



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea Triennale in Fisica

Tesi di Laurea

Studio del fascio di ioni negativi di NIO1

con telecamera lineare

Relatore

Dr. Gianluigi Serianni

Correlatore

Dr. Matteo Agostini

Laureando

Pietro Tasso

Anno Accademico 2017/2018

Indice

Introduzione	v
1 Apparato strumentale	1
1.1 L'esperimento NIO1	1
1.2 Telecamera lineare	2
1.2.1 Calibrazione	2
1.2.2 Tasso di conversione mm/pixel	3
2 Analisi del segnale integrato	5
2.1 Segnale integrato	5
2.2 Analisi 1D del segnale	6
2.2.1 Scan in tensione di accelerazione V_{AG}	7
2.2.2 Scan in tensione di estrazione V_{EG}	9
2.2.3 Scan in potenza RF	12
2.2.4 Scan in pressione	13
3 Ricostruzione tomografica del fascio	15
3.1 Modello per l'inversione tomografica del segnale	15
3.2 Analisi 2D del segnale integrato	17
4 Conclusioni	21
4.1 Risultati	21
4.2 Lavori futuri	21
Bibliografia	vii

Introduzione

La possibilità di una produzione di energia a basso impatto ambientale e sufficiente a soddisfare il fabbisogno energetico di una popolazione mondiale in crescita, ha come importante banco di prova la realizzazione di ITER, attualmente il più grande esperimento di fusione nucleare in costruzione [1]. Uno dei principali problemi di ITER è il riscaldamento del centro del plasma a temperature dell'ordine dei 15 keV, e l'iniezione di fasci di particelle neutre (NBI) è uno dei metodi più importanti per tale scopo [2]. Fasci di atomi neutri ad alta energia, intendendo con quest'ultima un'energia molto maggiore della temperatura di plasma voluta, sono generati per neutralizzazione di fasci di ioni energetici. Gli ioni negativi sono preferiti rispetto a quelli positivi per una migliore efficienza del processo di neutralizzazione alle energie prese in considerazione, ovvero maggiori di 100 keV.

Nato da una collaborazione tra i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) e il Consorzio RFX, l'esperimento NIO1 (Negative Ion Optimization phase 1) si pone l'obiettivo di caratterizzare la fisica delle sorgenti di ioni negativi per i futuri utilizzi negli iniettori di fasci neutri. NIO1 è una piccola sorgente a radio frequenza RF, progettata per generare un fascio di ioni di idrogeno negativi di 130 mA, composto da nove fascetti disposti in una matrice 3×3 e accelerati fino a 60 keV [3].

Tra le diagnostiche utilizzate per lo studio del fascio di NIO1 è presente una telecamera CMOS lineare, che raccoglie il segnale luminoso generato dall'interazione degli ioni H^- con gli atomi neutri del gas di fondo nella zona di drift. Se si ipotizza che il fascio sia monoenergetico e la densità del gas di fondo uniforme, il profilo di emissività del fascio è proporzionale al suo profilo di densità [4].

Obiettivo della tesi è ottenere dall'analisi dei segnali integrati della telecamera lineare informazioni utili sul modo in cui il fascio estratto è influenzato dai parametri dell'acceleratore e della sorgente; in particolare se ne sono caratterizzate l'ottica e l'uniformità.

La tesi è così strutturata:

Capitolo 1 Si descrive l'esperimento NIO1, le principali caratteristiche tecniche e i parametri di fascio.

Si presenta in dettaglio la telecamera lineare, il suo utilizzo e le operazioni preliminari per la calibrazione e per trovare il tasso di conversione mm/pixel.

Capitolo 2 Si presenta l'elaborazione del segnale grezzo, un primo metodo di analisi del segnale elaborato e i risultati ottenuti.

Capitolo 3 Si illustra un secondo metodo, consistente in una ricostruzione del profilo bidimensionale di emissività del fascio, e si confronta quanto trovato con quanto mostrato al Capitolo 2.

Capitolo 4 Si riassumono i risultati ottenuti con i due metodi di indagine e si discutono possibili lavori futuri.

Capitolo 1

Apparato strumentale

Nel capitolo presente si descrivono le caratteristiche principali dell'esperimento NIO1, situato presso il Consorzio RFX, e si mostrano le operazioni preliminari per la telecamera lineare usata per lo studio del fascio.

1.1 L'esperimento NIO1

L'obiettivo dell'esperimento NIO1 è l'estrazione di una corrente nominale di fascio di H^- di 130 mA a -60 kV [3]. Il fascio è composto da nove fascetti disposti in una matrice 3×3 su un'area all'incirca di $40 \times 40 \text{ mm}^2$. Nel seguito si userà come sistema di riferimento quello in cui l'asse z è la direzione di propagazione del fascio e l'asse y la direzione verticale usuale. In figura 1.1 sono rappresentate le tre parti principali che costituiscono l'esperimento: la sorgente, la colonna di accelerazione e la camera di diagnostica [5]. Il plasma è generato in una camera cilindrica di 50 mm di raggio e 200 mm

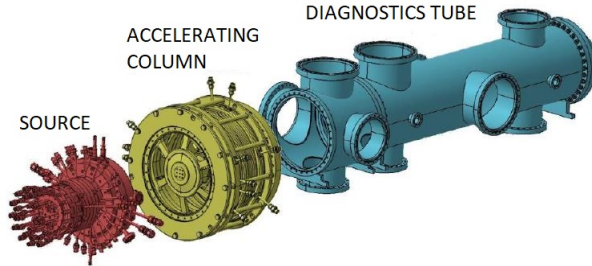


Figura 1.1: Le tre parti principali di NIO1: la sorgente, la colonna di accelerazione e la camera di diagnostica [5].

di lunghezza, grazie ad un sistema a radiofrequenza costituito da una bobina con sette spire che avvolgono la sorgente e alimentato da un generatore RF a $2 \text{ MHz} \pm 10\%$, con potenza massima 2500 W. La sorgente è circondata da magneti che provvedono al confinamento del plasma. Gli ioni di idrogeno negativi prodotti nella sorgente sono poi estratti attraverso le aperture della griglia di plasma (PG), che si interfaccia direttamente con la sorgente. La PG è il primo stadio della colonna di accelerazione e può essere portata fino ad una tensione di -60 kV. I nove fori circolari della PG, attraverso cui passa il fascio, sono disposti in una matrice 3×3 ed equispaziati di 14 mm in entrambe le direzioni e hanno raggio $R = 3.8 \text{ mm}$. La griglia di estrazione (EG), che si trova ad un potenziale più alto rispetto alla PG, è in grado di estrarre e accelerare gli H^- . L'accelerazione totale del fascio è data dalla differenza di potenziale (V_{AG}) tra la PG e una terza griglia, la Post Acceleration Grid (PA), collegata a terra. Infine, il fascio attraversa il Repeller (REP), la quarta e ultima griglia posta a 60 V, che ha lo scopo di evitare il flusso contro corrente di ioni positivi verso la sorgente. La colonna di accelerazione è lunga 58 mm dall'uscita della PG all'uscita del REP.

Per eliminare il contributo al fascio degli elettroni co-estratti, nella EG sono collocati dei magneti, chiamati 'Co-extracted Electron Suppression Magnets' (CESM), che producono un campo magnetico lungo x tale da deviare gli e^- contro la griglia stessa. Anche gli ioni, pur con raggio di Larmor maggiore,

sono deflessi e per la particolare configurazione del campo i fascetti delle colonne laterali sono spostati verso l'alto, quelli della colonna centrale verso il basso. Dopo essere stato accelerato, il fascio entra nella camera di diagnostica, un tubo lungo 1.5 m, con diametro interno pari a 350 mm e con diverse porte di accesso per le varie strumentazioni (figura 1.2 [5]). Il fascio alla fine del percorso impatta su un calorimetro.

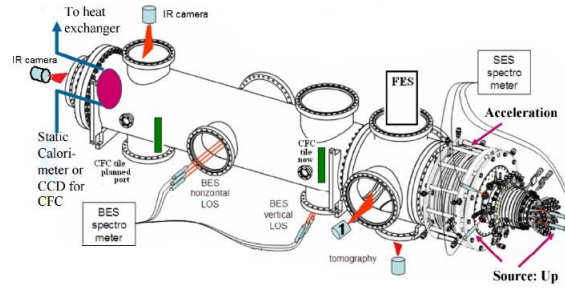


Figura 1.2: Camera da vuoto con le diagnostiche per lo studio del fascio [5]. La telecamera lineare usata per l'analisi oggetto di questa tesi è rappresentata schematicamente con il cilindretto contrassegnato con il numero 1.

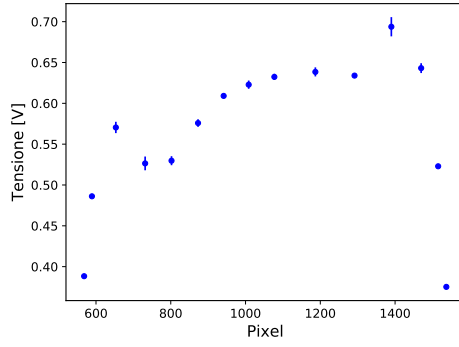
I fotoni emessi nella transizione H_α , dovuta all'interazione degli H^- con il gas presente nella camera da vuoto, sono raccolti da una telecamera lineare che osserva di profilo i nove fascetti lungo l'asse della deflessione (in figura 1.2 è rappresentata con un cilindretto contrassegnato con il numero 1). Se si ipotizza che il fascio sia monoenergetico e la densità del gas di fondo uniforme, il profilo di emissività del fascio è proporzionale al suo profilo di densità [4]. È dunque possibile ricavare informazioni utili sull'ottica e l'uniformità del fascio al variare dei parametri di fascio più importanti che sono: la differenza di potenziale tra la PA e la PG o 'tensione di accelerazione totale' (V_{AG}), la differenza di potenziale tra la EG e la PG o 'tensione di estrazione' (V_{EG}), la potenza RF e la pressione nella camera di diagnostica.

1.2 Telecamera lineare

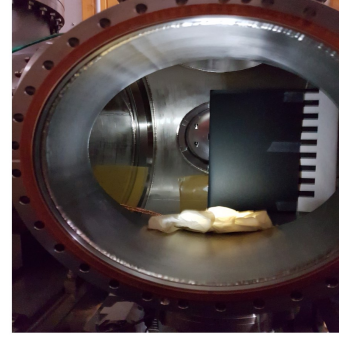
La telecamera utilizzata è dotata di un obiettivo, con lunghezza focale $l = 50$ mm, e di un CMOS lineare modello S11639-01 Hamamatsu, particolarmente sensibile alla lunghezza d'onda H_α , con le seguenti caratteristiche tecniche: 2048 pixel di dimensione $14 \times 200 \mu\text{m}$ e rate di acquisizione massimo pari a 10 MHz [6]. Il tempo di integrazione è variabile ed impostato dall'operatore, e per ogni singola acquisizione sono raccolti dieci frame consecutivi. Si descrive ora la calibrazione e il metodo con cui è stato ottenuto il tasso di conversione mm/pixel.

1.2.1 Calibrazione

Per indagare l'uniformità della risposta della telecamera ed eventuali intersezioni delle linee di vista con il tubo di accesso alla camera da vuoto, si sono illuminati i pixel con una sorgente luminosa costante. Con la telecamera installata si è raccolto il segnale di un LED alimentato a tensione costante, posto all'interno della camera da vuoto nella zona di vista di interesse, con la sorgente in aria. Con tempo d'integrazione impostato a 30 ms, si è raccolto il segnale collocando la lampada in diverse posizioni. Dopo aver mediato il segnale raccolto sui dieci frame per ridurre il rumore, si è interpolato lo stretto picco rilevato con una gaussiana per individuare il valore massimo di intensità registrata e la posizione del LED. Riportando in grafico i valori massimi di tensione e le posizioni della lampada così ricavati, si è ottenuta la curva di calibrazione, riportata in figura 1.3a. Si osserva, in primo luogo, una drastica riduzione dell'intensità del segnale a pixel inferiori a 700 e maggiori di 1400. Questo effetto è dovuto alla presenza della flangia, visibile in figura 1.3b, che interseca le linee di vista estreme della telecamera. Nella finestra centrale [800, 1200] pixel in cui, si vedrà, è compreso il segnale originato dal fascio, la curva ha un andamento leggermente crescente, con una variazione massima dei valori di tensione attorno al 15%. Questa disuniformità è compatibile con un allineamento non perfetto tra il LED e la telecamera stessa, e si è scelto di non utilizzare questo termine correttivo nelle successive analisi.



(a) Curva di calibrazione.

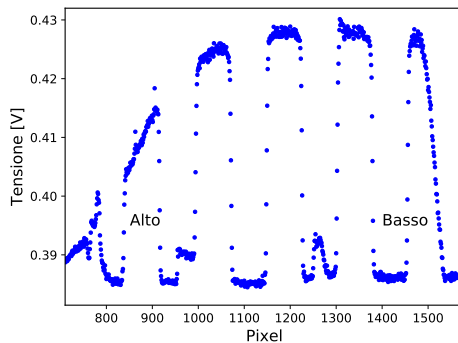


(b) Zona di vista della telecamera e schermo a strisce bianche e nere.

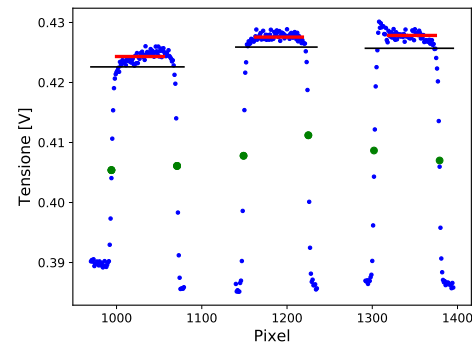
Figura 1.3: A sinistra, curva di calibrazione ottenuta riportando i massimi di intensità dei segnali integrati di un LED posto su un supporto mobile. A destra, visualizzazione della flangia e dello schermo a strisce bianche e nere utilizzato per ottenere il tasso di conversione mm/pixel.

1.2.2 Tasso di conversione mm/pixel

Nell'ottica di un confronto tra i risultati delle analisi dei segnali integrati raccolti dalla telecamera con quelli ricavati da altre diagnostiche, si è calcolato il tasso di conversione mm/pixel. A sorgente aperta si è posto un foglio a strisce bianche e nere alternate, ciascuna di larghezza (13.0 ± 0.3) mm, all'incirca al centro della camera e nella zona dove passa il fascio. Si è illuminato lo schermo con un LED posto sul fondo della camera di diagnostica e si è raccolto il segnale, con tempo di integrazione impostato a 30 ms. In figura 1.3b è riportata una foto dell'apparato sperimentale. L'acquisizione mediata sui dieci frame, per ridurre il rumore, è riportata in figura 1.4a. Per ottenere la larghezza in pixel delle strisce dello schermo si è applicato il seguente metodo, illustrato in figura 1.4b. Si è calcolata l'altezza delle tre strisce mediando sui valori di tensione dei punti sperimentali oltre una certa soglia, rappresentata in figura 1.4b con un tratto nero orizzontale. Si sono poi individuati i due punti sperimentali, a destra e sinistra della zona di massimo, con valore di tensione il più vicino possibile a metà altezza della striscia. Calcolando infine le differenze dei valori di ascissa (pixel) delle cinque coppie di punti consecutivi, si è ottenuta la larghezza media della striscia: (77.0 ± 0.6) pixel. Il tasso di conversione risulta dunque uguale a (0.169 ± 0.004) mm/pixel.



(a) Segnale integrato dello schermo a strisce bianche e nere alternate.



(b) Illustrazione esemplificativa del calcolo del tasso di conversione mm/pixel.

Figura 1.4: A sinistra, segnale raccolto dalla telecamera illuminando uno schermo a strisce bianche e nere alternate. Per come è installata la telecamera a sinistra-destra nel segnale corrisponde alto-basso nella camera da vuoto. A destra, grafico illustrativo della procedura con cui si è ottenuto il tasso di conversione mm/pixel. I tratti colorati in nero e in rosso individuano rispettivamente la soglia per il calcolo dell'altezza della striscia e il valore di questa. I punti a metà altezza sono rappresentati in verde.

Capitolo 2

Analisi del segnale integrato

In questo capitolo si discute l'elaborazione del segnale integrato della telecamera in vista della successiva analisi e i risultati di quest'ultima.

Si è ipotizzato, in prima approssimazione, che la forma del segnale integrato sia la somma di tre funzioni gaussiane, ognuna corrispondente ad un massimo di intensità. Facendo riferimento alla matrice 3×3 di fascetti estratti, si assume che il profilo di emissività del singolo fascetto sia una gaussiana. In secondo luogo si assume che per ogni riga il tripletto di profili dia origine ad un'unica gaussiana che, in termini di intensità, corrisponde ad uno dei tre picchi visibili nel segnale. A partire dai dati ricavati dall'interpolazione del segnale acquisito, si è poi studiato come i vari parametri - V_{AG} , V_{EG} , pressione e potenza RF - modifichino il fascio, con particolare attenzione all'ottica. D'ora in avanti per 'pressione' si intende quella misurata nella camera di diagnostica.

2.1 Segnale integrato

Ogni acquisizione della telecamera è composta di dieci frame consecutivi, ognuno con uguale tempo d'integrazione, impostato dall'operatore all'inizio delle operazioni. Per i segnali presi in esame il tempo di integrazione è di 30 ms. Si è poi elaborato il segnale effettuando le seguenti operazioni:

- con lo scopo di diminuire il rumore, per ogni acquisizione si è calcolato il segnale medio dei dieci frame, che sono uguali tra loro. Prima di acquisire il segnale infatti, si è atteso un tempo adeguato perchè i valori dei parametri di fascio si stabilizzassero ;
- per ogni segnale medio si è associato un tempo medio di salvataggio e, in base a questo, si sono associati i valori dei parametri V_{AG} , V_{EG} , pressione e potenza RF più vicini a quelli effettivi all'istante dell'acquisizione;

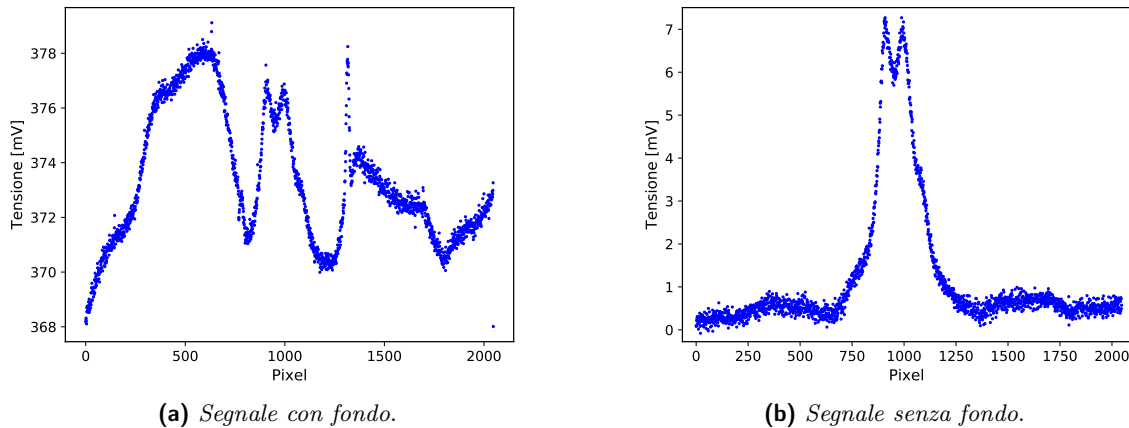
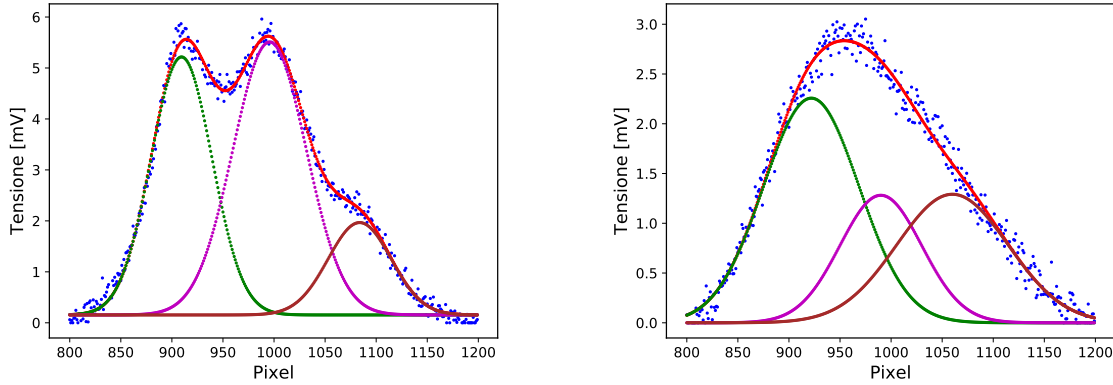


Figura 2.1: Esempio di segnale con e senza fondo.



(a) Segnale 11693 con sovrapposte in rosso la funzione interpolante e in verde, viola e marrone le sue tre componenti.

(b) Segnale 11689 con sovrapposte in rosso la funzione interpolante e in verde, viola e marrone le sue tre componenti.

Figura 2.2: Esempi di segnale con interpolazione.

- è stato individuato un segnale di fondo da sottrarre a tutti gli altri acquisiti nell'arco della singola giornata. In figura 2.1a è riportato un esempio di segnale grezzo. Nell'intervallo dei 2048 pixel, le linee di vista che entrano completamente all'interno della camera da vuoto attraverso la finestra sono quelle corrispondenti ai pixel centrali, da 800 a 1200. I due picchi intensi e larghi ai due lati corrispondono invece all'intersezione delle linee di vista con il tubo di accesso, e non sono quindi utilizzati nell'analisi. Inoltre, un effetto importante che deve essere evitato o minimizzato è la riflessione della luce di plasma contro la camera da vuoto metallica. A tale scopo si è annerita la parete interna della camera che interseca le linee di vista. Poichè questa precauzione non è pienamente sufficiente, si sottrae al segnale un fondo, unico in tutta la giornata di operazioni, in cui sia presente il riflesso della luce proveniente dalla sorgente ma sia assente il fascio. Si è dunque scelto come fondo il segnale a sorgente accesa (ovvero potenza RF $\neq 0$) e fascio non formato (tensione di estrazione nulla). In questo modo si ottiene anche l'effetto di sopprimere il rumore causato dalla luce che potrebbe provenire dall'esterno attraverso le finestre della camera da vuoto.

2.2 Analisi 1D del segnale

I segnali ristretti alla finestra [800, 1200] pixel e a cui è stato tolto il fondo, sono stati interpolati con la seguente funzione:

$$F(x) = k + \sum_{i=1}^3 A_i e^{-\frac{(x-x_{0_i})^2}{2\sigma_i^2}} \quad (2.1)$$

ovvero una somma di tre gaussiane e un ulteriore fondo (k) assunto costante. In figura 2.2a è riportato un esempio di profilo in cui sono ben visibili tre massimi di intensità, denominati 'picco sinistro', 'picco centrale', 'picco destro'. È stata sovrapposta in colore rosso $F(x)$, in colore verde la componente del picco sinistro, in viola quella del centrale, in marrone quella del destro. Sono presenti casi in cui i tre massimi di intensità non sono chiaramente visibili, ma sono inglobati ad esempio in una forma a campana (si veda figura 2.2b). In questi casi gli errori relativi dei parametri del fit sono maggiori rispetto a profili simili a quello riportato in figura 2.2a. Per l'analisi è risultato utile anche il calcolo dell'integrale del segnale, inteso come somma dei valori di tensione misurati dalla telecamera nell'intervallo ristretto alla finestra centrale.

2.2.1 Scan in tensione di accelerazione V_{AG}

In data 28/09/2017 è stato eseguito uno scan in V_{AG} con impostazioni: potenza RF = 1200 W, pressione pari a 0.157 Pa e $V_{EG} = 300$ V. V_{AG} varia in modo progressivo da 1.3 kV a 4.5 kV. Per $V_{AG} < 2.5$ kV gli errori relativi sui parametri del fit sono maggiori rispetto alla media (per le ampiezze ad esempio si ha 50 % vs 2 %), e ciò si spiega con la forma non ottimale del segnale (vedi figura 2.2b). Osservando la dipendenza dell'integrale del segnale da V_{AG} , riportata in figura 2.3a, si deduce che il segnale cresce d'intensità fino a saturare a $V_{AG} = 3.0$ kV. Le tre ampiezze, A1, A2, A3 dell'equazione (2.1), il cui andamento è mostrato in figura 2.3b, raggiungono un massimo di saturazione a V_{AG} compresa tra 3.0 kV e 3.5 kV, per poi, solo nel caso di A2, decrescere. Mettendo a confronto i due andamenti si deduce che il segnale, dopo 3.5 kV, cresce in larghezza.

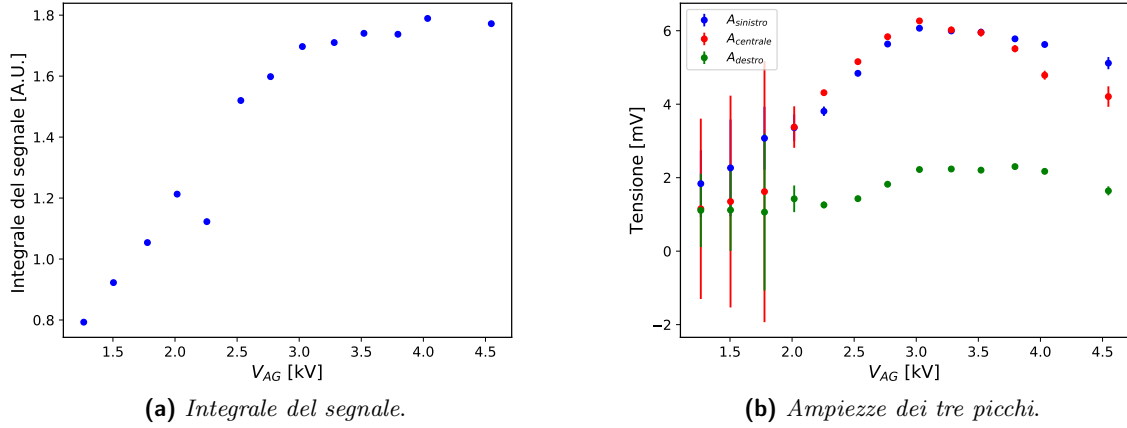


Figura 2.3: Andamento dell'integrale del segnale e delle ampiezze dei tre picchi per scan in V_{AG} eseguito in data 28/09/2017 con impostazioni: potenza RF = 1200 W, pressione = 0.157 Pa e $V_{EG} = 300$ V.

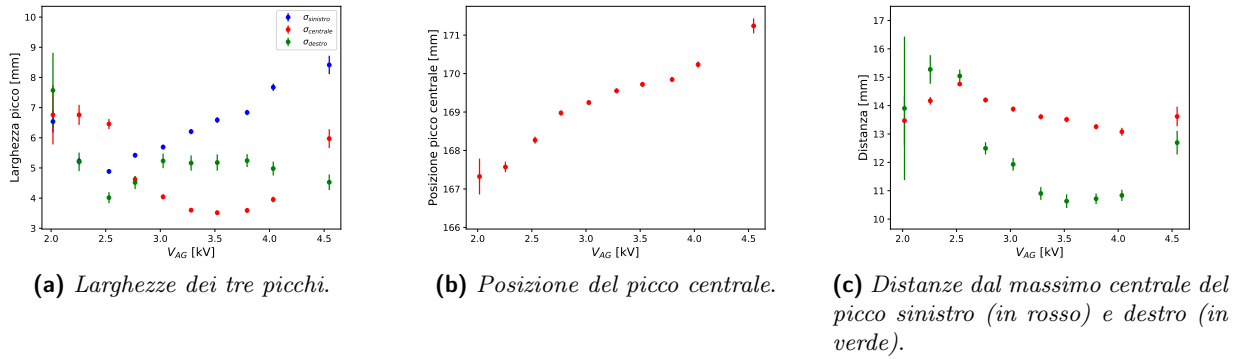


Figura 2.4: Andamento dei parametri rilevanti per l'ottica per scan in V_{AG} eseguito in data 28/09/2017 con impostazioni: potenza RF = 1200 W, pressione = 0.157 Pa e $V_{EG} = 300$ V.

L'ottica del fascio al variare di V_{AG} è studiata nella figura 2.4. In figura 2.4a si nota come a $V_{AG} = 3.5$ kV si abbia un minimo per $\sigma_{centrale}$, σ_{destro} sia approssimativamente costante e $\sigma_{sinistro}$ cresce linearmente. In figura 2.4b si osserva che il massimo centrale migra verso il massimo destro, mentre, come è illustrato in figura 2.4c, la distanza tra picco sinistro e centrale diminuisce fino a $V_{AG} = 4$ kV. La distanza tra i picchi centrale e destro raggiunge un massimo a $V_{AG} = 2.5$ kV, per poi calare lentamente (si veda sempre figura 2.4c). Aumentando dunque V_{AG} si riesce a 'recuperare' sempre più fascio estratto (le ampiezze e l'integrale aumentano fino a saturare), mutando conseguentemente l'ottica. I fascetti effettuano uno spostamento rigido verso destra, si avvicinano e il picco centrale si definisce sempre più fino a un minimo attorno a $V_{AG} = 3.5$ kV. Superato l'ottimo dell'ottica il fascio si sfuoca e si allarga. Questi risultati sono compatibili con quelli ottenuti con un altro tipo di diagnostica,

la Beam Emission Spectroscopy (BES), per la quale, a questi parametri di fascio, la divergenza minima si ha a valori di V_{AG} attorno ai 2-3 kV [7].

Al variare di V_{AG} l'ottica del fascio mostra una dipendenza anche dalla tensione di estrazione a cui si lavora. Analizzando infatti lo scan in V_{AG} eseguito in data 31/08/2017, dove l'intervallo di valori di V_{AG} è circa lo stesso del precedente scan, da 0.9 kV a 4.5 kV, si ritrovano andamenti simili ma non identici. Le impostazioni ora sono: potenza RF = 1100 W, pressione = 0.167 Pa e $V_{EG} = 500$ V. Anche la pressione e la potenza RF sono cambiati ma, come si vedrà più avanti nell'analisi, non influiscono in maniera importante sull'ottica. In figura 2.5a si osserva che a tensioni di accelerazione crescenti l'integrale del segnale aumenta, e un andamento analogo è mostrato in figura 2.5b per le ampiezze. Solamente $A_{centrale}$ satura a 3.5 kV. Studiando il grafico delle larghezze (figura 2.6a) si nota che $\sigma_{sinistro}$ ha un minimo attorno a 3.5 kV, $\sigma_{centrale}$ è costante tra 3 e 4 kV e il picco destro si definisce al crescere di V_{AG} . Il picco centrale dunque, raggiunge una sua forma stabile a 3.5 kV, mentre il massimo sinistro ha un ottimo sempre attorno a 3.5 kV e il picco destro si assottiglia sempre più. La posizione del massimo centrale si sposta verso il picco destro (si veda figura 2.6b) ma, diversamente dallo scan precedente, le distanze tra i picchi sono ora meno sensibili all'energia delle particelle, come illustrato in figura 2.6c. In tutti i grafici dei parametri si può infine osservare come, per V_{AG} minori di 2.5 kV, gli errori siano maggiori rispetto a quelli ricavati da segnali acquisiti a tensioni maggiori. Questo succede perchè il segnale interpolato è simile a quello in figura 2.2b, dove i tre picchi non sono ben distinguibili.

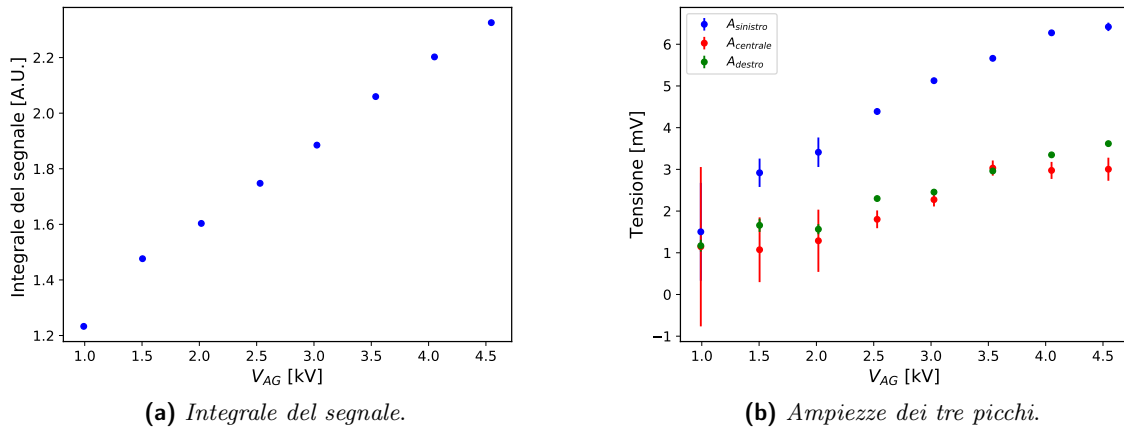


Figura 2.5: Andamento dell'integrale del segnale e delle ampiezze per scan in V_{AG} eseguito in data 31/08/2017 con impostazioni: potenza RF = 1100 W, pressione = 0.167 Pa e $V_{EG} = 500$ V.

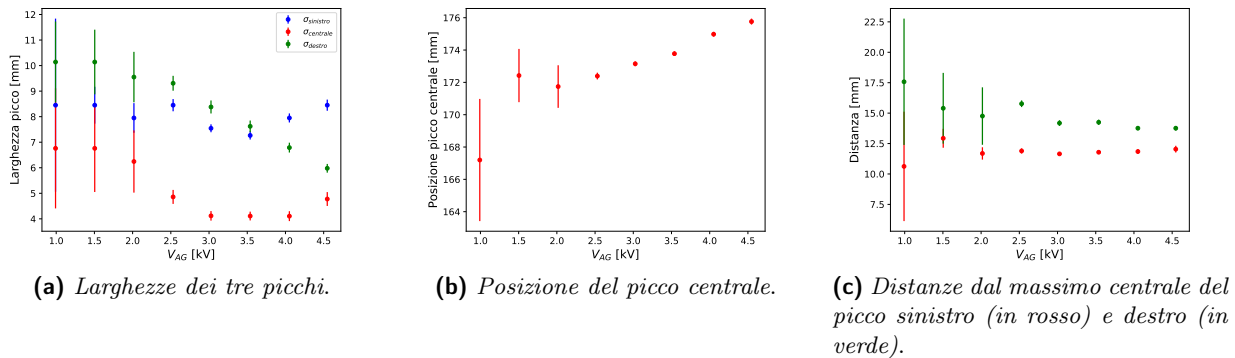


Figura 2.6: Andamento dei parametri rilevanti per l'ottica per scan in V_{AG} eseguito in data 31/08/2017 con impostazioni: potenza RF = 1100 W, pressione = 0.167 Pa e $V_{EG} = 500$ V.

2.2.2 Scan in tensione di estrazione V_{EG}

Si è successivamente preso in esame uno scan in tensione di estrazione V_{EG} , precisamente quello eseguito in data 04/10/2017 con impostazioni: potenza RF = 1200 W, pressione = 0.158 Pa e $V_{AG} = 2.5$ kV. V_{EG} varia in modo progressivo da 100 V a 500 V. A tensioni inferiori a 200 V gli errori relativi dei parametri sono grandi e difatti non sono visibili i tre picchi (per le larghezze ad esempio si ha 25 % vs 7 % di media). L'integrale del segnale è proporzionale alla tensione di estrazione, come illustrato in figura 2.7a. Per quanto riguarda le ampiezze, il loro tasso di crescita è rapido fino a $V_{EG} = 250$ V, poi diminuisce (si veda figura 2.7b). Studiando l'andamento delle larghezze, riportato in figura 2.8a, si osserva che $\sigma_{sinistro}$ è approssimativamente costante tra 250 e 450 V, mentre $\sigma_{centrale}$ e σ_{destra} in generale sono maggiori a tensioni più grandi. Analizzando il grafico di figura 2.8b, la posizione del massimo centrale è costante tra 200 e 300 V, successivamente si sposta verso il massimo sinistro. Le distanze dal picco centrale dei picchi sinistro e destro presentano un simile andamento crescente fino a 350 V, ma a tensioni maggiori non si ha un chiaro comportamento (si veda figura 2.8c).

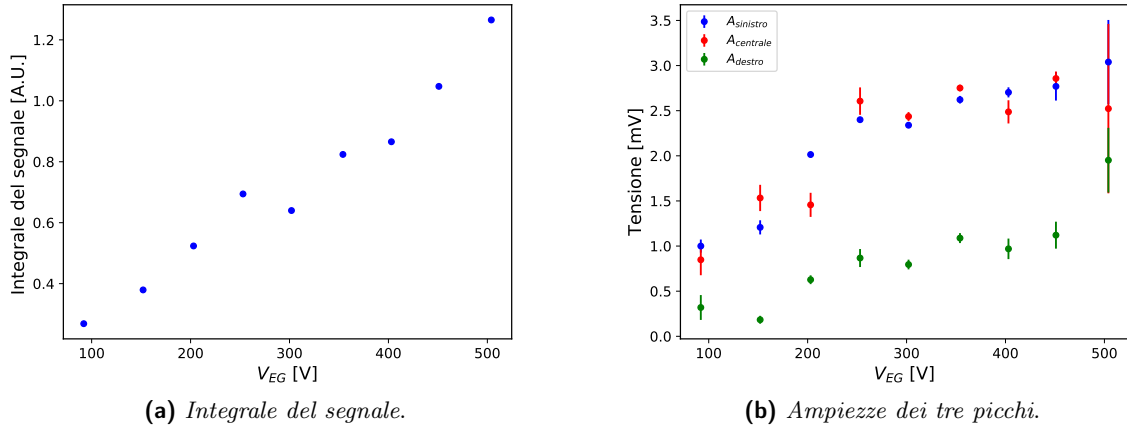


Figura 2.7: Andamento dell'integrale del segnale e delle ampiezze dei tre picchi per scan in V_{EG} eseguito in data 04/10/2017 con impostazioni: potenza RF = 1200 W, pressione = 0.158 Pa e $V_{AG} = 2.5$ kV.

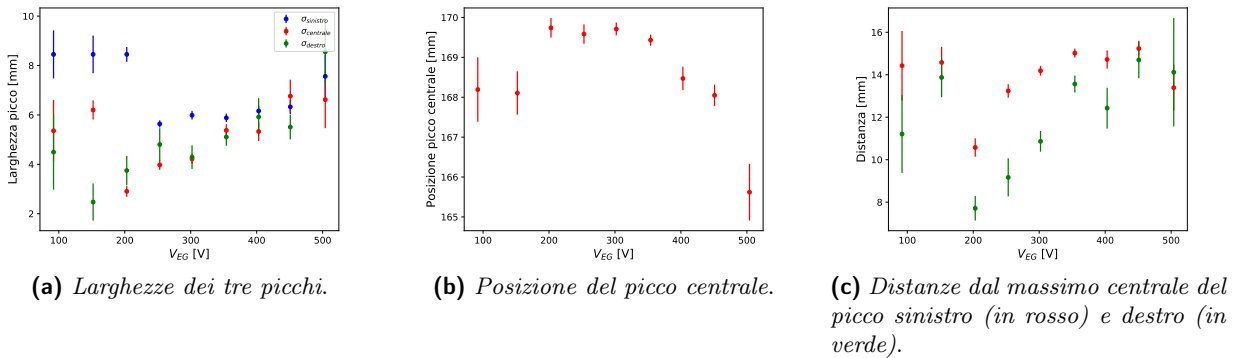


Figura 2.8: Andamento dei parametri rilevanti per l'ottica per scan in V_{EG} eseguito in data 04/10/2017 con impostazioni: potenza RF = 1200 W, pressione = 0.158 Pa e $V_{AG} = 2.5$ kV.

Come previsto dalle simulazioni [8], l'incremento di V_{EG} porta all'aumento della quantità di fascio estratto, ioni ed elettroni, e questo fatto è confermato, per esempio, dalla crescita del segnale totale raccolto dalla BES [7]. Il fascio dunque è più intenso e l'intensità del segnale acquisito con la telecamera difatti è proporzionale a V_{EG} (l'integrale e le ampiezze mostrano un andamento crescente). Un secondo effetto della variazione della tensione di estrazione è il cambiamento di forma del profilo, che si riflette nell'andamento crescente delle larghezze dei picchi e delle distanze. Non potendo trarre informazioni

sicure dai dati a $V_{EG} < 200$ V, l'analisi suggerisce che a valori crescenti di tensione di estrazione l'ottica peggiora (le larghezze e le distanze sono maggiori).

Nella stessa giornata è stato effettuato uno scan in V_{EG} con le stesse impostazioni del precedente, ad eccezione della potenza RF, ora impostata a 1000 W. Gli andamenti delle larghezze per ogni picco, riportati in figura 2.9, sono quasi simili nei due scan a potenza RF differenti. Si nota però che σ_{destro} , a potenza RF 1000 W, presenta un minimo a 300 V, ma in generale i valori di σ dei due scan sono confrontabili. Nei grafici di confronto per ciascuna ampiezza, riuniti in figura 2.10, si nota che, nonostante $A_{centrale}$ e $A_{sinistro}$ siano maggiori a potenza RF minore, fatto poi confermato in uno scan illustrato in seguito, il loro andamento è simile. Lo spostamento del picco centrale, illustrato in figura 2.11a, è lo stesso nei due scan, così come l'andamento delle distanze tra massimo destro e centrale (si veda figura 2.11b). Diverso tra i due set di dati risulta il modo in cui variano le distanze tra picco sinistro e centrale: per potenza RF 1000 W le distanze raggiungono un massimo a 300 V e poi decrescono, per potenza RF 1200 W il massimo è raggiunto a 350 V (si osservi figura 2.11c). Il segnale dunque è maggiormente intenso a potenza RF minore ma gli andamenti dei parametri sono gli stessi, eccezion fatta per le distanze del massimo sinistro dal centrale, mostrando quindi che l'ottica del fascio è poco influenzata da variazioni della potenza RF.

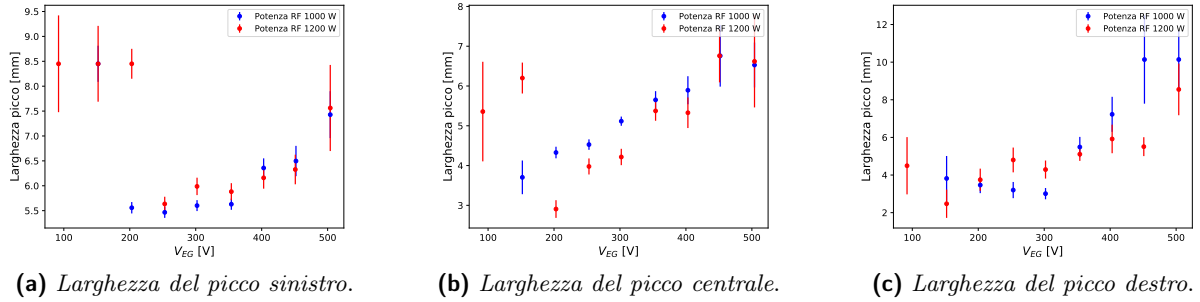


Figura 2.9: Confronto degli andamenti delle larghezze dei tre picchi per due scan in V_{EG} , eseguiti in data 04/10/2017, a differente potenza RF ma a stessi valori di pressione e V_{AG} , rispettivamente pari a 0.158 Pa e 2.5 kV.

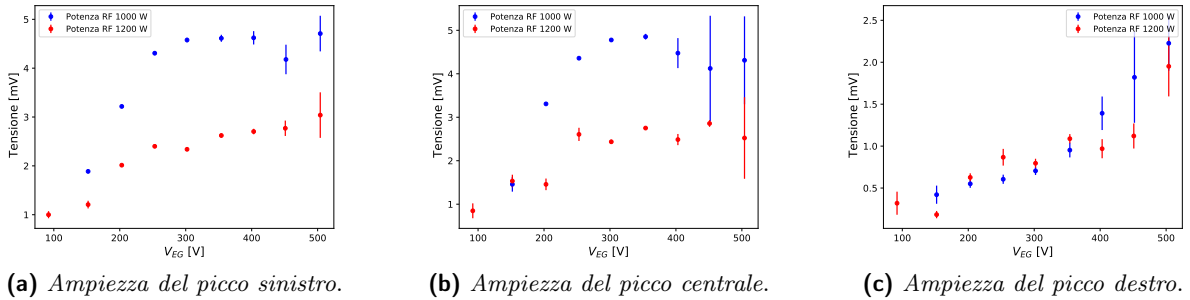
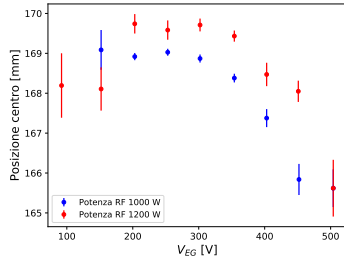
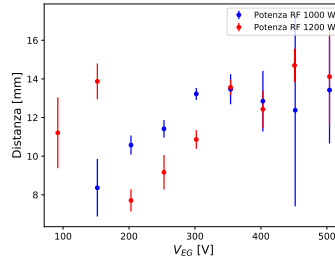


Figura 2.10: Confronto degli andamenti delle ampiezze dei tre picchi per due scan in V_{EG} , eseguiti in data 04/10/2017, a differente potenza RF ma a stessi valori di pressione e V_{AG} , rispettivamente pari a 0.158 Pa e 2.5 kV.

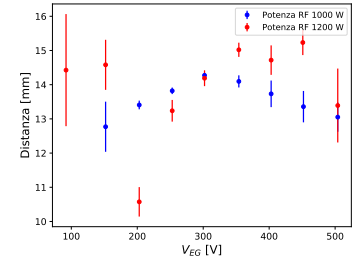
Per studiare l'effetto della pressione si sono confrontati due scan in V_{EG} simili ma con valori di pressione diversi: 0.158 Pa e 0.126 Pa. Il primo è lo scan illustrato all'inizio del paragrafo, il secondo è stato effettuato il 05/10/2017.



(a) Posizione del picco centrale.

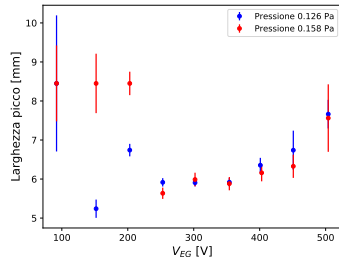


(b) Distanze dal massimo centrale del picco destro.

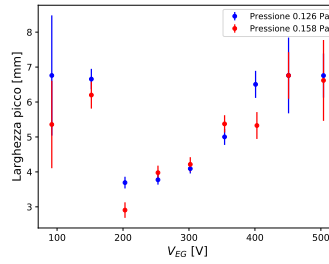


(c) Distanze dal massimo centrale del picco sinistro.

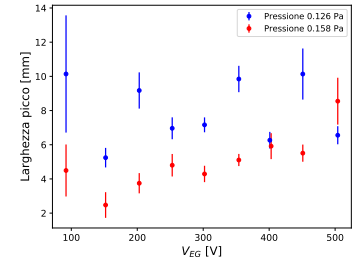
Figura 2.11: Confronto degli spostamenti del massimo centrale e delle distanze da questo dei picchi laterali, per due scan in V_{EG} , eseguiti in data 04/10/2017, a differente potenza RF, ma a stessi valori di pressione e V_{AG} , rispettivamente pari a 0.158 Pa e 2.5 kV.



(a) Larghezza del picco sinistro.

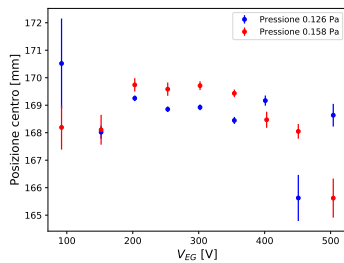


(b) Larghezza del picco centrale.

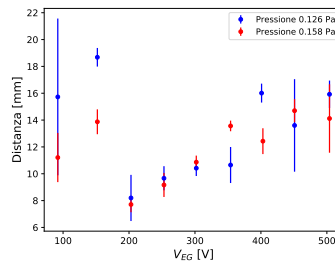


(c) Larghezza del picco destro.

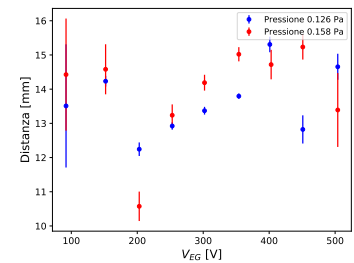
Figura 2.12: Confronto degli andamenti delle larghezze dei tre picchi per due scan in V_{EG} , a differente pressione ma a stessi valori di V_{AG} e potenza RF, rispettivamente pari a 2.5 kV e 1200 W.



(a) Posizione del picco centrale.



(b) Distanze dal massimo centrale del picco destro.



(c) Distanze dal massimo centrale del picco sinistro.

Figura 2.13: Confronto degli spostamenti del massimo centrale e delle distanze da questo dei picchi laterali, per due scan in V_{EG} , a differente pressione ma a stessi valori di V_{AG} e potenza RF, rispettivamente pari a 2.5 kV e 1200 W.

In figura 2.12 si osserva che gli andamenti delle larghezze dei tre picchi, nei due scan a pressione diversa, sono circa gli stessi e i valori confrontabili. L'unica eccezione è rappresentata dal comportamento di σ_{destro} , compatibile tuttavia con la difficoltà del fit a definire la gaussiana a destra, essendo meno intensa delle altre due. Analizzando i grafici riuniti in figura 2.13, si nota che sono simili gli andamenti dello spostamento della posizione del massimo centrale e delle distanze relative tra questo e i picchi laterali, confermando dunque che variazioni di pressione non influiscono sull'ottica del fascio.

2.2.3 Scan in potenza RF

Fissati i valori di V_{AG} e V_{EG} e variando la potenza RF, cambia l'intensità del segnale ma non la forma. In data 04/10/2017 si è effettuato uno scan in potenza RF con impostazioni: $V_{\text{AG}} = 2.5 \text{ kV}$, $V_{\text{EG}} = 350 \text{ V}$ e pressione = 0.158 Pa. La potenza RF varia in modo progressivo da 1000 W a 1200 W.

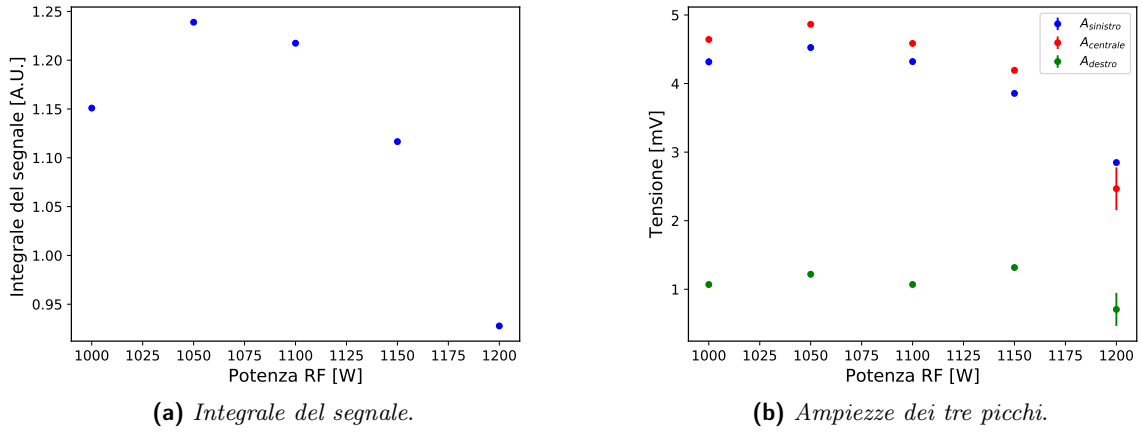


Figura 2.14: Andamento dell'integrale del segnale e delle ampiezze dei tre picchi per scan in potenza RF eseguito in data 04/10/2017 con impostazioni: $V_{\text{AG}} = 2.5 \text{ kV}$, $V_{\text{EG}} = 350 \text{ V}$, pressione = 0.158 Pa.

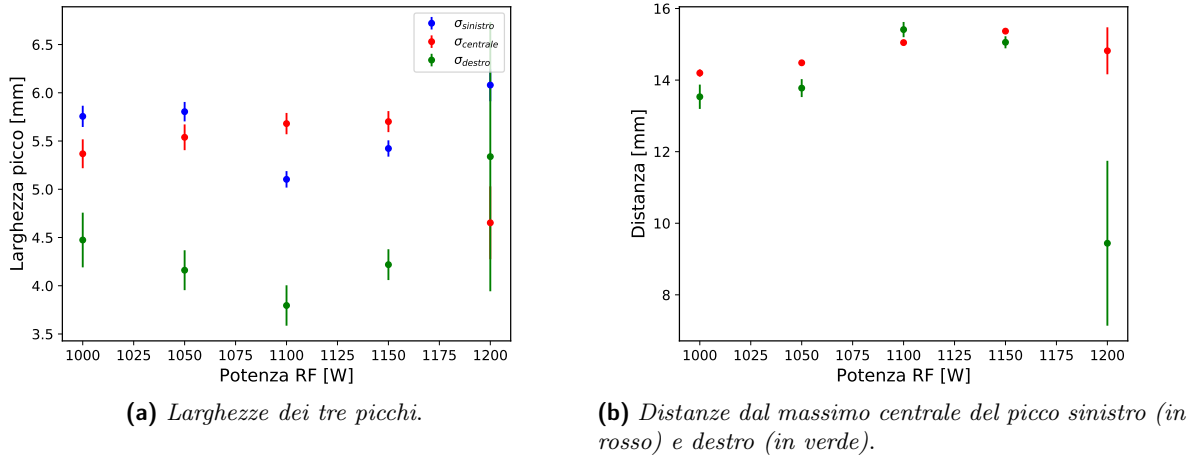


Figura 2.15: Andamento dei parametri rilevanti per l'ottica per scan in potenza RF datato 04/10/2017 con impostazioni: $V_{\text{AG}} = 2.5 \text{ kV}$, $V_{\text{EG}} = 350 \text{ V}$, pressione = 0.158 Pa.

Si osserva in figura 2.14a e 2.14b che l'integrale del segnale e le ampiezze aumentano fino a 1050 W, mentre a potenze maggiori diminuiscono. Non si riporta il grafico della posizione del picco centrale perchè costante. In figura 2.15a è mostrato l'andamento di σ per ogni gaussiana, che è circa costante. Le distanze tra i picchi laterali e il centrale sono costanti, come illustrato in figura 2.15b. Variando quindi il valore della potenza RF, la forma del segnale rimane la stessa e cambia l'intensità. Incre-

mentando infatti il valore della potenza RF, la densità elettronica nella sorgente aumenta, con due effetti opposti. Se gli elettroni possiedono poca energia (minore di 2 eV) favoriscono la reazione di produzione degli ioni H^- , se sono più energetici sono in grado di distruggere lo ione negativo appena formato (fenomeno di stripping). Ipotizzando per l'energia elettronica una funzione di distribuzione di Maxwell-Boltzmann, il numero degli e^- poco energetici è maggiore, con conseguente aumento degli ioni negativi prodotti. L'andamento anomalo mostrato in questo scan, confermato dai risultati ottenuti dalla BES, sarà oggetto di studio per future indagini.

2.2.4 Scan in pressione

Impostando diversi valori di pressione nella sorgente, ottenendo quindi pressioni diverse anche nella camera di diagnostica, il segnale diventa più o meno intenso ma la forma non cambia. Si riportano ora i risultati di uno scan in pressione, datato 05/10/2017, con impostazioni: $V_{AG} = 2.5$ kV, $V_{EG} = 350$ V e potenza RF = 1200 W. La pressione varia in modo progressivo da 0.126 Pa a 0.211 Pa.

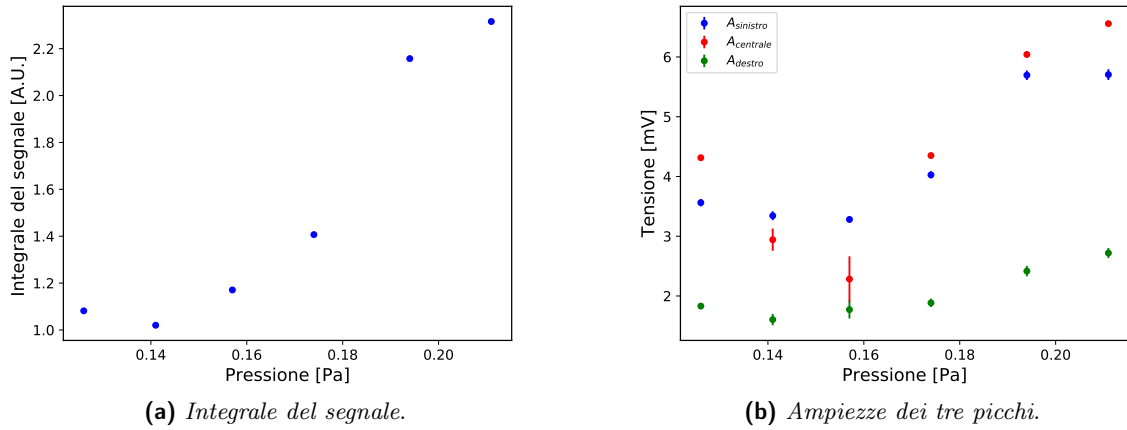


Figura 2.16: Andamento dell'integrale del segnale e delle ampiezze dei tre picchi per scan in pressione datato 05/10/2017 con impostazioni: $V_{AG} = 2.5$ kV, $V_{EG} = 350$ V e potenza RF = 1200 W.

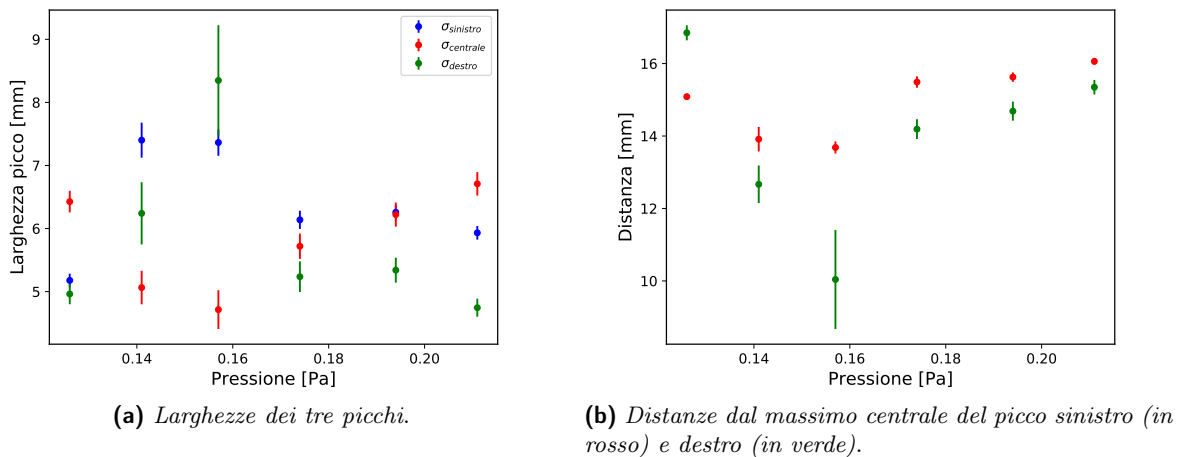


Figura 2.17: Andamento dei parametri rilevanti per l'ottica per scan in pressione datato 05/10/2017 con impostazioni: $V_{AG} = 2.5$ kV, $V_{EG} = 350$ V e potenza RF = 1200 W.

La curva dell'integrale del segnale in funzione della pressione, riportata in figura 2.16a, mostra che a pressioni maggiori corrispondono segnali più intensi. Gli andamenti delle ampiezze dei tre massimi, mostrati in figura 2.16b, sono in generale crescenti. Come si osserva in figura 2.17a non

c'è una chiara dipendenza delle larghezze dei picchi dalla pressione. Le variazioni delle distanze tra i picchi laterali dal massimo centrale sono trascurabili (figura 2.17b), mentre non si riporta il grafico dello spostamento del picco centrale perchè costante. Variazioni di pressione non influiscono perciò sull'ottica in maniera significativa, ma a pressioni maggiori il fascio diventa più luminoso. Questo si può spiegare considerando che, aumentando la pressione, la densità del gas di fondo nella camera da vuoto è maggiore, e più probabili diventano perciò le interazioni tra gli H^- e gli atomi neutri che conseguentemente si eccitano.

Capitolo 3

Ricostruzione tomografica del fascio

In questo capitolo si mostra la ricostruzione tomografica del fascio a partire dai dati acquisiti dalla telecamera, e si confrontano i risultati che si ricavano da questa procedura con quelli illustrati nel capitolo precedente.

3.1 Modello per l'inversione tomografica del segnale

L'analisi tomografica del fascio si prefigge lo scopo di ricavare il profilo di emissività $\epsilon(x, y)$ del fascio, utilizzando un numero adeguato di linee di vista. Il segnale raccolto dalla telecamera lineare infatti è un vettore di misure di tensione proporzionale alla brillantezza f_i , ciascuna corrispondente al pixel i -esimo, lungo la linea di vista l_i :

$$f_i = \int_{l_i} \epsilon(x, y) dx dy \quad (3.1)$$

Invertendo tale relazione, si può ottenere $\epsilon(x, y)$. Questa relazione è invertibile solo se si misura l'emissività con un numero sufficiente di telecamere [9]. Utilizzandone solo una, si è adottato un approccio diverso basato su una procedura di fit.

Si scrive il profilo di emissività bidimensionale del fascio come somma dei profili di emissività dei nove fascetti, che si assumono avere ciascuno un profilo bidimensionale di tipo gaussiano:

$$\epsilon_j(x, y) = A_j e^{-\frac{(x-x_j)^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y-y_j)^2}{2\sigma_y^2}} \quad \text{con } j = 1, \dots, 9 \quad (3.2)$$

dove $x_j = x_j^{in}$ e $y_j = y_j^{in} + \delta_{y_j}$, con x_j^{in} e y_j^{in} le coordinate x e y dei fori della Plasma Grid, attraverso cui passa il fascio estratto. La deflessione verticale del fascetto j -esimo dovuta al campo magnetico è indicata con δ_{y_j} . Approssimando $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, ogni fascetto viene descritto da quattro parametri (A , x_0 , y_0 , σ). A partire dall'emissività $\epsilon(x, y)$, data la linea di vista i -esima della telecamera descritta dall'equazione:

$$y = a_i + b_i x$$

l'integrale lungo questa linea di vista è definito come:

$$I_i = \sum_{j=1}^9 \int_{-\infty}^{+\infty} A_j e^{-\frac{(x-x_j)^2 + (a_i + b_i x - y_j)^2}{2\sigma_j^2}} dx \quad (3.3)$$

Poichè la distanza della telecamera dal centro del fascio è relativamente grande (circa 340 mm) e la zona di piano tomografico con valori di emissività non nulla è sufficientemente ristretta, si può valutare l'integrale tra $-\infty$ e $+\infty$. Pertanto l'equazione (3.3) diventa:

$$I_i = \sum_{j=1}^9 A_j \sigma_j \sqrt{\frac{2\pi}{1 + b_i^2}} e^{-\frac{a_i + b_i x_j - y_j}{2\sigma_j^2(1 + b_i^2)}} \quad (3.4)$$

Si è dunque confrontato il valore I_i con il corrispondente sperimentale I_i^{exp} per determinare i parametri liberi delle nove gaussiane che descrivono il fascio, minimizzando la loro differenza. In figura 3.1 è

illustrata schematicamente la procedura appena descritta per un fascio ideale. I fascetti, oltrepassati i fori della PG, si muovono in linea retta e dunque, per il design di NIO1, il fascio occupa il centro della camera. Per semplicità si è posta l'origine degli assi nel fascetto centrale del fascio ideale (in figura 3.1 il numero 5) e si è assunto che l'asse x passi per il centro della telecamera lineare.

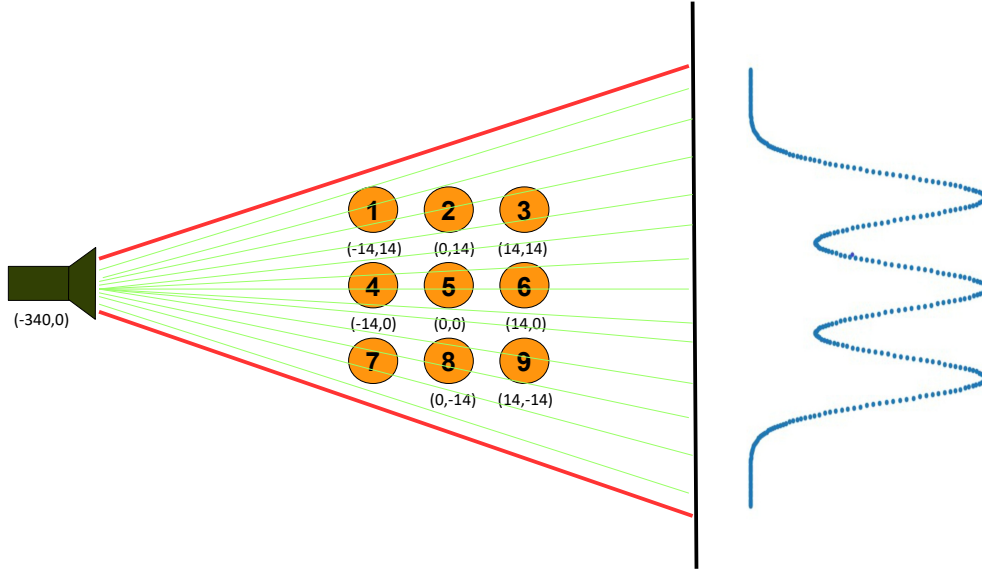


Figura 3.1: Rappresentazione schematica della ricostruzione tomografica 2D del fascio. Dalla telecamera, raffigurata a sinistra, si originano le linee di vista che intersecano il fascio, rappresentato in figura come una matrice 3×3 di pallini numerati da 1 a 9. Il profilo di segnale a destra è il risultato dei contributi di tutti i fascetti all'integrale dell'emissività lungo ciascuna linea di vista. Nel caso di fascio ideale, qui raffigurato, i tre picchi sono larghi e alti uguali. Si scrivono tra parentesi le coordinate dei fascetti e della telecamera nel sistema di riferimento con origine il centro del pallino 5. Le distanze sono espresse in mm.

Se si considerano liberi tutti e quattro i parametri (A, x_0, y_0, σ) di tutti e nove i fascetti, si arriva ad un numero totale di 36 variabili. È molto improbabile giungere in un fit non lineare, con un così elevato numero di parametri liberi, ad un risultato sufficientemente robusto. Si è dunque cercato di semplificare il problema riducendo il numero di variabili libere in gioco. Una delle possibili scelte che si possono prendere è ragionare per righe, facendo riferimento alla matrice 3×3 di fascetti. Questa decisione si basa in primo luogo sull'ipotesi che la deflessione verticale sia piccola, e in secondo luogo sui limiti intrinseci della telecamera lineare. Questa infatti osserva il fascio lungo l'asse y e dunque, tenendo valida l'ipotesi precedente, variazioni all'interno della singola riga dell'ampiezza A , della larghezza σ e dell'ascissa del centro x_0 non sono univocamente rilevabili. Si sono perciò fissate le posizioni in x (x_j) di tutti i fascetti alle posizioni nominali, escludendole dal fit, e si è limitato il numero delle ampiezze libere A da nove a tre, una per ogni riga. Così è stato fatto anche per le larghezze σ . Infine, al posto dei nove δ_{y_j} , si è considerato uno spostamento rigido per colonna, δ_n ($n = 1, 2, 3$), arrivando così ad un totale di nove parametri liberi per il fit.

Nonostante la riduzione consistente delle variabili per l'interpolazione, si deve porre massima attenzione agli input iniziali da dare al programma che esegue il fit. Prima di procedere con l'interpolazione, si è dunque scritto un codice in grado di valutare in maniera combinata quali valori per le tre A , le tre σ , le tre δ_n minimizzassero la somma quadratica dei residui tra il fit e il segnale. Una volta trovati, si è eseguito il fit e si è visualizzato il profilo di emissività del fascio.

La semplificazione fatta per ridurre il numero delle variabili libere del fit non è però l'unica possibile. Si sono tentate infatti altre vie, svincolando ora alcuni parametri ora altri. Tutti gli approcci alternativi

però non hanno finora condotto ad esiti soddisfacenti, producendo inversioni del segnale evidentemente non ragionevoli e non compatibili con le informazioni raccolte dalle altre diagnostiche. Pertanto, nella presentazione del lavoro condotto in questa tesi si mostrano solamente i risultati ricavati usando l'approssimazione per righe sopra descritta.

3.2 Analisi 2D del segnale integrato

Prendendo in esame lo scan in V_{AG} del 28/09/2017, già discusso al paragrafo 2.2.1, si sono invertiti i segnali con il metodo descritto nella sezione precedente, ottenendo le immagini dei nove fascetti al variare della tensione di accelerazione. Le impostazioni del fascio sono: potenza RF = 1200 W, pressione = 0.157 Pa e $V_{EG} = 300$ V; V_{AG} varia in modo progressivo da 1.3 kV a 4.5 kV. In figura 3.2 sono riportati alcuni profili ricostruiti di emissività del fascio in ordine crescente di tensione di accelerazione, mentre in figura 3.3 sono mostrati i segnali corrispondenti con sovrainposta la curva interpolante.

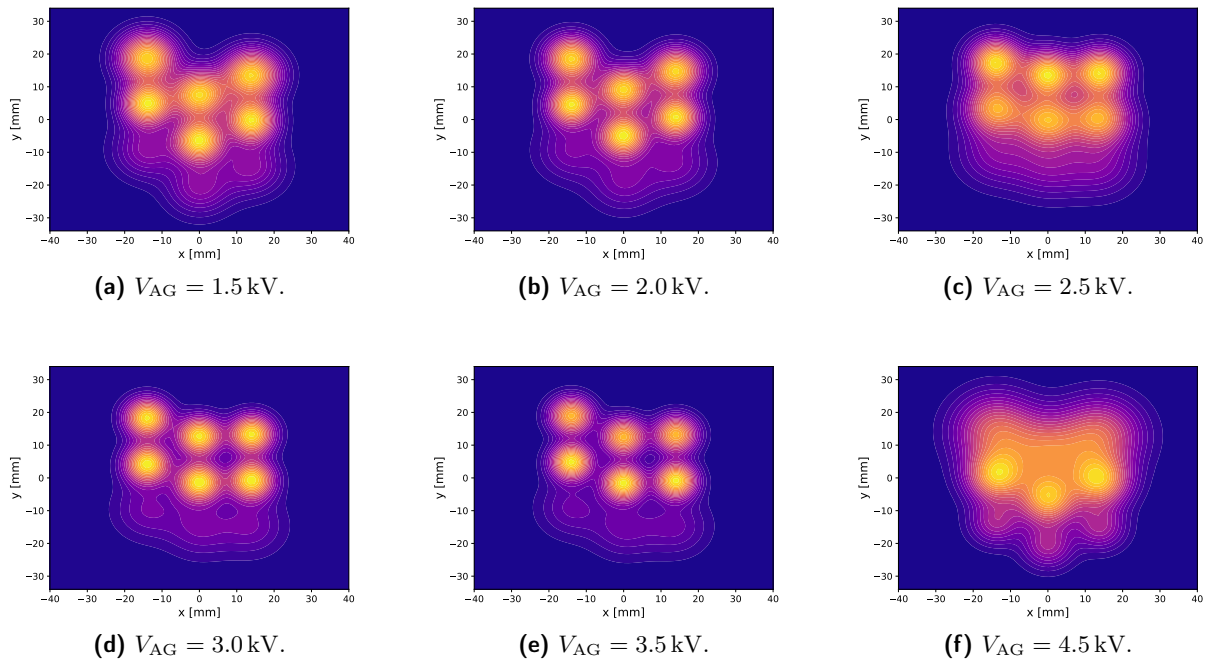


Figura 3.2: Profili ricostruiti di emissività del fascio per scan in tensione di accelerazione del 28/09/2017 con impostazioni: potenza RF = 1200 W, pressione = 0.157 Pa e $V_{EG} = 300$ V. I profili si riferiscono ai segnali con V_{AG} : 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.5 kV. Il codice dei colori è in scala arbitraria normalizzata al massimo.

Si osserva innanzitutto che la riga in basso, a cui nel segnale integrato corrisponde il terzo picco, è meno intensa rispetto alle altre due e questo conferma il fatto, trovato nel capitolo 2, che l'ampiezza del picco destro è più bassa rispetto a quella degli altri picchi. Una possibile spiegazione del fenomeno potrebbe essere una disuniformità della sorgente o, meno probabile, della densità del gas di fondo. Particolarmente significativo poi è il confronto tra l'evoluzione dei profili ricostruiti di emissività del fascio (in figura 3.2) e dei corrispettivi segnali integrati (figura 3.3): a tensione di accelerazione attorno a 3-3.5 kV i fascetti sono ben definiti e nei segnali corrispondenti sono ben visibili i tre picchi; a tensioni maggiori o minori il fascio si sfuoca e i tre picchi non sono più visualizzabili. Da una prima analisi qualitativa dunque, risulta che l'ottimo dell'ottica è attorno agli stessi valori di V_{AG} trovati con il metodo precedente. La ricostruzione 2D del fascio mostra, come previsto, che le due colonne laterali sono spostate verso l'alto rispetto a quella centrale indipendentemente dal valore della tensione di accelerazione. Per evitare infatti che gli elettroni estratti insieme agli ioni negativi procedano oltre la PA, nella griglia di estrazione sono collocati dei magneti che deviano gli e^- contro la griglia stessa. In misura minore però sono deviati anche i fascetti estratti e, per la particolare configurazione del campo magnetico, le file laterali sono deflesse verso l'alto, quella centrale verso il basso. Maggiore è lo spostamento verticale relativo delle colonne laterali da quella centrale, meno visibili diventano

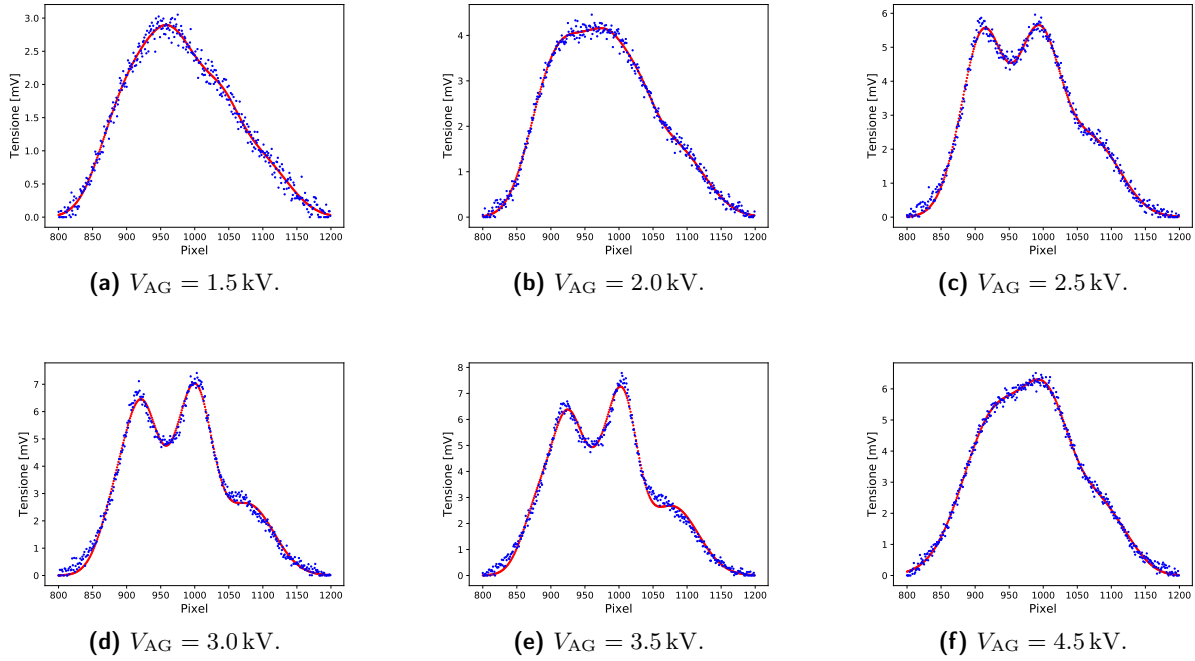
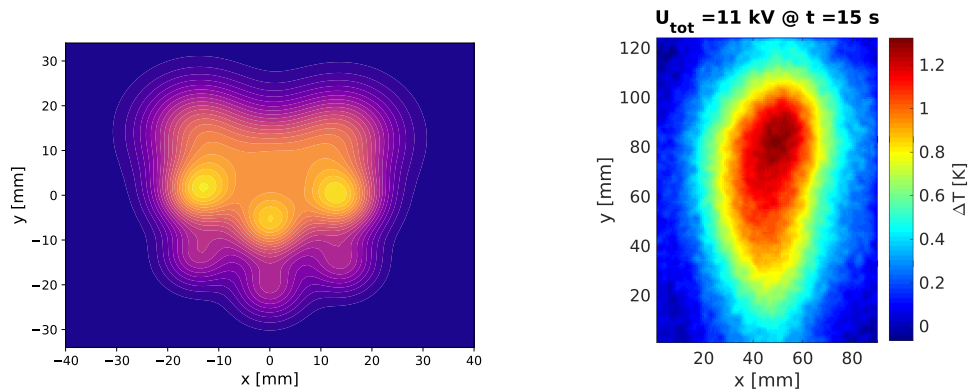


Figura 3.3: Segnali, con sovrainposta la funzione interpolante, dello scan in tensione di accelerazione del 28/09/2017 con impostazioni: potenza RF = 1200 W, pressione = 0.157 Pa e $V_{EG} = 300$ V. I segnali riportati sono stati acquisiti con V_{AG} : 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.5 kV.

i picchi nel segnale integrato (si veda per confronto i profili in figure 3.2b e 3.2c e i corrispettivi segnali sperimentali in figura 3.3b e 3.3c). La minore emissività della parte inferiore del fascio e la configurazione sfalsata delle colonne è compatibile con quanto ottenuto dalla telecamera sensibile all'infrarosso (IR). L'obiettivo di quest'ultima diagnostica è la ricostruzione del flusso di energia del fascio che impatte su una tegola di grafite, tramite misure di temperatura del lato del bersaglio lungo la corrente. In figura 3.4 è riportato un confronto tra i profili ricavati dalle due telecamere [10]. Si nota come in entrambi i casi la parte inferiore del fascio risulti meno energetica.

Passando ora ad un'analisi più quantitativa, in figura 3.5a si mostra l'andamento degli spostamenti verticali δ_n delle colonne. Si osserva che questi dipendono dal valore della tensione di accelerazione, ma non c'è un chiaro comportamento. Si può solo notare come attorno a 2.5 kV si abbia in generale una minore deflessione. Le ampiezze invece, riportate in figura 3.5b, hanno un massimo ben visibile a



(a) Profilo ricostruito di fascio a $V_{AG} = 4.5$ kV a partire dal segnale integrato della telecamera lineare.

(b) Esempio di segnale acquisito dalla telecamera IR [10].

Figura 3.4: Confronto tra segnali sperimentali della telecamera lineare e della telecamera IR.

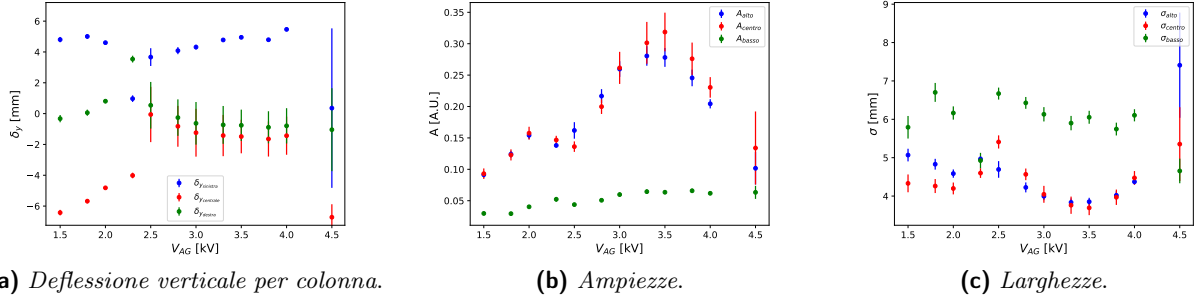


Figura 3.5: Parametri ottenuti con il metodo della ricostruzione tomografica 2D del fascio, a partire dai segnali dello scan in V_{AG} del 28/09/2017. Sono rappresentate in blu l'ampiezza e la larghezza σ dei fascetti della riga superiore, in rosso di quella centrale, in verde di quella inferiore. La stessa sequenza di colori è stata usata per gli spostamenti δ_n delle colonne rispettivamente sinistra, centrale, destra.

valori di V_{AG} attorno a 3-3.5 kV. Come già notato nell'analisi qualitativa, l'ampiezza dei fascetti della riga in basso è inferiore rispetto agli altri. Studiando il grafico delle larghezze dei fascetti (figura 3.5c) si osserva che σ_{alto} e σ_{centro} presentano un minimo a tensione di accelerazione attorno a 3-3.5 kV, mentre σ_{basso} decresce nell'intervallo 2.5-3.3 kV per poi stabilizzarsi.

Si denotano da ora per semplicità i due metodi di interpolazione, quello discusso al capitolo 2 e quello trattato in questo capitolo, rispettivamente come 'fit 1D' e 'fit 2D'. Confrontando quanto trovato per il fit 1D (paragrafo 2.2.1) si osserva che le ampiezze hanno andamenti simili: crescono fino ad un massimo a V_{AG} attorno a 3-3.5 kV, per poi diminuire (figure 2.3b e 3.5b). In entrambe le interpolazioni i valori delle larghezze del picco centrale sono confrontabili e hanno un minimo attorno a 3.5 kV (figure 2.4a e 3.5c). Confrontando gli stessi due grafici si osserva però che l'andamento di σ_{sinistro} (fit 1D) o σ_{alto} (fit 2D) è diverso: nel fit 1D le larghezze crescono a tensioni maggiori, nell'altro caso presentano un minimo a V_{AG} attorno a 3.0 e 3.5 kV. Infine si ritrova l'andamento circa costante della larghezza del terzo picco attorno a 3.5 kV. Il fit 2D pertanto conferma i risultati ottenuti con il metodo precedente, e in particolare che la migliore focalizzazione del fascio sia attorno ai 3-3.5 kV di tensione di accelerazione. Nonostante i limiti e le approssimazioni coinvolte, il metodo discusso in questo capitolo ha il pregio di visualizzare il profilo di fascio e di ricavare informazioni dai segnali prima non analizzabili, come quello di figura 3.3a, dove i tre picchi non sono visibili.

Capitolo 4

Conclusioni

4.1 Risultati

In questo lavoro di tesi, attraverso l'analisi dei segnali acquisiti da una telecamera lineare, si è studiato il modo in cui il fascio estratto di NIO1 è influenzato dai parametri dell'acceleratore e della sorgente; in particolare se ne sono caratterizzate l'ottica e l'uniformità. La telecamera, che osserva di profilo i nove fascetti componenti il fascio e disposti in una matrice 3×3 , raccoglie il segnale luminoso generato dall'interazione degli ioni H^- con gli atomi neutri del gas di fondo nella zona di drift.

Per l'analisi si sono adottati due approcci: il primo consiste nell'interpolare il segnale raccolto dalla telecamera con tre gaussiane, ciascuna corrispondente ad uno dei tre picchi visibili; l'altro, più ricco di informazioni ma meno flessibile non essendo ancora pienamente ottimizzato, ricostruisce il profilo bidimensionale di emissività del fascio, ricavando le variabili libere che lo descrivono a partire dai segnali integrati. Mediante queste analisi si è mostrato che:

- variando la potenza RF si modifica la sorgente e sperimentalmente si osserva una variazione della luminosità del fascio. Non sono presenti invece effetti rilevanti per l'ottica. In particolare, a valori maggiori di potenza RF l'intensità del segnale diminuisce. Tale risultato è stato poi confermato studiando i segnali di scan in tensione di estrazione a differente potenza RF.
- incrementando la pressione cresce l'intensità del segnale integrato, ma non ci sono effetti considerevoli sull'ottica. A pressioni maggiori infatti, la densità del gas di fondo è maggiore e dunque diventano più probabili le interazioni degli ioni H^- con gli atomi neutri, che si eccitano. Queste conclusioni sono state poi confermate confrontando segnali di scan in tensione di estrazione a diversi valori di pressione.
- l'ottica dipende fortemente dalle tensioni V_{AG} e V_{EG} e la dipendenza da una è influenzata dal valore dell'altra. In particolare la migliore focalizzazione dei nove fascetti si ha per valori di V_{AG} attorno a 3.5 kV e V_{EG} pari a 300 V. È importante notare che questo risultato è compatibile con quanto osservato da un altro tipo di diagnostica, la Beam Emission Spectroscopy (BES) [7].

Il secondo approccio ha permesso di ottenere un'immagine 2D, con i nove fascetti che compongono il fascio risolti. Questa immagine, ottenuta tramite un'inversione tomografica dei segnali integrati, permette di osservare sia la deflessione in verticale alternata delle tre file di fascetti, dovuta al campo magnetico generato dai magneti collocati nella griglia di estrazione [3], sia l'emissività minore della parte inferiore del fascio, compatibile con quanto rilevato sperimentalmente dalla telecamera ad infrarosso [10]. Questa disuniformità potrebbe rappresentare un problema al fine di un'ottimizzazione completa del fascio.

4.2 Lavori futuri

L'analisi presentata in questo lavoro di tesi ha permesso la caratterizzazione del fascio con un accordo soddisfacente con i risultati già illustrati in letteratura ([5], [7], [8], [10]) ma ha evidenziato i limiti della diagnostica usata, dovuti al numero ristretto di linee di vista che intersecano i fascetti estratti.

Due nuove telecamere sono ora installate su NIO1 ma, come descritto in [4], per ottenere una ricostruzione tomografica fedele del fascio è necessaria una copertura il più possibile uniforme su tutti i 360° . Questo risulta in parte possibile, nonostante le uniche due porte di accesso disponibili, installando uno specchio all'interno della camera da vuoto. Considerando la situazione attuale, si potrebbe migliorare il metodo di inversione tomografica usando una tecnica alternativa, denominata 'tecnica di ricostruzione algebrica simultanea' (SART), basata su un algoritmo iterativo [4].

Bibliografia

- [1] ITER Organization, <https://www.iter.org/> .
- [2] R. Hemsworth *et al.*, *Status of the ITER heating neutral beam system*, Nuclear Fusion **49**, 045006, <https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/4/045006>, (2009).
- [3] M. Cavenago *et al.*, *Design of a versatile multiaperture negative ion source*, Review of Scientific Instruments **81**, 02A713, <https://doi.org/10.1063/1.3271247>, (2010).
- [4] N. Fonnesu *et al.*, *Tomographic reconstruction of the beam emissivity profile in the negative ion source NIO1*, Nuclear Fusion **56**, 126018, <https://doi.org/10.1088/0029-5515/56/12/126018>, (2016).
- [5] M. Ugoletti, *NIO1 negative ion beam investigation in view of ITER heating and current drive*, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Tesi di Laurea Magistrale in Fisica, (2018).
- [6] Hamamatsu Photonics, <https://www.hamamatsu.com/> .
- [7] B. Zaniol *et al.*, *First Hydrogen operation of NIO1: Characterization of the source plasma by means of an optical emission spectroscopy diagnostic*, Review of Scientific Instruments **87**, 02B319, <https://doi.org/10.1063/1.4936084>, (2016).
- [8] P. Veltri *et al.*, *Ion beam transport: modelling and experimental measurements on a large negative ion source in view of the ITER heating neutral beam*, Nuclear Fusion **57**, 016025, <https://doi.org/10.1088/0029-5515/57/1/016025>, (2017).
- [9] F. Natterer, *The mathematics of computerized tomography*, Prima edizione, Stuttgart B.G. Teubner, ISBN 3-519-02103-X, (1986).
- [10] A. Pimazzoni *et al.*, *A first characterization of the NIO1 particle beam by means of diagnostic calorimeter*, AIP Conference Proceedings **1869**, 030028, <https://doi.org/10.1063/1.4995748>, (2017).