforme la velocità di deriva degli elettroni prodotti tramite ionizzazione. In queste condizioni la determinazione del t_0 dovrebbe essere più semplice e precisa.

1.2 Apparato sperimentale

L'acquisizione dei dati si è svolta presso l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare a Legnaro (PD). Il rivelatore oggetto di questa tesi, denominato Camera64, è una camera a deriva composta da otto layer ciascuno avente otto celle cilindriche di raggio 5 cm e altezza 2 m, inizialmente saturo di una miscela Ar-CO₂ 85-15%. Dato il volume considerevole della camera64 è stato utilizzato un ulteriore rivelatore, denominato Camera18, avente diciotto celle cilindriche sempre di raggio 5 cm, ma di lunghezza 1 m, al fine di poter sostituire la totalità del volume di gas in breve tempo. Infatti il volume della Camera18 è circa 1/7 di Camera64 e, pertanto, tutti gli studi preliminari sono stati eseguiti su Camera18. I rivelatori sono mostrati in figura 1.1.



Figura 1.1: Camera18 e Camera64

I fili che attraversano i tubi di Camera18 sono di due diversi spessori. In figura 1.2 vengono mostrati in blu i così detti *thick-wires*, spessi $100\ \mu\text{m}$ e in rosso i *thin-wires*, da $75\ \mu\text{m}$. Tale differenza è dovuta al fatto che in fase di costruzione sono stati studiati entrambi per vedere quale spessore garantiva le prestazioni migliori. La scelta è ricaduta su i *thick-wires*, pertanto tutta l'analisi fatta su Camera18 fa riferimento a loro.

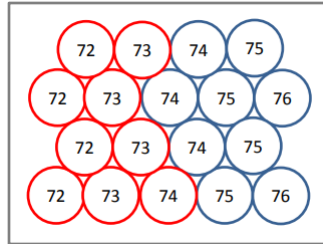


Figura 1.2: *Suddivisione fili Camera18*

Le due camere sono state poste tra due CamereCMS, ovvero le camere a deriva utilizzate dall'esperimento CMS[2]. Tali rilevatori sono stati usati come trigger, poiché non si era interessati alle prestazioni della Camera64, già studiate in precedenza, ma alla risposta della stessa in relazione alla miscela di gas al suo interno. Il potenziale sul catodo è messo a terra e quello sull'anodo è controllato da remoto. In particolare è possibile settare un potenziale sugli anodi di Camera64, uno su quelli di Camera18. È molto importante controllare e settare adeguatamente i potenziali per avere una risposta ottimale dalla camera. Per tutta questa tesi i potenziali saranno indicati o come $V_{\text{Camera64}} - V_{\text{Camera18}}$, indicando il potenziale impostato rispettivamente per Camera64 e Camera18. Il funzionamento delle camere segue quello di una camera a deriva standard. Il passaggio del muone all'interno dei tubi ionizza la miscela di gas, producendo in particolare elettroni che, grazie al campo elettrico, derivano verso il filo. Essendo il campo, per una cella come quelle in esame, proporzionale a $1/r$, con r distanza dal centro del filo, in prossimità di questo gli elettroni acquistano tanta energia da ionizzare a loro volta il gas, dando luogo al fenomeno detto "effetto valanga" che genera il segnale acquisito¹. Uno schema elementare è riportato in figura 1.3.

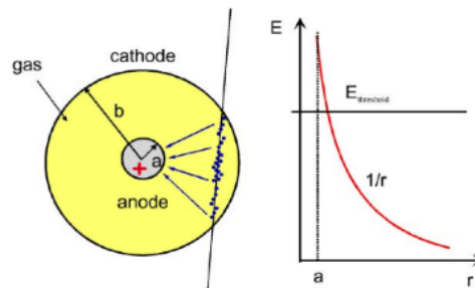


Figura 1.3: *Processo di ionizzazione e andamento del campo elettrico nella cella*

La descrizione del set-up si conclude citando le miscele di gas utilizzate. In un primo momento si sono studiate miscele di Ar-CO₂ in diverse percentuali, settate manualmente grazie all'ausilio di flussimetri. Successivamente è stato aggiunto l'azoto e in contemporanea la bombola di Argon è stata sostituita con una miscela Ar-CH₄ 95-5%. Infine, per ovviare ad eventuali errori in calibrazione dei flussimetri, si è usata una bombola con la miscela Ar (90.5%), CH₄ (5%), CO₂ (3%) e N (1.5%).

¹In realtà il processo di generazione del segnale è più complicato e per averne una descrizione più completa si può consultare la presentazione di Manfred Krammer[3]

Capitolo 2

Analisi Preliminare

In questo capitolo viene mostrata la prima parte dello studio svolto al fine di spiegare la metodologia di lavoro seguita durante tutto l'esperimento. Saranno mostrati e commentati i risultati ottenuti in diverse condizioni di flusso e potenziale applicato. Tutti i risultati mostrati sono riferiti alla Camera18. La miscela di partenza è una composizione di Ar-CO₂. L'Argon è stato scelto in quanto gas nobile, infatti, l'effetto valanga sopra citato in questo tipo di gas si verifica per campi elettrici molto minori rispetto ad una molecola complessa. I gas nobili, tuttavia, danno luogo a fenomeni rumorosi, discussi più in dettaglio in sezione 2.2., pertanto, è necessario introdurre un gas poliatomico, quale la CO₂ per ridurre questi effetti. ¹ A meno di diverse indicazioni, tutti i plot mostrati fanno riferimento a Camera18.

2.1 Miscela Ar-Co₂ 85-15 %

Il set-up iniziale dell'esperimento consisteva nelle due camere sature della miscela sopra citata preparata da un produttore specializzato. In questa configurazione possiamo ricavare la distanza dell'elettrone prodotto a seguito della ionizzazione del gas in funzione del tempo con la seguente formula, ricavata in diversi anni di studio del detector:

$$d(t) = p[1] \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{t - p[0]}{p[2]}\right) \right) + p[3] \cdot (t - p[0]) + p[4] \cdot (t - p[0])^2 \quad (2.1)$$

Ove $p[i]$ sono i parametri ricavati tramite fit della di questa funzione. Derivando (2.1) otteniamo l'espressione per la velocità di deriva:

$$v_d(t) = -\frac{p[1]}{p[2]} \cdot \left(\exp\left(\frac{t - p[0]}{p[2]}\right) \right) + p[3] + 2p[4] \cdot (t - p[0]) \quad (2.2)$$

Affinché il programma usato in questa parte dell'esperimento restituisca i parametri cercati è necessario dargli dei valori ragionevoli in input, che andranno poi corretti iterativamente fino ad ottenere la risoluzione migliore. Lo stesso programma che esegue il fit restituisce due grafici di particolare interesse riportati qui sotto. In 2.1 vi è l'istogramma che mostra la risoluzione della Camera18, ottenuto misurando la differenza in posizione tra la traccia ricostruita dalle CamereCMS, considerata in buona approssimazione come l'effettiva traccia del muone, e la traccia ricostruita usando la formula (2.2), con i parametri di fit dati in input.

¹Per ulteriori dettagli consultare l'articolo [...]ARGON-METHANE GAS DRIFT CHAMBER[5].

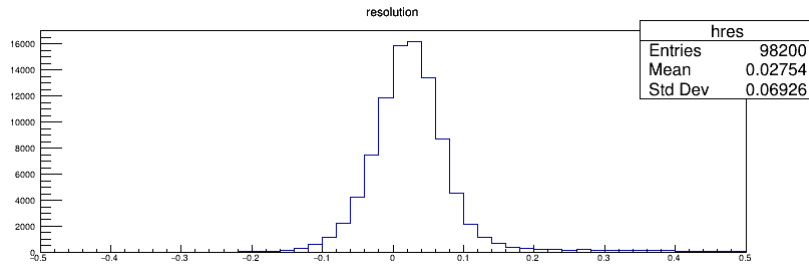


Figura 2.1: Differenza in posizione tra traccia ricostruita da CamereCMS e Camera 18 per miscela Ar-CO₂ 85%-15% a 3100 V

Sempre in figura sono mostrati media (mean) e risoluzione (*Std Dev*). Ci aspetteremmo di avere l'istogramma centrato in 0, tuttavia il piccolo spostamento non è di particolare interesse, poiché evidenzia semplicemente un errore di offset nella posizione nominale dei fili data al programma di analisi. Vediamo che in questo caso $\sigma = (693 \pm 2) \mu\text{m}$, valore troppo elevato che ci impedisce di affermare che il fit è buono. Tuttavia tale risultato non preoccupa molto, poiché in questo passaggio si è interessati ad uno studio semi-qualitativo, tanto che numerosi fattori che creano rumore, illustrati nella sezione successiva, non sono stati eliminati. Invece, in figura 2.2 è mostrato il grafico $d(t)$ su t e in rosso vi è il fit eseguito dal programma, cui parametri sono mostrati in tabella 2.1

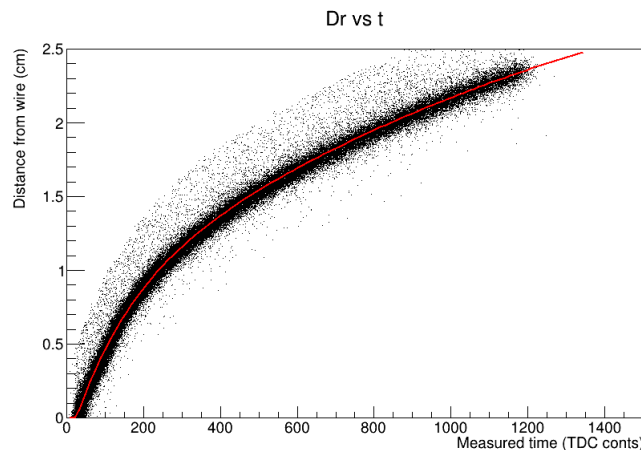


Figura 2.2: Distanza su tempo con fit esponenziale per miscela Ar-CO₂ 85%-15% a 3100 V

Parametro	Valore	Unità di misura
p[0]	26.01 ± 0.09	s
p[1]	0.84 ± 0.02	cm
p[2]	144 ± 3	s
p[3]	$(2.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$	cm/s
p[4]	$(-4.3 \pm 0.5) \cdot 10^{-7}$	cm/s ²

Tabella 2.1: Parametri fit

2.2 Rumore

In figura 2.2 si nota subito l'alone di punti al di sopra della curva di interesse. Si tratta di rumore dovuto principalmente a due cause: i raggi δ prodotti sul catodo e i raggi UV prodotti in prossimità del filo. I primi non sono altro che elettroni prodotti a seguito del passaggio del muone, esattamente come gli elettroni prodotti per ionizzazione. La sostanziale differenza sta nel fatto che questi vengono prodotti con un momento sufficiente a percorrere un tratto all'interno della cella, andando così a

ionizzare il gas. Se la direzione del momento punta verso il centro del tubo si avrà che gli elettroni dovuti a questa seconda ionizzazione giungeranno prima sull'anodo, producendo un segnale in anticipo rispetto a quello di interesse. Uno schema del fenomeno è riportato in figura 2.3.

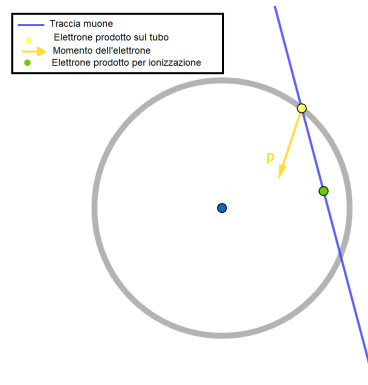


Figura 2.3: Produzione di elettrone δ con momento p non nullo

Questa è la causa principale di rumore e, come ci si aspetta, compare solo al di sopra della curva di fit. La seconda causa citata è dovuta ai fotoni UV prodotti in prossimità del filo. Questi possono colpire l'alluminio del tubo e dar luogo a effetto fotoelettrico, producendo ulteriori elettroni che poi derivano verso il filo generando segnale. Viene qui riportato un plot prodotto per analizzare il fenomeno.

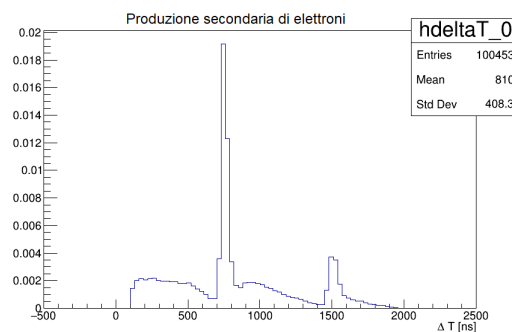


Figura 2.4: Differenza in tempo tra segnali registrati dallo stesso tubo. Si notano i picchi dovuti a emissione per effetto fotoelettrico dal tubo (vedi testo)

Si nota un tempo morto dopo lo zero, dovuto al tempo in cui l'acquisizione rimane inattiva dopo l'arrivo del segnale. Questo raccoglie tutti gli elettroni prodotti per effetto fotoelettrico. A loro volta, i fotoelettroni, in prossimità del tubo, possono provocare l'emissione di UV e, di conseguenza, dar luogo nuovamente a effetto fotoelettrico. Il picco sulla destra in figura 2.4 rappresenta proprio i così detti elettroni terziari. Questo fenomeno, seppur presente, non influisce in maniera significativa sui dati raccolti, in quanto si tratta di avere semplicemente elettroni secondari che giungono in ritardo sul filo. Eliminare i segnali di rumore non è un passaggio semplice ed essendo interessati, in questa fase dell'esperimento, solo ad un'analisi di massima, non abbiamo quantificato in maniera rigorosa il rumore dovuto alle cause sopra citate. Tale analisi è stata riservata per lo studio di Camera64 con la miscela di gas finale.

2.3 Mixaggio manuale

Dopo aver raccolto i dati con la configurazione precedente abbiamo scelto di utilizzare due bombole di Ar e CO₂ distinte, in modo da controllare la calibrazione dei flussimetri da utilizzare per la miscela finale e per poter miscelare in diverse percentuali i due gas. Una prima acquisizione di dati è stata lanciata tenendo come miscela Ar-CO₂ 85-15 % in configurazione denominata "fast-flux", ovvero il

sistema di flussimetri immetteva nella camera la miscela di gas con velocità maggiore di un l/min. Una successiva acquisizione è stata presa in configurazione "slow-flux", ove il flusso non superava i 0.05 l/min. Vengono riportati i plot della risoluzione in figura 2.5, realizzati con i parametri di input corretti dopo due iterazioni.

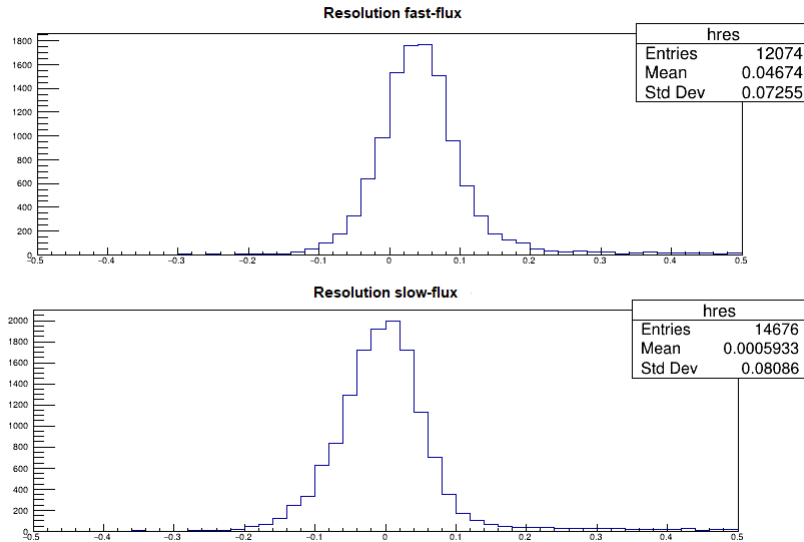


Figura 2.5: Differenza tra traccia ricostruita da CamereCMS e Camera 18 per miscela Ar-CO₂ 85%-15% in mixaggio manuale a 3100 V fast-flux in alto e slow-flux in basso

Si nota immediatamente un peggioramento della risoluzione, particolarmente significativo nella seconda configurazione. Il risultato ha contraddetto le nostre aspettative e ci ha portato a ipotizzare la presenza di un errore nella calibrazione dei flussimetri. Un'altra ipotesi avanzata è che in *slow-flux* i due gas non si mischiassero a sufficienza. Non è stato possibile testare le ipotesi, pertanto abbiamo deciso di procedere acquisendo sempre una serie di dati per entrambe le configurazioni di ogni nuova miscela testata durante la fase preliminare e osservare i risultati non curanti dei possibili errori sistematici. L'approccio scelto per la fase conclusiva dell'esperimento, ovviamente, non poteva essere altrettanto approssimativa e sarà spiegato più avanti in questa tesi.

2.4 Miscela Ar-CO₂ 90-10 %

La seconda miscela testata non è altro che una variazione della miscela di partenza. Ci si aspetta che aumentando la percentuale di Ar rispetto a quella di CO₂ il comportamento delle Camere tenda a quello desiderato. Per quanto detto a inizio capitolo non si può, tuttavia, usare una miscela di Argon puro, pertanto ci siamo limitati ad un aumento del 5% di Argon nella miscela.

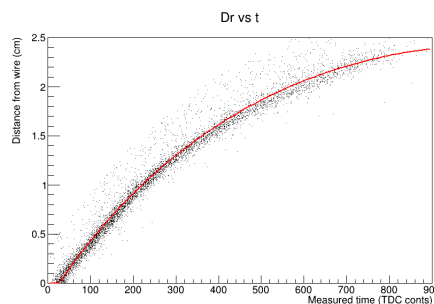


Figura 2.6: Distanza su tempo per miscela Ar-CO₂ 90 – 10% a 3100 V

Figura 2.6 mostra chiaramente la presenza di punti sopra la curva di fit e nella parte destra del plot che non sono riconducibili al passaggio di un muone in un tubo. L'ipotesi che tali punti siano dovuti a scariche interne ha avuto riscontro, infatti abbassando il potenziale da 3100 V a 2900 V otteniamo risultati migliori, riportati in figura 2.7 e in figura 2.8.

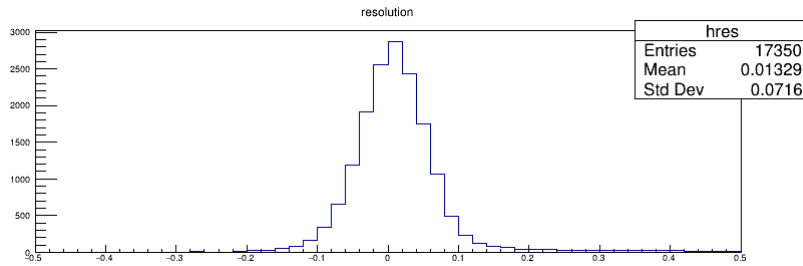


Figura 2.7: Differenza tra traccia ricostruita da CamereCMS e Camera 18 per miscela Ar-CO₂ 90%-10% in mixaggio manuale a 2900 V

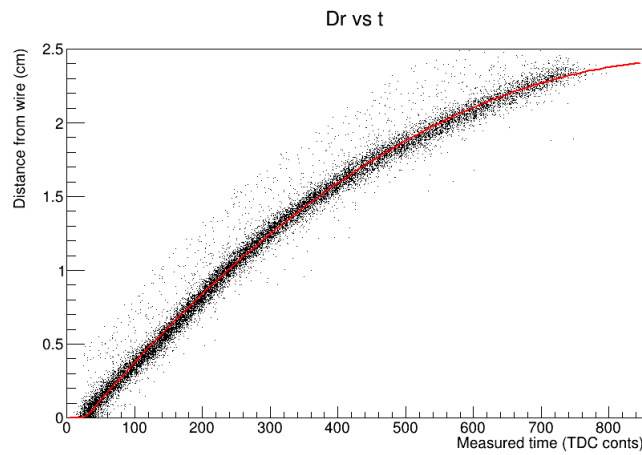


Figura 2.8: Distanza su tempo per miscela Ar-CO₂ 90 – 10% a 2900 V

La risoluzione è buona per il tipo di analisi svolta e il plot in figura 2.8 non mostra la presenza di punti palesemente di non interesse a meno del rumore spiegato sopra. I risultati sono stati soddisfacenti anche in relazione al fatto che sono stati acquisiti in configurazione *slow-flux*, pertanto affetti da errori sistematici non trascurabili. Si vede inoltre che con questa miscela di gas la relazione spazio-tempo mostra un andamento che si avvicina di più alla linearità cercata. Per avere un'idea quantitativa oltre che qualitativa vengono riportati i parametri di fit ricavati.

Parametro	Valore	Unità di misura
p[0]	26.8 ± 0.6	s
p[1]	1.357 ± 0.005	cm
p[2]	3988 ± 4	s
p[3]	$(3.722 \pm 0.002) \cdot 10^{-3}$	cm/s
p[4]	$(-2.19 \pm 0.02) \cdot 10^{-6}$	cm/s ²

Tabella 2.2: Parametri fit per miscela Ar-CO₂ 90 – 10%

Confrontando questi parametri con quelli riportati in tabella 2.1 si nota come il termine esponenziale sia fortemente soppresso, mentre il termine lineare cresce dell'85%. Ottenendo risultati in linea con le aspettative abbiamo scelto di aumentare ulteriormente la percentuale di Ar nella miscela a discapito della CO₂.

2.5 Miscela Ar-Co₂ 95-5 %

La terza miscela testata ci ha avvicinato notevolmente al risultato cercato, tanto da non giustificare l'andamento esponenziale evidenziato nelle formule (2.1) e (2.2). Pertanto è stato necessario modificare la funzione di fit da (2.2) alla seguente:

$$d(t) = p[1] \cdot (t - p[0]) + p[2] \cdot (t - p[0])^2 + p[3] \cdot (t - p[0])^3 \quad (2.3)$$

Da cui segue l'espressione per la velocità di deriva:

$$v_d = p[1] + 2p[2] \cdot (t - p[0]) + 3p[3](t - p[0])^2 \quad (2.4)$$

Tali funzioni non saranno più modificate per l'intera durata dell'esperimento. Per questa miscela abbiamo preso due set di dati, uno in configurazione *fast-flux* e uno in configurazione *slow-flux*, per poi confrontare i risultati. Le risoluzioni sono rispettivamente: $\sigma = (689 \pm 6) \mu\text{m}$ e $(736 \pm 4) \mu\text{m}$. Osservando questi valori abbiamo avanzato l'ipotesi che il problema del flusso sia indipendente dalla miscela di gas utilizzata. A questo punto è necessario sottolineare il fatto che le acquisizioni in *slow-flux* sono necessarie, perché abbiamo acquisito dati per diverse notti e se avessimo fatto tali acquisizioni in *fast-flux* avremmo consumato sei volte il gas utilizzato, esaurendo quindi bombole da rimpiazzare, aumentando costi e, soprattutto, la durata dell'esperimento. Ora, è vero anche che non ha senso risparmiare per acquisire dati inutili o affetti da errori sistematici troppo grandi, tuttavia non è questo il caso. La risoluzione è visibilmente migliore, ma per lo studio svolto in questa parte dell'esperimento è sufficiente, la risposta del gas è la stessa e i parametri di fit sono abbastanza compatibili tra loro, come si può evincere dalla tabella 2.3.

Parametro	Valore _{f-f}	Valore _{s-f}	
p[0]	30 s	30 s	-
p[1]	$(3.68 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \text{cm/s}$	$(3.26 \pm 0.04) \cdot 10^{-3} \text{cm/s}$	
p[2]	$(2.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-6} \text{cm/s}^2$	$(1.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-6} \text{cm/s}^2$	
p[3]	$(-4.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-9} \text{cm/s}^3$	$(-1.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-9} \text{cm/s}^3$	

Tabella 2.3: Parametri fit per miscela Ar-CO₂ 95 – 5% a 2750 V

Si noti che il parametro p[0] è privo di errore. Ciò è dovuto al fatto che il programma tende a restituire un valore per tale parametro sempre più grande all'aumentare della percentuale di Argon nella miscela, sino a restituire valori non fisici, pertanto è stata aggiunta al programma una limitazione su tale parametro, raggiunta in fase di fit. In altre parole, il valore di p[0] non è un valore fittato, ma il limite superiore da noi imposto. Per quanto riguarda p[1] osserviamo che i valori ottenuti sono abbastanza simili, nonostante l'errore ricavato in fase di fit sia molto piccolo. Lo stesso non si può dire per p[2] e p[3], tuttavia il parametro più significativo è proprio p[1], il coefficiente del termine lineare nella formula (2.3). Queste considerazioni giustificano le analisi fatte in configurazione *slow-flux*. Prima di passare alla miscela finale abbiamo acquisito altri dati per cercare la configurazione migliore, che è risultata essere 2650 V e per la quale si ha un significativo aumento della risoluzione anche in *slow-flux*. Confrontando la prima, riportata sopra, con la seconda, riportata in figura 2.9, possiamo notare un miglioramento del 7,7%, significativo, ma ancora lontano dal nostro obiettivo. Oltre alla risoluzione è qui riportato per l'ultima configurazione il grafico Spazio-Tempo con il fit (figura 2.10) e i parametri di tale fit (2.4).

2.6 Miscela multigas

Siamo arrivati alla penultima parte dell'analisi preliminare, ove la miscela immessa è quasi quella finale: Ar 90.49% - CO₂ 3% - CH₄ 4.99% - N 1.52%. Tale miscela è stata scelta dopo numerose simulazioni con diverse miscele svolte con il programma Garfield[7] che hanno mostrato come questa permetta al rivelatore di dare la risposta il più lineare possibile. Abbiamo studiato la risposta di

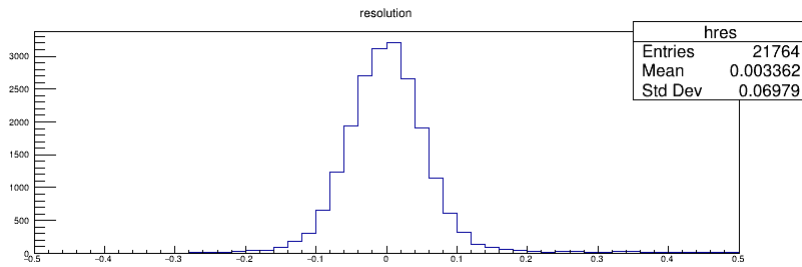


Figura 2.9: Risoluzione per miscela Ar-CO₂ 95 – 5% con 2650 V

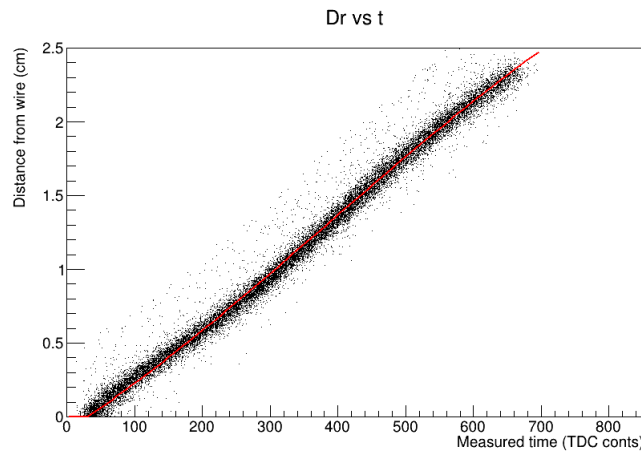


Figura 2.10: Distanza su tempo per miscela Ar-CO₂ 95 – 5% con 2650 V

Camera18 confrontando, come sopra, i risultati ottenuti in *fast-flux* e *slow-flux* e i parametri di fit. Abbiamo riscontrato la solita differenza in risoluzione tra i flussi che avvalorata ulteriormente l'ipotesi della difficoltà dei gas a miscelarsi bene se flussati lentamente e che, allo stesso tempo, conferma la necessità di lavorare con un'unica bombola di cui, fidandosi del produttore, abbiamo la certezza del corretto mixaggio. In questo particolare caso, tuttavia, c'è da sottolineare l'inferiorità della statistica acquisita in *fast-flux*, come si può notare da figura 2.11, circa un terzo rispetto allo *slow-flux*.

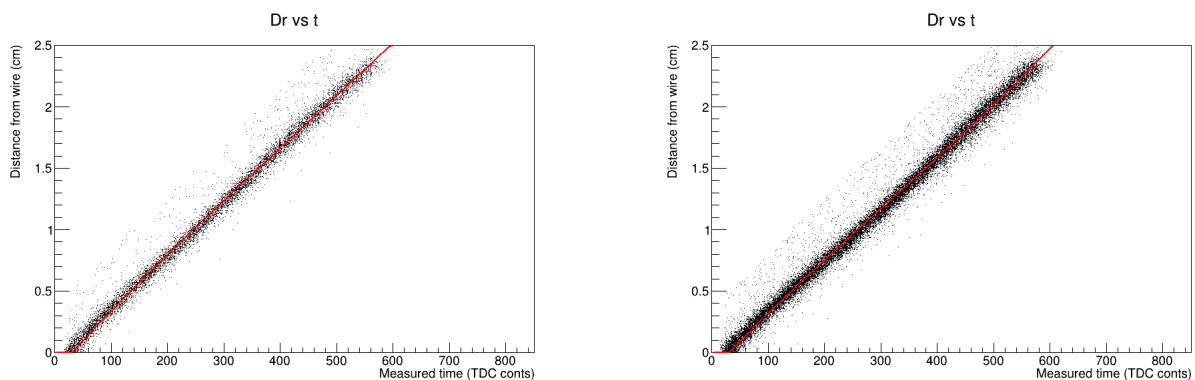


Figura 2.11: Spazio-tempo *Fast-Flux* (sinistra) e *Slow-Flux* (destra) per miscela multigas a 3000 V

Il grafico spazio-tempo è quello di maggior interesse in questo momento dell'esperimento, poiché evidenzia chiaramente una relazione lineare tra le due grandezze il che implica, come ricercato, una velocità di deriva costante. Le correzioni quadratiche e cubiche nella relazione (2.3) sono di tre e sei ordini superiori. Ovviamente non trascurabili per la precisione che vogliamo ottenere nella ricostruzione delle tracce dei muoni, ma abbastanza piccole da rendere molto più facile lo stesso processo di ricostruzione. Vengono ora riportati i parametri di fit.

Parametro	Valore	Unità di misura
p[0]	30	s
p[1]	$(3.09 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	cm/s
p[2]	$(2.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-6}$	cm/s ²
p[3]	$(-2.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-9}$	cm/s ³

Tabella 2.4: Parametri fit per miscela Ar-CO₂ 95 – 5% a 2650 V

Parametro	Valore _{f-f}	Valore _{e-s-f}	
p[0]	30 s	30 s	-
p[1]	$(4.96 \pm 0.04) \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$	$(4.71 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$	
p[2]	$(-1.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}^2$	$(-2.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}^2$	
p[3]	$(1.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-9} \text{ cm/s}^3$	$(2.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-9} \text{ cm/s}^3$	

Tabella 2.5: Parametri fit per miscela dei quattro gas

Le considerazioni applicate ai parametri in tabella 2.3 valgono anche per questi nuovi parametri e vengono, pertanto, omesse.

2.7 Miscela multigas pronta

Giungiamo ora alla parte conclusiva dell'analisi preliminare, ove la miscela utilizzata è: Ar 90.5% - Co₂ 3% - CH₄ 5% - N 1.52%, fornita direttamente dal produttore. Sono riportati in questa sezione i risultati sia per Camera18 che per Camera64 di tre diverse acquisizioni cui configurazioni vengono riportate in tabella 2.6.

Acquisizione	Tipologia flusso	Potenziale Camera64	Potenziale Camera18
1	fast	2600	2900
2	medium	2850	2850
3	slow	2850	2850

Tabella 2.6: Configurazioni acquisizioni

Per evitare di essere ridondanti, vengono riportati solo i plot più significativi e rilevanti per lo studio in esame. Proprio per questo della prima acquisizione viene riportato solo il plot della risoluzione.

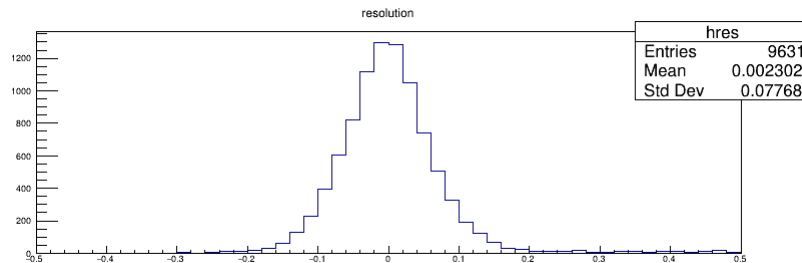


Figura 2.12: Risoluzione miscela multigas pronta in Fast-flux a 2900 V

Notiamo subito che la risoluzione è nettamente peggiore rispetto alle precedenti, nonostante fossimo nelle condizioni che usualmente portavano ai risultati migliori. Studiando le successive acquisizioni abbiamo capito che 2850 V è la tensione massima che possiamo dare a Camera18, poiché con solo 50 V in più abbiamo ottenuto i pessimi risultati appena mostrati. Per quanto riguarda Camera64, invece, la prima acquisizione ci è servita soltanto a capire che la tensione di 2600 V andava decisamente aumentata. In questa configurazione i programmi di fit hanno restituito valori significativamente

diversi dei parametri da inserire nella relazione (2.3), il che è conseguenza diretta delle considerazioni sopra fatte.

Le due acquisizioni successive hanno condotto a risultati analoghi, segno che la velocità del flusso immesso nelle camere è assolutamente irrilevante e le misure in condizioni ottimali sono da essa indipendenti. Riportiamo, pertanto, solo i risultati dell'ultima acquisizione, in quanto ha più statistica.

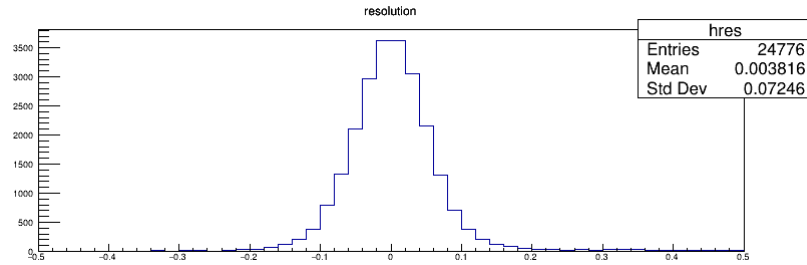


Figura 2.13: Risoluzione Slow-flux per Camera18 a 2850 V

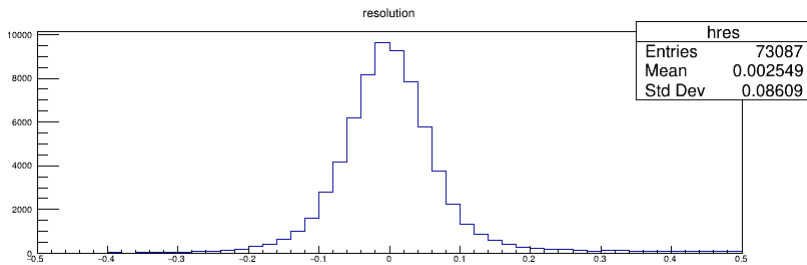


Figura 2.14: Risoluzione Slow-flux per Camera64 a 2850 V

Per Camera64 notiamo subito che la risoluzione è nettamente peggiore, ma ciò non crea stupore, poiché abbiamo un volume sette volte maggiore di Camera18, quindi è ragionevole che il rumore, che influisce significativamente sulla risoluzione, sia maggiore. Più che questi plot appena mostrati, sono importanti i seguenti, che mostrano la risposta sempre più lineare di entrambe le camere. Per una veloce analisi quantitativa si osservino i parametri di fit riportati in tabella 2.7.

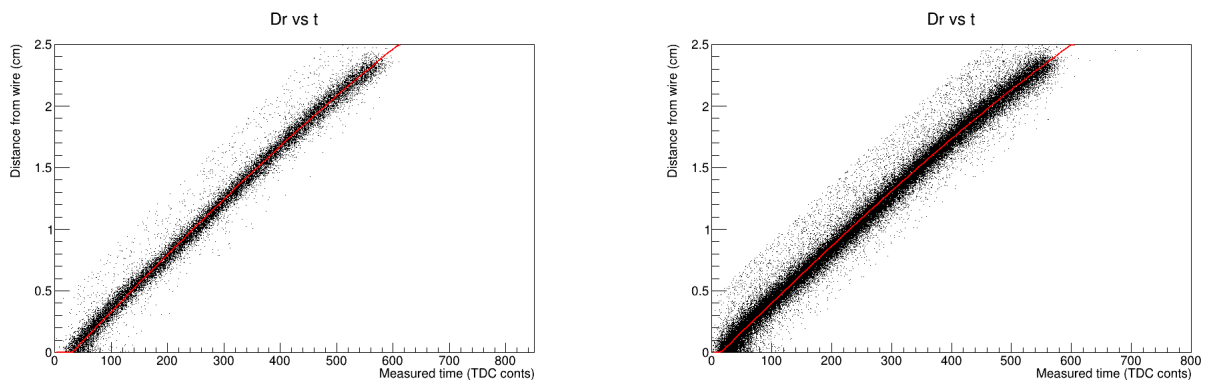


Figura 2.15: Spazio-tempo per Camera18 (sinistra) e Camera64 (destra)

Parametro	Valore _{Camera18}	Valore _{Camera64}	Compatibilità
p[0]	30 s	15 s	-
p[1]	$(4.77 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$	$(4.76 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$	0.2
p[2]	$(-4 \pm 2) \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}^2$	$(-3 \pm 2) \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}^2$	0.4
p[3]	$(-6 \pm 3) \cdot 10^{-10} \text{ cm/s}^3$	$(-9 \pm 2) \cdot 10^{-10} \text{ cm/s}^3$	0.8

Tabella 2.7: Parametri fit per Camera18 e Camera64

È importante notare che la compatibilità tra i parametri è ottima, e abbiamo soppresso di un altro ordine di grandezza le correzioni quadratiche e cubiche alla linearità.

Con questi ultimi risultati termina lo studio preliminare e si conclude che la miscela Ar 90.5% - CO₂ 3% - CH₄ 5% - N 1.52% permette di ottenere un'ottima risposta in termini di linearità dai rilevatori. Prima di passare all'analisi finale, riassumiamo in tabella 2.8 i valori di risoluzione trovati per le varie configurazioni.

Camera	Miscela	Tensione [v]	Flusso	Risoluzione [μm]
18	85-15, pronta	3100	slow	693 \pm 2
18	85-15	3100	Fast	726 \pm 6
18	85-15	3100	Slow	809 \pm 7
18	90-10	2900	Slow	716 \pm 6
18	95-5	2750	Fast	689 \pm 6
18	95-5	2750	Slow	736 \pm 4
18	multigas	3000	Fast	716 \pm 6
18	multigas	3000	Slow	748 \pm 3
18	multigas, pronta	2900	Fast	777 \pm 5
18	multigas, pronta	2850	Slow	725 \pm 2
64	multigas, pronta	2850	Slow	861 \pm 2

Tabella 2.8: *Tabella riassuntiva delle risoluzioni presentate in questo capitolo*

Capitolo 3

Analisi Finale

In questo capitolo si andranno a mostrare i risultati dell'analisi svolta con programmi più sofisticati, tali da eliminare i problemi spiegati in sezione 2.2 e faremo riferimento esclusivamente a Camera64, vero oggetto del nostro studio. In un primo momento verranno discusse due acquisizioni svolte con le CamereCMS come trigger, come nei capitoli precedenti, per poi concentrarci sui dati raccolti in assenza di trigger esterno. A differenza di quanto fatto fino ad ora, ci concentreremo sulla ricostruzione delle tracce dei muoni. In particolare, nella prima sezione di questo capitolo, andremo a confrontare i risultati ottenuti dalla Camera64 e quelli delle CamereCMS.

3.1 Acquisizioni con trigger

Mostriamo in primis un confronto tra un'acquisizione con la miscela Ar-CO₂ 85-15% a 3100 V e l'ultima mostrata nel capitolo precedente. L'analisi svolta dal nuovo programma si concentra, come accennato nell'introduzione di questo capitolo, sulla ricostruzione delle tracce. Assumendo che i dati raccolti dalle CamereCMS permettano una ricostruzione perfetta, siamo interessati a confrontare con queste, le tracce prodotte tramite l'analisi su Camera64. Ci concentriamo, in particolare, sui parametri ϕ e x , rispettivamente coefficiente angolare e intercetta della traccia ricostruita. In condizioni ideali ci aspettiamo che $\phi_{\text{CMS}} = \phi_{64}$ e lo stesso per x . Nella realtà vogliamo che la deviazione da queste due condizioni sia minima e pertanto abbiamo costruito due plot per ciascun parametro che ci permettano di capire se Camera64 produce dei risultati attendibili. Concentriamoci in un primo momento su figura 3.1 e figura 3.2 che mostrano tali plot per il parametro ϕ .

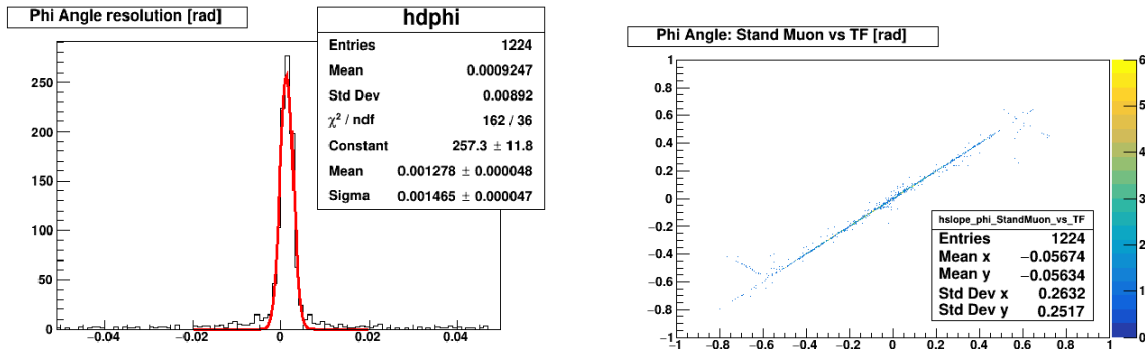


Figura 3.1: Risoluzione ϕ e confronto con CameraCMS con miscela Ar-CO₂ 85-15% a 3100 V

A sinistra abbiamo gli istogrammi ottenuti plottando le differenze $\phi_{\text{CMS}} - \phi_{64}$ per ogni traccia ricostruita e fittando con una gaussiana i risultati finali. Quello che vogliamo ottenere è una media prossima allo zero e una σ il più piccola possibile. Osservando i plot, è chiaro che queste condizioni sono soddisfatte, il che ci fa capire che Camera64 lavora come dovrebbe. Confrontando le due ac-

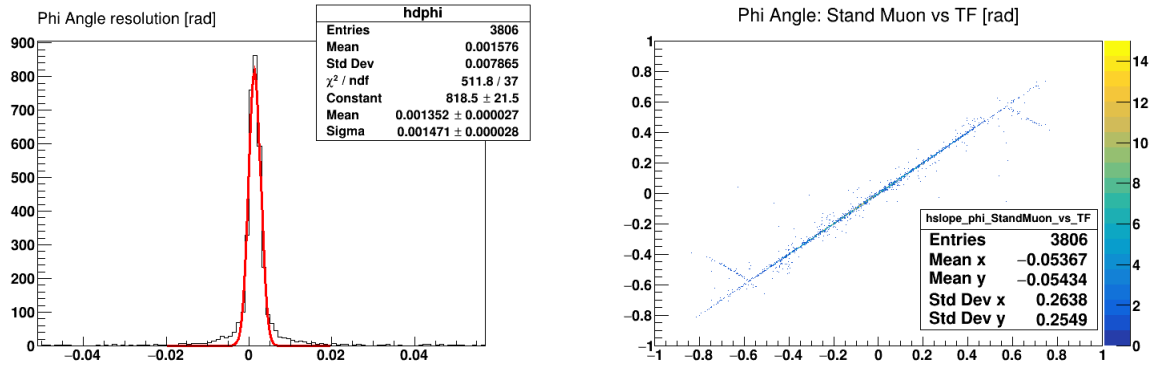


Figura 3.2: Risoluzione ϕ e confronto con CameraCMS con miscela multigas pronta a 2850 V

quisizioni si vede come, in realtà, non vi sia una sostanziale differenza tra le due miscele e, pertanto, possiamo usare la seconda sicuri del fatto che restituisca risultati in accordo con le nostre previsioni.

Seppur molto soddisfatti da questi grafici, bisogna osservare la presenza di eventi molto lontani dallo zero. Questi non sono eventi casuali o rumorosi, ma indicano un difetto nella ricostruzione della traccia che sarà spiegato nel dettaglio nella sezione successiva. I plot sulla destra hanno sull'asse delle ascisse ϕ_{CMS} [rad] e sulle ordinate ϕ_{64} [rad]. Nel caso ideale ci aspetteremmo due diagonali perfette. Considerando le fluttuazioni statistiche, il risultato ottenuto è ottimo, come ci si aspetta guardando il plot della risoluzione. Si può notare anche in questo caso qualche punto che devia considerevolmente dalle nostre aspettative. Come accennato sopra, nella prossima sezione discuteremo di questo problema.

Gli stessi plot sono stati prodotti per l'intercetta e sono riportati in figura 3.3 e figura 3.4.

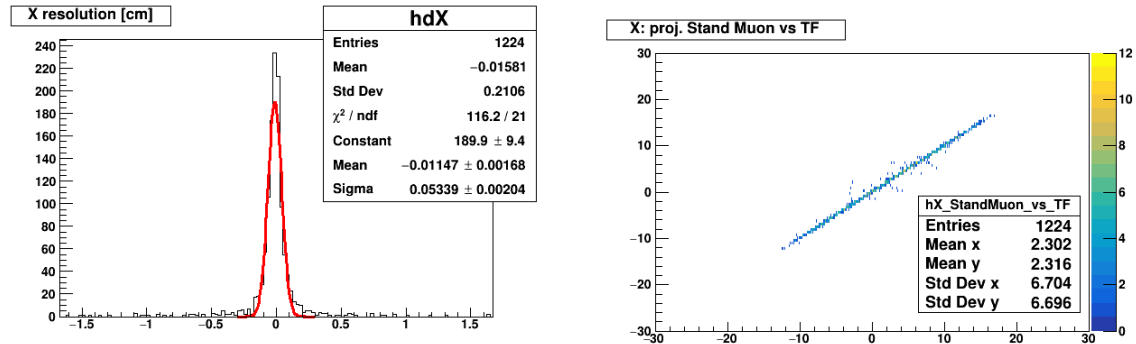


Figura 3.3: Risoluzione x e confronto con CameraCMS con miscela Ar-CO₂ 85-15% a 3100 V

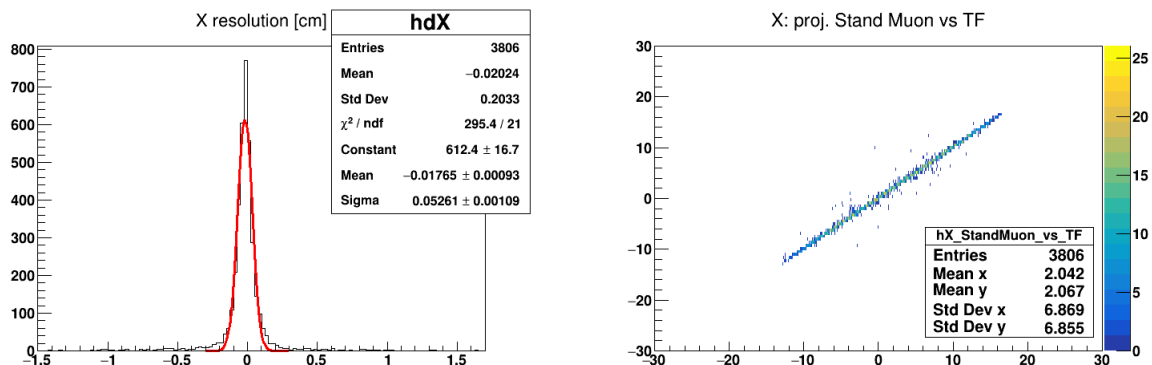


Figura 3.4: Risoluzione x e confronto con CameraCMS con miscela multigas pronta a 2850 V

Concentrandosi sui plot a sinistra notiamo subito che la risoluzione non è molto migliore di quelle ottenute con un solo tubo, trovate nel capitolo precedente, ma questo non deve stupire più di tanto, poiché molto probabilmente nel codice la posizione spaziale dei fili della Camera64 non è perfetta, il che si traduce con un globale peggioramento della risoluzione. Per questo siamo più interessati ai plot in figura 3.2 che a quelli appena riportati.

L'acquisizione cui dati sono stati ora mostrati è stata svolta impostato un potenziale di 2850 V sui fili di Camera64. Per la successiva lo abbiamo abbassato a 2800 V.

Mostriamo nuovamente prima i plot relativi a ϕ :

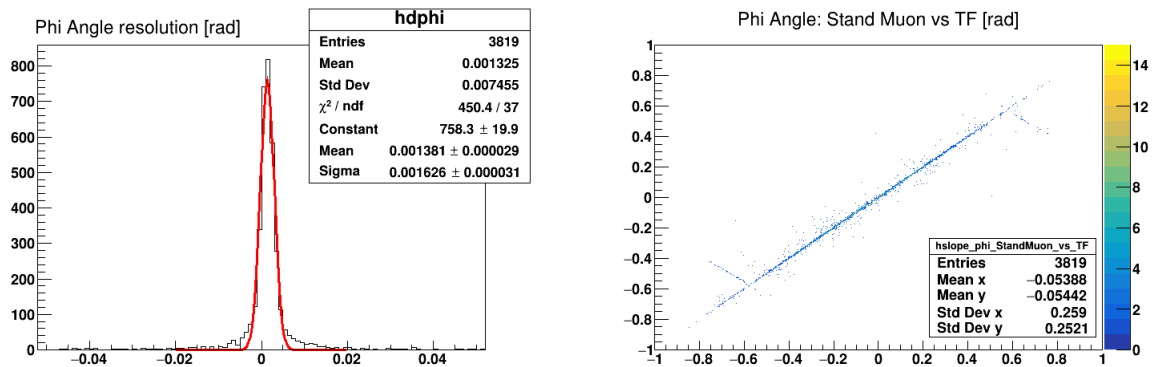


Figura 3.5: Risoluzione ϕ e confronto con CameraCMS con miscela multigas pronta a 2800 V

Confrontando i risultati con i precedenti si nota che la risoluzione peggiora del 10,5%, nonostante la variazione del potenziale sia stata appena del 1,7%. Possiamo notare il medesimo peggioramento osservando i plot relativi a x :

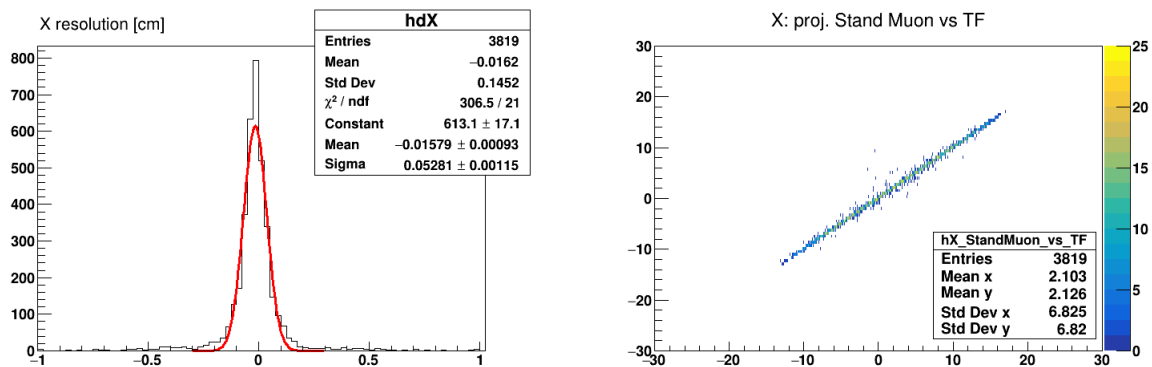


Figura 3.6: Risoluzione x e confronto con CameraCMS con miscela multigas pronta a 2800 V

Osservando questi risultati comprendiamo l'importanza di settare correttamente il potenziale in modo da ottimizzare le performance della Camera64.

3.2 Ricostruzione delle tracce

Prestiamo di nuovo attenzione ai plot di risoluzione mostrati nella sezione precedente. Si possono notare, come sopra citato, delle misure che si allontanano di molto dal picco centrale. Tali eventi corrispondono a tracce mal ricostruite da Camera64. Le due immagini riportate qui sotto ci mostrano quello che succede.

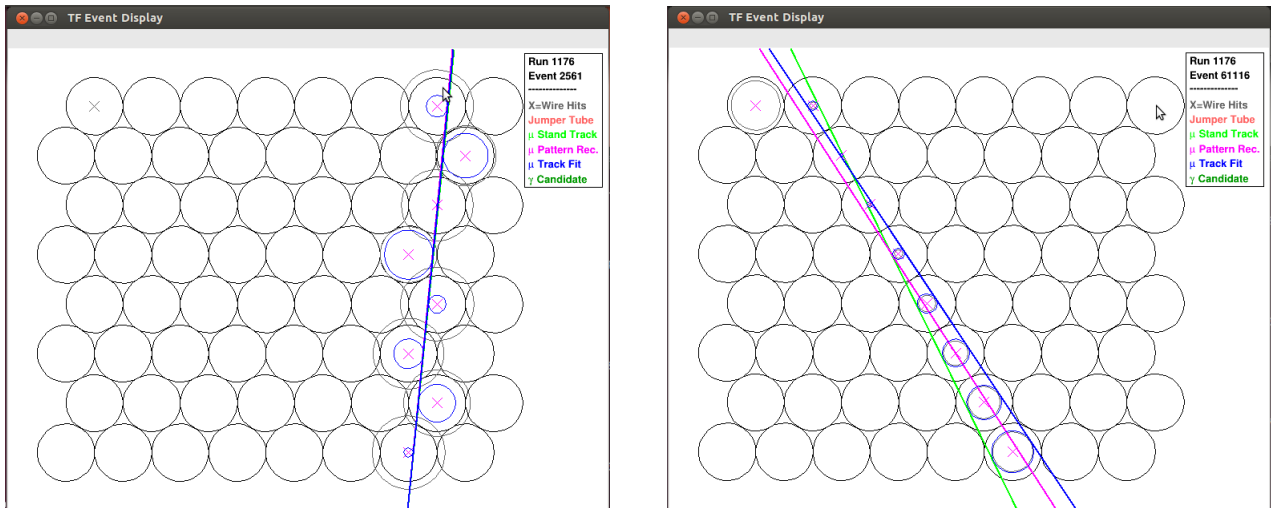


Figura 3.7: Esempio di ricostruzione di tracce

Osserviamo la griglia che rappresenta Camera64 in sezione. I tubi contrassegnati da una croce sono quelli che hanno trasmesso il segnale. In blu possiamo osservare circonferenze centrate sui fili, di raggio pari alla distanza calcolata con (2.3)¹. Si è interessati, in particolare, alla linea verde e a quella blu, che indicano rispettivamente la traccia ricostruita dalle CamereCMS e quella ricostruita da Camera64. A sinistra abbiamo la situazione in cui i diversi rilevatori portano ad un risultato praticamente identico, tanto che la linea verde è completamente nascosta, ed è ciò che accade la maggioranza delle volte. Coefficiente angolare e intercetta differiscono di pochissimo e ciò spiega i risultati mostrati nella sezione precedente. A destra vediamo, tuttavia, che le due tracce sono nettamente differenti. Possiamo osservare, però, che le due sembrano simmetriche rispetto alla linea che congiunge i fili che hanno trasmesso segnale. Ciò è dovuto al fatto che il programma per la ricostruzione si basa sulla distanza dal filo, non su una coordinata spaziale assoluta. Spiegato molto semplicemente il programma non sa se il muone è passato a destra o a sinistra dei fili e semplicemente fitta la traccia migliore che, nel caso in figura, è quella sbagliata. La spiegazione molto sommaria appena fornita serve a illustrare le anomalie dei plot di risoluzione sopra mostrati. Una discussione più rigorosa del problema la si può trovare nella tesi di laurea di A. Paccagnella[4].

3.3 Acquisizioni senza trigger esterno

Siamo giunti alla parte più importante di questa tesi. Camera64 è un detector per tomografia muonica e deve essere trasportabile con relativa facilità. È infattibile, pertanto, avere sempre le CamereCMS come trigger. D'altro canto è necessario studiare la risposta del detector in assenza di trigger esterno. Ciò è l'argomento di questa sezione.

In assenza di un trigger esterno il t_0 , istante in cui passa il muone all'interno dei tubi, viene trovato mediante una procedura di fit. Al fine di evitare segnali di rumore o eventi di non interesse, viene imposta la condizione di ricevere segnale da almeno sei layer, quindi lavoriamo con almeno sei misure di tempo. Il fatto che ricostruiamo t_0 con procedura di fit comporta un naturale peggioramento delle performance di Camera64. Vogliamo quantificare tale peggioramento e per farlo confrontiamo nuovamente i risultati prodotti dall'analisi dei dati raccolti dal detector e quelli ricavati dalle CamereCMS, partendo dal parametro ϕ :

¹Si usa (2.1) per le miscele Ar-CO₂ 85-15 e 90-10

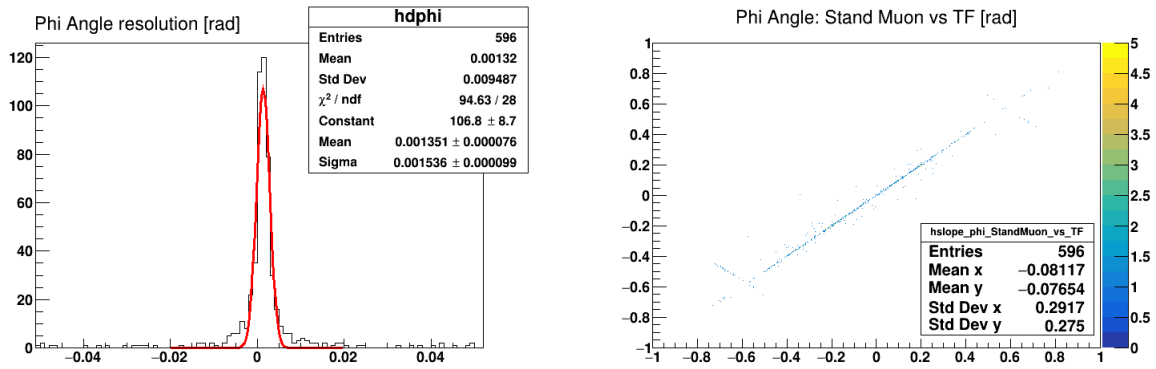


Figura 3.8: Risoluzione ϕ e confronto con CameraCMS con miscela multigas pronta a 2800 V, auto-trigger

Il primo plot di figura 3.8 mostra un peggioramento di appena il 4% rispetto ai risultati riportati in figura 3.2 che ci permette di concludere che la risposta di Camera64 è ottima anche in assenza di trigger esterno.

Vengono ora riportati i plot per l'intercetta:

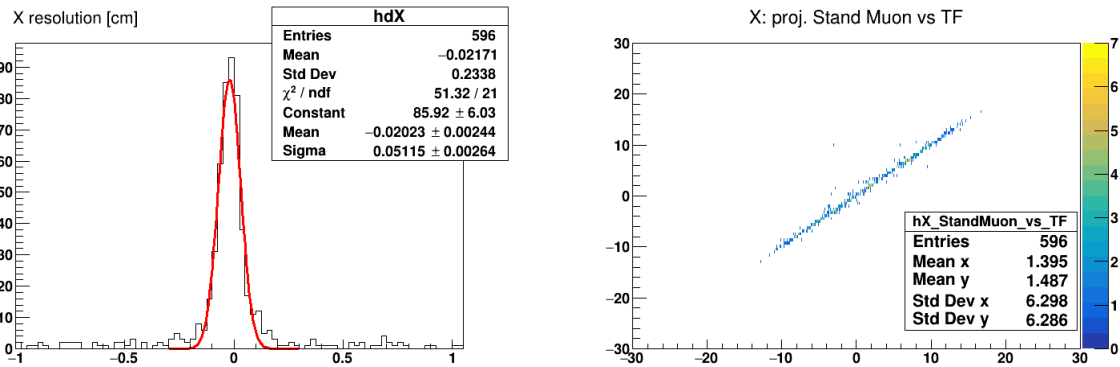


Figura 3.9: Risoluzione x e confronto con CameraCMS con miscela multigas pronta a 2800 V, auto-trigger

In questo caso la risoluzione mostrata dal plot di destra è di poco migliore, segno che la differenza di risultati rispetto alla prima acquisizione mostrata è riconducibile a fluttuazioni statistiche e non a differenze sistematiche.

Concludiamo questa sezione mostrando due plot interessanti, uno riferito alla prima acquisizione mostrata nella sezione 3.1 e uno riferito all'acquisizione in assenza di trigger.

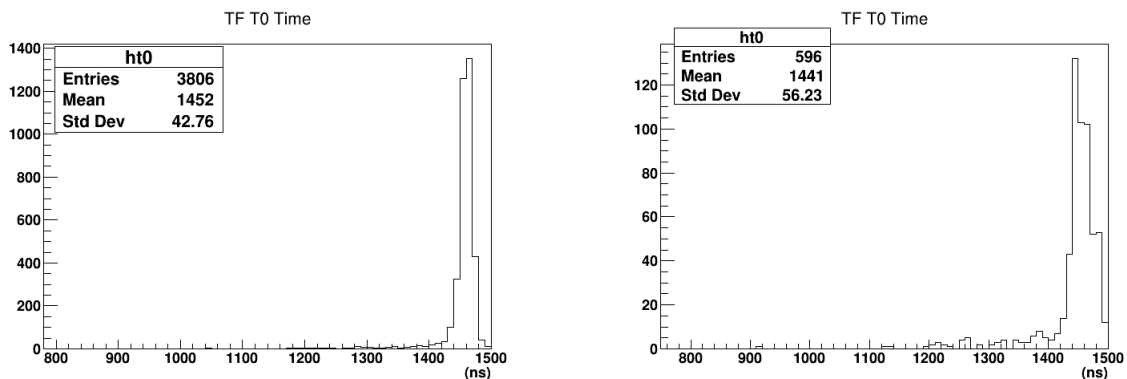


Figura 3.10: t_0 stimato con trigger (sinistra) e senza trigger (destra)

Stiamo osservando due istogrammi che contano i t_0 stimati rispettivamente usando le CamereCMS come trigger e tramite fit. Si nota subito come non vi sia una sostanziale differenza in valore assoluto tra le due configurazioni, tuttavia, ciò che non è così evidente ad un primo sguardo, è che nel plot a destra in figura 3.10 il picco tende ad avere una forma gaussiana, mentre nel plot a sinistra è formato da un'unica colonna centrale molto alta e due colonne molto più basse ad essa adiacenti. Questo fatto è diretta conseguenza del metodo con cui il t_0 è ricavato.

Con la tabella 3.1 che riassume tutti i valori di risoluzione relativi a ϕ trovati in questo capitolo, termina l'analisi dei dati.

Miscela	Trigger	Tensione [v]	Risoluzione [rad]
Ar-CO ₂ 85-15	CMS	3100	$(14.7 \pm 0.05) \cdot 10^{-4}$
Multigas, pronta	CMS	2850	$(14.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$
Multigas, pronta	CMS	2800	$(16.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$
Multigas, pronta	auto	2850	$(15 \pm 1) \cdot 10^{-4}$

Tabella 3.1: *Tabella riassuntiva delle risoluzioni relative a ϕ presentate in questo capitolo*

Conclusioni

Dallo studio condotto sulla miscela di gas Ar 90.5% - CO₂ 3% - CH₄ 5% - N 1.52% abbiamo osservato che la risposta di Camera64 in termini di relazione spazio-tempo è lineare, come desiderato. Inoltre, i risultati in termini di ricostruzione delle tracce dei muoni sono tanto validi quanto quelli ottenuti con la miscela standard. L'obbiettivo di questa tesi si può, pertanto, dire raggiunto. Grazie al risultato raggiunto sarà possibile condurre, in futuro, altri studi atti a migliorare le prestazioni di Camera64, come ad esempio l'ottimizzazione della funzione di fit, l'autodeterminazione del t_0 . Lo studio condotto durante questa tesi ha mostrato come le simulazioni del programma Garfield siano valide e rispecchino i risultati sperimentali. Ciò implica che è possibile cercare una variazione alla miscela adottata che dia la stessa risposta in termini di linearità, ma con una velocità di deriva minore che ottimizzi la risoluzione.

Ringraziamenti

Ringrazio sinceramente Sophie Wuyckens, Franco Gonnella e Paolo Checchia per la paziente guida ricevuta durante la stesura di questa tesi.

Bibliografia

- [1] Paolo Checchia. “Review of possibile applications of cosmic muon tomography”. In: *JINST* 11 (2016). C12072.
- [2] CMS collaboration. “The CMS experiment at CERN LHC”. In: *JINST* 3 (2008). S08004.
- [3] Manfred Krammer. *Gaseous Detectors*. URL: https://www.hephy.at/fileadmin/user_upload/V0-3-Gaseous_Detector.pdf.
- [4] Andrea Paccagnella. “Costruzione e test di un rivelatore a muoni basato su tubi a deriva per misure in ambienti radioattivi”. Univeristà di Padova.
- [5] J. Park e tal. *Note for UCLAIUTD Argon-Methane gas dritf chamber*. URL: [http://inspirehep.net/record/1225186/files/UCLA-UTD%5C%\\$20Argon%5C%\\$20Methane%5C%\\$20Gas%5C%\\$20Drift%5C%\\$20Chamber.pdf](http://inspirehep.net/record/1225186/files/UCLA-UTD%5C%$20Argon%5C%$20Methane%5C%$20Gas%5C%$20Drift%5C%$20Chamber.pdf).
- [6] Sara Vannini e tal. “Cultural heritage investigations using cosmic muons”. In: *C. R. Physique* 19 (2018). 533-542.
- [7] Rob Veenhof. *Garfield - simulation of gaseous detectors*. URL: <http://garfield.web.cern.ch/garfield/>.