

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Caratterizzazione del fascio di NIO1 con telecamere
visibili

Relatore

Prof. Matteo Agostini

Correlatore

Dr. Margherita Ugoletti

Laureando

Alessio Saccomani

Anno Accademico 2021/2022

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Fusione nucleare e ITER	2
1.2	NIO1 e Telecamere visibili	4
1.3	Produzione di ioni negativi	6
1.4	Ottica del fascio: divergenza e deflessione	7
2	Analisi 1D	10
2.1	Fit a quattro gaussiane del profilo di intensità	10
2.2	Divergenza e deflessione	12
3	Scan in ottica con Veg costante	14
4	Scan in perveanza con R=10	18
5	Deflessione	21
6	Conclusioni	23

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Fusione nucleare e ITER

L'esperimento NIO1 (Negative Ion Optimization Phase 1), situato al Consorzio RFX a Padova, si inserisce nell'ambito della ricerca scientifica riguardante la fusione nucleare, la reazione che avviene nel sole e nelle altre stelle, il fenomeno fisico che si sta studiando come fonte di sostentamento del futuro per soddisfare il crescente utilizzo mondiale di energia. La fusione nucleare è promettente come nuova fonte di energia per alcune ragioni principali: il carburante è potenzialmente infinito, infatti si utilizzano gas di deuterio e trizio, isotopi dell'idrogeno; è una fonte di energia pulita, essendoci zero emissioni di anidride carbonica e scorie radioattive con vita molto breve. Infine, dal punto di vista civile, non può portare a incidenti nucleari con danni a popolazioni e ambiente e non vengono usati elementi che possono essere utilizzati per realizzare armi. L'esperimento che sarà il caposaldo di questa nuova innovazione tecnologica è ITER, un cammino verso la fusione nucleare; è il primo esperimento che ha come obiettivo quello di mantenere la fusione per lunghi periodi di tempo (400-600 secondi), preparando la via per le centrali a fusione di un domani.

Lo scopo di ITER (una sezione dell'esperimento è riportata in figura 1.1) è produrre 500 MW di potenza partendo da 50 MW di potenza termica in input, con un $Q = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 10$ [1]. In tabella 1.1 sono riportati alcuni parametri dell'esperimento. In ITER ci sarà un plasma di deuterio-trizio a temperature molto alte, di circa 10 keV, e tra i vari metodi di riscaldamento del plasma uno sarà l'utilizzo di iniettori di particelle neutre ad alta energia, la NBI (Neutral Beam Injection). Una parte fondamentale di questi iniettori è l'estrazione e l'accelerazione di ioni negativi da una camera cilindrica, che funge da sorgente. Per ITER è richiesta una grande quantità di potenza e corrente trasportata dal fascio; in particolare, entrambi gli iniettori genereranno fino a 16.5 MW di potenza termica. Le particelle neutre saranno accelerate a 1 MeV, con una corrente di 40 A per un tempo di 3600 s. Il fascio sarà diviso in 1280 fascetti, per ognuno dei quali è richiesto di avere una divergenza ≤ 7 mrad. Sono richieste delle condizioni anche sulla deflessione orizzontale, che deve essere ≤ 2 mrad. Il motivo è che anche una piccola deflessione può portare ad un significativo spostamento dei fascetti, considerato il lungo spazio di percorrenza [2]; infatti la sorgente di ioni negativi e il plasma distano circa 25 metri.

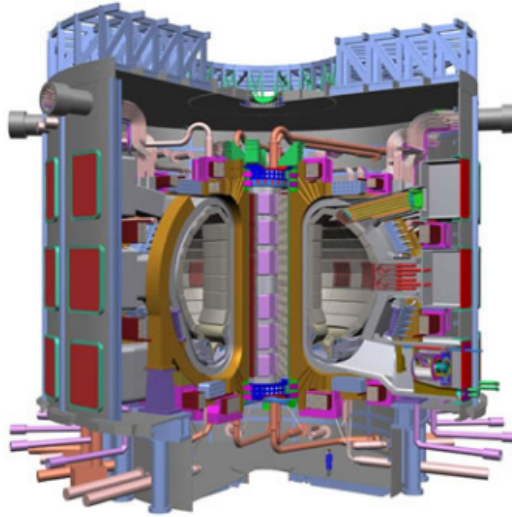


Figura 1.1: Sezione del tokamak di ITER

Parametri	Valori
Potenza di fusione	500 MW
Guadagno Q	10
Durata impulso	3600 s
Tipo di plasma	D-T
Raggio maggiore del plasma	6.2m
Raggio minore del plasma	2.0m
Corrente di plasma	15 MA
Campo magnetico toroidale per R=6.2m	5.3 T
Volume del plasma	830 m^3
Altezza/diametro della macchina	26 m/29 m

Tabella 1.1: Parametri principali dell'esperimento ITER

NIO1 è un esperimento che permette di studiare queste proprietà del fascio; questo lavoro di tesi si occuperà in particolare di studiare divergenza e deflessione, nei capitoli 3, 4 e 5. Per studiare il fascio si utilizza il suo profilo di emissione, ottenibile misurando la luce emessa dalle particelle dei fascetti nell'interazione con le particelle del gas di fondo. Per questo si utilizzano due telecamere, una posta sotto il fascio ed una lateralmente ad esso. Lo scopo principale del lavoro è stato sulla telecamera laterale, dal momento che in questo caso è stata compiuta tutta l'analisi partendo dal profilo di emissione per arrivare alla stima della divergenza e della deflessione. Per la telecamera che osserva il fascio dal basso i risultati della divergenza e deflessione erano già presenti [3] e ci si è limitati ad analizzarli per confrontarli con i risultati della telecamera laterale. Alla fine si sono considerate la visione laterale e dal basso per studiare il fascio in tutte le sue dimensioni e trovare le condizioni migliori per minimizzare la divergenza e la deflessione dei fascetti.

1.2 NIO1 e Telecamere visibili

L'esperimento NIO1 è una sorgente di ioni negativi a radiofrequenza, composta da una camera cilindrica di lunghezza 7 cm e raggio interno 10 cm [4]. Attorno alla sorgente è montata una bobina che permette di ionizzare il gas di idrogeno scaldandolo e generando così un plasma; uno schema dettagliato dell'esperimento è riportato in figura 1.2. Da questo plasma vengono estratti gli ioni negativi (H^-) tramite un campo elettrico e attraverso una griglia di estrazione in rame. L'obiettivo di NIO1 è l'estrazione in modo continuo di 130 mA di ioni negativi di idrogeno in uno schema a 3x3 fascetti, accelerati fino a 60 keV [4]. La sorgente opera con una frequenza del generatore RF di circa 2 MHz, con una potenza massima di 2.5 kW. Per estrarre ed accelerare gli ioni sono presenti 3 elettrodi: la plasma grid (PG) a contatto con il plasma, la griglia di estrazione (EG) e la griglia di accelerazione che permette di raggiungere la velocità finale (PA, Post Acceleration Grid). Inoltre è presente un'ulteriore griglia, il Repeller (REP), il cui compito è impedire che gli ioni positivi prodotti nella propagazione del fascio nel gas di fondo tornino indietro a grande velocità impattando sulla sorgente. Oltre a questo sono installati dei magneti permanenti sulla griglia di estrazione per deviare gli elettroni (CESM : Co-Extracted Electrons Suppression Magnets); gli elettroni, infatti, avendo una massa molto inferiore a quella degli ioni vengono deflessi dal campo magnetico e impattano sulla griglia stessa. Tuttavia questi magneti influenzano anche la traiettoria degli ioni H^- , perciò è necessario correggerla tramite metodi di compensazione; in particolare sono posti dei magneti anche sulla PA per correggere questa deflessione. Questo effetto modifica la direzione di propagazione dei vari fascetti: la colonna centrale del fascio devia verso l'alto, mentre le due colonne laterali verso il basso. La soluzione è un'ulteriore serie di magneti installati sulla EG, gli ADCM (Asymmetric Deflection Compensation Magnets), che insieme ai CESM hanno l'obiettivo di compensare perfettamente la deflessione. In fondo al tubo a vuoto è presente un calorimetro (CFC, carbon fiber composite), che serve come bersaglio del fascio per misurarne la forma e la corrente trasportata.

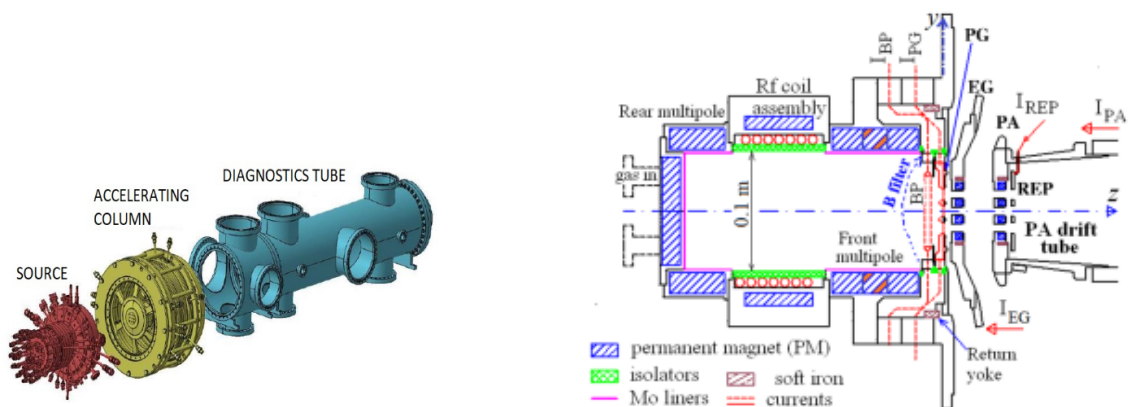


Figura 1.2: Apparato sperimentale: rappresentazione di NIO1 a sinistra e schema della sorgente e delle griglie di estrazione e accelerazione a destra

Il sistema tomografico di NIO1 è composto da due telecamere visibili; esse montano un sensore CMOS (modello Ace 1920-40GM by Basler, con un sensore Sony Pregius IMX249), con un frame rate massimo di 42 fps. I sensori sono formate da 1920 x 1200 pixel di larghezza $5.86 \mu\text{m}$. Entrambe le telecamere montano un obiettivo con lunghezza focale di 16 mm, con un pixel corrispondente a 0.18 mm nell'asse del fascio. Le camere ricevono principalmente la luce visibile emessa nella diseccitazione dell'idrogeno H dal livello $n=3$ a $n=2$ con una lunghezza d'onda di $\lambda=656.28 \text{ nm}$; in corrispondenza di questa lunghezza d'onda i sensori hanno un'alta efficienza. Come si vede in figura 1.3, le telecamere sono poste una sotto (BC, il cui campo di vista è in verde in figura) e una lateralmente (LC, in blu) rispetto alla direzione dei fascetti (in giallo).

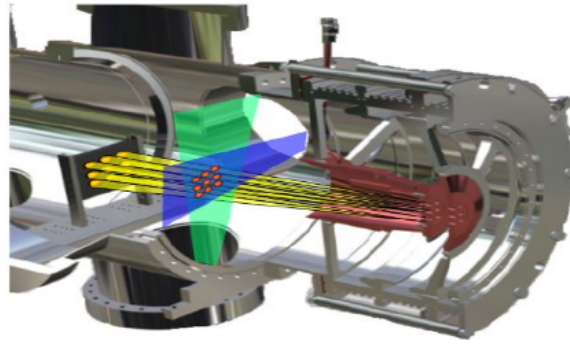


Figura 1.3: Visualizzazione delle telecamere BC (dal basso, in verde) e LC (Laterale, in blu) installate su NIO1. In giallo sono raffigurati i fascetti estratti dalla sorgente

Un esempio di immagine 2D delle telecamere è riportato in figura 1.4. In entrambe le figure, le tre colonne (dal basso, nell'immagine a sinistra) e le tre righe (lateralmente, immagine di destra) di fascetti sovrapposti sono ben visibili, secondo lo schema 3x3 già discusso. Ogni riga visibile è infatti la luce che arriva dalla sovrapposizione di tre fascetti. Per la BC si visualizzano le tre colonne di fascetti, per la LC le tre righe. Nella prima immagine si vede da sotto il fascio che si propaga da sinistra a destra; nella seconda foto si propaga sempre da sinistra a destra ma si ha una visione laterale del fascio. Ci sono dei fogli neri di alluminio di spessore 100 μm , installati attorno alla camera a vuoto, tra i pixel 1 e 500 per la telecamera laterale e tra i pixel 1000 e 1400 per la telecamera dal basso. Questi fogli servono a minimizzare la luce riflessa dalle superfici interne del tubo a vuoto dove passa il fascio. Proprio in corrispondenza di questi fogli di alluminio vengono presi i profili 1D di intensità.

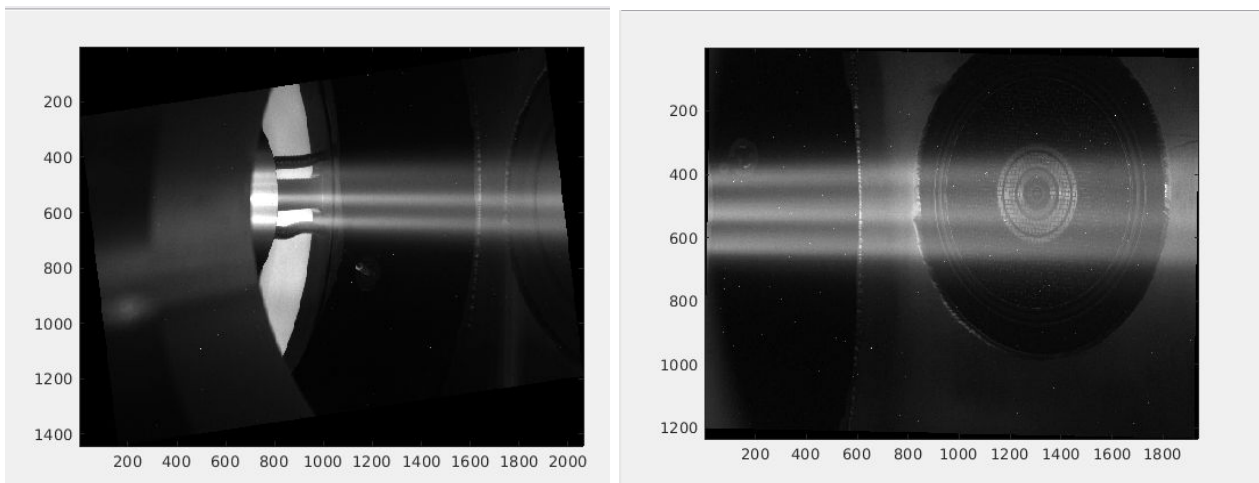


Figura 1.4: Scatto per la telecamera BC a sinistra e LC a destra, sugli assi sono riportati i pixel

1.3 Produzione di ioni negativi

La necessità di estrarre ed accelerare ioni negativi invece che positivi, più facili da produrre, deriva dalla capacità di neutralizzazione ad alte energie, che risulta 10-100 volte maggiore come si può vedere dal grafico 1.5. Perciò si neutralizzano ioni negativi, ottenendo un numero maggiore di particelle neutre per scaldare il plasma all'interno del tokamak di ITER o altri esperimenti [5].

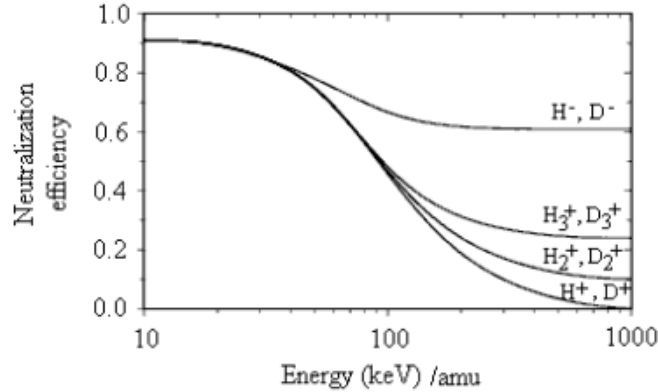
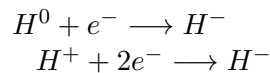


Figura 1.5: Efficienza di neutralizzazione di ioni/isotopi di idrogeno in funzione della loro energia cinetica

La produzione degli ioni negativi si effettua in due differenti modi: formazione di volume e formazione di superficie. Nel primo caso molecole di idrogeno, H_2 , si dissociano in collisioni con elettroni: molecole molto eccitate possono a loro volta assorbire un elettrone diventando H_2^- e dividendosi in H e H^- [6]. La formazione di volume risulta insufficiente per ottenere la densità di ioni negativi richiesta; per questo motivo si sfrutta anche la produzione di superficie che avviene con assorbimento di un elettrone da parte di una superficie, per via di un urto di atomo o ione di idrogeno. La formazione di uno ione negativo in questo caso può avvenire secondo due diverse reazioni:



La probabilità di cattura elettronica dopo un urto contro la superficie di un atomo/ione di idrogeno, p , si descrive con la seguente relazione:

$$p \propto \frac{E_a - \phi}{v_{\perp}}$$

Nella quale v_{\perp} è la velocità ortogonale alla parete della particella incidente, ϕ è la funzione lavoro caratteristica del materiale della superficie (2,2 eV per il cesio) e E_a è l'affinità elettronica (0,76 eV per l'idrogeno). Il miglior donatore di elettroni è il cesio, perciò è utilizzato nelle sorgenti per aumentare il numero di ioni negativi che possono essere estratti. In tutte le misure effettuate in questo lavoro è presente il cesio all'interno della sorgente.

1.4 Ottica del fascio: divergenza e deflessione

Due proprietà che caratterizzano l'ottica di un fascio di ioni negativi sono la divergenza, cioè la distribuzione angolare degli ioni che compongono il fascio, e la deflessione, cioè la deviazione dalla direzione nominale di propagazione. Esse dipendono da alcuni parametri caratteristici della sorgente [7], come la pressione. Dipendono anche da parametri dell'acceleratore come la tensione di estrazione (V_{eg} , tra la PG e la EG), la tensione di accelerazione (V_{acc} , tra EG e PA) e il loro rapporto $R = \frac{V_{acc}}{V_{eg}}$.

La pressione della sorgente influisce sul fascio in quanto, modificandola, si può variare la corrente estratta e la percentuale di elettroni co-estratti dalla EG. Una bassa pressione del gas di fondo tra le griglie permette di evitare di rimuovere elettroni dagli ioni e diminuire quindi il numero di elettroni liberi.

Tra la PG, che separa il plasma dalla zona di estrazione, e la EG l'ottica del fascio è determinata dalla perveanza, che deriva dalla relazione di Child-Langmuir, che mette in relazione la corrente estratta I_s con la differenza di potenziale V tra le due griglie

$$I_s = \frac{4\epsilon_0\pi}{9} S^2 V^{3/2} \sqrt{\frac{ez}{m}} \quad (1.1)$$

Dove $S = \frac{r}{d}$, con r raggio dell'apertura e d distanza tra le griglie; z e m sono la carica e la massa della particella estratta. Essendo S una costante per un dato sistema di estrazione, la corrente del fascio di ioni negativi che si può estrarre è proporzionale alla tensione $V^{3/2}$, e la costante di proporzionalità è la perveanza

$$P = \frac{I_s}{V_{ext}^{3/2}} \quad (1.2)$$

A tensioni e geometrie fissate quindi la densità di corrente che può essere estratta è limitata superiormente, come si può osservare in figura 1.6. Per estrarre più corrente dal fascio è necessario alzare la tensione di estrazione (curva nera in figura) e la quantità di carica estraibile, il cui valore mi determina quando la corrente estratta satura (in figura ogni curva colorata rappresenta un diverso valore di carica estraibile). Senza un numero sufficiente di ioni negativi non è possibile aumentare la corrente oltre un certo valore; questo limite massimo alla corrente estratta è definito appunto dalla perveanza.

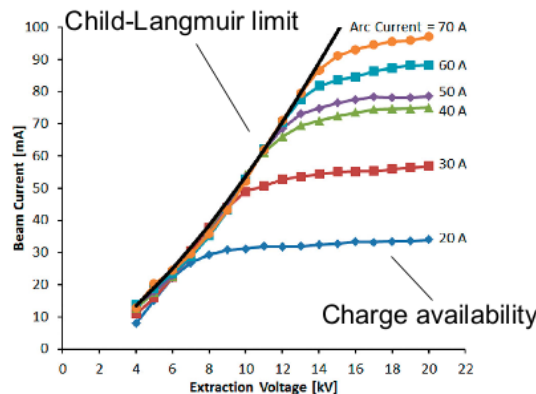


Figura 1.6: Corrente estraibile in funzione della tensione di estrazione secondo la legge di Child-Langmuir, le diverse curve saturano a seconda della carica che può essere estratta [8].

La divergenza del fascio dipende principalmente dalla perveanza nel primo gap dell'acceleratore (tra la PG e la EG) e dal rapporto $\frac{V_{acc}}{V_{eg}}$ tra la EG e la PA. Nel primo gap la perveanza mi definisce la forma del fascio [9]. In particolare esiste un valore di perveanza ottimale per cui si ottiene la divergenza minore dei fascetti. Se la densità di corrente è minore (under perveance) o maggiore (over perveance) della perveanza ottimale si ottiene una divergenza maggiore. Il grafico della divergenza del fascio in funzione della corrente estratta a tensione costante ha una caratteristica curva a sorriso con un minimo corrispondente alla perveanza ottimale, come mostrato in figura 1.7.

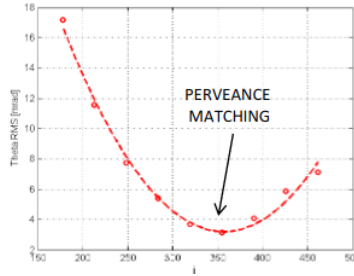


Figura 1.7: Divergenza in funzione della perveanza [10]

Se nella prima zona di estrazione la perveanza definisce l'ottica del fascio, nel secondo gap tra l'EG e la PA il rapporto tra la tensione di accelerazione e di estrazione determina la forma del fascio. In figura 1.8 è possibile osservare i due gap dell'acceleratore: la zona di estrazione tra la PG e la EG in cui la perveanza determina la forma del fascio e la zona di accelerazione in cui il fascio viene focalizzato definita dal rapporto delle tensioni. Un'apertura in una griglia con campi elettrici di diverso valore ai suoi lati diventa una lente elettrostatica per i fasci di ioni negativi che la attraversano [11]. All'ingresso della griglia si forma una lente divergente e alla sua uscita una lente convergente. Con l'approssimazione di lente sottile si ottiene la formula di Davisson-Calbick per la lunghezza focale.

$$f = \frac{4V}{E_{>} - E_{<}} \quad (1.3)$$

Dove V è il potenziale all'elettrodo e $E_{<}$ e $E_{>}$ i campi elettrici rispettivamente prima e dopo l'apertura.

In questo modo variando la tensione tra le griglie di estrazione ed accelerazione è possibile formare una lente elettrostatica convergente tale da diminuire l'espansione del fascio dovuta alla carica spaziale.

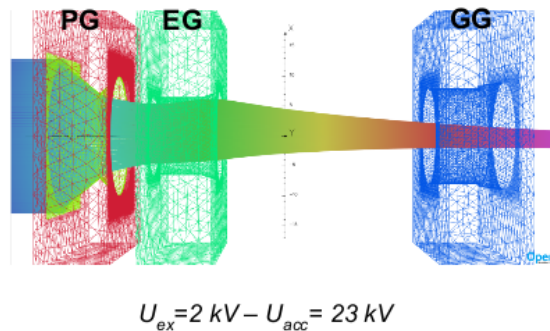


Figura 1.8: Schema dell'acceleratore: perveanza e lente elettrostatica. GG rappresenta la griglia di accelerazione

Per quanto riguarda la deflessione del fascio invece, la compensazione della deviazione può essere effettuata in due modi [12]: è possibile spostare le griglie successive a quella di estrazione in modo tale da compensare la deflessione del fascio (compensazione elettrostatica) oppure compensarla tramite campi magnetici. Nel primo caso tuttavia c'è la dipendenza del metodo dal raggio di Larmor degli ioni, e quindi dall'energia e dalle tensioni applicate. Nel secondo metodo con i magneti ADCMs montati direttamente sulla griglia di estrazione è possibile compensare direttamente la deflessione. Ciò che si fa è scompensare il campo magnetico: si passa dalla curva blu simmetrica in figura relativa ad un singolo magnete, alla curva rossa asimmetrica (figura 1.9). L'integrale sotteso a quest'ultima curva permette di calcolare l'effetto cumulativo del campo magnetico nel percorso degli ioni e quindi compensare con precisione la deflessione.

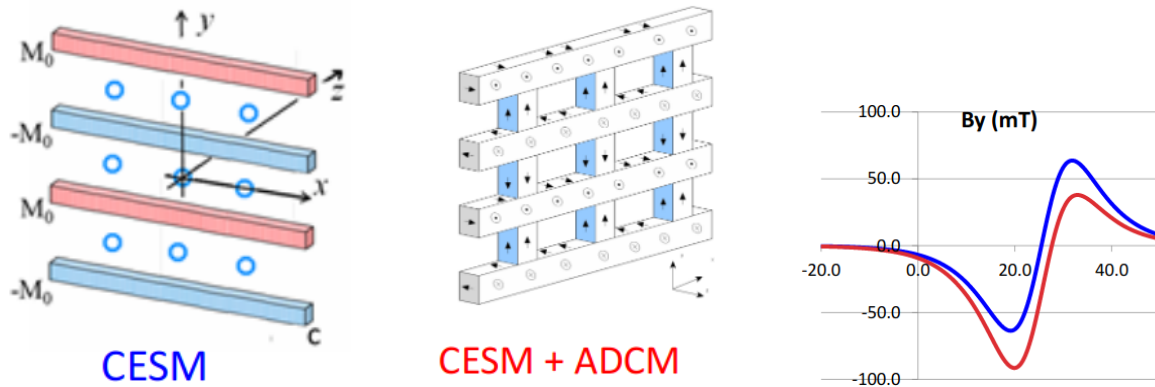


Figura 1.9: Magneti CESMs , ADCMs e campo magnetico prodotto [13]

Capitolo 2

Analisi 1D

In questo capitolo sono descritte le tecniche di analisi utilizzate per stimare divergenza e deflessione dei fascetti accelerati. È riportato il fit a più gaussiane che permette la stima di larghezza e integrale di ogni riga di fascetti e in seguito i fit lineari per il calcolo di divergenza e deflessione.

2.1 Fit a quattro gaussiane del profilo di intensità

In figura 2.1 si vede una foto dalla telecamera laterale con evidenziate le posizioni alle quali si è analizzato il profilo unidimensionale dell'emissione di luce. Queste posizioni sono rispettivamente ai pixel 200, 350 e 490; convertendo in mm le posizioni sono $z_1 = 240.5$ mm, $z_2 = 270.5$ mm e $z_3 = 297.5$ mm, dove 0 mm rappresenta l'uscita della PA. Tutte e tre le posizioni sono all'interno della striscia nera di alluminio.

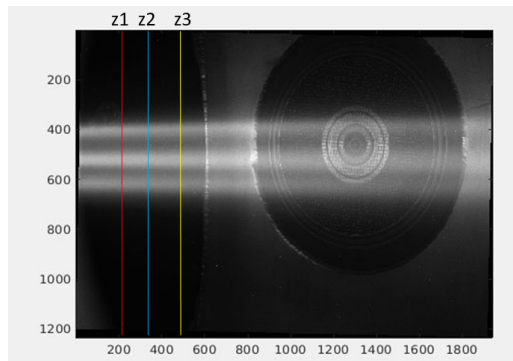


Figura 2.1: Fascio visto lateralmente dalla telecamera LC; sono indicate anche le posizioni z_1 , z_2 , z_3 su cui si sono misurati i profili 1D. Gli assi rappresentano i pixel

Il profilo di intensità 1D misurato dalla telecamera si può vedere in figura 2.2. Si notano i tre principali picchi corrispondenti ognuno alle tre righe composte dai tre fascetti sovrapposti. L'analisi del profilo suggerisce un fit multi parametrico; in particolare è stato eseguito un fit a quattro gaussiane dopo aver sottratto alla figura il fondo. Si è fatta una media dell'intensità rivelata dai pixel agli estremi della telecamera, cioè lontani dai fascetti, ed è stata sottratta all'intero profilo. In seguito il profilo è stato fittato con quattro gaussiane; d'ora in poi, nella vista della telecamera laterale al fascio, l'indice 1 corrisponderà alla gaussiana della riga superiore, l'indice 2 per quella centrale e l'indice 3 per quella inferiore. La quarta gaussiana è una gaussiana molto larga (e quindi molto bassa) che rappresenta il fondo nella zona di passaggio del fascio. Con questo metodo sono stati presi diversi shot ed è stato eseguito il fit nelle tre differenti posizioni z_1 , z_2 , z_3 in maniera tale da poter studiare l'evoluzione spaziale delle grandezze tipiche del fascio come larghezza, posizione ed integrale. La funzione utilizzata per fittare il profilo è la seguente:

$$f(y) = \sum_{i=1}^4 Amp_i \cdot \exp - \frac{(y - X_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (2.1)$$

La sommatoria sugli indici da 1 a 4 definisce le 4 diverse gaussiane. y corrisponde al pixel considerato nella direzione verticale (da 1 a 1200), Amp è l'ampiezza della gaussiana del fit, X è il centroide della gaussiana singola, σ è la deviazione standard della gaussiana, in questo caso considerata come la larghezza del fascetto.

L'altra grandezza derivata da quelle trovate nel fit è l'integrale di ogni singola gaussiana, proporzionale alla corrente trasportata dal singolo fascetto:

$$I = \sqrt{\pi} \cdot \sigma \cdot Amp \quad (2.2)$$

I è l'integrale, σ è la larghezza e Amp l'ampiezza della gaussiana

Sono quindi stati eseguiti i fit dei dati sperimentali nelle tre diverse posizioni. In figura 2.2 si riportano un esempio di profilo 1D misurato in z_1 con affiancato il fit multi-parametrico. I risultati numerici del fit sono riportati nelle tabelle 2.1, 2.2, 2.3, 2.4. Questi grafici e risultati sono indicativi anche dei fit effettuati per gli altri dati sperimentali, analizzati con lo stesso metodo.

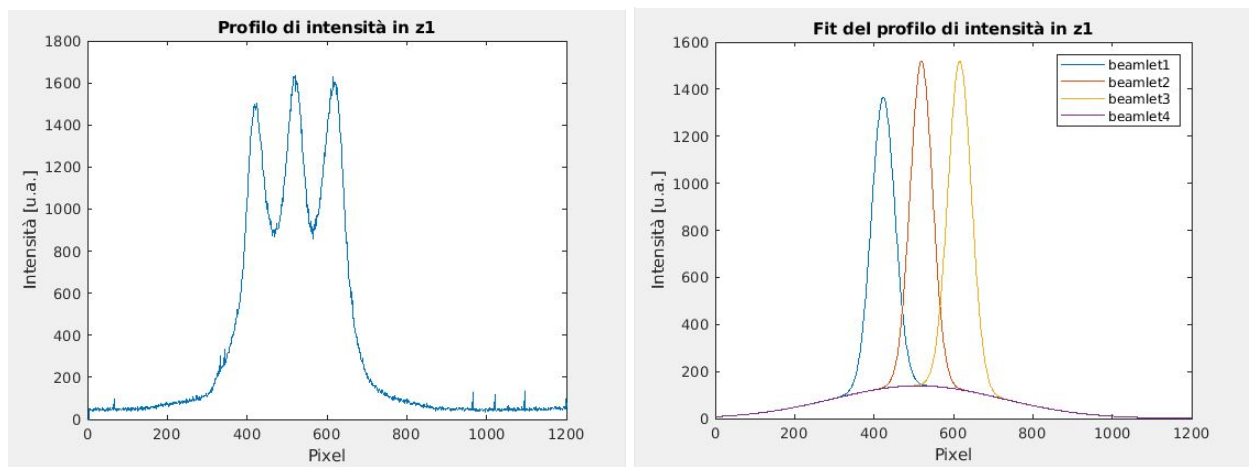


Figura 2.2: Profilo di emissività a sinistra e fit a destra

X_1 [mm]	X_2 [mm]	X_3 [mm]	X_4 [mm]
85 ± 3	104 ± 3	123 ± 3	102 ± 8

Tabella 2.1: Posizioni dei centroidi delle gaussiane

Amp_1 [u.a.]	Amp_2 [u.a.]	Amp_3 [u.a.]	Amp_4 [u.a.]
1237 ± 6	1379 ± 7	1395 ± 7	139 ± 8

Tabella 2.2: Ampiezze delle gaussiane

σ_1 [mm]	σ_2 [mm]	σ_3 [mm]	σ_4 [mm]
8.35 ± 0.07	7.97 ± 0.07	8.38 ± 0.07	60 ± 2

Tabella 2.3: Larghezze delle gaussiane

I_1 [u.a.]	I_2 [u.a.]	I_3 [u.a.]
18300 ± 200	19500 ± 100	20700 ± 100

Tabella 2.4: Integrali delle gaussiane

2.2 Divergenza e deflessione

Ottenute queste grandezze dai fit, l'analisi è proseguita con la stima della divergenza e della deflessione. Prima di procedere al calcolo della divergenza è necessario verificare che non ci siano scambi di corrente tra le righe di fascetti durante la propagazione. Per fare questo si sono calcolati gli integrali di ogni riga, cioè l'area sottesa alla gaussiana corrispondente, che si calcola come mostrato in Eq. 2.2, per ognuna delle tre posizioni z_1 , z_2 , z_3 . Sono stati quindi calcolati i rapporti relativi tra questi integrali per verificare che rimangano costanti nello spazio: sono stati calcolati per tutte le posizioni e per tutti gli shot i rapporti tra l'integrale del fascetto 2 e quello del fascetto 1 e analogamente per i fascetti 2 e 3. Il rapporto tra integrali resta costante nelle diverse posizioni verificando che non ci sono scambi di corrente tra fascetti durante la loro propagazione. A questo punto per stimare la divergenza si esegue un fit lineare delle larghezze delle gaussiane in funzione della distanza dalla griglia di accelerazione, e la pendenza della retta è la divergenza:

$$\sigma = \omega + z \cdot \delta \quad (2.3)$$

σ sono le larghezze delle gaussiane, δ è la divergenza, z sono le posizioni in cui si misurano le larghezze e ω è la larghezza del fascetto a $z=0$.

Sono stati eseguiti due tipologie di fit differenti: in un caso si è posto il vincolo che l'intercetta del fit sia $\omega \leq 4$ mm. Questo numero rappresenta la larghezza del fascetto a $z=0$, cioè all'uscita dell'ultima griglia dell'acceleratore, le cui aperture hanno raggio 4.4 mm. Si assume che la larghezza dei fascetti sia leggermente più piccola del raggio delle aperture stesse. Sono stati eseguiti anche dei fit lineari liberi, senza il vincolo su ω ; le differenze si possono osservare in figura 2.3 (risultati in tabella 2.5). Nell'analisi mostrata nei prossimi capitoli si è utilizzato il fit vincolato per la stima della divergenza, perché rappresenta meglio la fisica dell'esperimento e nei dataset in cui viene utilizzato il fit risulta comunque ben riuscito. Il fit non vincolato potrebbe essere utilizzato in presenza di più di tre punti sperimentali; in particolare sarebbe ottimale avere delle altre misure in posizioni più vicine a $z=0$ così da capire il comportamento della divergenza in ogni parte dell'acceleratore.

La stessa tecnica è stata utilizzata anche con i dati della telecamera dal basso per ottenere una stima della divergenza orizzontale.

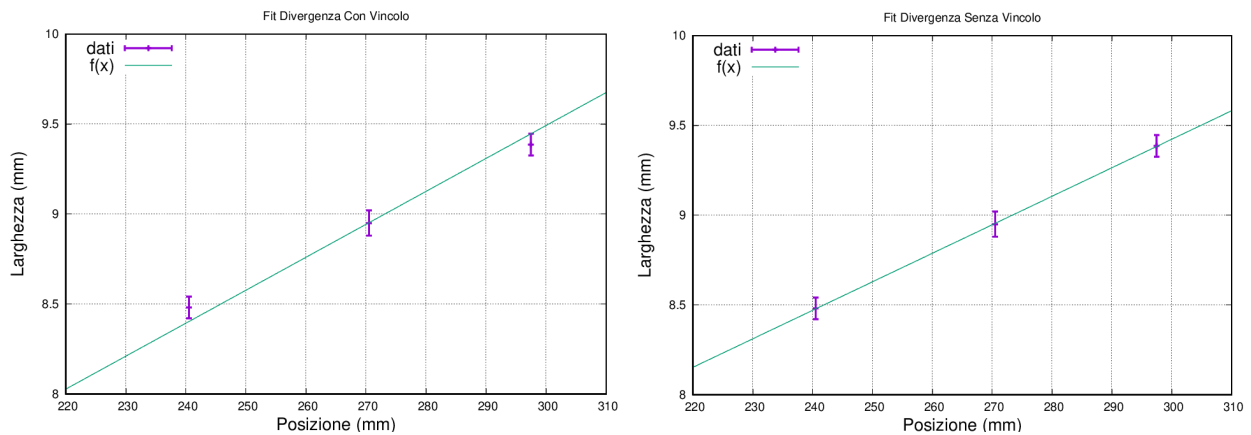


Figura 2.3: Esempio di fit lineare tra larghezza e posizione dei fascetti per stimare la divergenza con vincolo sull'intercetta a sinistra e senza a destra

	ω [mm]	div [mrad]
Vincolo	4	18 ± 1
No Vincolo	4.7 ± 0.3	16 ± 1

Tabella 2.5: Risultati fit divergenza con vincolo e senza

Un altro parametro che viene studiato è la deviazione verticale dei fascetti durante la loro propagazione; data la configurazione magnetica di NIO1, i fascetti non hanno deflessione orizzontale. Per procedere alla stima della deflessione conviene innanzitutto confrontare le distanze relative tra i tre fascetti. Per fare ciò è stata calcolata la distanza $|X_i(z_k) - X_j(z_k)|$ tra fascetti, stimata come valore assoluto della differenza dei centroidi delle gaussiane nella posizione z_k .

La stima della deflessione dei singoli fascetti si effettua invece prendendo le posizioni verticali dei fascetti e facendo un grafico in funzione della distanza dalla griglia di estrazione; un esempio è riportato in figura 2.4, i risultati nella tabella 2.6. In questo modo si può vedere l'andamento della deflessione/deviazione.

$$x = a + z \cdot \theta \quad (2.4)$$

x sono le posizioni verticali dei fascetti, θ è la deflessione verticale, z sono le distanze dalla griglia di estrazione e a è la posizione verticale a $z=0$, coincidente con l'apertura sulla griglia

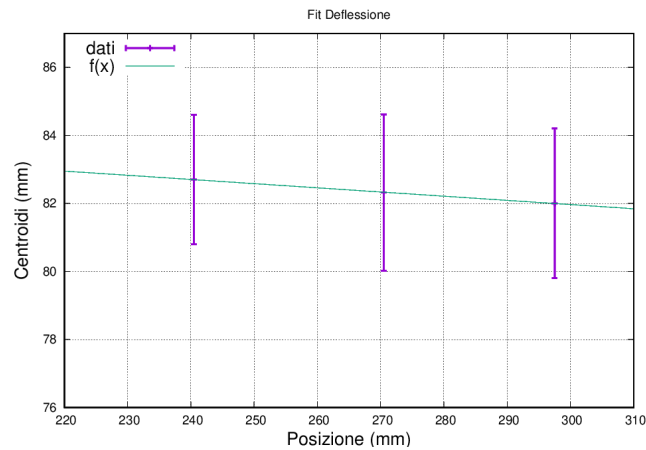


Figura 2.4: Esempio di fit per stimare la deflessione

a [mm]	θ [mrad]
86 ± 4	-12 ± 2

Tabella 2.6: Risultati fit deflessione

Capitolo 3

Scan in ottica con V_{eg} costante

In questa sezione e nella prossima vengono descritti e commentati i risultati dei dati sperimentali, ottenuti durante le operazioni con l'evaporazione del cesio (produzione di superficie degli ioni H^-). I primi risultati discussi sono stati presi a perveanza costante, a tensione di estrazione costante, e modificando solo la tensione di accelerazione e di conseguenza $R = \frac{V_{acc}}{V_{eg}}$. In particolare con questo scan in ottica si vuole trovare il valore di R che minimizza la divergenza dei fascetti. In questo scan si tiene costante la tensione di estrazione a 900 V e si varia la tensione di accelerazione da 6 kV a 13 kV; la pressione della camera è mantenuta a 2.5 Pa. Si è utilizzato lo scan a pressione maggiore al fine di ottenere una corrente di fascio maggiore.

Nelle figure 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 si riportano i grafici con l'andamento di ampiezze, larghezze, integrali e divergenze delle gaussiane relative alle colonne/righe di fascetti. Gli errori sono simili a quelli delle tabelle 2.2, 2.3, 2.4, 2.5. Le figure di sinistra si riferiscono alle colonne di fascetti misurate con la camera dal basso mentre a destra alle righe di fascetti misurate con la camera laterale. Nella legenda dei grafici beamlet 1 (punti rossi) corrisponde alla colonna di sinistra per la camera dal basso e alla riga di fascetti in alto per la camera laterale. beamlet 2 (punti blu) in entrambi i casi è riferito alla colonna/riga centrale e beamlet 3 (punti verdi) corrisponde alla colonna di destra per la camera dal basso e alla riga di fascetti in basso per la camera laterale. Si parla di beamlet intendendo riga/colonna di tre fascetti sovrapposti, assumendo che siano al massimo una sovrastima della larghezza del singolo fascetto (dovuto ad una eventuale non perfetta sovrapposizione dei tre fascetti nella stessa riga/colonna).

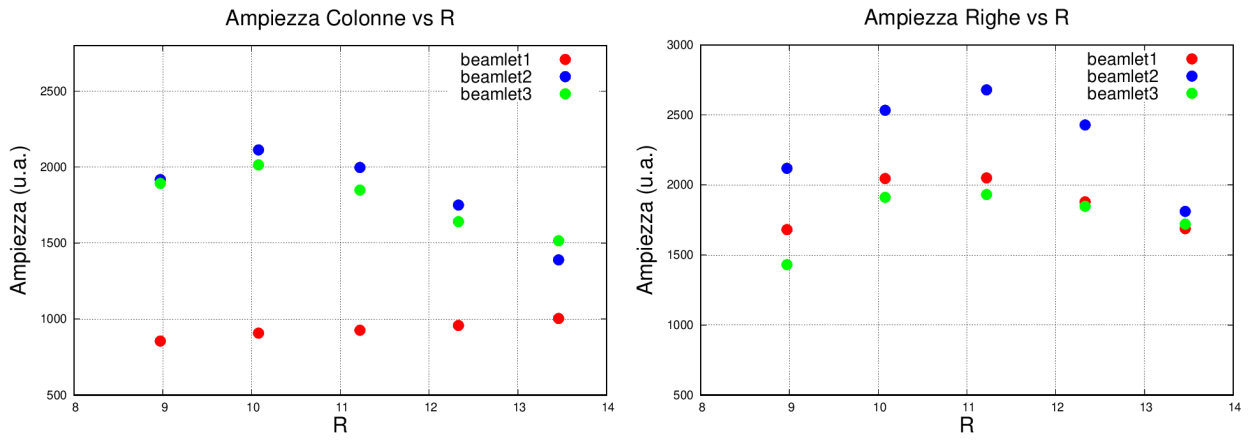


Figura 3.1: Ampiezze delle colonne a sinistra e delle righe a destra in funzione di R

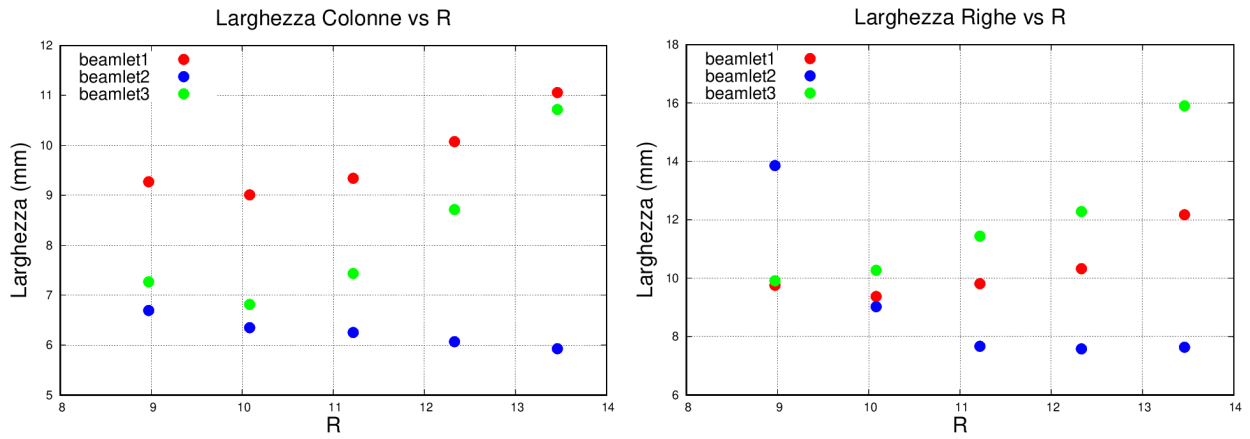


Figura 3.2: Larghezze delle colonne a sinistra e delle righe a destra in funzione di R

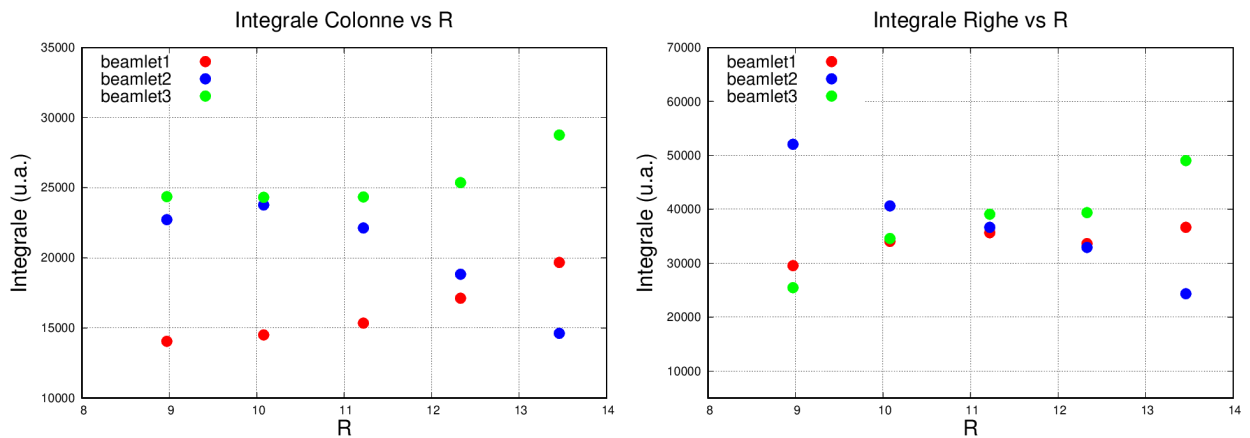


Figura 3.3: Integrali delle colonne a sinistra e delle righe a destra in funzione di R

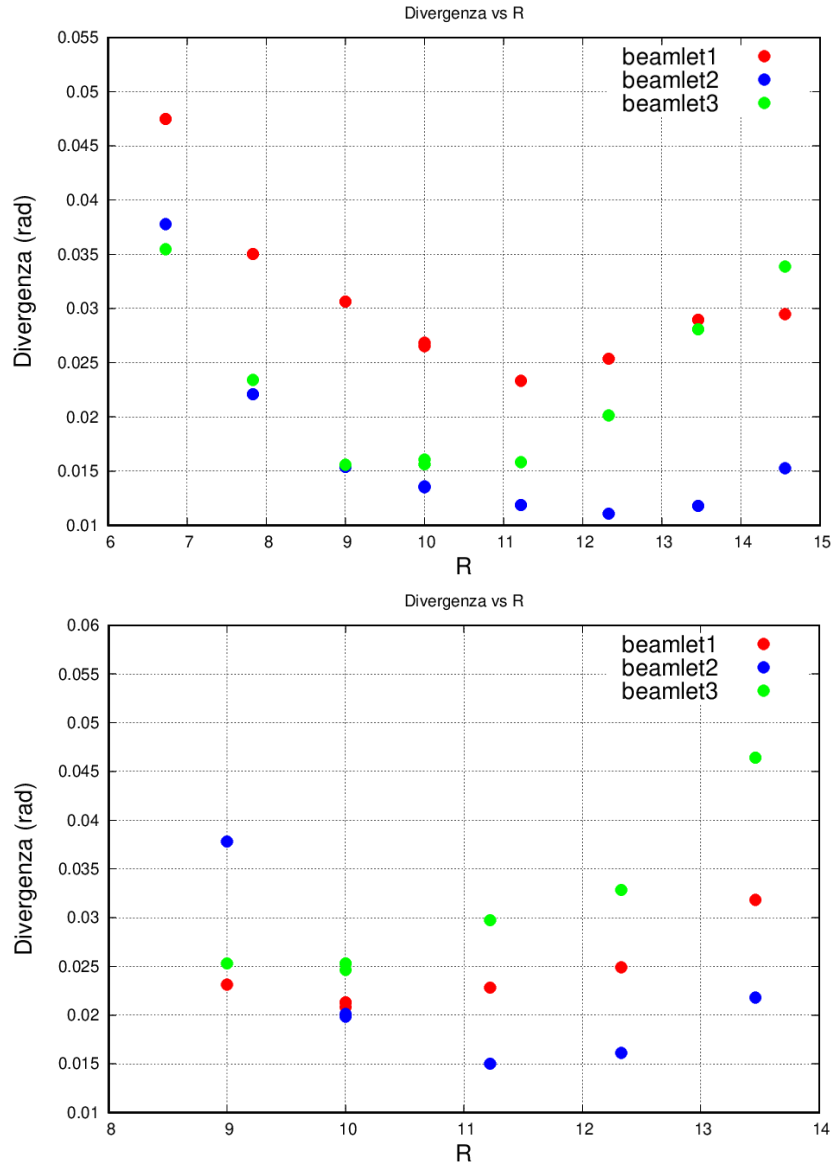


Figura 3.4: Divergenza delle colonne sopra e delle righe sotto in funzione di R

Le ampiezze sono proporzionali al picco di intensità della colonna/riga di fascetti (figura 3.1). Si nota per tutte e tre le righe un andamento semi parabolico con un massimo attorno a $R=11$. Osservando dal basso si trova un andamento costante per la colonna di sinistra e un massimo di ampiezza per R tra 10 e 11 per le altre colonne.

Analizzando le larghezze orizzontali dei fascetti (figura 3.2 a sinistra), si nota un andamento differente per le tre colonne. La larghezza della colonna centrale diminuisce sensibilmente all'aumentare di R , mentre le colonne esterne hanno un minimo di larghezza per R tra 10 e 11. Si può notare che la colonna di sinistra è molto più larga delle altre. Ciò deriva dal fatto che a parità di tensione di estrazione i fascetti non trasportano sufficiente corrente. Si può confermare questo guardando che, in figura 3.3, la colonna a sinistra ha un integrale minore, e quindi una corrente trasportata minore.

Per la divergenza orizzontale (figura 3.4 in alto), la colonna destra ha una divergenza minima pari a circa 15 mrad per R tra 9 e 11, mentre le colonne di fascetti di sinistra e centrali hanno un minimo per R tra 11 e 12 (rispettivamente 23 mrad e 11 mrad). La colonna sinistra ha un'ottica peggiore delle altre (maggiore divergenza), essendo anche quella con la corrente minore (figura 3.3).

Lo stesso tipo di caratterizzazione è stato fatto per la telecamera laterale studiando le righe di fascetti. La figura 3.1 mostra che le righe di fascetti a destra sono più simili tra di loro rispetto alle colonne; in particolare è presente un massimo di ampiezza per tutte e tre le righe a $R=11$. In figura 3.2 si riportano le larghezze delle righe in funzione di R . Le righe esterne raggiungono un minimo di larghezza per R tra 9 e 10, mentre quella centrale per R tra 11 e 12. La riga in basso ha larghezza maggiore e quella centrale ha larghezza minore. In corrispondenza di $R=11$ quindi si ha un minimo della larghezza dei fascetti. Per lo stesso rapporto gli integrali dei fascetti assumono lo stesso valore (a destra in figura 3.3), ciò significa che ogni riga trasporta la stessa corrente ed è una situazione ideale per l'ottica del fascio. Variando R invece si osserva che gli integrali delle righe esterne crescono con l'aumentare di R mentre diminuisce l'integrale di quella centrale.

Osservando ora la divergenza in funzione di R (figura 3.4) l'andamento è simile a quello mostrato per le larghezze: anche in questo caso la condizione ottimale è attorno a $R=11$. Osservando meglio si nota che le righe in alto e in basso raggiungono il minimo di divergenza per un R compreso tra 9 e 11 (20 mrad e 25 mrad), mentre la riga centrale per un R tra 11 e 12 (15 mrad).

L'andamento in funzione di R risulta simile sia considerando le divergenze orizzontali, sia quelle verticali. Perciò si può ritenere che la condizione ottimale per l'ottica dell'intero fascio sia un rapporto tra tensione di accelerazione ed estrazione pari a 10-11. Un ulteriore risultato che si ottiene confrontando le due telecamere è che la sezione dei fascetti non è circolare, infatti, considerando figura 3.2, si osserva che le larghezze orizzontali sono sistematicamente minori delle larghezze verticali. La forma 2D dei fascetti è quindi un'ellisse con l'asse maggiore lungo la verticale.

Capitolo 4

Scan in perveanza con $R=10$

In questo capitolo si analizza uno scan a $R=10$ (attorno al valore ottimale che si è visto essere 10-11), in cui si modifica la tensione di estrazione e quindi la perveanza. Si varia la tensione di accelerazione da 2.5 kV a 12.5 kV e quella di estrazione da 0.25 kV a 1.25 kV in modo da mantenere costante il rapporto. Vengono riportati i grafici dei risultati e delle grandezze del fascio in funzione della tensione di accelerazione $V_{acc} = 10 \cdot V_{eg}$. I grafici sono riportati nello stesso modo del capitolo precedente.

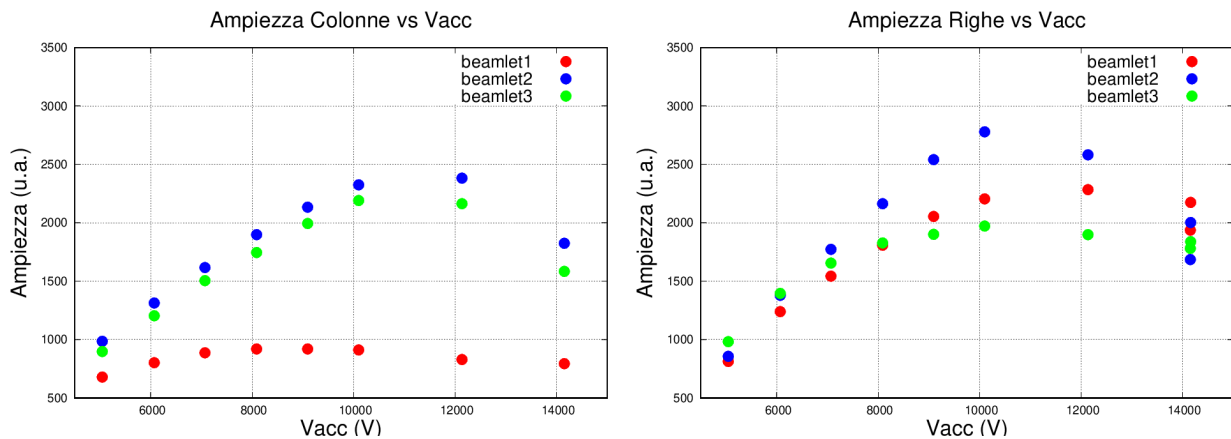


Figura 4.1: Ampiezze delle colonne a sinistra e delle righe a destra in funzione di V_{acc}

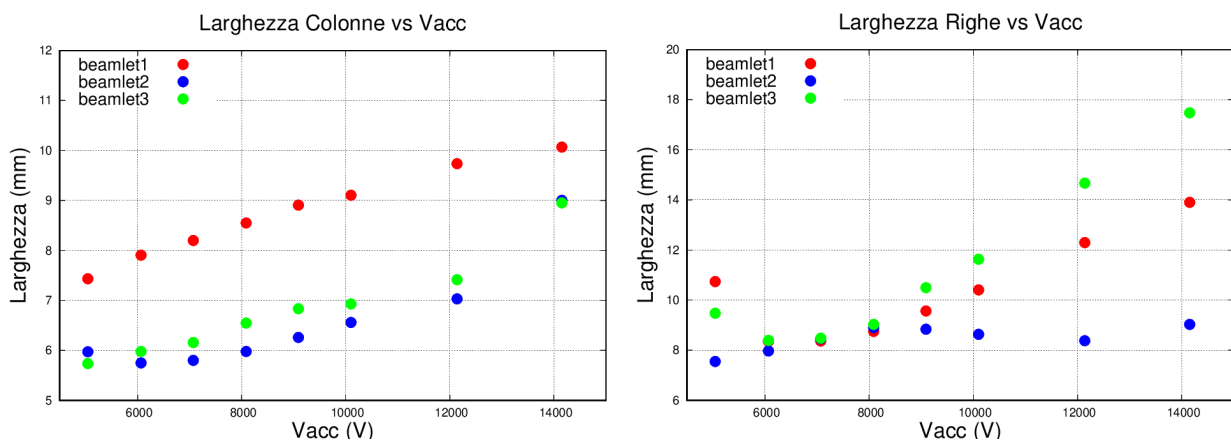


Figura 4.2: Larghezze delle colonne a sinistra e delle righe a destra in funzione di V_{acc}

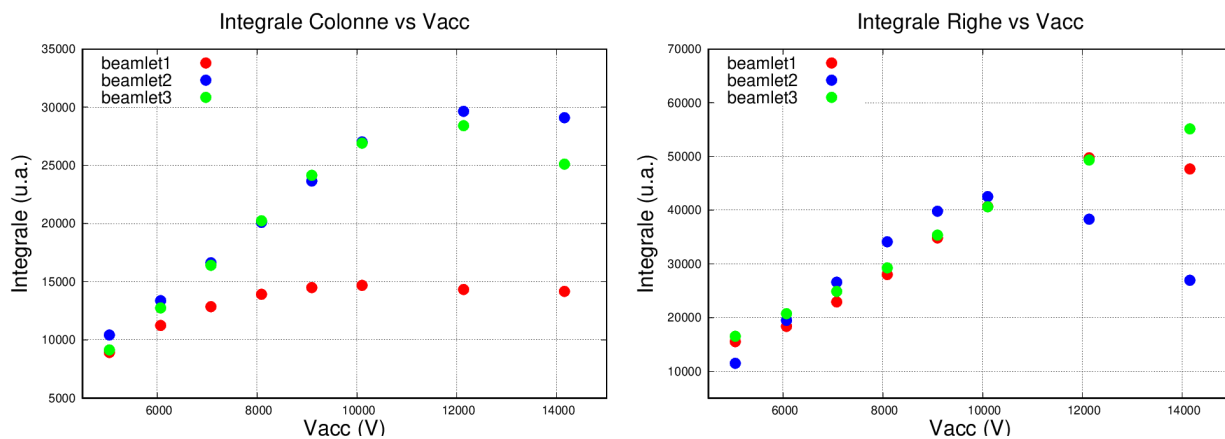


Figura 4.3: Integrali delle colonne a sinistra e delle righe a destra in funzione di V_{acc}

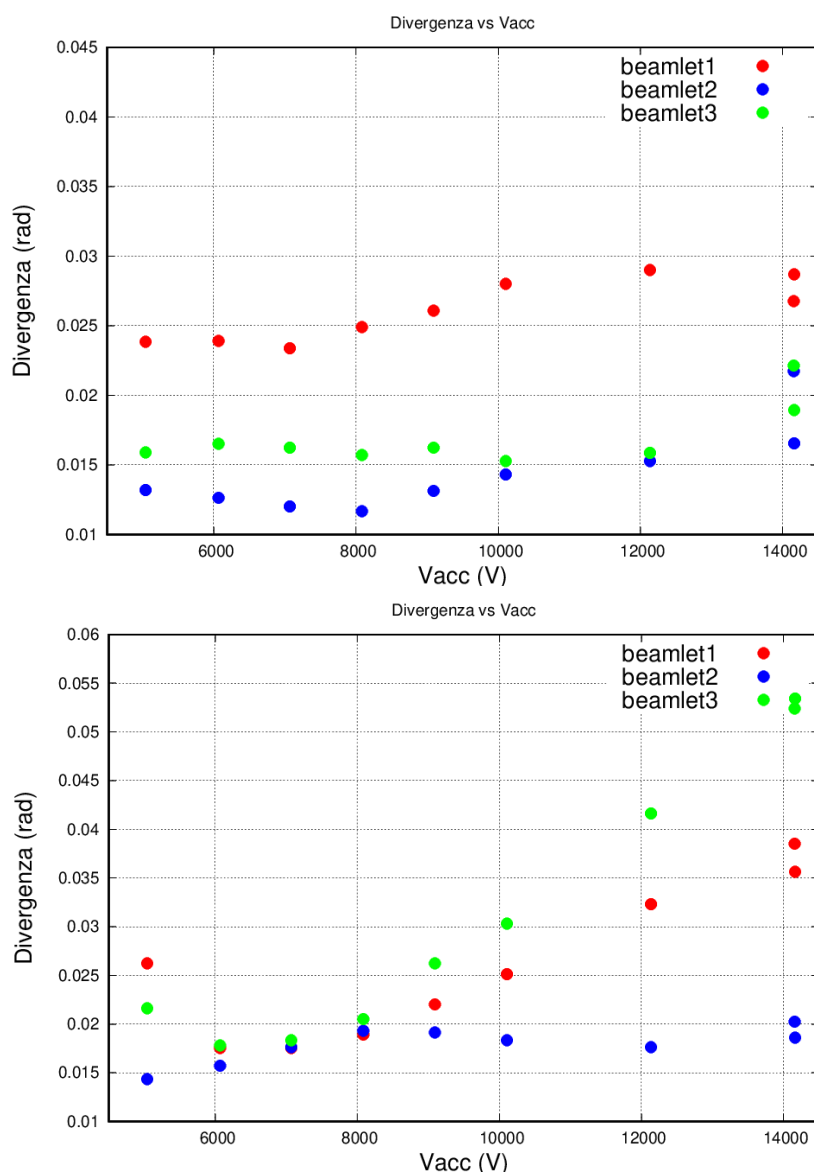


Figura 4.4: Divergenza delle colonne sopra e delle righe sotto in funzione di V_{acc}

Le ampiezze delle righe di fascetti anche in questo caso risultano più simili tra loro rispetto alle colonne (figura 4.1). In entrambi i casi è presente un massimo a 10 kV.

La larghezza della riga centrale rimane costante con l'aumento di V_{acc} (in blu, a destra in figura 4.2), mentre per le altre due righe si ha un allargamento. Tra 6 kV e 8 kV le righe hanno la stessa larghezza e lo stesso integrale (figura 4.3).

Per quanto riguarda le colonne (a sinistra in figura 4.2) si trova un andamento simile tra la colonna centrale e quella destra mentre la colonna sinistra che risulta più larga come già visto in precedenza. Come nel capitolo precedente, anche in questo caso le larghezze verticali sono maggiori delle larghezze orizzontali.

È possibile notare in figura 4.3 che in funzione di V_{acc} l'integrale della riga centrale ha un massimo attorno ai 10 kV, mentre per le righe esterne si ha un andamento crescente che sembra appiattirsi ma comunque oltre i 15 kV. Le tre righe fino a 10 kV hanno la stessa corrente (stesso integrale), poi quella centrale diminuisce mentre le altre due continuano a crescere. Questo accade in corrispondenza della tensione per cui la larghezza delle righe esterne aumenta, ciò potrebbe significare una deflessione dei fascetti.

Passando alla divergenza si osserva in figura 4.4 che sia la divergenza orizzontale sia la divergenza verticale aumentano all'aumentare della tensione di accelerazione. In particolare a 14 kV la divergenza delle righe esterne raggiunge il valore di 40 mrad per la riga in alto e 50 mrad per la riga in basso. In entrambi i grafici si osserva una condizione di minimo attorno a 6-8 kV. Con questi valori di tensione le divergenze verticali delle righe sono uguali e pari a 17-18 mrad. Le divergenze orizzontali assumono valori leggermente diversi: 24 mrad per la colonna di sinistra, 16 mrad per la colonna di destra e 12 mrad per la colonna centrale. Le tensioni di accelerazione ottimali sono quindi circa 6-8 kV.

Capitolo 5

Deflessione

In questo capitolo si studia la deflessione dei fascetti, in particolare come varia in funzione della permeanza e di R . Nei grafici di figura 5.1 sono state riportate le distanze tra il fascetto centrale e quelli esterni nella posizione z_2 , per valutarne l'andamento in funzione di R e V_{acc} (a $R=10$).

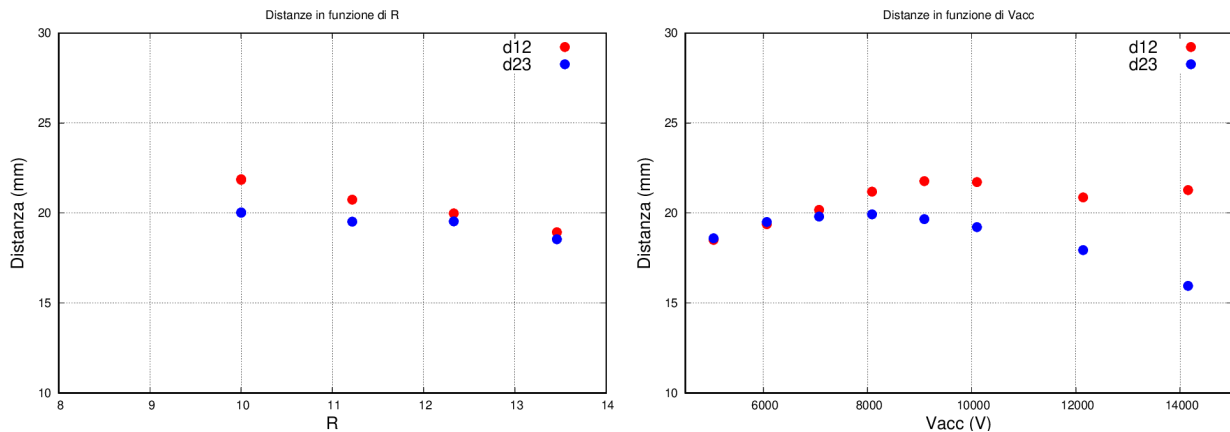


Figura 5.1: Distanze tra i centri delle righe in funzione di R a sinistra e V_{acc} ($R=10$) a destra; d12 rappresenta la distanza tra riga in alto e riga centrale, d23 tra riga centrale e riga in basso

Nel grafico di sinistra si osserva che modificando la tensione di estrazione i fascetti sono equidistanti per $R=13-14$; per R minori si ha invece disparità tra le distanze.

Nel grafico a $R=10$ si nota a tensioni elevate (> 9 kV) che la distanza tra fascetto in alto e centrale è molto maggiore che tra centrale e basso. Per tensioni di accelerazione tra 6 e 9 kV c'è minore differenza; per 5-6 kV i fascetti sono equidistanti. La distanza è circa di 20 mm; la distanza verticale tra le 3x3 aperture nella griglia di accelerazione è 14 mm, perciò sempre minore di quella trovata in z_2 , a 27 cm dalla griglia. La spiegazione di questo risultato potrebbe dipendere dalla diversa deflessione dei fascetti.

Si verifica quindi questa ipotesi calcolando la deflessione delle righe di fascetti usando l'Eq. 2.4. Si riportano i grafici dell'andamento della deflessione in funzione di R e V_{acc} nei due scan.

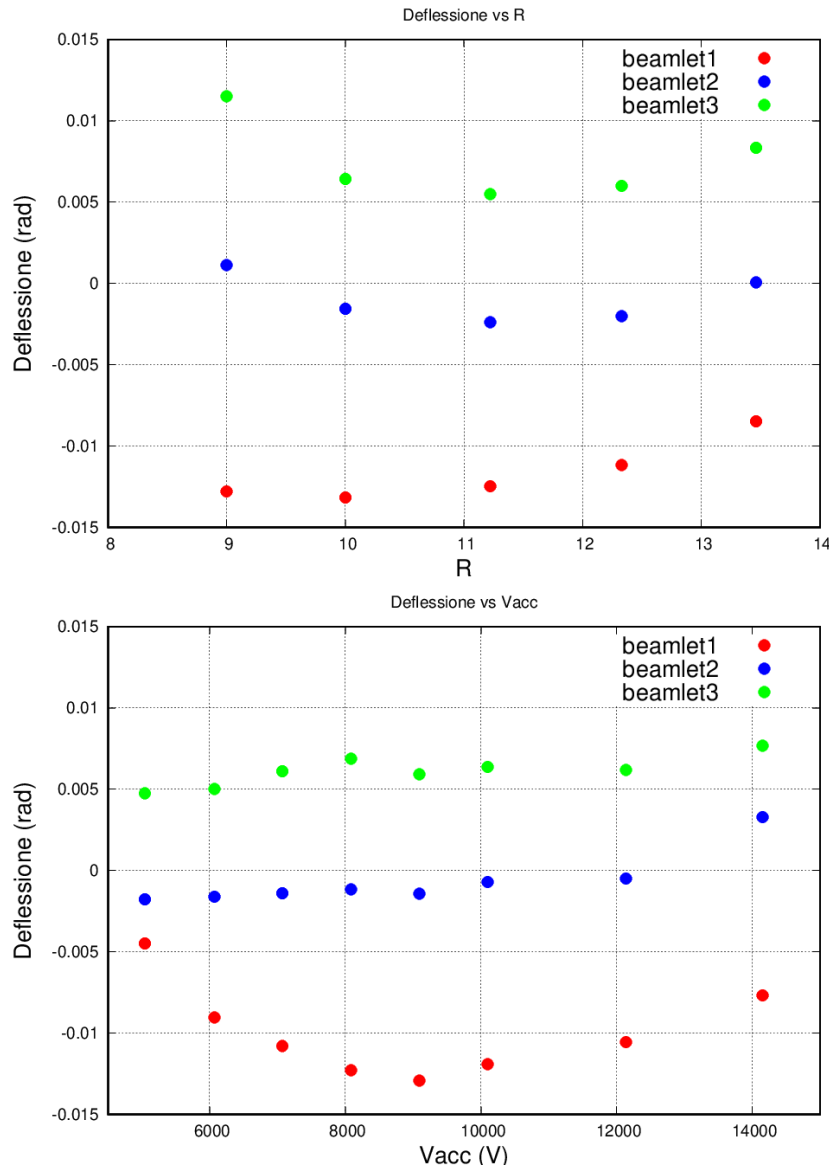


Figura 5.2: Deflessione delle righe in funzione di R sopra ($V_{eg}=\text{cost.}$) e di V_{acc} ($R=10$) sotto

I risultati dei fit rispecchiano l'andamento visto con l'analisi della distanza tra fascetti, mostrando una deflessione maggiore per la riga superiore. Osservando il grafico sotto, a tensioni basse il fascetto centrale (blu) tende ad alzarsi leggermente di 1-2 mrad, mentre quello in alto (rosso) si alza consistentemente (> 10 mrad) e quello in basso (verde) si abbassa di circa 6-8 mrad.

Anche in funzione di R si ha un andamento all'incirca costante con una tendenza a deflettere verso l'alto per R tra 10-12. Si può comunque concludere che si ha minor deflessione nella condizione di 5-6 kV di tensione di accelerazione, per cui tutti i fascetti hanno deflessione < 5 mrad; ciò significa che, nella situazione ottimale, se il fascio percorre 1 metro, lo spostamento verticale sarà di circa 5 mm. Questo spiega perché la distanza tra le righe risulta maggiore della distanza tra le aperture nella griglia di accelerazione.

Capitolo 6

Conclusioni

Lo scopo del lavoro è stato studiare la divergenza e la deflessione del fascio di ioni negativi di NIO1 in presenza di cesio, cioè con produzione di superficie di ioni H^- . Per fare questo sono stati considerati due parametri essenziali dell'esperimento: la perveanza, che regola la forma del fascio nella zona di estrazione, e il rapporto tra tensione di accelerazione e tensione di estrazione, che determina l'ottica del fascio nella seconda parte dell'acceleratore. Come diagnostica sono state utilizzate due telecamere, una che osserva il fascio lateralmente, l'altra dal basso; con queste sono stati misurati i profili di emissione delle righe e delle colonne di fascetti rispettivamente. Da questi profili, utilizzando un fit a quattro gaussiane, sono state ricavate le posizioni, le larghezze e gli integrali dei fascetti con i quali calcolare divergenza e deflessione tramite fit lineare.

Sono stati analizzati due gruppi di dati sperimentali: il primo è stato uno scan di ottica, ottenuto fissando la perveanza e modificando il rapporto tra le tensioni di accelerazione ed estrazione, al fine di trovare il valore di R ottimale. Si è cercato il valore per cui la larghezza e la divergenza delle righe e delle colonne risultasse minore. Il rapporto ottimale trovato è tra 10 e 11; per questo valore le righe di fascetti trasportano la stessa corrente mentre la colonna di sinistra ne trasporta sistematicamente di meno rispetto alle altre due. Il secondo gruppo di dati è uno scan in perveanza, ottenuto mantenendo fisso $R=10$ e variando le tensioni in modo tale da trovare il valore di tensione ottimale per l'ottica del fascio. In questo caso la tensione di accelerazione che minimizza la divergenza è tra i 6 kV e gli 8 kV. Per questi valori ottimali, le divergenze sono tra i 10 mrad e i 20 mrad, maggiori ad esempio di quelle richieste da ITER (inferiori a 7 mrad).

Infine è stata analizzata la deviazione verticale dei fascetti, calcolando prima le distanze relative tra essi, e poi eseguendo un fit lineare per ottenere la deflessione. È stato osservato che la riga centrale si propaga con una deflessione minima (minore di 1-2 mrad), mentre la riga superiore devia verso l'alto e la riga inferiore verso il basso. La tensione di accelerazione che minimizza la deflessione è 5-6 kV. Per questo valore di tensione la deflessione è minore di 5 mrad, cioè ogni riga si sposta meno di 5 mm ogni metro di percorrenza.

I valori di corrente e tensione in queste misure sono molto lontani dai valori nominali dell'esperimento (130 mA 60 kV), in particolare la tensione di accelerazione ottimale trovata è circa 1/10 della tensione di progetto. Per migliorare questi risultati potrebbe essere necessario avere più ioni negativi per estrarre più corrente. Un modo potrebbe essere avere un plasma più denso, aumentando la potenza RF. L'obiettivo sperimentale è riuscire a lavorare a tensioni di estrazione e di accelerazione più elevate e stimare nuovamente la divergenza e la deflessione del beam, rientrando nei parametri richiesti da ITER.

Bibliografia

- [1] Antoni et al. Physics design of the injector source for iter neutral beam injector. *Review of Scientific Instruments*, 85(2):02B128, 2014.
- [2] Hurlbatt et al. Impact of operational parameters on single beamlet deflection in a negative ion source for nbi applications. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2373, page 030004. AIP Publishing LLC, 2021.
- [3] Ugoletti et al. Visible cameras as a non-invasive diagnostic to study negative ion beam properties. *Review of Scientific Instruments*, 92(4):043302, 2021.
- [4] Cavenago et al. Improvements of the versatile multiaperture negative ion source nio1. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1869, page 030007. AIP Publishing LLC, 2017.
- [5] Serianni et al. Neutralisation and transport of negative ion beams: physics and diagnostics. *New Journal of Physics*, 19(4):045003, 2017.
- [6] Bacal et al. Volume production negative hydrogen ion sources. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 33(6):1845–1871, 2005.
- [7] M.Ugoletti. Nio1 negative ion beam investigation in view of iter heating and current drive, tesi magistrale.
- [8] Lawrie et al. Detailed beam and plasma measurements on the vessel for extraction and source plasma analyses (vespa) penning h- ion source. *Review of scientific instruments*, 87(2):02B122, 2016.
- [9] Song et al. Numerical simulation of beam extraction and optics of an nbi negative ion source. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2373, page 080002. AIP Publishing LLC, 2021.
- [10] Ian G Brown. *The physics and technology of ion sources*. John Wiley & Sons, 2004.
- [11] Serianni et al. Neutralisation and transport of negative ion beams: physics and diagnostics. *New Journal of Physics*, 19(4):045003, 2017.
- [12] Kashiwagi et al. Compensations of beamlet deflections for 1 mev accelerator of iter nbi. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1515, pages 227–236. American Institute of Physics, 2013.
- [13] Tanaka et al. Investigation of beam deflection reduction and multi-beamlet focus at a large-area negative ion source for a neutral beam injector with 3-d beam trajectory simulation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 449(1-2):22–35, 2000.