

Contents

1 Tokamak	2
1.1 Struttura	2
1.2 Confinamento	2
1.3 Scarica	2
2 Ruolo delle misure magnetiche	2
3 Sensori Induttivi	3
3.1 Rogowski Coil	3
3.2 Voltage Loop / Flux Loop	3
3.3 Pick-Up Coils	3
3.4 Saddle Coils	3
3.5 Loop Diamagnetico	3
3.6 Sensori di Hall	4
4 Sistemi di riscaldamento aggiuntivi	4
4.1 Diagnostiche su atomi neutri	4
4.2 Electron Cyclotron Resonant Heating	4
5 Thomson Scattering	5
6 Polarimetro	5
6.1 Polarizzatore	5
6.1.1 Assorbimento	5
6.1.2 Polarizzazione tramite doppia rifrazione	6
6.2 Onde elettromagnetiche	6
6.3 Ellisse di Propagazione e Vettori di Stokes	6
6.4 Sistema Polarimetrico	7
7 MSE	7
7.1 Motion Stark Effect	7
7.2 Principi NBI	8
7.3 Spettroscopia	8
7.4 Stark Effect	8
7.5 Motional Stark Effect	8
8 Interferometro	8
8.1 Onde ottiche	9
8.2 Interferenza	9
8.3 Diagnostiche	10
8.3.1 Interferometro di Michelson	10
8.4 Interferometro nella fusione	10
8.4.1 Mach-Zender	10
8.4.2 Interferometro nel JET	11
8.5 Problemi dell'interferometro: salti di frangia	11
9 Hardware	11
10 Neutronica 1-2-3-4	12
10.1 Introduzione	12
11 Tomografia	12
12 Bolometria	13
12.1 Bolometri a filmetallico	13
12.1.1 Problematiche	14
13 Bolometri basati su diamanti	14

14 Spettroscopia	14
14.1 Informazioni dalla linea spettrale	14
14.2 Misure spettrali	15
14.3 Line Monitoring	15
14.4 Bilancio delle particelle da D_α	15
14.5 Spettrometro UV	15
14.6 Spettrometro Raggi X	15
14.7 Bremsstrahlung	15
14.8 CSX	16
15 Disruzioni	16
15.1 Classificazione diagnostiche disruzione	16
15.2 Requisiti Hardware	17
15.2.1 Carichi termici	17
15.2.2 Carichi Meccanici	17
15.3 Locked mode detection AUG	17
15.4 Imaging for disruptions	17
15.5 Indicatori di Profilo	17
15.6 Problema inverso nella fusione	17

1 Tokamak

1.1 Struttura

Il Tokamak si basa su tre gruppi elettromagnetici:

- campo toroidale: funge da manicotto e confina il plasma;
- magneti centrale che appartengono al trasformatore e incuono corrente nel plasma che fluisce torodialmente;
- magneti del campo verticale: agiscono in modo da stabilizzare il plasma e vincolarlo al centro del toro.

1.2 Confinamento

Per far avvenire la scarica di plasma, il tokamak deve raggiungere la cosiddetta configurazione di confinamento in cui la risultante del campo magnetico toroidale e poloidale è un campo magnetizo elicoidale: le particelle di plasma si avvitano toroidalmente in superfici isobare di flusso.

1.3 Scarica

Durante l'avviamento di un esperimento nel tokamak si inizia crea il vuoto all'interno del vessel e si inietta una miscela di deuterio e trizio all'interno nella camera da vuoto. A questo punto, si innalza il campo toroidale, si ha un ramp up del flusso nel trasformatore per ottenere un alto campo elettrico per poi essere interrotto. Così facendo si crea una differenza di potenziale che avvia un breakdown del plasma: gli elettroni, accelerati dal campo elettrico, guadagnano energia. Questi quando urtano gli atomi di deuterio e trizio lo possono ionizzare e generare un nuovo elettrone. Questo fenomeno si ripete esponenzialmente (avalanche) così da giungere al breakdown del plasma.

Una volta che è trascorso il breakdown viene avviato il controllo in feedback del plasma.

2 Ruolo delle misure magnetiche

Le misure magnetiche si possono dividere in due macrocategorie:

- **Operazioni real time:**
 1. Posizione del plasma e controllo di forma;
 2. Sistema di protezione;
 3. Misurazioni;
- **Analisi offline:**
 1. Ricostruzioni magnetiche: superfici di flusso e il bordo del plasma. Sono molto impoortanti per correggere e interpretare le informazioni contenuta in una scarica;
 2. Analisi MHD

3 Sensori Induttivi

Il tokamak possiede delle diagnostiche basate su sensori induttivi: sono dei sensori che risentono delle variazioni del campo magnetico in forma integrale o derivativa.

I sensori induttivi si basano sulla legge di Faraday: la forza elettromotiva indotta è proporzionale alla derivata del flusso di campo magnetico.

$$f_{em} = -\frac{d\Phi\langle B \rangle}{dt} \quad (1)$$

Tuttavia in pratica quello che lo strumento ritorna sono valori di tensione che tramite la relazione:

$$V = -NA\langle \dot{B} \rangle \quad (2)$$

Integrando nel tempo si può avere una misura del flusso del campo magnetico:

$$\Phi = NA\langle B \rangle = -\int V dt + const \quad (3)$$

Di seguito si illustreranno i sensori induttivi installati in un tokamak.

3.1 Rogowski Coil

Le bobine Rogowski sono delle bobine solenoidali che si avvolgono lungo la sezione poloidale del toro. Queste forniscono una misura diretta della corrente che fluisce nel suo centro.

L'equazione che la caratterizza è:

$$\Phi = nA \oint B dl \mu_0 n A I_p = -\int V dt + const \quad (4)$$

Bisogna ricordare che:

- Le misure di corrente non dipendono sulla forma del rogowski né dalla distribuzione di corrente nel plasma;
- Il cammino degli avvolgimenti del solenoide devono ritornare sullo stesso asse in cui sono iniziate;
- Le bobine Rogowski possono essere sostituite da un set di bobine tangenti alla camera.

3.2 Voltage Loop / Flux Loop

Il Voltage Loop è un singolo cavo che avvolge la camera toroidalmente ed ha il compito di misurare la tensione indotta dal trasformatore centrale. La tensione ai capi della bobina vengono inviati ad un DAS che ne calcola il valore.

3.3 Pick-Up Coils

Le Pick-up Coils sono bobine poste al bordo del vessel utilizzate per ricostruire l'equilibrio, per controllare il plasma e rilevare le instabilità MHD.

3.4 Saddle Coils

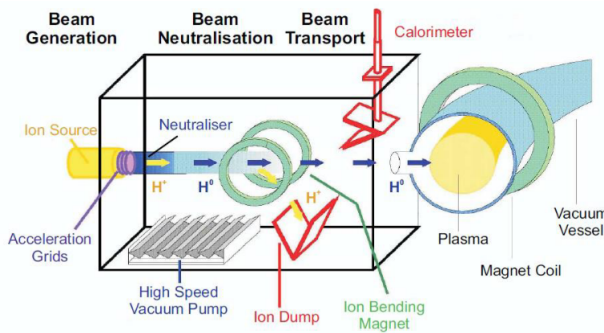
Le bobine Saddle sono bobine estese montate sulla camera da vuota che permettono di misurare il flusso magnetico perpendicolare a loro stessi. Inoltre, sono utilizzate per la ricostruzione dell'equilibrio e possono fornire in totale misure del flusso poloidale. In quest'ultimo caso, si ottengono misure integrali del flusso poloidale che devono essere derivate con un flusso di riferimento per ottenere una informazione.

3.5 Loop Diamagnetico

Sappiamo che il plasma, dall'equazione dell'equilibrio $j \times B = \nabla p$ le particelle del plasma si dispongono lungo superficie isobare e che l'equilibrio sviluppa delle correnti poloidali che riducono il campo magnetico. Questo specifico comportamento viene detto **diamagnetismo**.

Al fine di misurare l'energia del plasma dal flusso toroidale si utilizza il Loop Diamagnetico. Questa misura risulta non semplice dato che l'effetto diamagnetico è molto piccolo.

Infine, risulta una diagnostica che soffre dell'allineamento.



3.6 Sensori di Hall

Una delle problematiche delle diagnostiche a bobine magnetiche è che le misurazioni del campo magnetico rispondono a cambiamenti della derivata del campo magnetico. Ciò implica che in un campo magnetico stazionario queste bobine risultano inutili finché non vengono mosse all'interno del campo.

Per questi tipi di campi si è deciso di introdurre delle diagnostiche che si basassero sull'effetto Hall.

L'effetto Hall è un fenomeno fisico proprio del plasma in cui si considera il plasma come un semiconduttore solido. In particolare, una lastra di semiconduttore è immersa in un campo magnetico. Una corrente attraversa la lastra e viene affetta dalla forza di Lorentz, deviando perpendicolarmente al prodotto vettoriale tra \mathbf{j} e \mathbf{B} .

La carica risultante sulle facce della lastra genera un campo elettrico addizionale che cancella la forza magnetica. Quest'ultimo campo elettrico viene misurato dai sensori.

4 Sistemi di riscaldamento addizionali

Il principale meccanismo utilizzato nel tokamak per accelerare le particelle è il riscaldamento ohmico. Tuttavia, non è necessario ad accelerare le particelle quanto dovuto dato che questo tipo di riscaldamento risulta inefficace ad alte temperature. Questo difetto è dovuto alla resistività del plasma che diminuisce con l'aumentare della temperatura. Si necessitano di riscaldamenti addizionali per raggiungere le temperature necessarie. Esse sono basate su riscaldamento da particelle α , su onde elettromagnetiche e su iniezione di particelle neutre.

4.1 Diagnostiche su atomi neutri

Le diagnostiche basate su atomi neutri nel plasma sono importanti per plasmi confinati elettromagneticamente poiché essi, essendo neutri, attraversano le linee di campo. Possono essere quindi sfruttati per ottenere delle informazioni sul centro del plasma.

Per creare un fascio neutro si utilizza una miscela da cui si producono gli ioni di deuterio o idrogeno (per maggiore efficienza si sono scelti ioni negativi), a questo punto vengono accelerati da un campo magnetico orizzontale, vengono neutralizzati e poi iniettati all'interno del plasma. Le linee guida per l'iniezione di un fascio neutro sono i seguenti:

- Le particelle neutre viaggiano inalterate attraverso i campi magnetici;
- Il beam trasferisce energia al plasma attraverso le collisioni;
- L'assorbimento del fascio deve avvenire al centro del plasma. Se abbiamo formato un fascio debole allora verrà assorbito nel bordo del plasma; se troppo forte o mal direzionato può bucare la camera da vuoto;
- L'assorbimento del fascio dipende dalla sezione d'urto tra il fascio e il plasma;

Schematicamente:

4.2 Electron Cyclotron Resonant Heating

Le cosiddette ECRH sono riscaldamenti addizionali basati su onde radio per trasferire energia da una sorgente esterna al plasma. Quando una onda elettromagnetica si propaga attraverso il plasma, il campo elettrico dell'onda accelera le particelle cariche e quindi aumenta il numero di collisioni di queste nel plasma.

In particolare, si ha assorbimento dell'onda quando si è in risonanza, tuttavia essendo il plasma non uniforme si possono avere anche fenomeni di riflessioni. Ne risulta quindi che la polarizzazione dell'onda gioca un ruolo molto importante sulla forza dell'onda e sulla regione di assorbimento. Vi sono principalmente due distinzioni di polarizzazioni che sono dipendenti dal campo magnetico nel plasma:

- O-Mode: parallelo al campo magnetico e incontrano solamente una frequenza di risonanza e un di cut-off;

- X-Mode: perpendicolare al campo magnetico

Un altro fenomeno che potrebbe risentire il fascio è quello della rifrazione quando si trattano plasmi di alta densità.

5 Thomson Scattering

Per misurare la temperatura e la densità del plasma si sfrutta il fenomeno del Thomson Scattering. In particolare si inietta nel plasma un fascio laser e se ne misura sia la luce diffusa che la larghezza spettrale.

Le misure di larghezza forniscono delle informazioni sulla temperatura e l'intensità della luce diffusa sulla densità degli elettroni. Le ragioni principali per cui si è introdotta questa diagnostica sono due:

- è un metodo che non perturba l'equilibrio del plasma poiché si richiede solo l'accesso alle radiazioni del plasma;
- permette di avere delle informazioni dettagliate sulla funzione di distribuzione degli elettroni.

Si ha una onda elettromagnetica incidente su una particella che viene accelerata dai campi elettromagnetici dell'onda. Durante l'urto si ha una emissione di una radiazione detta scattered wave. Questa radiazione viene misurata dagli spettrometri a filtri policromatici. Dato che occorre che il posizionamento delle ottiche sia ottimale, la calibrazione diventa fondamentale per ottenere misurazioni della densità di elettroni. Essa viene effettuata utilizzando altri gas.

6 Polarimetro

Il Polarimetro è una diagnostica che consente di avere misure delle componenti del campo magnetico per capire la causa che hanno portato alla rilevazione di tale misura. Queste misure sono fondamentali per la ricostruzione dell'equilibrio del plasma dato che tramite esse è possibile inserire ulteriori vincoli per la risoluzione del problema inverso.

Il funzionamento del Polarimetro si basa su un fascio laser negli infrarossi che fa ad incidere sul plasma. Da questo urto si hanno informazioni riguardo alla corrente di plasma (campo poloidale) e la densità degli elettroni.

L'urto del fascio laser con il plasma, dato che quest'ultimo è un mezzo birifrangente (indice di rifrazione differente in base all'angolo di incidenza del fascio) dà origine a due effetti:

- Effetto Faraday: il fascio laser ruota, dovuto al campo magnetico poloidale;
- Effetto Cotton-Mouton: il fascio laser si elettrifica, dovuto al campo magnetico toroidale;

La birifrangenza del plasma dipende da:

- densità elettronica;
- campo magnetico; temperatura elettronica

Il Polarimetro per funzionare ha bisogno di una luce polarizzata: una luce in cui i vettori del campo elettrico non si propagano lungo tutte le direzioni, ma lungo una precisa direzione. Tuttavia, la luce di base non è polarizzata e quindi occorre polarizzarla tramite uno strumento detto polarizzatore.

6.1 Polarizzatore

Il polarizzatore è uno strumento che consente di polarizzare la luce non polarizzata. In particolare, data una sorgente di luce non polarizzata, si interpone lungo le direzioni di propagazione della luce un filtro a bande verticali che permette di far passare solo le componenti del campo elettrico parallele alle fenditure del filtro. In generale la polarizzazione può essere effettuata tramite:

- assorbimento;
- riflessione;
- scattering;

6.1.1 Assorbimento

L'assorbimento è il metodo più comune per polarizzare la luce. Si necessita di una sorgente di luce non polarizzata, un polarizzatore, un analizzatore hardware capace di valutare l'efficienza del polarizzatore. L'efficienza viene considerata come l'angolo formato tra il raggio incidente e uscente all'analizzatore.

6.1.2 Polarizzazione tramite doppia rifrazione

I materiali birifrangenti possono essere utilizzati per la polarizzare la luce. La loro particolarità è che essi posseggono due indici di rifrazione: quando un fascio di luce passa nel materiale birifrangente si genera il raggio straordinario (E) e raggio ordinario (O) dovuto alla diversa velocità di attraversamento del mezzo.

Inoltre, il punto in cui coincidono gli indici di rifrazioni è quello che si trova lungo l'asse del mezzo.

6.2 Onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche sono composte da componenti perpendicolari fra loro del campo elettrico e magnetico che si propagano lungo una direzione z . Detto ciò possiamo esprimere l'equazioni di un'onda elettromagnetica che si propaga lungo una direzione come:

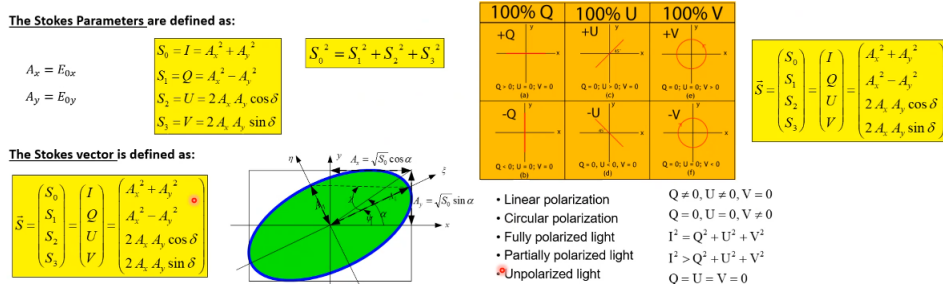
$$\vec{E}_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \vec{x} \quad \vec{E}_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \vec{y} \quad (5)$$

Si dimostra che unendo queste due equazioni si giugne all'equazione dell'ellisse dipendendo dalla differenza di fase fra le componenti del campo elettrico dell'onda. A questo punto, data l'equazione dell'ellisse si può calcolare la deformazione del fascio tramite l'ellisse di polarizzazione nel piano xy : si individuano gli angoli ψ di orientamento dell'ellisse e χ l'ellitticità dal fascio iniziale e quello rifratto.

6.3 Ellisse di Propagazione e Vettori di Stokes

L'ellisse di propagazione da cui si ricava l'ellitticità e l'orientamento può essere ricondotta in una forma più semplice tramite i vettori di Stokes. I parametri di Stokes sono un insieme di valori utili a capire se un'onda è polarizzata linearmente, radialmente etc... per poi modellizzare il percorso ottico del polarimetro.

In particolare è un vettore composto da 4 componenti dipendenti dall'equazione elettromagnetiche delle onde:



Per calcolare l'effetto del Plasma sul fascio laser occorre tenere conto delle componenti ottiche che ha attraversato il fascio laser. Per vedere questo effetto si calcola:

$$\vec{S}_{fin} = M_{pol} \cdot \vec{S}_{in} \quad (6)$$

In cui:

- M:matrice che caratterizza il componente ottico;
- S in o fin: polarizzazione del fascio iniziale e finale espressi in vettore di Stokes;

Ogni elemento ottico viene descritto dalla matrice di Mueller ed è sempre nota.

6.4 Sistema Polarimetrico

Gli effetti che entrano in gioco nel polarimetro sono espressi come:

$$\psi \propto \int n_e \cdot B_z dz \quad \text{Rotazione di Faraday} \quad (7)$$

$$\phi \propto \int n_e \cdot B_T^2 dz \quad \text{Cotton-Mouton} \quad (8)$$

L'evoluzione della polarizzazione viene descritta in base alla variazione del vettore di Stokes sull'asse z:

$$\frac{d\vec{S}}{dz} = \vec{\Omega} \times \vec{S} \quad (9)$$

In cui Ω dipende dalla frequenza, dai due indici di rifrazione del mezzo e il vettore di polarizzazione dell'onda veloce. Non ha risoluzione e può essere risolta tramite una matrice simmetrica simile a quella di Muller sia per i componenti ottici che il plasma.

Quindi, per sapere l'effetto che hanno i componenti ottici (inclusi il plasma) si moltiplicano tutte le matrici di Muller come da formula per poi ottenere:

- Angolo di rotazione:

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1} \quad (10)$$

- Cotton-Mouton:

$$\arctan \frac{S_3}{S_2} \quad (11)$$

7 MSE

L'MSE è una diagnostica che permette di avere delle misure interne al plasma tramite un'analisi degli atomi neutri. Dato che gli atomi immessi sono neutri non interagiscono con i campi magnetici, ma possono interagire con gli atomi del plasma così da inferire a delle proprietà del plasma. L'immissione del fascio neutro è anche un sistema di riscaldamento nel NBI.

7.1 Motion Stark Effect

L'MSE è una diagnostica che utilizza la luce che proviene dai NBI ad idrogeno (utilizzati per il riscaldamento addizionale) e l'interazione con il plasma. La luce proveniente dall'idrogeno eccitato uò essere osservato all'interno della lunghezza d'onda di Balmer α : la luce emessa è polarizzata e la sua banda risulterà allargata a causa del campo magnetico.

Charge exchange	$D_0^0(1s) + D^+ \rightarrow D_0^+ + D^0$
Ionization by ions	$D_0^0(1s) + D^+ \rightarrow D_0^+ + D^+ + e$
Ionization by impurities	$D_0^0(1s) + A^{n+} \rightarrow D_0^+ + A^{n+} + e$
Impurity CX	$D_0^0(1s) + A^{n+} \rightarrow D_0^+ + A^{(n-1)+}$
Ionization by electrons	$D_0^0(1s) + e \rightarrow D_0^+ + 2e$

7.2 Principi NBI

- Le particelle neutre viaggiano inalterate attraverso i campi magnetici;
- Il beam trasferisce l'energia al plasma tramite le collisioni;
- L'assorbimento del beam deve avvenire al centro e non al bordo e questo è dovuto alla potenza del fascio;
- I processi principali sono:

7.3 Spettroscopia

Come abbiamo visto l'MSE si basa sullo spettro della luce emessa dall'interazione del fascio con il plasma.

Lo spettrometro misura per varie lunghezze d'onda la luce emessa dall'idrogeno. Le varie bande sono dovute allo shift doppler. Questo fenomeno è vantaggioso poiché permette di distinguere tra le emissioni dell'idrogeno e quelle al bordo. In particolare, l'informazione è contenuta nell'intensità della linea: più è intensa più il plasma è denso in una determinata porzione di plasma. Un altro modo per vedere lo spettrogramma è quello di utilizzare i fasci quantici: l'energia emessa dipende dalla costante di Planck e la frequenza della luce emessa.

7.4 Stark Effect

L'effetto Stark è quell'effetto che quantifica la separazione delle bande dello spettro dell'idrogeno in presenza di un campo elettrico. (Nel caso in cui si parlasse di campo magnetico si chiama Effetto Zeeman).

Vedendo uno spettrometro, si vedono più picchi e degli allargamenti delle bande: l'aggiunta dei picchi sono dovuti all'energia con cui entrano i NBI nel plasma che va a diminuire a $\frac{1}{i}$ $u = 1, \dots, n$. Inoltre, si nota una variazione della lunghezza d'onda della luce è dovuto all'effetto Doppler: il cambio della lunghezza d'onda della radiazione è dovuta al moto relativo tra sorgente e osservatore. Si quantifica:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (12)$$

7.5 Motional Stark Effect

Il contributo dominante per la struttura spettrale di un componente monoenergetico del fascio è dovuto al motional Stark Effect. Questo effetto non è differente dal classico Stark Effect, ma il campo elettrico in questione non è vicino al plasma. Tuttavia, sorge dal movimento dell'atomo all'interno del campo magnetico, ma risentirà di un campo elettrico dovuto alla forza di Lorentz.

Il suo effetto può essere di due tipi:

- Quadratico: si ha quando si considera il momento della carica;
- Lineare

Lo Stark effect si compone di due regimi:

- Per la maggioranza degli atomi lo Stark effect è quadratico in particolare rispetto al campo elettrico. Questo perché il momento del dipolo elettrico dell'atomo è proporzionale all'applicazione del campo e all'energia della perturbazione.
- Lineare: quando si è in presenza di campi elettrici forti in cui questa energia è comparabile alla divisione dello spettro dei livelli di energia (numero quantico) di un atomo non perturbato. Le barre si dividono in barre sigma e pi greco nella serie di Balmer in cui la loro altezza rappresenta l'intensità dello spettro e si differenziano in polarizzazione. In particolare:
 - La componente π relativo al numero quantico 0 risulta in un'onda polarizzata nella componente parallela del campo elettrico;
 - La componente σ con numero quantico pari a ± 1 alla componente perpendicolare del campo elettrico

8 Interferometro

L'interferometro è una diagnostica che consente di misurare la densità del plasma. Anche questa diagnostica come il polarimetro si basa sulle ottiche.

8.1 Onde ottiche

Quando si trattano le onde si possono verificare 3 tipi di eventi:

- Interferenza;
- Diffrazione: se il fascio laser passa tramite due fenditure, si nota che al passaggio delle fenditure disegna delle figure di diffrazione corrispondente ad una dispersione dell'onda;
- Polarizzazione.

Affinché sia possibile verificarsi di questi eventi necessitiamo che il fascio sia:

- Coerente: deve mantenere una fase costante;
- Monocromatica: il laser deve avere una singola lunghezza d'onda.

8.2 Interferenza

Date due sorgenti coerenti e monocromatiche esse possono interagire in due maniere:

- Costruttiva: se l'ampiezza dell'onda risultante è maggiore di quella singola;
- Distruttiva: se l'ampiezza dell'onda risultante è meno di una delle due sorgenti.

Tutte le interferenze associate ai fasci di luce sono associate all'interazione dei campi elettromagnetici. Visivamente, in un interferometro, il fenomeno di interferenza origina una sequenza di bande chiare e scure corrispondenti rispettivamente a fenomeni di interferenza costruttiva e distruttiva. Queste bande sono ottenute da uno schermo posto ad una certa distanza dalle fenditure: le onde delle due sorgenti corrispondenti alle due fenditure formano una interferenza costruttiva se le onde arrivano sullo schermo in fase (una onda corre più dell'altra) e altrimenti è distruttiva. In formule:

- Interferenza costruttiva: $\delta = d \sin(\theta_{\text{brigh}}) = m\lambda$
- Interferenza distruttiva $\delta = d \sin(\theta_{\text{dark}}) = (m + \frac{1}{2})\lambda$

Da cui possiamo calcolare la posizione delle frange:

- $y_k = L \tan \theta_k \quad k = \{\text{brigh}, \text{dark}\}$

Inoltre, assumendo che la distanza fra gli schermi è molto più grande della distanza tra le fenditure e quest'ultima è molto più grande della lunghezza d'onda si sostituisce la tangente con il seno (condizione di piccolo angolo) che è noto. Così facendo, si ottiene una formula che non dipende dall'angolo:

$$y_{\text{brigh}} = L \frac{m\lambda}{d} \quad y_{\text{dark}} = L \frac{(m + \frac{1}{2})\lambda}{d} \quad (13)$$

Ottenuta la posizione, ora vogliamo caratterizzare l'ampiezza dell'intensità luminosa corrispondente alla frangia rilevata sullo schermo. Dalle equazioni dell'onda:

$$E_1 = E_0 \sin \omega t \quad (14)$$

$$E_2 = E_0 \sin \omega t + \phi \quad (15)$$

Dal principio di sovrapposizione degli effetti si ottiene:

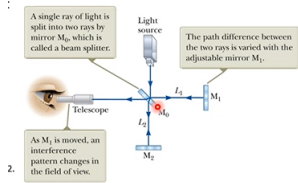
$$E_p = 2E_0 \cos \frac{\phi}{2} \sin \omega t + \frac{\phi}{2} \quad (16)$$

La differenza di fase tra le due onde nel punto P dello schermo è:

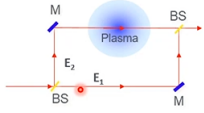
$$\delta = r_1 - r_2 = d \sin \theta \quad (17)$$

con r percorso generato tra le due fenditure. Si può scrivere l'intensità dell'onda sarà proporzionale al quadrato della risultante dell'intensità del campo elettrico. Graficamente:

- L'interferenza consiste in bande equispaziate di uguale intensità.
- Nei picchi interferenza costruttiva;
- Nelle valli interferenza distruttiva.



Interferometro di Mach-Zehnder



8.3 Diagnostiche

Vi sono due possibili configurazioni di diagnostiche utilizzano l'interferenza:

- Michelson;
- Mac-Zender;

8.3.1 Interferometro di Michelson

La sorgente di luce incide su un bisplitter che dividerà il fascio in due. Entrambi i fasci laser attraversando il bisplitter incidono su due specchi M1,M2 posti a distanza L1 e L2 e uno specchio si trova a 90 gradi della sorgente, l'altro parallelamente alla sorgente.

I due rami riflessi dagli specchi ritornano indietro sul bisplitter e vengono osservati. Ricomponendosi, si ottengono le immagini di interferenza in base alla distanza degli specchi del bisplitter. Il vantaggio di questo strumento è che non si necessita di calibrazione dato che la misura che viene acquisita è una misura relativa tra i bracci degli specchi: la sorgente è la stessa e viene divisa da un componente ottico (a patto che le ottiche non si siano guastate).

8.4 Interferometro nella fusione

L'interferometro utilizza dei fasci a frequenze molto lontane da quelle del plasma così da non perturbarlo ed avere delle misure ottimali sulla densità di plasma e insieme al polarimetro sulle componenti del campo magnetico.

I vantaggi di questa diagnostica sono i seguenti:

- Si segue l'evoluzione del plasma istante per istante sulla densità degli elettroni;
- Non si necessita di calibrazione per gli strumenti;
- Non si necessitano di informazioni aggiuntive da altre diagnostiche.

8.4.1 Mach-Zender

Si ha il fascio laser che viene diviso da un bisplitter: un ramo passa per il plasma e l'altro no. In seguito ripassano per un altro bisplitter per essere ricomposte ed analizzate. Questa configurazione è detta autocalibrante poiché si prende sempre il segnale di riferimento dal fascio che non passa per il plasma. Il parametro n di rifrazione del plasma può essere scritta come:

$$n^2 = \frac{n_e}{n_c} \quad (18)$$

La frequenza del plasma dipende da:

- Densità elettronica;
- Costante dielettrica nel vuoto;

Phase lag in the plasma arm

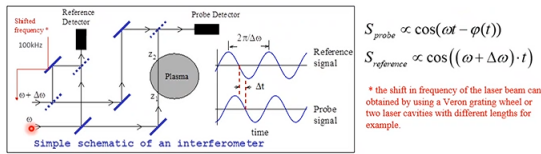
$$\varphi = \int k \cdot dl \int_1 n \cdot \frac{\omega}{c} dl$$

Signal at detector

$$V = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2E_1E_2 \text{Re} e^{i\Delta\varphi} = A_0 + A_1 \cos \Delta\varphi$$

where

$$\Delta\varphi = \int (k_{\text{plasma}} - k_0) dl = \int (n-1) \frac{\omega}{c} dl$$



Frequency controlled choppers	Diffraction wheels	Rotator stages with air bearing	Twin-cavity length modulation
Pros • Very cheap • Easy to implement	Pros • High modulation (300kHz) • Very stable	Pros • Medium modulation (30kHz) • Accurate modulation	Pros • Very high modulation (MHz region)
Cons • Low modulation frequency	Cons • Difficult to make • Break points for the alignment	Cons • Vibration and air-leak control needed	Cons • Difficult to maintain the system stability

- Carica elettronica;
- Massa dell'elettrone;

Per una frequenza fissata si definisce la densità di cut-off come la densità per cui la frequenza del fascio laser è uguale alla frequenza di plasma. Se la densità eccede il valore di cutoff, l'onda non è più propagata, ma decade esponenzialmente con la distanza. Ciò risulta che normalmente si trasmette una piccola potenza attraverso il plasma e l'interferometro cessa di funzionare.

8.4.2 Interferometro nel JET

8.5 Problemi dell'interferometro: salti di frangia

Le misure interferometriche possono perdere il segnale quando l'onda del fascio è un multiplo elevato del plasma e quindi si perdono le misurazioni della densità del plasma. Per ovviare a questo problema o si ferma la scarica o si continua lo sparo e poi si avvia la fase di ricostruzione del segnale. Tuttavia, il metodo più efficiente è quello di utilizzare il polarimetro per fittare i dati sull'interferometro.

9 Hardware

- Lunghezza d'onda: componente principale da cui dipende la scelta di tutte le altre componentistiche:
 - Onda lunga:
 - * Pro: Migliore risoluzione delle misure;
 - * Contro: rifrazione;
 - Onde corte:
 - * Pro: bassa rifrazione;
 - * Contro: Problemi di vibrazioni meccaniche e bassa risoluzione.
- ;
- Laser: il laser opera nel lontano infrarosso. Devono essere stabili poiché molti laser dipendono dalle condizioni ambientali nel quale operano. Per essere sicuri della stabilità dello strumento si isolano gli strumenti in condizioni ambientali ottimali con un controllo in feedback;
- Ottiche le componenti ottiche devono lavorare in ambienti ad alte temperature, radiazioni e neutroni. Quindi bisogna scegliere i materiali con cui sono relizzate le ottiche avendo particolare cura a scegliere dei materiali che non risentono dei campi magnetici;
- Modulatori;
- Rivelatori;
- Struttura meccanica;
- Controllo dell'atmosfera.

- The choice depends strongly on the modulation frequency and the power of the laser beams as well as on required accuracy of the measurements
- Pyro-detectors are adequate for low temporal resolution measurements
- At very high modulation frequency or very low beam power the use of cryogenic detectors becomes essential as they have very low NEP (system noise equivalent power) of $10^{-11} \text{W}\sqrt{\text{Hz}}$

• At RFX polarimeter the pyro-detectors are involved as there are only 6 channels (200mW FIR power) and 3kHz modulation via a chopper.

• At JET for example, the main FIR DCN with 200mW of laser power is divided in 16 optical branches and the power level of the FIR beams that reach the detectors are of the order of few μW .

10 Neutronica 1-2-3-4

10.1 Introduzione

• Struttura Nucleare:

- **Nucleone:** è il nome dato alla particella $\frac{A}{Z}X$
- **Nuclide:** è una particolare compinazione di protoni e neutroni che compongono un nucleo. Vengono usati per distinguere gli isotopi tra i nuclei.
- **Numero di nucleoni:** Il numero di nucleoni A coincide con il numero di massa ed è definito come la somma dei protoni e dei neutroni nel nucleo. Viene misurato in unità di massa atomica u .
- **Numero di protoni:** Z è il numero dei protoni nel nucleo;
- **Isotopi:** Un isotopo sono nuclei con lo stesso numero di protoni, ma differente numero di neutroni. Tramite A e Z si riconoscono i vari tipi di isotopi;
- **Numero di neutroni:** $N=A-Z$ è il numero di neutroni nel nucleo;

- **Isotopi:** Un isotopo è atomo con stesso numero di protoni, ma differente numero di neutroni. L'esistenza degli isotopi è una conseguenza dell'esistenza dei neutroni: non vi è un'altra spiegazione per spiegare la differenza di massa fra due isotopi dello stesso elemento. Dato che le masse differiscono, allora si hanno diverse proprietà fisiche.

Per l'idrogeno vi sono 3 tipi di isotopi: prozio (stabile), deuterio (stabile) e trizio (instabile, radioattivo). Quelli utilizzati nella fusione sono deuterio e trizio. Il trizio non è molto presente in natura poiché decade velocemente quindi in un Tokamak occorre produrlo artificialmente;

11 Tomografia

La tomografia è un esempio di un problema inverso: dall'integrale della linea di vista si vogliono ottenere delle informazioni locali. Un problema inverso è il problema di calcolare da un insieme di osservazioni i fattori causali che li hanno prodotti. Viene detto così, poiché inizia con l'effetto per poi calcolare la causa.

Di norma il problema potrebbe risultare mal posto poiché non sempre esiste una funzione inversa che mi permetta di risalire alla sorgente (il plasma) che mi ha portato a quella determinata soluzione. Inoltre, in molti casi la soluzione non è neanche unica.

Nella tomografia per il plasma è un tipo di tomografia ad emissione, in cui si calcola:

$$g_s = \int f ds$$

per ogni linea di vista. IN cui f è l'emissione, g è la proiezione della linea di vista.

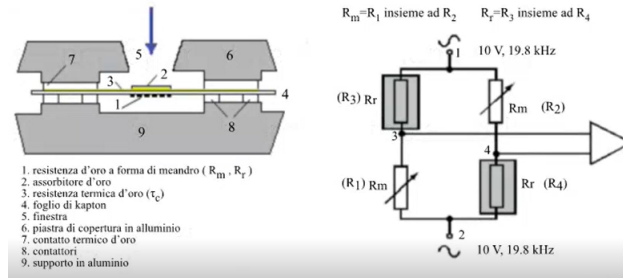
Per risolvere il problema si discretizza. In particolare si divide la cross section in pixel trasformando il problema integrale in uno matriciale:

$$g = Hf$$

con H è la matrice delle proiezioni, f è l'immagine da ricostruire e g le misure della linea di vista. Noi vogliamo conoscere f , ma la matrice H non è invertibile. Per risolvere questa problematica si imposta un problema di minimizzazione con un funzionale di costo che minimizza l'errore tra l'integrale di linea ricostruito e quello empirico: nella matrice di pixel si aumenta l'emissività, si calcola g e si effettua il confronto con le misure effettive. A convergenza le due misure coincidono.

$$\min \frac{\chi^2}{2} + \alpha R$$

L'obiettivo del funzionale di costo è quello di avere un errore minimo e che la soluzione ottenuta sia regolarizzata cioè deve mantenere un certo livello di smoothness per avere una soluzione reale rispetto al processo che si sta studiando.



Un altro metodo per effettuare la ricostruzione è effettuato tramite il Machine Learning ed in particolare con il metodo della **Maximum Likelihood**: si mette un vincolo sulla funzione di distribuzione delle misure. In particolare si osserva che i neutroni e gamma seguono la distribuzione di Poisson (eliminando di conseguenza l'utilizzo del fattore di normalizzazione). Infine, si ha che se la ricostruzione delle proiezioni passanti attraverso un certo pixel sono minori delle misurazioni sperimentali, allora l'emissività di quel pixel viene aumentata e viceversa.

A livello implementativo il problema viene risolto iterativamente.

- Il Maximum Likelihood fornisce un algoritmo molto stabile;
- L'inversione tramite ML fornisce un metodo gestibile computazionalmente per calcolare gli intervalli di confidenza della ricostruzione;
- L'approccio ML con phantom permette di ottimizzare i parametri di ricostruzioni per varie categorie di emissività;
- Il tempo di calcolo è compatibile con il tempo che intercorre tra uno sparo e l'altro.

12 Bolometria

La Bolometria è una diagnostica passiva che misura la potenza totale persa irradiata dal plasma. Questa misura è importante per capire il bilancio di potenza del plasma e il suo confinamento.

Tra tutto lo spettro si sceglie di misurare le particelle alpha che costituiscono un indicatore delle purezza del plasma. Inoltre, la distribuzione di radiazione emessa e la sua evoluzione nel tempo forniscono, quindi, una informazione della purezza del plasma.

Nei Tokamak, con la loro parete in berillio e il divertore in tungsteno, sono soggetti ad un'altra emissione di radiazioni che portano alla distruzioni.

In particolare, per misurare la potenza irradiata si utilizza una resistenza che cambia con la sua temperatura sotto irradiazione. Per realizzare questi componenti si richiede

- Un sensitività molto elevate (grandezza spettrale);
- Per estendere il livello della sensitività si ricopre il bolometro con la grafite o oro.

La relazione che lega la temperature con la potenza assorbita è data da:

$$P = C \left(\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau_c} \right)$$

Questo strumento è molto afflitto da rumore poiché misurando l'integrale della Temperatura si amplificano i rumori portando ad una misura potenzialmente totalmente errata.

12.1 Bolometri a filmetallico

Un bolometro a film metallico si presenta con una array di teste composte da dei bolometri. Ogni testa, a livello elettronico è rappresentato da un ponte di Winston.

Inizialmente, si bilancia il ponte di Winston prima dello sparo; poi quando si forma il plasma si irradiano due resistenze su rami opposti. Questo processo porta ad uno sbilanciamento del ponte che coincide con la misura effettuata. La costante di calibrazione per bilanciare il ponte viene scelta in maniera empirica.

Per ridurre i rumori, si modulano le tensioni ai capi del ponte. Quindi i segnali all'uscita del ponte è una sinusoide con l'ampiezza dettata dalla misura. Quindi: si sposta la frequenza del segnale tramite i modulatori in una posizione molto lontana dal rumore così da minimizzare l'effetto derivativo dei rumori. Attorno alla frequenza scelta si implementa un filtro passa banda per escludere le frequenze indesiderate.

Nel Tokamak, i bolometri sono provvisti di piccole fenditure per ogni rivelatore del bolometro per determinare un cono singolo di vista su cui andare poi a derivare e calcolare la perdita di potenza. Questo metodo viene detto tecnica che *pin holes*. La dimensione del cono di vista dipende da:

- Dimensione del pin holes;
- Dimensione del rivelatore;
- Distanza relativa tra il rivelatore e il plasma.

12.1.1 Problematiche

- Rumore magnetico e derivativo;
- Il filo metallico a contatto con la radiazione può subire una trasmutazione che porta alla perdita di segnale;
- La calibrazione deve essere effettuata nel momento dello sparo;
- Sono sensibili ai neutroni;
- Sono sensibili al gas dell'ambiente che lo circonda.

13 Bolometri basati su diamanti

Un singolo cristallo di diamante basato sui diodi forniscono una diagnostica affidabile nei reattori a fusione. La durabilità e la resistenza alle radiazioni di questa tecnologia sono ben sperimentati e supportati. Infatti, il loro vantaggio è che sono molto più definiti, non si hanno problemi di derivazione poiché non si basano misure integrali.

14 Spettroscopia

La spettroscopia è una diagnostica che si basa sullo studio degli spettri delle sostanze. Nel plasma la spettroscopia viene utilizzata per gli spettri delle impurezze.

Può fornire informazioni su:

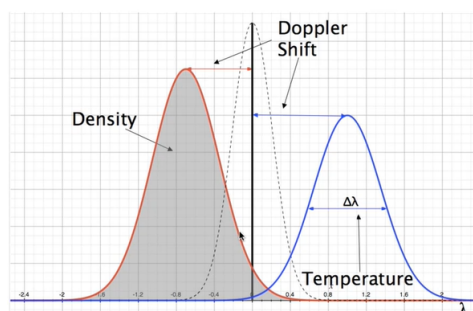
- L'ammontare delle impurezze presenti nel plasma;
- Velocità del plasma;
- Temperatura e densità del plasma;

Il range di emissione delle particelle parzialmente ionizzate va dal visibile ai raggi x "hard". L'emissione delle particelle dipende dalle impurezze presenti e dalla temperatura e densità del plasma: a bassa temperatura si ha nel visibile in seguito, all'aumentare della temperatura, si va ai raggi x.

14.1 Informazioni dalla linea spettrale

Con la spettroscopia, guardando la linea di emissione possiamo ottenere:

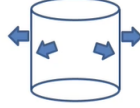
- Densità delle impurezze (Area sottesa dalla linea);
- Temperatura (larghezza della linea);
- Velocità media lungo la linea di vista (Shift dovuto all'effetto doppler. In particolare i picchi risultano spostati dalla linea spettrale normale);



$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_i) = n_o n_e S_o - n_i n_e \alpha$$

Neglecting recombination, and integrating over the plasma radius:

$$a \Gamma_i = \int_0^a n_o n_e S_o r dr$$



14.2 Misure spettrali

Dato che il range di emissione è grande si usano diversi strumenti di misura:

- Spettrometri a grate nel range del visibile;
- Filtri interferenziali;
- Spettrometri UV;
- Spettrometri dei raggi Soft X;

14.3 Line Monitoring

Dato che per ogni sostanza si conosce la linea spettrale e vogliamo avere un'idea della forma della zona che emette quella riga, si utilizzano di filtri interferenziali (lamine opportune) che fanno passare una porzione limitata di spettro per osservare una sola riga. Si utilizza una fibra ottica per vedere la riga nel tempo e con un rivelatori è possibile monitorare la regione di spazio in cui avviene l'emissione.

14.4 Bilancio delle particelle da D_α

Dalla misura dell' H_α è possibile ottenere delle informazioni sul fglusso delle particelli entranti nel pasla e le particelle del tempo di confinamento:

$$I_\alpha = \int_{-a}^a n_o n_e X B dr$$

$$\Gamma_i = \frac{1}{2} \frac{S_0}{XB} I_\alpha$$

14.5 Spettrometro UV

Lo spettrometro UV tramite un tubo da vuoto che guarda direttamente il plasma. Questo strumento è composto da:

- Flange per separare i componenti;
- Pinhole per regolare l'angolo di incidenza;
- Grating per convertire l'UV nel visibile;
- SD Camera per analizzare la conversione;

Dato che guarda direttamente il plasma questo strumento è fondamentale per vedere le impurezze all'interno della scarica da vuoto. In genere le impurezze sono leggere (impediscono l'entrata di impurezze pesanti dal bordo, ma abbassano la temperatura del bordo fino a spegnere o a non far partire la scarica) e impurezze pesanti.

14.6 Spettrometro Raggi X

Questo tipo di spettroscopia hanno una alta risoluzione. Nei raggi X non esistono grating, ma si utilizza la diffrazione di Bragg in cui i raggi X urtano dei cristalli vicini alla lunghezza d'onda del raggio. Dato che vogliamo avere una focalizzazione, si curvano le lamine di cristallo di un certo raggio (configurazione di Rowland). IN particolare il raggio X incide il cristallo che viene riflesso ad un certo angolo su cui è montato un rilevatore che analizza le lunghezze d'onda rifratte ad angoli diversi.

14.7 Bremsstrahlung

La Bremsstrahlung non è una emissione di riga, ma studia le emissione spettroscopiche nel visibile. Ha una forte dipendenza dalla temperatura nei raggi X e nel visibile l'emissione è indipendente dalla temeratura e dalla densità:

$$I_{BS} = Z_{ef} n_e^2 T_e^{-\frac{1}{2}}$$

In cui Z è la carica media delle impurezze presenti nel plasma. Nel caso di alta energia si moltiplica l'espressione precedente per un esponenziale dipendente dalla temperatura.

14.8 CSX

Gli atomi neutri nel plasma donano elettroni per ionizzare completamente gli ioni delle impurezze producendo ioni simili all'idrogeno. Quando gli elettroni decadono dagli stati eccitati emettono fotoni che possono essere misurati dalla spettroscopia da cui si ottengono misurazioni della temperatura, rotazione e densità delle impurezze. La misura CXS è ottenibile solo con un beam attivo ed ha le seguenti capacità:

- Le impurezze dominanti, gli stati completamente ionizzati caratterizzati da basso Z possono essere studiati tramite la rivelazione delle radiazioni in cascata;
- La risoluzione spaziale può essere ottenuta senza la necessità di invertire le linee di vista vedendo perpendicolarmente al beam.

Nel tokamak si hanno 50 linee di vista che incidono il beam e altre 50 rivolte nella posizione opposta. Per ogni linea di vista si posiziona uno spettrometro dal quale si calcolano le misure necessarie. Per le linee di vista poste fuori dal beam, sono necessarie per la sottrazione del contributo che viene dal bordo del toro.

15 Disruzioni

Le disruzioni nei Tokamak sono inevitabili. Esse sono una perdita globale di confinamento e controllo del plasma dovuto da impurezze e radiazioni.

Si compongono di due fasi:

- Thermal quence: perdita di tutta l'energia cinetica e termica;
- Current quence: decadimento di corrente

In particolare, si ha una fase lontana dalla disruzione non si ha un indizio della disruzione. Dopo di che, si ha un segnale di precurso nelle bobine magnetiche che indica l'inizio di una anomalia. Passata questa fase, si hanno delle anomalie sul profilo di temperatura e corrente così da innescare il thermal quence e quindi l'inizio di una disruzione, perdendo di conseguenza il controllo.

Il problema principale di questo fenomeno è che avvenuta la disruzione si danneggiano i dispositivi e si introducono impurezze nel vessel che diminuiscono il tempo operativo del Tokamak. I danni principali sono:

- Carichi termici;
- Estinzione della corrente rapida porta a carichi magnetici molto elevati dovuto alle correnti indotte (Eddy current);
- Elettroni di runaway nella fase di current quence: in questa fase il plasma perde la densità, così vengono accelerati notevolmente divenendo un fascio di elettroni incontrollato in assenza di collisioni per limitarne la velocità.

15.1 Classificazione diagnostica disruzione

L'obiettivo delle diagnostiche per le disruzioni è quello di predizioni, spiegazione e controllo. Si dividono in:

- monitoraggio delle conseguenze;
- misura della disruzione;
- investigazione della fisica della disruzione;
- predizione delle disruzione

Queste diagnostiche fanno parte del sistema di controllo e quindi è necessario che l'hardware siano affidabili, disponibili, forniscano una risoluzione spaziale e temporale per prevenire il fenomeno e devono coprire tutti i punti della camera da vuoto. Inoltre, al livello di processamento deve essere in real-time ed avere capacità predittive. Una scarica distruttiva presenta la seguente nomenclatura:

- Avoidance: la fase lontana di disruzione;
- Prevenzione: azione correttiva per evitare l'instabilità;
- Mitigazione: nel caso in cui la prevenzione non è abbastanza d'avviene la disruzione si riducono i carichi abbassando lentamente la corrente e l'energia termica. In questa fase possono avvenire i run-away. Si immettono pellet di gas per ridurre il carico termico o degli shattered pellet.

15.2 Requisiti Hardware

15.2.1 Carichi termici

Il problema principale sono i carichi termici che dipendono dalla potenza deposita, dalla superficie e dal tempo. Le misure che si utilizzano sono:

- Camere termiche;
- Spettrometria;
- Bolometria

La problematica di queste misure è che il carico termico non sono toroidalmente simmetrici.

15.2.2 Carichi Meccanici

Le misure che si utilizza sono:

- bobine in posizioni differenti per eseguire una ricostruzione dell'equilibrio;
- Misure delle correnti toroidali del vessel (Halo currents);
- Accelerometria per misurare gli spostamenti della camera da vuoto

15.3 Locked mode detection AUG

Siamo nella fase di mitigazioni per cui dobbiamo predire con un margine di predizioni basso, ma molto accurato. In questa fase, vi sono delle instabilità MHD macroscopiche con misure magnetiche grande. La crescita delle instabilità vengono misurate con la componente radiale del campo magnetico tramite le Saddle Coils. In un tokamak ve ne sono 4 e tramite la differenza di queste bobine opposte e tramite un indicatore si misura l'effetto di rallentamento delle instabilità. Esse crescono nella fase preliminare della disruzioni, poi rallentano fino a zero e poi disrompe. Viene detto bloccato poiché il campo magnetico da loro generato si blocca con gli errori del Tokamak divenendo stazionari nel sistema di riferimento del laboratorio.

Analizzando lo spettro a bassa frequenza si nota che le instabilità MHD non sono le uniche fautrici delle disruzioni, ma anche dovute dai cosiddetti ELMS.

15.4 Imaging for disruptions

Si utilizzano delle telecamere nel visibile per avere una idea di quello che accade nella camera da vuoto. Risulta quindi molto importante cercare di ricoprire il maggior spazio della camera da vuoto e del vessel. Tramite queste telecamere è possibile rivelare i MARFE.

I MARFE sono instabilità termiche che si manifestano come un anello di radiazioni visibili per effetto delle impurezze. In queste zone la temperatura risulta più bassa rispetto al plasma.

15.5 Indicatori di Profilo

Per la predizione delle disruzione e il controllo in feedback sono necessari gli indicatori di profilo.

Gli indicatori di profilo per la predizione devono essere robusti e calcolabili in real time, ma allo stesso tempo devono fornire un quantitativo sufficiente di informazioni. Uno degli indicatori sul profilo di temperatura è la hollowness cioè quanto il profilo di temperatura è cavo. Questa è una misura particolarmente difficile da quantificare dato che in molti casi si deve effettuare il mirroring dei dati sull'asse magnetico per un problema di coverage e che è resiliente sulle fluttuazioni della temperatura.

Per questa misura si utilizza un fitting basato su due Gaussiane quando il profilo è cavo: differenze tra i due massimi e normalizzata per la deviazione standard delle gaussiane. Con questo approccio, più due massimi sono distanti più il profilo sarà cavo.

15.6 Problema inverso nella fusione

Per quanto riguarda le misure effettuate dall'esterno del plasma, esse vengono utilizzate nella risoluzione di un problema inverso per ottenere delle informazioni dell'interno. Il principale strumento che viene utilizzato è la tomografia. Da aggiungere disruzioni 2