



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI FISICA

Corso di Laurea in Fisica

**RUOLO DELLE INSTABILITÀ LOCALIZZATE AL
BORDO DEL PLASMA DI JET NEL
CONFINAMENTO DELLE IMPUREZZE PESANTI**

Laureando

Elia Guglielmin

Relatore

Dott. T. Bolzonella

Co-relatore

Dott. M. Valisa

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

Ai miei genitori

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Fusione nucleare e reattori da fusione	1
1.1.1	Tokamak	1
1.1.2	ELMy H-Mode	3
2	Metodo di analisi ed esposizione dei dati	7
2.1	Metodo di analisi	8
2.1.1	Assunzioni e limiti	8
2.1.2	Selezione impulsi	8
2.2	Analisi	10
2.2.1	Risultati analisi	14
2.3	Confronto coi dati spettroscopici	19
2.3.1	Immissione di altri elementi	19
2.3.2	Spettrografia: tungsteno	21
2.3.3	Flussi di tungsteno al divertore	22
3	Conclusione	25
3.1	Riassunto del lavoro e commento dei risultati	25
3.1.1	Possibilità future	26
	Bibliography	27

Sommario

Questa tesi si sviluppa nel contesto dei plasmi utilizzati nei reattori da fusione nucleare e si propone di studiare il ruolo delle instabilità localizzate al bordo del plasma, note generalmente con il nome di ELM (Edge Localized Mode), nel controllo delle impurità pesanti presenti nel plasma, sfruttando dati provenienti da una serie di esperimenti svolti al JET, un reattore di tipo tokamak, sito a Culham in Inghilterra.

Il lavoro è strutturato in tre sezioni:

Nel capitolo 1 è presente un'introduzione in cui si spiega brevemente l'ambiente dei reattori da fusione in cui si è lavorato e si introduce il lettore al fenomeno degli ELM.

Nel capitolo 2 si trova il corpo centrale in cui si spiega il lavoro effettuato, il metodo di analisi ed infine si illustrano i risultati ottenuti.

Nel capitolo 3, infine, è presente una conclusione con commento ai risultati ottenuti.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Fusione nucleare e reattori da fusione

La fusione è un processo nucleare durante il quale due nuclei leggeri fondono in uno più pesante, liberando un'energia dell'ordine di diversi MeV per nucleone. Lo scopo ultimo della ricerca sulla fusione nucleare è quello di riuscire a sfruttare il fenomeno per produrre grandi quantitativi di energia. Il principale ostacolo per poter produrre energia con la fusione sta nella difficoltà di far avvenire il processo stesso in modo energeticamente favorevole. Infatti, affinché due nuclei possano fondere, devono superare una barriera coulombiana repulsiva dell'ordine del MeV. Perché questo accada, mantenendo un alto rendimento, è necessario fornire ai gas in cui si vuole far avvenire la fusione, generalmente di deuterio-trizio, un'energia cinetica di 1-10KeV, che equivale a temperature di 10^7 , 10^8 K. A queste temperature il deuterio-trizio è nello stato di plasma, ovvero un gas quasi neutro di particelle cariche, che presenta comportamento collettivo. Per portare il plasma a tali temperature è necessario contenerlo in una regione limitata di spazio per un periodo di tempo prolungato. Poiché a temperature così elevate nessun materiale può resistere esposto al plasma, si sfruttano campi magnetici con varie configurazioni per riuscire a confinare il plasma all'interno del reattore per il tempo necessario.

1.1.1 Tokamak

Ci sono vari tipi di reattori, ad esempio: tokamak, stellarator, reversed field pinch e macchine lineari. In particolare, i reattori di tipo tokamak sono caratterizzati da una sezione toroidale asimmetrica, con una curvatura poloidale maggiore in corrispondenza del raggio toroidale maggiore (Fig. 1.2). I campi generati all'interno dei tokamak hanno una configurazione polo-toroidale,

con linee di campo poloidali che formano una separatrice, che divide la zona interna del plasma, in cui le linee di campo poloidali sono chiuse (Fig. 1.1), da quella esterna in cui le linee sono aperte.

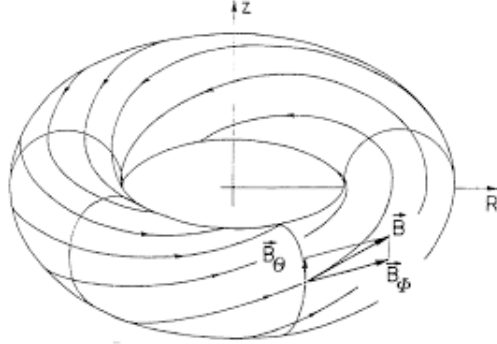


Figura 1.1: Configurazione magnetica tipica di un tokamak. B_θ è la componente poloidale del campo, mentre B_ϕ è quella toroidale.

Lo studio dei reattori di tipo tokamak è di particolare importanza al giorno d'oggi, in quanto rappresentano la tipologia che verrà adottata per ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), reattore in costruzione a Cadarache, Francia, che sarà il più grande centro di ricerca sulla fusione costruito e punto di riferimento per molte ricerche future. Nella zona inferiore dei tokamak è presente una struttura chiamata divertore. Il divertore è la regione dove la topologia magnetica convoglia i flussi di particelle in uscita dal plasma nella zona inferiore del reattore, e dove un sistema di pompe ed una appropriata conformazione geometrica assicurano l'intrappolamento di queste ultime per impedirne il ritorno nella camera. Il divertore svolge dunque un ruolo fondamentale, permettendo il controllo del gas principale, l'espulsione delle impurità e, nel reattore vero e proprio, l'espulsione dei prodotti delle reazioni di fusione. Al tempo stesso, il divertore è la regione della macchina più sollecitata dal plasma, che vi riversa potenze che in JET¹[1], per esempio, sono dell'ordine di diversi MW/m², e rappresenta per questo uno degli aspetti più critici verso la realizzazione di un reattore commerciale. Proprio per questo motivo in ITER si è scelto di costruire il divertore in tungsteno, poiché la sua resistenza meccanica ed il suo alto punto di fusione lo rendono un ottimo candidato per lo scopo. A causa delle potenze riversate su di esso, il divertore è anche la principale sorgente di impurità, che vengono prodotte nel processo di erosione delle superfici esposte ai flussi di plasma. In ITER il resto della prima parete esposta al plasma sarà ricoperta di berillio per minimizzare la diluizione del plasma.

¹Tokamak da cui arrivano i dati utilizzati in questo lavoro.

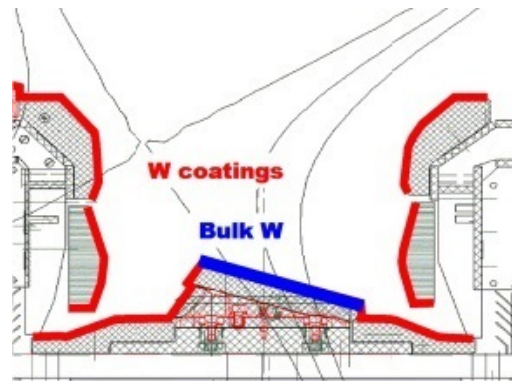
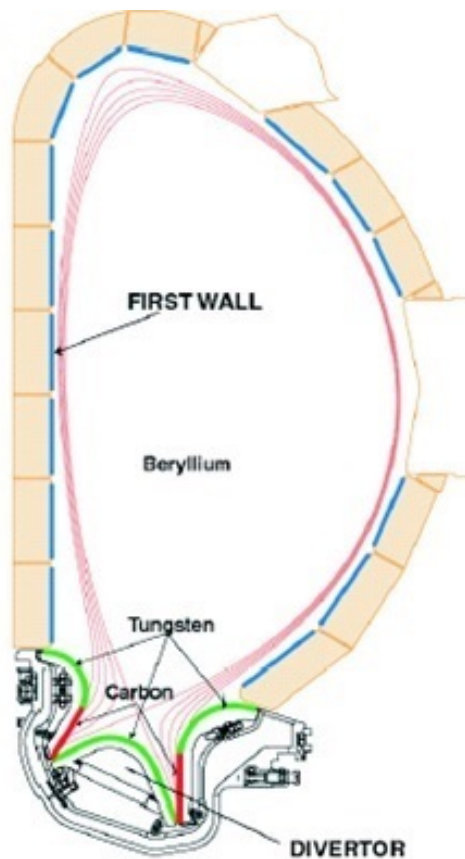


Figura 1.2: Sezione toroidale del tokamak JET.

Figura 1.3: Particolare del divertore.

1.1.2 ELMy H-Mode

I regimi a maggior confinamento dell'energia e delle particelle in cui operano i tokamak sono caratterizzati dalla formazione di profili di temperatura e densità a scalino, con elevati gradienti immediatamente all'interno della separatrice. Questa struttura è generalmente chiamata 'pedistallo H-Mode', dove H sta per "high". Tali gradienti sono causati da una barriera di trasporto al bordo, che si sviluppa quando viene soppressa la turbolenza elettrostatica al bordo e migliorano le prestazioni del reattore. Un'altra caratteristica del H-Mode è che, quando le pressioni e/o le correnti all'interno del pedistallo superano un certo limite di stabilità, si innescano ripetitivamente delle instabilità localizzate, generalmente chiamate ELM (Edge Localized Mode), che portano i gradienti di temperatura e densità nuovamente sotto la soglia critica. Poiché il crollo del pedistallo implica un improvviso rilascio di

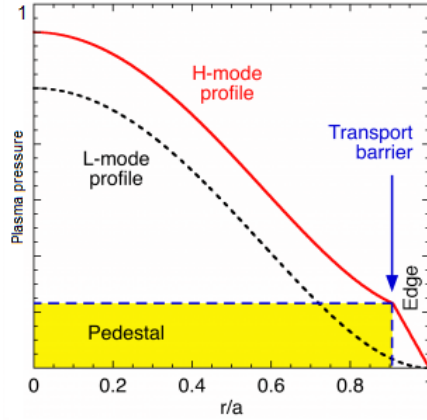


Figura 1.4: Profilo tipico del H-Mode in un tokamak.

energia verso il divertore, aumentandone significativamente l'erosione, inoltre, esso porta il plasma in una condizione non ottimale alla fusione. Per questo motivo si cerca di limitare il formarsi dell'instabilità, mentre si cerca di massimizzare l'ampiezza del piedistallo[2]. Per fare ciò si utilizzano varie tecniche di controllo degli ELM, come ad esempio l'iniezione di pellet di deuterio, o perturbazioni nelle bobine per il controllo della stabilità verticale del plasma, che riducono la soglia di stabilità del piedistallo e generano degli ELM più frequenti e meno violenti.

ELM per il controllo delle impurità Negli ultimi anni si è cominciato a studiare l'effetto degli ELM sulle impurità all'interno del plasma, per cercare di capire se questi potessero essere sfruttati per controllarle, facendo in modo che il plasma espellesse autonomamente quelle non volute al suo interno. Infatti, per avere dei rendimenti energetici accettabili, le concentrazioni¹ di impurità tollerabili nel core del plasma sono molto basse. Nel caso del tungsteno, si stima che una concentrazione di 3×10^{-5} alzi la condizione di ingizione del 20%, e che quest'ultima non sia possibile per concentrazioni superiori a 1.9×10^{-4} [3]. Appare dunque chiara l'importanza di studiare metodi di controllo del trasporto delle impurità. Lo scopo che si è prefissato questo lavoro di tesi è proprio quello di andare a studiare il comportamento delle impurità pesanti, in particolare del tungsteno, al variare della frequenza degli ELM e dei modi utilizzati per produrli. Come già accennato, tutti i dati utilizzati in seguito sono stati ottenuti nell'esperimento JET sito a Culham, UK, la cui prima parete, quella direttamente esposta al plasma, è stata

¹Definite come rapporto della densità delle impurità e quella degli elettroni.

modificata nel 2012 per simulare le condizioni di prima parete che si verranno a creare in ITER. Le caratteristiche principali di questa nuova struttura interna denominata ITER Like Wall (ILW) sono l'utilizzo del berillio per la copertura della camera principale e del tungsteno per la regione del divertore.

Capitolo 2

Metodo di analisi ed esposizione dei dati

Sessioni sperimentali analizzate

Lo scopo delle sessioni sperimentali, da cui derivano i dati utilizzati, è quello di studiare il comportamento delle impurità di metalli pesanti nel plasma al variare della frequenza degli ELM, in particolare quello del tungsteno prodotto al divertore a causa dell'erosione fisica. Sono stati quindi raccolti dati bolometrici e spettroscopici per riuscire ad individuare tipi e concentrazioni delle impurità. Alcune impurità, normalmente non presenti e poco riciclabili, sono state immesse di proposito per studiare il loro comportamento in un contesto in cui il termine sorgente è noto. Nello specifico di questo lavoro si è cercato di capire se durante le varie sessioni era presente un andamento ricorrente della concentrazione in funzione della frequenza degli ELM.

Tipologia di impulsi e strategie adottate Quasi tutti gli impulsi effettuati durante le sessioni sperimentali sono plasmi di deuterio, caratterizzati da potenze iniettate tramite fasci di neutri (NBI) di 10-12 MW ed immissioni di impurità secondarie per studiarne il comportamento simultaneamente a quello del tungsteno. In particolare, all'inizio di quasi tutte le scariche viene iniettato molibdeno o kripton per studiare in quali tempi il plasma lo espella. Per variare la frequenza degli ELM nei vari impulsi, sono stati utilizzati principalmente due modi: aumentare il rate del gas¹ iniettato e la generazione volontaria di kicks². Nel primo modo si porta il plasma più velocemente al

¹Definito come numero di elettroni immessi al secondo. In un plasma di idrogeno equivale anche al numero di atomi di gas principale immesso.

²Oscillazione verticale della colonna di plasma ottenuta variando rapidamente le correnti nelle bobine di controllo della stabilità verticale.

punto di instabilità critica tipica dell'ELMy H-mode, causando quindi un aumento della frequenza degli ELM. La brusca oscillazione dovuta ai kicks invece destabilizza il plasma, il quale tenderà a generare un ELM. L'alternare dei due metodi nei vari impulsi ha permesso di mettere in evidenza delle sostanziali differenze tra i due approcci, che verranno presentate in seguito.

2.1 Metodo di analisi

2.1.1 Assunzioni e limiti

Per poter effettuare il lavoro svolto, sono state fatte alcune considerazioni. Inanzitutto, durante lo studio del comportamento delle impurità, non sono stati presi in considerazione fenomeni di trasporto. Questa approssimazione non dovrebbe comportare errori nei risultati ottenuti poiché, sebbene in un plasma da fusione l'abbondanza frazionaria di un'impurità è determinata sia dai rate di ricombinazione e ionizzazione sia dai fenomeni di trasporto, entro un raggio normalizzato³ di 0.7⁴, quest'ultimi influenzano solo debolmente l'equilibrio del tungsteno. Questo accade perché i tempi tipici del trasporto dei metalli pesanti sono molto maggiori dei tempi di ricombinazione e ionizzazione. In altri termini, con questa assunzione si considera che l'abbondanza frazionaria degli ioni del W sia funzione della sola temperatura locale. La Figura 2.1, in cui sono rappresentate le abbondanze di ioni nella zona centrale a seconda che si considerino o meno i fenomeni di trasporto, mostra quanto minime siano le differenze.

Inoltre è stato riscontrato un limite nel valutare gli errori durante l'analisi effettuata. Questo poiché l'incertezza delle sezione d'urto per i processi di eccitazione, ionizzazione e ricombinazione è dell'ordine del 30-50%, ed i programmi utilizzati per stimare le concentrazioni fornivano solamente un errore approssimato, basato sull'incertezza sulle misure delle temperature del plasma.

2.1.2 Selezione impulsi

Prima di poter svolgere qualsiasi analisi, è stato necessario effettuare una selezione degli impulsi per poter scartare dal campione quelli compromessi. Per fare ciò, si sono osservati i profili nel tempo di potenza iniettata tramite

³(Raggio dal centro del plasma)/(Raggio massimo).

⁴La maggior parte delle impurità sono concentrate a raggi inferiori di 0.2.

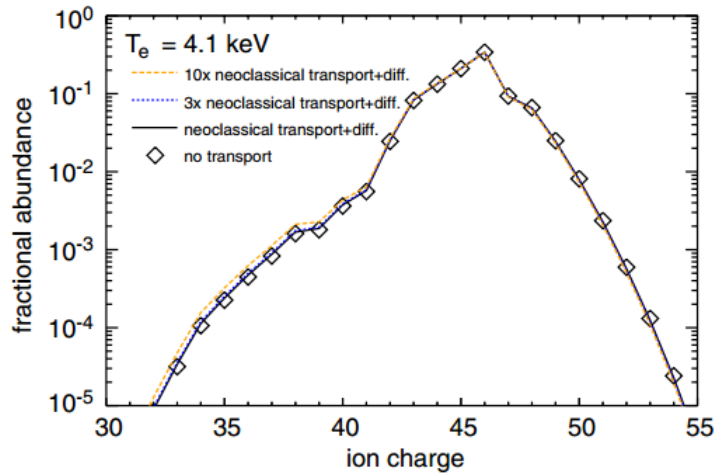


Figura 2.1: Abbondanze frazionarie di ioni alla temperatura di 4.1keV. L'effetto del trasporto è trascurabile[4].

NBI, radiazione totale e soft x-rays emessi.

Scariche in cui una o più sorgenti di ioni smettono di iniettare potenza durante la scarica non sono da considerare. Infatti ad una diminuzione di potenza iniettata corrisponde una caduta della temperatura del plasma, che modifica i parametri di sputtering al divertore, e quindi la quantità di tungsteno che viene emessa nel plasma, rendendo l'impulso non confrontabile in modo omogeneo con il resto del campione.

Analizzando l'andamento dei SXR si è in grado di individuare spari contenenti impurità non desiderate o in cui il plasma è troppo instabile. Osservando questo tipo di radiazione lungo linee di vista passanti vicino al centro del plasma, si può riconoscere chiaramente la tipica figura del dente di sega, dovuta alle forti correnti che si creano e si distruggono periodicamente nelle zone centrali del reattore. Poiché durante questo lavoro è stata sfruttata questa periodicità per riuscire ad effettuare un'analisi più precisa ed avere dai parametri di confronto presenti in tutti gli impulsi, è stato necessario eliminare le scariche irregolari che non presentavano il profilo voluto (esempio in Fig. 2.2).

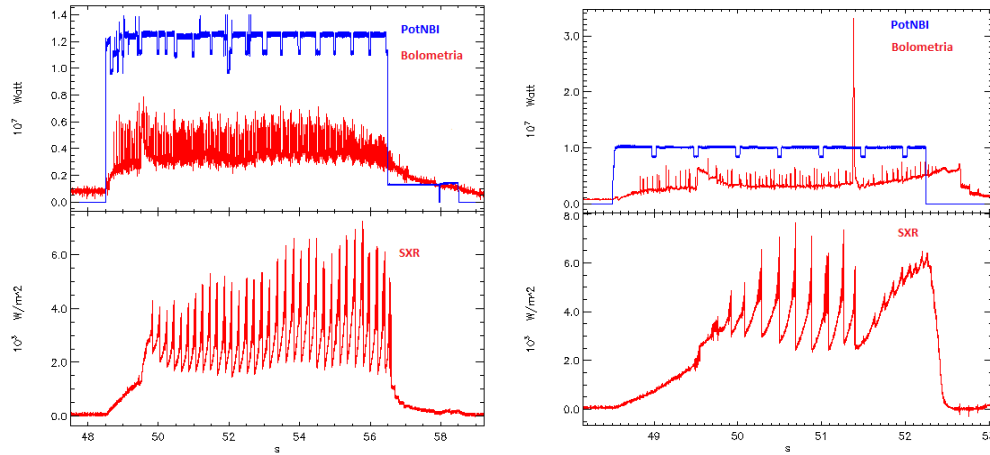


Figura 2.2: Due esempi di scariche: a sinistra è mostrata una scarica considerata buona, in cui la potenza iniettata si mantiene costante e con dente di sega ben riconoscibile. A destra è mostrata una scarica che perde stabilità all'istante 51.5s, e quindi analizzabile solo fino a quell'istante. In entrambe le scariche si può notare (dal picco nella bolometria) l'immissione di molibdeno a 49.5s.

2.2 Analisi

Dente di sega Come detto precedentemente, la presenza del dente di sega ha portato al compimento di diverse scelte durante l'analisi. Questa particolare figura, infatti, è dovuta a correnti piccate nella zona centrale del plasma, che periodicamente si rilassano bruscamente una volta raggiunto il limite di stabilità. L'esistenza di queste correnti ha importanti conseguenze sulla distribuzione delle impurità all'interno del reattore. Generalmente, osservando una sezione trasversale del toro, è presente una forte asimmetria poloidale nella loro distribuzione, causata dalle forze centrifughe dovute al movimento toroidale del plasma. La presenza delle correnti va a modificare questo profilo. In corrispondenza dei picchi del dente di sega, quindi quando la corrente è elevata, le impurità, in particolare quelle pesanti, si concentrano nel core, per poi tornare alla configurazione standard quando la corrente si distrugge.

I grafici seguenti (Fig. 2.3) mostrano i SXR in sezione. L'emissione può essere considerata, in buona approssimazione, dovuta solamente al tungsteno, come constatato in ricerche precedenti effettuate da Thomas Pütterich, in cui i profili risultavano consistenti con delle simulazioni consideranti solo la presenza di questo, e quindi può essere utilizzata per stimare dove esso si concentra maggiormente.

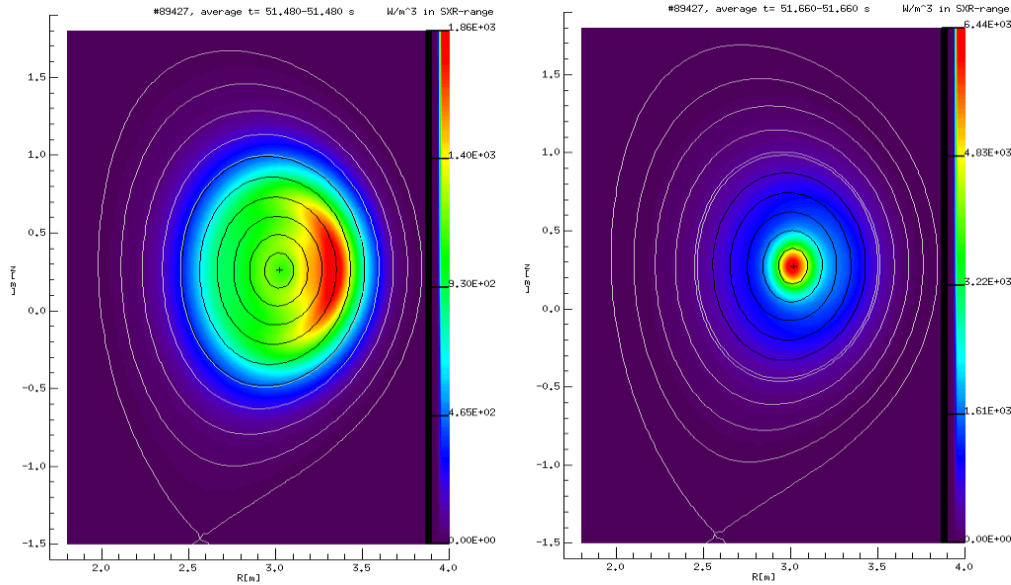


Figura 2.3: A sinistra: distribuzione di W in corrispondenza del ventre del dente di sega (corrente centrale minima).
A destra: distribuzione di W in corrispondenza del picco del dente di sega (corrente centrale massima).

Scelta degli intervalli temporali A causa di queste brusche variazioni dei profili di densità, è stato necessario individuare nelle varie scariche gli intervalli temporali omogenei, sia rispetto ai denti di sega sia rispetto alla fase della scarica⁵. Inoltre questi intervalli dovevano contenere un numero sufficiente di ELM⁶, per evitare che il risultato non fosse compromesso dalla vicinanza eccessiva ad uno di essi o viceversa. Poiché negli impulsi analizzati, per poter aver un numero abbastanza elevato di ELM, era necessario studiare regioni di tempo contenenti 3-4 denti di sega completi, si è scelto di misurare le concentrazioni su 3 picchi contenuti in esse, escludendo eventuali picchi troppo elevati, indice di accumuli sporadici non desiderati, e di farne la media per stimare la concentrazione del tungsteno con maggiore precisione. Si è scelto di prendere il picco come riferimento perché è di facile individuazione, presenta una distribuzione di impurità più localizzata ed è quindi più difficile

⁵All'inizio della scarica / a scarica inoltrata / prima dell'iniezione di un altro elemento di test etc.

⁶Almeno 20.

commettere errori.

Inoltre, si è posta attenzione ad analizzare le scariche abbastanza lontano dall'iniezione di molibdeno, in modo da essere sicuri che il plasma lo avesse già espulso, evitando così che la sua radiazione emessa si sommasse a quella del tungsteno. Generalmente, come si può vedere dal grafico seguente (Fig. 2.4), dopo circa un secondo l'evoluzione del Mo può ritenersi completata.

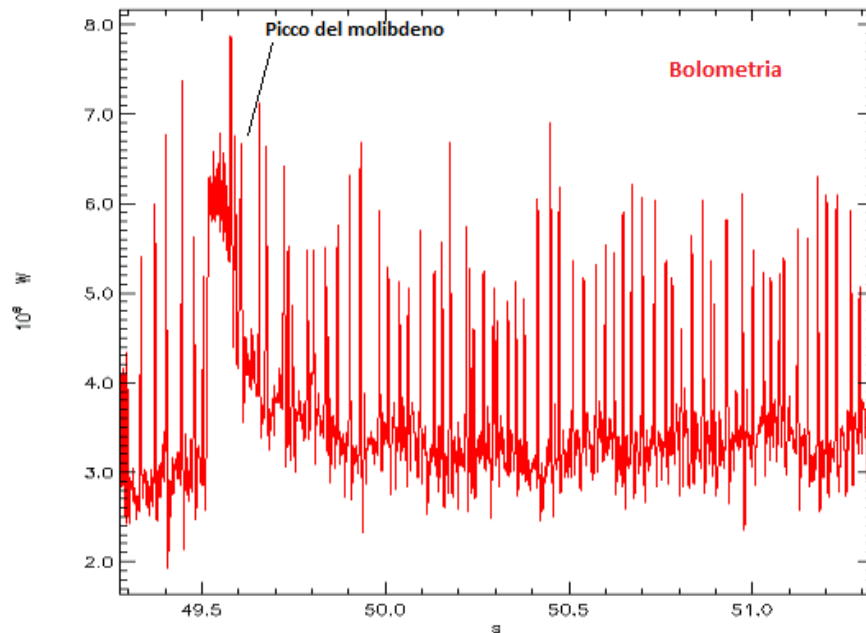


Figura 2.4: Particolare della bolometria in corrispondenza dell'immissione di molibdeno per la scarica 89427

Una volta scelto un intervallo che fosse buono in tutte le scariche di una sessione, come quello in Figura 2.5, si è effettuata una deconvoluzione dei dati dei SXR ricavati dalle telecamere durante l'impulso, utilizzando un programma in dotazione a JET, che permette di risalire dai raggi X alla concentrazione di W. Il programma sottrae al segnale degli X il contributo stimato degli ioni d'idrogeno all'emissione di continuo nella regione X e valuta quale concentrazione di tungsteno produrrebbe la radiazione X residua per i valori sperimentali di densità elettronica e temperatura. Nel fare ciò ci si avvale di un database di fisica atomica, contenente i calcoli dell'emissione di continuo e di riga in funzione dei parametri cinetici del plasma.

Come risultato si ottengono sia i profili di densità di W in sezione, visti nella figura 2.3 e sia, applicando le semplificazioni descritte precedentemente per non raggiungere costi computazionali troppo elevati, i valori numerici della

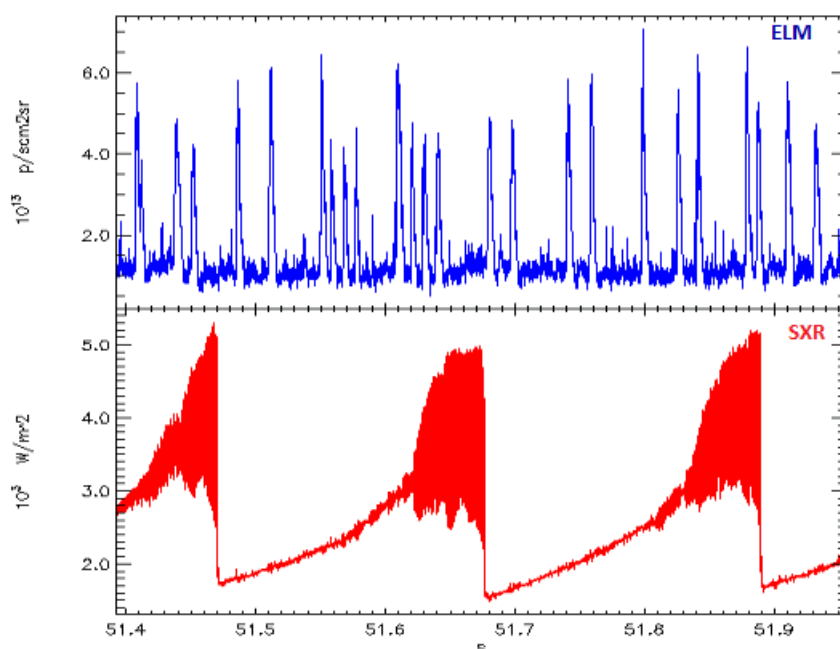


Figura 2.5: Particolare dell'impulso 89427. In alto eventi localizzati (ELM). In basso e di emissione di X, in cui è presente il dente di sega.

concentrazione di tungsteno. Impostando un passo temporale abbastanza piccolo⁷ nell'algoritmo del programma, si è riusciti ad evidenziare il dente di sega, in modo da poterlo isolare. I dati sulle concentrazioni così ottenuti mostrano un andamento nel tempo molto simile a quello degli SXR e forniscono i valori di impurità di tungsteno al variare del raggio. I dati si presentano come nelle figure 2.6 e 2.7. Osservando la brusca variazione di densità nella zona centrale del plasma, si comprende l'importanza della scelta di un istante specifico in cui prendere tutte le misure per non commettere gravi errori sistematici.

⁷Si è scelto un passo di 0.02s per evitare tempi computazionali troppo elevati.

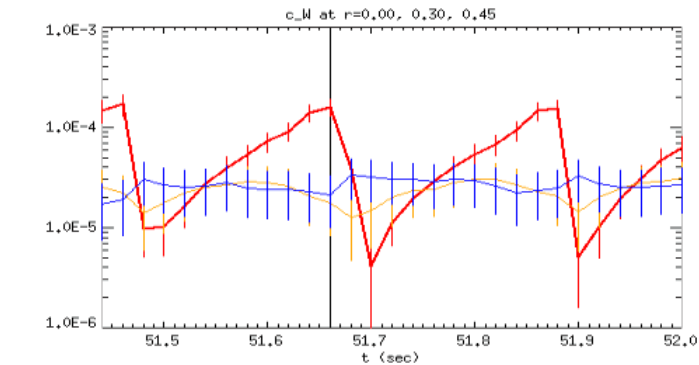


Figura 2.6: Andamento temporale della concentrazione di tungsteno, colori diversi indicano raggi diversi.

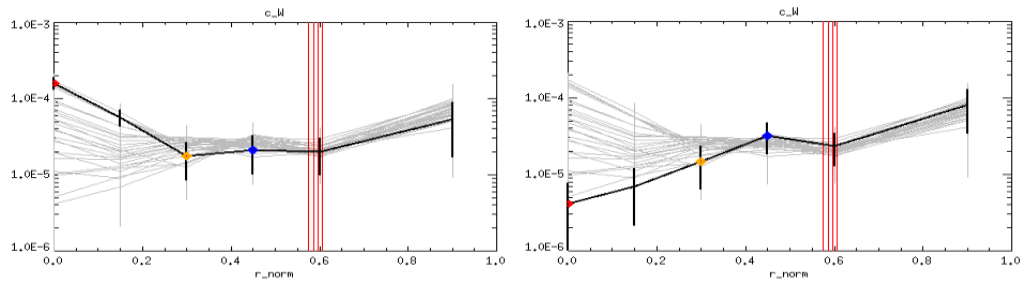


Figura 2.7: Concentrazione di W in funzione del raggio normalizzato. A sinistra: in corrispondenza del picco. A destra: in corrispondenza del ventre.

Lo scopo principale di questo tipo di analisi è stato quello di verificare se, modificando la frequenza degli ELM e mantenendo costante la potenza iniettata nei vari impulsi, fosse possibile ridurre in maniera controllata la presenza di impurità nel plasma. I valori delle concentrazioni sono stati presi ad un raggio normalizzato di 0.15, per essere sicuri di non commettere grossi errori a causa delle asimmetrie dei profili.

2.2.1 Risultati analisi

Una volta applicato alle scariche selezionate quanto detto sopra, mantenendo separate le varie sessioni sperimentali, ed effettuando l'analisi in diversi momenti degli impulsi, si sono ottenuti i risultati riportati di seguito.

Impulsi 89420-89427 Gli impulsi di questa sessione sono ben rappresentati dalla scarica 89427 in figura 2.8.

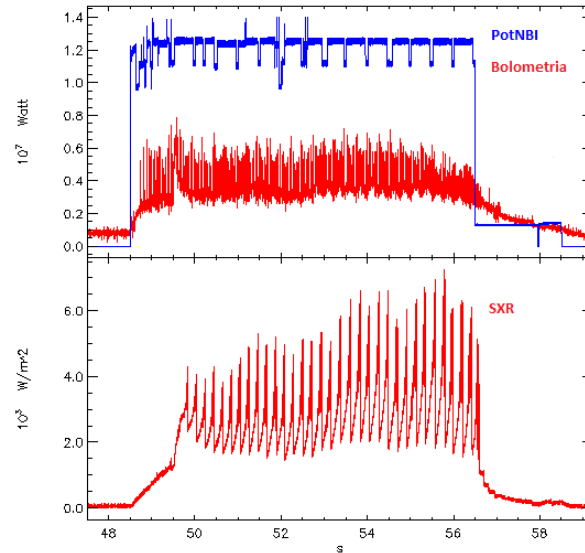


Figura 2.8: Scarica tipo della sessione (89427). In tutte le scariche viene iniettato Ne a $t=52.5$ s e Mo a 49.5s.

I risultati della prima sessione sono riportati nelle figure 2.9 e 2.10.

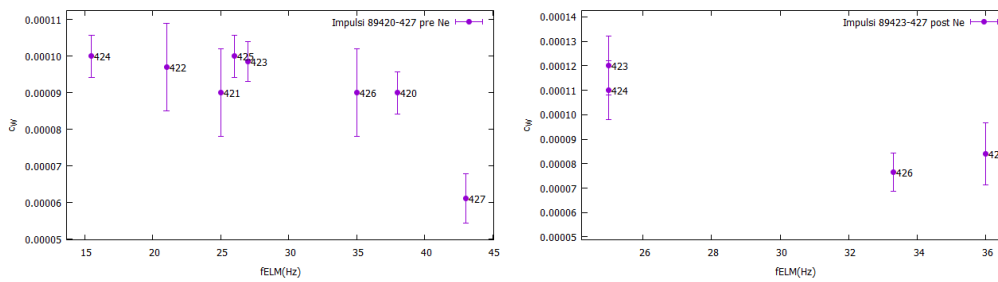


Figura 2.9: Concentrazioni di W al variare della frequenza degli ELM per le scariche 89420-89427 prima dell'immissione di Ne.

Figura 2.10: Concentrazioni di W al variare della frequenza degli ELM per le scariche 89423-89427 dopo dell'immissione di Ne. Le scariche 89420-89422 sono state scartate perché non più buone.

Osservando i dati ottenuti prima dell'immisione di Ne^8 , si può notare che la presenza di tungsteno tende a diminuire all'aumentare della frequenza dell'evento. Tutti dati, escluso il 427, presentano un andamento apparentemente lineare. L'unica differenza sostanziale tra la 89427 ed il resto delle scariche è che essa presenta un gas rate doppio⁹ rispetto alle altre. È plausibile ritenere che un gas rate maggiore comporti un abbassamento della temperatura del plasma al divertore, diminuendo così lo sputtering di tungsteno, come si vedrà meglio in seguito. Questo non avviene nelle scariche in cui si utilizzano i kicks.

Dopo l'immissione del Ne^{10} le concentrazioni di W continuano a diminuire all'aumentare della frequenza, ma apparentemente non si presenta più il fenomeno dovuto al gas rate.

Impulsi 90606-90610 Gli impulsi di questa sessione sono tutti simili a quello in figura 2.11.

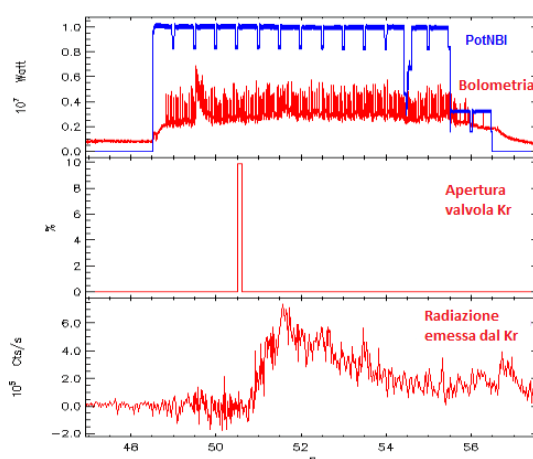


Figura 2.11: Scarica tipo della sessione (90609). In tutte le scariche viene iniettato Kr a $t=50.2\text{s}$.

Come si può notare, l'apertura della valvola che immette il kripton è molto vicina al picco dovuto all'iniezione di molibdeno. Per questo motivo, per rilevare le concentrazioni prima dell'entrata del Kr, rimanendo abbastanza lontani dal picco di Mo, si è dovuto prendere un intervallo temporale in parte sovrapposto con l'apertura della valvola. Questo non si è però rilevato un

⁸Tutti gli intervalli temporali tra 51.40s e 51.98s.

⁹ 1.6×10^{22} della 89427 contro 0.8×10^{22} delle altre.

¹⁰Tutti gli intervalli temporali tra 53.41s e 54.02s.

problema in quanto, per il funzionamento meccanico che regola l'apertura della valvola, una volta aperta, il Kr impiega circa mezzo secondo a diffondersi nel plasma, non andando quindi a intaccare le misure.

I risultati sono riportati nelle figure 2.12 e 2.13. In entrambi i grafici, pre-post

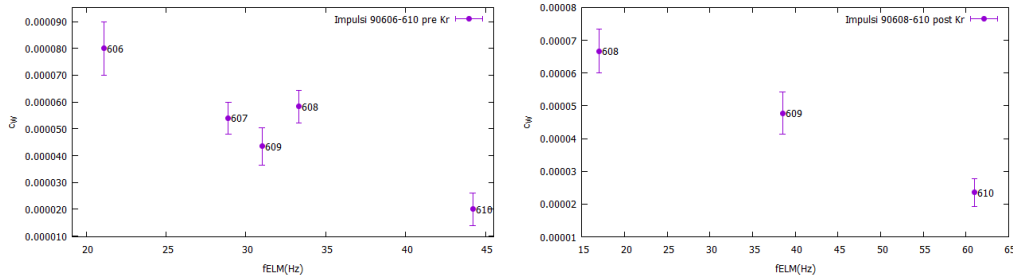


Figura 2.12: Concentrazioni di W al variare della frequenza degli ELM per le scariche 90606-90610 prima dell'immissione di Kr.

Figura 2.13: Concentrazioni di W al variare della frequenza degli ELM per le scariche 90608-90610 dopo dell'immissione di Kr. Le scariche 90606-90607 sono state scartate perché non più buone.

Kr, si può notare l'andamento tendenzialmente lineare della concentrazione. Anche qui, come nella sessione precedente, nel grafico pre-Kr (Fig. 2.12), la distribuzione delle scariche 607-608-609 può attribuirsi al diverso gas rate¹¹. Nel grafico post-Kr (Fig. 2.13) non sembra più essere presente il fattore dovuto al gas, in quanto il Kr iniettato, raffreddando il plasma al bordo, abbatte lo sputtering di tungsteno, rendendo più evidente l'azione di espulsione del W da parte degli ELM. Inoltre, poiché le differenze tra le frequenze degli ELM sono decisamente maggiori, è possibile che l'effetto sia stato assorbito da queste e che quindi sia difficilmente riconoscibile.

Impulsi 89243-89244 I due impulsi analizzati sono entrambi rappresentati nella figure 2.14 e 2.15.

La particolarità di questi due impulsi è che non presentano una potenza iniettata costante, ma aumenta al procedere della scarica. Inoltre, nella zona iniziale dove la potenza iniettata è 5MW, entrambi presentano diverse frequenze di ELM in intervalli temporali molto vicini tra loro. Si è scelto quindi di verificare se, anche in un caso come questo, a frequenze di ELM maggiori corrispondano concentrazioni di tungsteno minori.

¹¹Minimo per la 90608, massimo per la 90609.

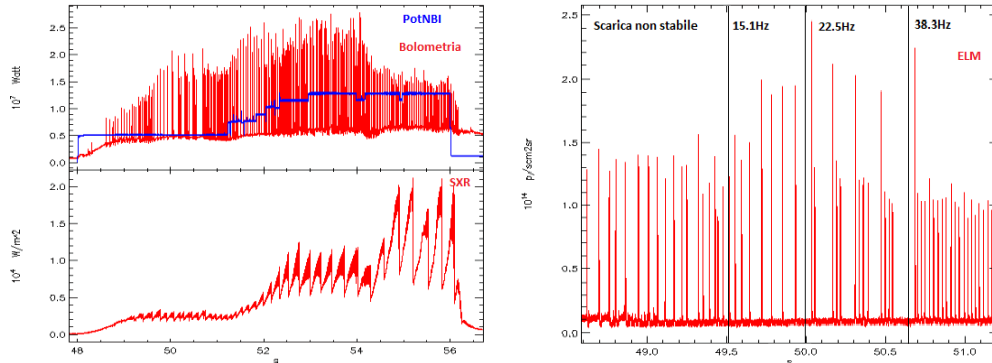


Figura 2.14: Scarica 89244. Il profilo della 89243 è molto simile. In entrambe la potenza iniettata aumenta progressivamente.

Figura 2.15: Particolare della scarica 89244 della zona analizzata con diverse frequenze degli ELM. Le diverse zone sono riportate nell'immagine.

Tutti i dati sono stati raccolti nella regione a 5MW iniettati, ottenendo i risultati in figura 2.16. Si nota come, anche in questo caso, gli ELM sembrano

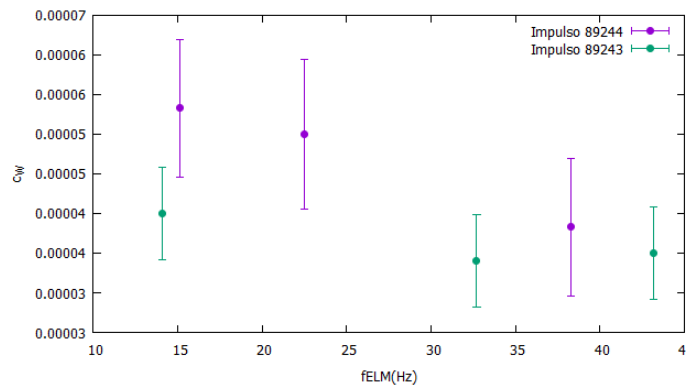


Figura 2.16: Concentrazioni di W al variare della frequenza degli ELM per le due scariche a potenza iniettata di 5MW.

avere un effetto pulente nel plasma.

I risultati ottenuti per queste ultime due scariche potrebbero essere meno attendibili dei precedenti, in quanto gli intervalli temporali analizzati sono molto vicini tra loro, e quindi il plasma potrebbe non aver avuto il tempo necessario per raggiungere l'equilibrio nell'intervallo temporale di una sezio-

ne. Si è scelto comunque di esporre i risultati in quanto sono un esempio di scariche diverse da quelle mostrate in precedenza.

Prime conclusioni Da un primo sguardo ai risultati ottenuti sembra che la concentrazione delle impurità all'interno del plasma tenda a diminuire linearmente all'aumentare della frequenza degli ELM, e che gas rate maggiori, a parità dei frequenza di ELM, corrispondano a minori concentrazioni di impurità di tungsteno, a causa di un raffreddamento del plasma al divertore.

2.3 Confronto coi dati spettroscopici

2.3.1 Immissione di altri elementi

Cercando un'ulteriore conferma di quanto ottenuto fino ad ora, si è studiato il comportamento del Kr nelle scariche 90607-90610 attraverso la spettroscopia. Infatti, essendo esso un elemento pesante, ci si aspetta presenti un comportamento simile a quello del tungsteno. L'analisi del kripton è riferita ad uno stato di ionizzazione, Kr XXVI, che abbonda nella regione del piedistallo ed ha una struttura spettrografica ben riconoscibile. Confrontando i grafici ottenuti (Fig. 2.14) con i relativi dati su frequenze degli ELM e gas rate delle scariche analizzate, riportati in tabella, è possibile trarre delle interessanti conclusioni.

Tabella relativa al grafico di Fig. 2.17 (fELM costante da 51s a 54s).

Impulso	fELM(Hz)	gas rate(e21)
90607	22	8.4
90608	34	8.1
90609	35	12.6
90610	46	19.4

Inanzitutto è chiaro come la radiazione emessa diminuisca all'aumentare degli ELM, a sottolineare ancora una volta l'effetto che questi possono avere per il controllo delle impurità pesanti. Inoltre, confrontando dati e grafico, è possibile notare come, per il Kr, un gas rate più alto non influisca sulla differente concentrazione di impurità nel plasma; le tracce verde e rossa della figura 2.17, corrispondenti a casi con gas rate diversi, sono infatti sovrapposte. Questo fatto combacia con l'ipotesi fatta in precedenza per spiegare il

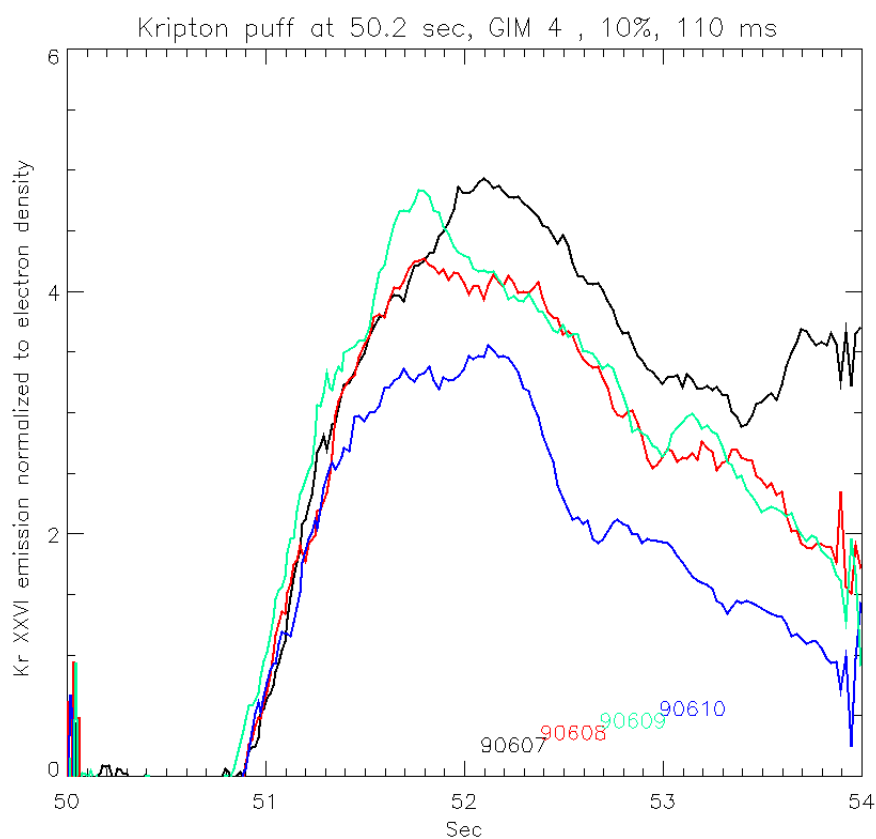


Figura 2.17: Dati spettrografici dell'immissione di kripton nelle scariche analizzabili. Le due tracce centrali si riferiscono a due casi con e senza kicks e stessa frequenza di ELM. Il fatto che siano sovrapposti suggerisce che ELM spontanei ed indotti coi kicks siano equivalenti.

motivo per cui, nel caso del tungsteno, ad un gas rate più alto corrispondevano concentrazioni minori di esso, ovvero che il gas immesso andasse ad abbassare la temperatura del plasma al divertore, diminuendo lo sputtering di tungsteno, motivo principale della sua presenza nel plasma. Se ciò fosse vero ci si aspetterebbe che, nel caso del kripton iniettato artificialmente e quindi non affetto da sputtering, il gas rate non abbia alcuna influenza, come confermano i dati sperimentali.

Il fatto che la scarica 90610 presenti una forma del picco iniziale leggermente diversa è invece da attribuirsi ad una caduta degli NBI a 51.8s. La scarica è comunque da considerarsi buona poiché la perdita di potenza è durata solo pochi decimi di secondo e quindi non l'ha compromessa in modo drastico.

2.3.2 Spettrografia: tungsteno

Come detto in precedenza, una delle assunzioni fondamentali effettuata durante questo studio è stata quella di considerare gli SXR analizzati dal programma di Thomas Pütterich emessi interamente dal tungsteno. Si è quindi scelto di verificare se questa assunzione fosse ragionevole.

Per fare ciò si è scelto di analizzare l'intensità delle righe spettrali tipiche del W, per verificare che avessero un profilo simile alle densità in funzione della frequenza degli ELM. Si è analizzato il numero di fotoni rilevati con

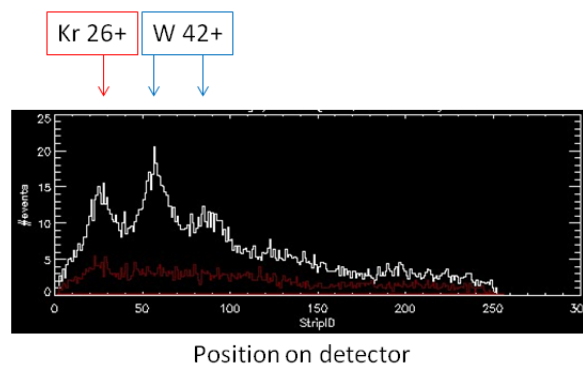


Figura 2.18: Spettro delle righe di W analizzate, in cui è presente anche il picco del Kr.

energie tipiche dello spettro del tungsteno nelle varie scariche (90606-90610), normalizzando i risultati sulle diverse densità elettroniche degli impulsi. In figure 2.18 e 2.19 i risultati, confrontati con i dati ottenuti in precedenza.

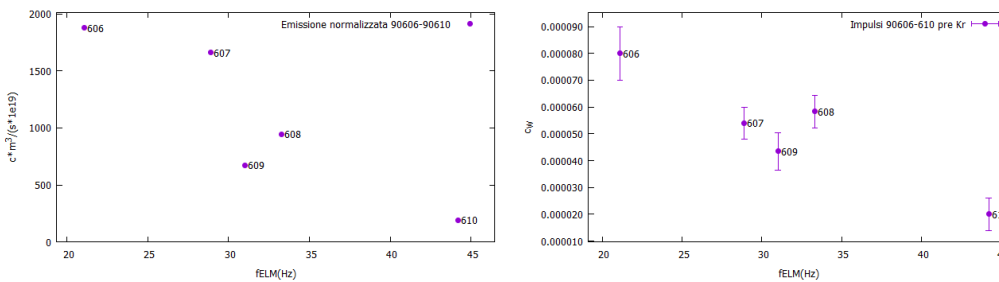


Figura 2.19: Emissione del W 42+ nelle scariche indicate normalizzata alla densità elettronica.

Figura 2.20: Concentrazioni di W stimate attraverso l'analisi dei raggi X integrati in energia.

Il confronto tra i due grafici lascia presupporre che l'assunzione all'inizio dell'analisi sia buona. Infatti, non solo il pattern è praticamente lo stesso, ma, in entrambi i casi, la variazione del valore sull'asse delle ordinate varia di un fattore quattro in corrispondenza della massima variazione di frequenza degli ELM.

2.3.3 Flussi di tungsteno al divertore

Infine, si sono ricavati i flussi di tungsteno emessi dalle due diverse zone¹² del divertore, in funzione del flusso di fotoni rivelati al divertore, per verificare che tutti i dati utilizzati fino ad ora fossero compatibili con essi, in quanto l'immissione di tungsteno nel plasma avviene per gran parte in questa regione del reattore, dove convergono le linee del campo magnetico esterne alla separatrice. Nel seguito i dati ottenuti.

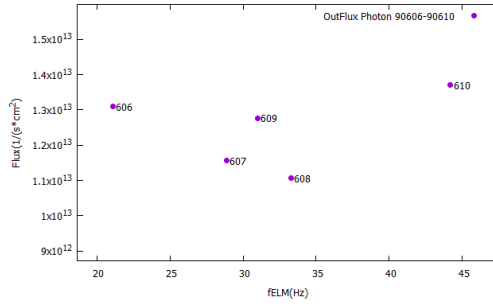


Figura 2.21: Flusso di fotoni nella regione esterna.

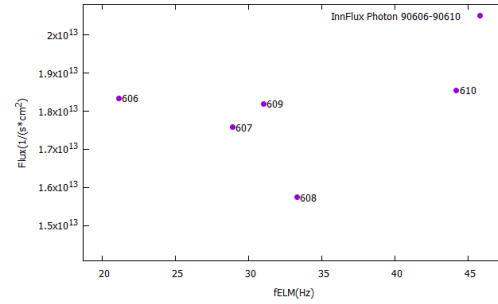


Figura 2.22: Flusso di fotoni nella regione interna.

La differenza tra i valori delle due regioni è dovuta ad una differenza di pressione tra le due zone, causata dalla diversa distribuzione dei flussi che impattano sul divertore. Da questi dati si ricava il flusso in ingresso di ioni W^{13} , infatti esso è descritto dalla formula:

$$\Gamma = 4\pi \frac{S}{XB} I$$

dove I è il flusso di fotoni e $\frac{S}{XB}$ è chiamato inverse photon efficiency, è il rapporto tra i rate di ionizzazione (S) ed eccitazione (X), determina quante particelle entrano nel plasma per fotone rivelato e dipende dalla temperatura elettronica T_e . Il parametro B (branching) tiene conto del peso relativo della

¹²Inner e outer.

¹³Non normalizzato sulla densità elettronica, misurato in $\frac{1}{s*cm^2}$.

specifica transizione che si sta osservando rispetto a tutte le altre possibili. In questo caso la riga di W osservata è la WI a 400.9 nm, il cui $\frac{S}{XB}$ è descritto dalla relazione[5]:

$$\frac{S}{XB}(T_e) = 53.7(1 - 1.04\exp(-\frac{T_e}{22.1}))$$

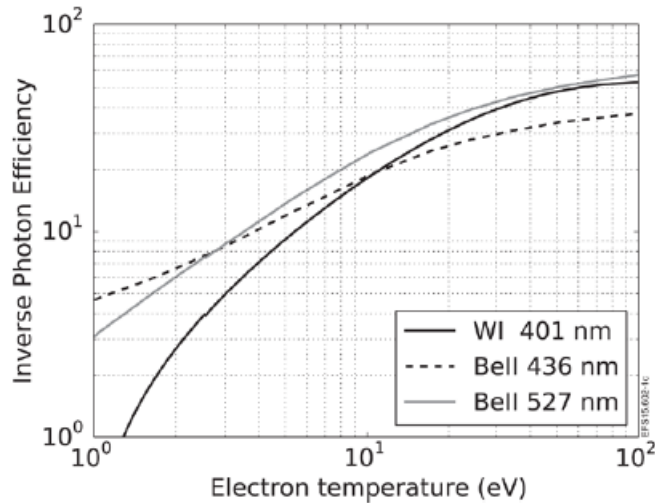


Figura 2.23: Andamento di $\frac{S}{XB}$ in funzione di T_e (eV) per WI.

Per completare l'analisi abbiamo quindi preso i valori medi del tempo della temperatura nelle due zone del divertore, misurati con delle sonde di Langmuir nelle varie scariche, e con questi valori abbiamo poi calcolato l'inverse photon efficiency per ogni scarica. Risultati a seguito.

Dati temperature e inverse photon efficiency

Impulso	T_e Outer(eV)	S/XB	T_e Inner(eV)	S/XB
90606	8.43	15.6	4.56	8.2
90607	8.4	15.5	4.8	8.8
90608	7.9	14.6	4.42	8.0
90609	7.1	13.6	3.9	6.9
90610	6.9	12.8	4.1	7.5

Infine, con i dati ottenuti, si è andati a calcolare l'effettivo flusso entrante di ioni di tungsteno emessi al divertore, sommando i flussi nelle due regioni (Fig. 2.24).

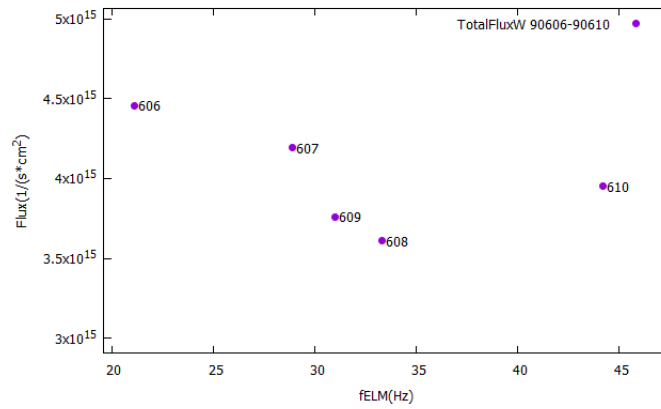


Figura 2.24: Produzione totale di W al divertore.

Osservando questi ultimi risultati, si nota come gli influssi presentino una variazione da scarica a scarica di circa il 10%, mentre le stesse scariche presentano un rapporto tra le concentrazioni massime e minime di circa 4. Da questo risultato si può evincere che le variazioni delle concentrazioni di W nel range di frequenze esplorato sia dovuto principalmente agli ELM, in quanto la quantità di tungsteno immessa al divertore è praticamente la stessa.

Capitolo 3

Conclusione

3.1 Riassunto del lavoro e commento dei risultati

Lo scopo di questa tesi è stato quello di valutare quantitativamente la capacità dei modi localizzati al bordo plasma (ELM) di ridurre la presenza di impurità pesanti, non desiderate, all'interno dei plasmi dell'esperimento JET con Iter Like Wall. Per effettuare lo studio, si sono inizialmente eliminate dal campione le scariche (effettuate nell'esperimento JET) che non presentavano una potenza iniettata costante o in cui era assente un profilo del dente di sega chiaro negli SXR. Una volta ottenuto il nuovo campione, sfruttando un programma ideato da Thomas Pütterich, si è stimata per ciascuna scarica la concentrazione di W nel plasma, sincronizzando le valutazioni con il dente di sega per ottenere dei dati coerenti e per ridurre al minimo le possibilità di errore. Quindi si sono plottate le concentrazioni ottenute in funzione della frequenza degli ELM. I plot ottenuti mostrano chiaramente che, all'aumentare degli ELM, la quantità di impurità di W presenti nel plasma diminuisce, in modo apparentemente lineare (almeno per le frequenze di ELM raggiunte negli esperimenti analizzati). Si è riscontrata una concentrazione minore di tungsteno nelle scariche con gas rate più alto durante tutta l'analisi, fatto spiegabile con un raffreddamento del plasma al divertore a causa del maggior gas iniettato durante il processo.

In cerca di ulteriori conferme ai risultati ottenuti, si è studiata la radiazione emessa dal kripton (in particolare si è osservata la riga a 17.6 nm del Kr XXVI) appositamente iniettato nel set di scariche 90606-10. La radiazione emessa dal Kr in funzione della frequenza degli ELM presenta la stessa tendenza a diminuire ad alte frequenze, riscontrata nell'analisi delle impurità di tungsteno. In questo caso non si sono riscontrate differenze dovute al gas

rate, come ci si aspettava, in quanto il Kr è un'impurità intrinseca del plasma e non dovrebbe risentire della differenza di temperatura al bordo.

Infine, si è analizzata la spettrografia del W nelle scariche 90606-10, per avere una conferma definitiva sull'affidabilità dei dati ottenuti durante la prima parte di analisi. Dal flusso di fotoni tipici delle righe W 42+ è stato possibile ricavare il flusso di tungsteno immesso nel plasma dal divertore, sfruttando l'inversa photon efficiency (ovvero numero di eventi di ionizzazione per fotone emesso), calcolata a partire dalla temperatura al divertore. Confrontando i rapporti tra i valori massimi e minimi di W immesso, con i rapporti delle concentrazioni massime e minime delle stesse scariche, si è giunti alla conclusione che i valori delle concentrazioni con il programma di T. Pütterich siano dovuti prevalentemente alla frequenza degli ELM (che copriva un range da 21Hz a 44Hz). Infatti il flusso di W immesso nel plasma al divertore è circa lo stesso in tutte le scariche.

Sembra quindi possibile sfruttare un fenomeno intrinseco come quello degli ELM, per controllare e ridurre la presenza di impurità pesanti all'interno del plasma.

3.1.1 Possibilità future

In conclusione si propongono dei possibili studi futuri continuativi del lavoro svolto. Dal punto di vista dell'esperimento si potrebbe estendere l'intervallo di frequenze degli ELM sia verso l'alto che verso il basso, per verificare se, per esempio, a basse frequenze cominci a dominare il trasporto delle fasi inter-ELM. Inoltre si potrebbe aumentare significativamente la potenza iniettata, per lavorare con ELM più potenti e studiarne l'effetto. Infine si potrebbe cercare di capire se esiste una frequenza che massimizza il rendimento della fusione, considerando che se da un lato gli ELM contribuiscono a migliorare le prestazioni del reattore eliminando le impurità, dall'altro le riducono abbassando il piedistallo del H-Mode. Dal punto di vista dell'analisi invece resta da studiare tutta la componente del trasporto, per capire quanto pesi la fase inter-ELM rispetto a quella dell'ELM al variare della loro frequenza.

Bibliografia

- [1] <https://www.euro-fusion.org/jet/>.
- [2] A. Diallo et al., “Observation of edge instability limiting the pedestal growth in tokamak plasmas” *Phys. Rev. Lett.* *112*, 115001, 2014.
- [3] T. Pütterich et al., “Tungsten screening and impurity control in JET” *IAEA FEC, San Diego EX/P3-15*, 2012.
- [4] T. Pütterich et al., “Modelling of measured tungsten spectra from ASDEX upgrade and predictions for ITER” *Plasma Physics and Controlled Fusion* *085016*, 2008.
- [5] N. Den Harder, S. Brezinsek, T. Pütterich et al., “ELM-resolved divertor erosion in the JET Iter-Like Wall” *Nuclear Fusion* *56* 026014, 2016.