Lo **spessore ottico** è un concetto fondamentale nella fisica dei plasmi (e più in generale in fisica) perché descrive il grado in cui un materiale (o un plasma, in questo caso) assorbe, riflette o trasmette la radiazione elettromagnetica. Si collega direttamente alla capacità del plasma di interagire con la luce o altre onde elettromagnetiche.

**Definizione di Spessore Ottico**

Lo spessore ottico τ\tauτ è definito come:

τ=∫0Lκ(s) ds\tau = \int\_0^L \kappa(s) \, dsτ=∫0L​κ(s)ds

dove:

* κ(s)\kappa(s)κ(s) è il coefficiente di assorbimento o di attenuazione del mezzo al punto sss,
* LLL è la lunghezza del cammino ottico attraversato dalla radiazione.

In parole semplici, misura la "quantità di ostacolo" che la radiazione incontra lungo il suo cammino attraverso il mezzo.

**Regimi Ottici**

A seconda del valore di τ\tauτ, il mezzo (nel nostro caso il plasma) può essere:

1. **Otticamente sottile** (τ≪1\tau \ll 1τ≪1):
   * La radiazione attraversa il plasma senza essere significativamente attenuata.
   * Le emissioni del plasma possono "uscire" facilmente, rendendo visibili le linee spettrali.
2. **Otticamente spesso** (τ≫1\tau \gg 1τ≫1):
   * La radiazione è fortemente assorbita e riemessa dal plasma.
   * Questo può rendere difficile osservare direttamente l'interno del plasma.

**Nel Plasma Confinato Magneticamente**

Nei plasmi confinati magneticamente (come nei tokamak):

* Lo spessore ottico gioca un ruolo nella diagnosi del plasma. Tecniche come la spettroscopia o la misura della radiazione di bremsstrahlung sono influenzate dal regime ottico.
* Le proprietà di assorbimento dipendono dalla densità del plasma, dalla temperatura e dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente.
* Fenomeni come la **radiazione di sincrotrone** e la **radiazione di ciclotrone** (associati al movimento degli elettroni in campi magnetici) sono fortemente legati allo spessore ottico.

**Applicazioni**

1. **Diagnosi del plasma**: Lo spessore ottico determina quali informazioni si possono ottenere dall'osservazione della radiazione emessa.
2. **Confinamento e perdite energetiche**: La trasparenza o l'opacità del plasma influenzano la quantità di energia persa sotto forma di radiazione.
3. **Progettazione di reattori a fusione**: Conoscere il comportamento dello spessore ottico aiuta a ottimizzare il confinamento magnetico e minimizzare le perdite.

Hai bisogno di approfondire qualche aspetto, ad esempio come lo spessore ottico interagisce con la densità del plasma o con specifiche tecniche diagnostiche? 😊

+++++ per plasmi otiamente spessi, cosa vuol dire che la radiazione viene assrobita e riemeessa?

Per plasmi **otticamente spessi**, il fatto che la radiazione venga **assorbita e riemessa** significa che i fotoni prodotti o che attraversano il plasma interagiscono molte volte con le particelle del plasma stesso, e non possono propagarsi liberamente.

**Processo di Assorbimento e Ri-emissione**

1. **Assorbimento**:
   * Un fotone incidente viene assorbito da una particella del plasma, ad esempio un elettrone o uno ione. Questo avviene attraverso vari processi, come:
     + **Eccitazione atomica**: il fotone fornisce energia a un elettrone legato, che passa a un livello di energia superiore.
     + **Interazione libera-libera** (Bremsstrahlung inverso): un elettrone libero perde energia per assorbire il fotone.
2. **Ri-emissione**:
   * Dopo aver assorbito l'energia del fotone, la particella può "rilasciare" questa energia emettendo un nuovo fotone. La riemissione può avvenire in modi diversi:
     + **Eccitazione e de-eccitazione**: l'elettrone precedentemente eccitato torna a un livello energetico inferiore, emettendo un fotone.
     + **Scattering di Thomson** o **Compton**: un elettrone libero ri-emette un fotone dopo un'interazione elastica o anelastica.
   * Il fotone riemesso può avere una direzione casuale, e in certi casi, una frequenza diversa rispetto al fotone assorbito (per via di effetti Doppler o di collisioni).

**Conseguenze nel Plasma Otticamente Spesso**

* **Opacità del plasma**: I fotoni non riescono a "uscire" facilmente dal plasma perché subiscono continue interazioni. Questo è analogo a quello che succede in una stella come il Sole, dove la radiazione rimbalza molte volte prima di emergere in superficie.
* **Distribuzione dell'energia**:
  + L'energia radiativa viene "termalizzata", cioè redistribuita tra le particelle del plasma e i fotoni. Questo porta spesso a un'emissione che segue una distribuzione del corpo nero (se il plasma è in equilibrio termodinamico locale, LTE).
* **Emissione diffusa**:
  + Anche se il plasma è una sorgente luminosa, l'emissione che osserviamo è "spalmata" su una regione più ampia rispetto a un plasma otticamente sottile.

**Implicazioni Pratiche**

1. **Energia persa per radiazione**: Nei reattori a fusione, come i tokamak, è fondamentale limitare le perdite radiative, specialmente quelle prodotte dagli ioni pesanti presenti come impurità.
2. **Diagnosi difficoltosa**: Nei plasmi otticamente spessi, diventa complicato osservare direttamente il nucleo del plasma, poiché la radiazione che osserviamo proviene prevalentemente dagli strati più esterni (dove τ∼1\tau \sim 1τ∼1).
3. **Efficienza del confinamento**: Se il plasma emette troppa energia sotto forma di radiazione, il bilancio energetico per raggiungere e mantenere la fusione potrebbe essere compromesso.

+++++++++. cosa emette in un plasma otticamente fino?

In un plasma **otticamente sottile** (τ≪1\tau \ll 1τ≪1), la radiazione prodotta nel plasma può propagarsi liberamente verso l'esterno senza subire molte interazioni (come assorbimento e riemissione). In questo caso, l'emissione osservata riflette direttamente i processi fisici che avvengono all'interno del plasma stesso.

**Tipi di Radiazione Emessa in un Plasma Otticamente Sottile**

1. **Radiazione di Bremsstrahlung (o libera-libera)**:
   * Causata dalla decelerazione degli elettroni liberi quando passano vicino a nuclei o ioni carichi positivamente.
   * È una radiazione continua, che copre un ampio spettro di frequenze.
   * Dominante nei plasmi ad alta temperatura, come quelli confinati magneticamente nei reattori a fusione.
2. **Radiazione di Ricombinazione (o libera-legata)**:
   * Quando un elettrone libero si ricombina con uno ione, emette un fotone per bilanciare l'energia persa.
   * Questa radiazione contribuisce a linee discrete nello spettro, dipendenti dai livelli energetici dell'atomo o dello ione coinvolto.
3. **Emissione di Linea (o legata-legata)**:
   * Avviene quando gli elettroni legati agli atomi o ioni nel plasma si eccitano e poi decadono a livelli di energia inferiori.
   * L'emissione di linea produce spettri caratteristici, unici per ogni elemento presente nel plasma, ed è fondamentale per la diagnosi spettrale.
4. **Radiazione di Ciclotrone o di Sincrotrone**:
   * Causata dagli elettroni che spiraleggiano attorno alle linee del campo magnetico.
   * **Radiazione di Ciclotrone**: Dominante a basse energie, con picchi discreti nelle frequenze associate alla frequenza di ciclotrone.
   * **Radiazione di Sincrotrone**: Dominante ad alte energie, con uno spettro continuo che si estende su un'ampia gamma di frequenze.

**Caratteristiche del Plasma Otticamente Sottile**

1. **Emissione che "esce" liberamente**:
   * La radiazione emessa fornisce informazioni dirette sulla temperatura, densità e composizione del plasma.
   * La quantità di radiazione osservata è proporzionale alla produzione interna, poiché non viene significativamente riassorbita o modificata nel percorso.
2. **Distribuzione dell’energia radiativa**:
   * L'emissione dipende dalla temperatura del plasma e dalla densità delle particelle. Per esempio:
     + **Bremsstrahlung** è proporzionale a densitaˋ degli elettroni2\text{densità degli elettroni}^2densitaˋ degli elettroni2.
     + **Linee di emissione** dipendono dalla popolazione degli stati energetici.
3. **Trasparenza del plasma**:
   * Permette una visione diretta delle regioni centrali o più profonde, rendendo possibile una diagnosi accurata.

**Esempio: Plasmi nei Tokamak o Stellarator**

* Nei plasmi confinati magneticamente, se il plasma è otticamente sottile per alcune lunghezze d'onda, possiamo osservare direttamente fenomeni come:
  + Radiazione di sincrotrone per gli elettroni spiraleggianti.
  + Linee spettrali di impurità per identificare composizione e dinamiche.

++++++++++. la diagnostica ECE richiede che il plasma sia otticamente spesso?

Sì, la **diagnostica ECE (Electron Cyclotron Emission)** richiede che il plasma sia **otticamente spesso** (τ≫1\tau \gg 1τ≫1) per essere efficace. Questo è fondamentale per garantire che la radiazione di ciclotrone osservata rappresenti accuratamente le condizioni locali del plasma, come la temperatura elettronica.

**Perché lo spessore ottico è importante per la ECE?**

1. **Emissione Termica Locale**:
   * In un plasma otticamente spesso, la radiazione di ciclotrone emessa in una determinata regione del plasma è quasi interamente riassorbita localmente prima di poter interagire con altre regioni.
   * Di conseguenza, la radiazione che "esce" dal plasma è dominata dalla ri-emissione termica, che segue la legge del corpo nero, con una intensità proporzionale alla **temperatura elettronica locale**.
2. **Trasparenza Limitata**:
   * In un plasma otticamente sottile (τ≪1\tau \ll 1τ≪1), la radiazione di ciclotrone non viene assorbita sufficientemente e può propagarsi attraverso il plasma senza rappresentare accuratamente la temperatura locale.
   * In tal caso, l'intensità osservata dipenderebbe dalla lunghezza del cammino ottico e non solo dalla temperatura elettronica.
3. **Misura Diretta della Temperatura**:
   * In un plasma otticamente spesso, l'intensità della radiazione ECE a una data frequenza può essere direttamente correlata alla temperatura elettronica del plasma nel punto di emissione, poiché: Iν∝TeI\_{\nu} \propto T\_eIν​∝Te​ dove IνI\_{\nu}Iν​ è l'intensità della radiazione a una data frequenza ν\nuν, e TeT\_eTe​ è la temperatura degli elettroni nella regione emittente.

**Diagnosi ECE nei Tokamak e Stellarator**

* La radiazione di ciclotrone emessa dagli elettroni in movimento attorno alle linee del campo magnetico dipende dalla **frequenza di ciclotrone** νc\nu\_cνc​, che è proporzionale alla forza del campo magnetico locale (BBB): νc=eB2πme\nu\_c = \frac{eB}{2\pi m\_e}νc​=2πme​eB​
  + Questo significa che diverse frequenze della radiazione ECE corrispondono a diverse posizioni radiali nel plasma (a causa della variazione radiale di BBB).
  + La diagnostica ECE sfrutta questo fenomeno per ottenere un **profilo radiale della temperatura elettronica**.

**Condizioni Necessarie per la Diagnostica ECE**

1. **Plasma Otticamente Spesso**:
   * Garantisce che la radiazione osservata sia termalizzata e proporzionale alla temperatura elettronica locale.
2. **Frequenze Trasparenti al Plasma**:
   * Anche se il plasma è otticamente spesso, deve essere trasparente a certe frequenze (cioè, la radiazione non deve essere totalmente assorbita lungo il cammino verso il rilevatore).
3. **Minime Impurità**:
   * Impurità o effetti di scattering possono complicare l'interpretazione del segnale.

**Limitazioni**

* Se il plasma non è otticamente spesso, il segnale ECE può essere più difficile da interpretare perché l'intensità osservata non è direttamente correlata alla temperatura elettronica locale.
* In plasmi con impurità significative o instabilità magnetiche, l'emissione potrebbe essere influenzata da processi non termici.

+++++++++++++++++++++++++

una domanda: in quali condizioni la temperatura di radiazione misurata dall'ECE in un tokamak, corrisponde alla temperatura elettronica?

###### ChatGPT ha detto:

Ottima domanda! La temperatura di radiazione misurata dalla **Electron Cyclotron Emission (ECE)** in un **tokamak** corrisponde alla **temperatura elettronica TeT\_eTe​** in condizioni di **emissione otticamente spessa**.

### ****Condizione principale:**** τν≫1\tau\_\nu \gg 1τν​≫1 ****(Otticamente spesso)****

L'ECE misura la **temperatura di brillanza** TbT\_bTb​, che può essere collegata alla temperatura elettronica TeT\_eTe​ attraverso l'espressione:

Tb=Te(1−e−τν)T\_b = T\_e (1 - e^{-\tau\_\nu})Tb​=Te​(1−e−τν​)

Dove τν\tau\_\nuτν​ è lo **spessore ottico**.

* Se τν≫1\tau\_\nu \gg 1τν​≫1, il plasma è **otticamente spesso** → Tb≈TeT\_b \approx T\_eTb​≈Te​ (**validità della misura ECE**).
* Se τν≪1\tau\_\nu \ll 1τν​≪1, il plasma è **otticamente sottile** → Tb≪TeT\_b \ll T\_eTb​≪Te​ (**ECE non affidabile per stimare TeT\_eTe​**).

### ****Quando**** τν≫1\tau\_\nu \gg 1τν​≫1****?****

Dipende da **tre fattori principali**:

1. **Densità elettronica nen\_ene​**: τν∝ne\tau\_\nu \propto n\_eτν​∝ne​, quindi plasmi più densi tendono ad essere otticamente spessi.
2. **Campo magnetico BBB**: τν∝1/B\tau\_\nu \propto 1/Bτν​∝1/B, quindi plasmi con B elevato possono avere assorbimenti minori.
3. **Frequenza di osservazione ν\nuν**: In generale, a frequenze vicine alle armoniche ciclotroniche (1ª, 2ª armonica) l'assorbimento è più forte.

💡 **Tipicamente nei tokamak moderni**, l'emissione della **2ª armonica ordinaria (O-mode)** è otticamente spessa in un ampio intervallo di condizioni operative, permettendo la misura diretta di TeT\_eTe​.

### ****Quando l'ECE non è affidabile per**** TeT\_eTe​****?****

* **Regioni di bordo (Scrape-Off Layer, SOL)**: bassa densità → otticamente sottile → Tb<TeT\_b < T\_eTb​<Te​.
* **Armoniche alte (3ª, 4ª, ...)**: possono essere otticamente sottili.
* **Plasmi con densità molto basse**: il coefficiente di assorbimento κν\kappa\_\nuκν​ diminuisce e l'emissione diventa trasparente.

### ****Conclusione****

Se il plasma è **otticamente spesso** alla frequenza di emissione (tipicamente la **2ª armonica in O-mode**), allora la temperatura misurata dall’ECE TbT\_bTb​ corrisponde alla temperatura elettronica TeT\_eTe​.  
Altrimenti, se l'emissione è **otticamente sottile**, TbT\_bTb​ sottostima TeT\_eTe​ e il dato va interpretato con cautela.

**Regola pratica per τν\tau\_\nuτν​**

* **τν>3\tau\_\nu > 3τν​>3** → il plasma è **quasi otticamente spesso**, TbT\_bTb​ è vicino a TeT\_eTe​ (errore inferiore al 5-10%).
* **τν>5\tau\_\nu > 5τν​>5** → il plasma è **sufficientemente otticamente spesso**, Tb≈TeT\_b \approx T\_eTb​≈Te​ con errore trascurabile.
* **τν>10\tau\_\nu > 10τν​>10** → il plasma è **completamente otticamente spesso**, TbT\_bTb​ è praticamente uguale a TeT\_eTe​.
* **τν<1\tau\_\nu < 1τν​<1** → il plasma è **otticamente sottile**, Tb≪TeT\_b \ll T\_eTb​≪Te​ (misura inaffidabile per stimare TeT\_eTe​).

**Motivazione fisica**

L'intensità della radiazione emessa da un corpo (o un plasma) è descritta dalla legge di **Beer-Lambert**:

I(ν)=I0e−τν+Bν(Te)(1−e−τν)I(\nu) = I\_0 e^{-\tau\_\nu} + B\_\nu(T\_e)(1 - e^{-\tau\_\nu})I(ν)=I0​e−τν​+Bν​(Te​)(1−e−τν​)

Dove Bν(Te)B\_\nu(T\_e)Bν​(Te​) è la radianza di corpo nero alla temperatura elettronica TeT\_eTe​.  
Se τν≫1\tau\_\nu \gg 1τν​≫1, il termine e−τνe^{-\tau\_\nu}e−τν​ diventa trascurabile, e quindi I(ν)≈Bν(Te)I(\nu) \approx B\_\nu(T\_e)I(ν)≈Bν​(Te​), il che significa che la radiazione emessa rappresenta fedelmente la temperatura elettronica.

📌 **Esempio numerico:**

* Per τν=3\tau\_\nu = 3τν​=3, abbiamo 1−e−3≈0.951 - e^{-3} \approx 0.951−e−3≈0.95 → il 95% della radiazione è emessa, quindi Tb≈0.95TeT\_b \approx 0.95 T\_eTb​≈0.95Te​.
* Per τν=5\tau\_\nu = 5τν​=5, 1−e−5≈0.9931 - e^{-5} \approx 0.9931−e−5≈0.993 → il 99.3% della radiazione è emessa, Tb≈TeT\_b \approx T\_eTb​≈Te​.
* Per τν=10\tau\_\nu = 10τν​=10, 1−e−10≈0.999951 - e^{-10} \approx 0.999951−e−10≈0.99995 → la misura è praticamente indistinguibile da TeT\_eTe​.

💡 **Conclusione**: nella pratica, **τν≳3−5\tau\_\nu \gtrsim 3-5τν​≳3−5** è sufficiente per considerare il plasma otticamente spesso e fidarsi della misura ECE. Se τν\tau\_\nuτν​ è molto più piccolo, bisogna considerare correzioni.

CONDìSIDERAZIONI:

Dal modello di assorbimento ciclotronico, si trova che il coefficiente di assorbimento cresce con l'armonica nnn, ovvero:

κνn+1>κνn\kappa\_{\nu\_{n+1}} > \kappa\_{\nu\_n}κνn+1​​>κνn​​

Questo significa che se il plasma è otticamente spesso alla seconda armonica ( τν2≫1\tau\_{\nu\_2} \gg 1τν2​​≫1 ), allora lo sarà ancora di più alla terza:

τν3>τν2\tau\_{\nu\_3} > \tau\_{\nu\_2}τν3​​>τν2​​

MA

Eccezioni

Ci sono alcune condizioni particolari in cui questa relazione potrebbe non essere rispettata perfettamente:

* Densità elettronica bassa → Se nen\_ene​ è molto basso, anche le armoniche più alte potrebbero rimanere otticamente sottili.
* Frequenze lontane dalla risonanza → Se la misura è effettuata lontano dalla risonanza ciclotronica, l’assorbimento può diminuire.
* Effetti relativistici → A temperature molto alte, gli effetti relativistici possono modificare il profilo di assorbimento e rendere il comportamento meno prevedibile.

Conclusione

Nella maggior parte dei casi, se il plasma è otticamente spesso alla seconda armonica, lo sarà ancora di più alla terza, perché l'assorbimento ciclotronico cresce con il numero dell’armonica.

Gli effetti relativistici **modificano il profilo dell'assorbimento ECE**, alterando sia la **frequenza di risonanza** che la **larghezza dell'emissione**. Questo ha importanti conseguenze sulla diagnostica della temperatura elettronica nei tokamak.

## **1. Spostamento della Frequenza di Risonanza (Redshift Relativistico)**

Nel caso classico, la frequenza ciclotronica è data da:

νc=eB2πme\nu\_c = \frac{e B}{2\pi m\_e}νc​=2πme​eB​

Tuttavia, per elettroni relativistici, la massa efficace aumenta secondo il fattore di Lorentz:

me′=γme,conγ=11−v2/c2m\_e' = \gamma m\_e, \quad \text{con} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}me′​=γme​,conγ=1−v2/c2

## **2. Allargamento Spettrale**

Gli elettroni in un tokamak hanno una distribuzione di velocità (tipicamente di Maxwell o una coda non termica), quindi **ogni elettrone ha una diversa γ\gammaγ e dunque una diversa νc′\nu\_c'νc′​**. Questo fa sì che l'emissione si allarghi attorno alla frequenza ciclotronica.

🔹 **Effetto principale:** L'**allargamento relativistico** del picco di emissione.

📌 **Conseguenza pratica:** Le armoniche successive si sovrappongono, rendendo più difficile la separazione tra emissione di seconda, terza armonica, ecc.

## **3. Aumento dell'assorbimento alle alte armoniche**

Gli effetti relativistici rendono il coefficiente di assorbimento **meno dipendente dall'armonica** nnn, permettendo una maggiore **trasmissione della radiazione alle alte armoniche**. Questo implica che:

🔹 Il plasma potrebbe risultare **otticamente sottile a frequenze più alte di quanto previsto nel modello non relativistico**.

📌 **Conseguenza pratica:** La temperatura elettronica stimata da armoniche più alte potrebbe differire da quella ottenuta con le armoniche più basse.

## **Conclusione**

Gli effetti relativistici **spostano la frequenza di risonanza verso valori più bassi, allargano lo spettro e riducono l’opacità del plasma alle alte armoniche**. Per diagnostiche precise della temperatura elettronica nei tokamak, questi effetti devono essere considerati, specialmente per plasmi con temperature elevate (> 10 keV).