



Il problema della stabilità del plasma nel reattore a fusione nucleare

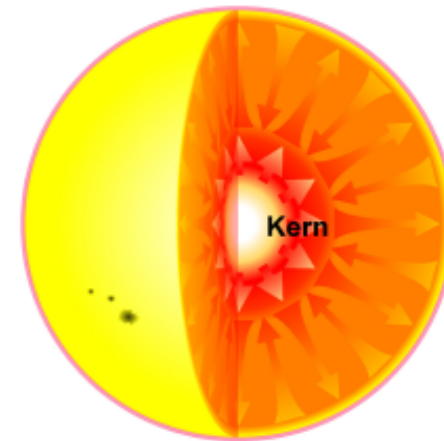
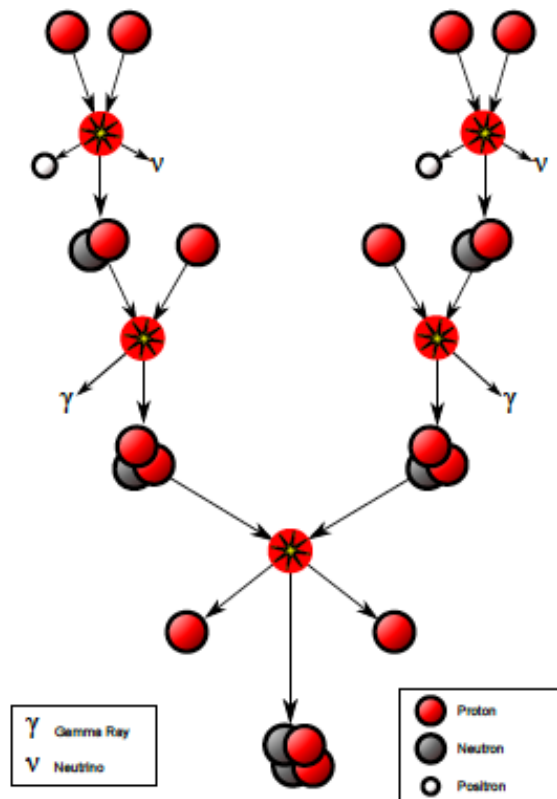
L Amicucci, A Cardinali, C Castaldo, R Cesario, A A Tuccillo

101° Congresso SIF
Roma, 25 settembre 2015

L'energia da fusione: è resa possibile dalla **stabilità** di un meccanismo spontaneo

Il sole

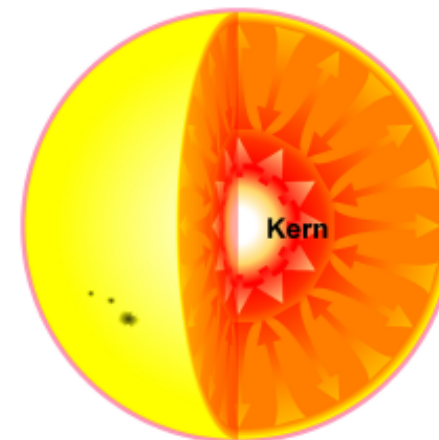
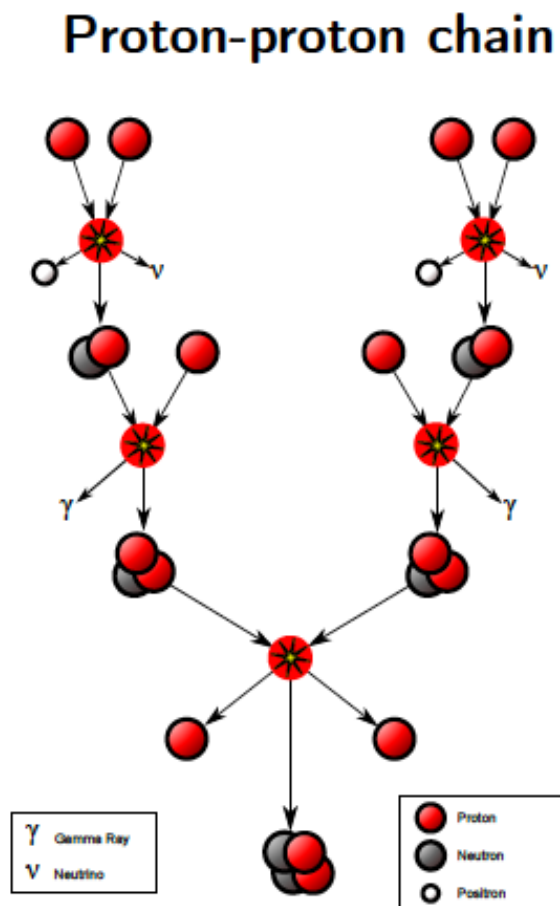
Proton-proton chain



- In the sun, 564 million tons of hydrogen fuse to 560 million tons of helium every second!
- 4 million tons of mass are converted into energy and emitted.

L'energia da fusione: è resa possibile dalla **stabilità** di un meccanismo spontaneo

Il sole. Menzionare solo l'aspetto del guadagno della reazione di fusione è fuorviante, perché porta alla similitudine con la bomba H che è assai più semplice da realizzare

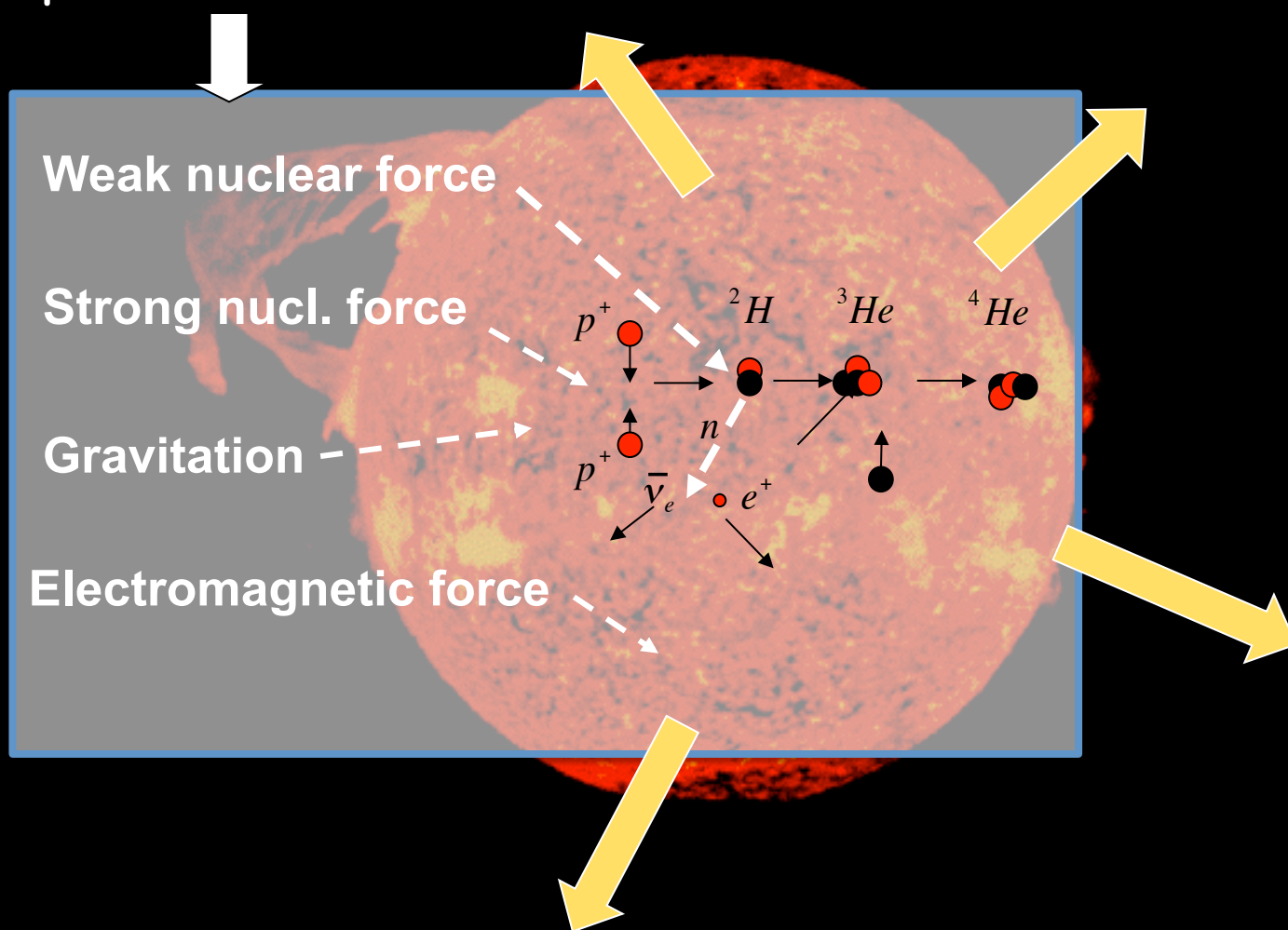


- In the sun, 564 million tons of hydrogen fuse to 560 million tons of helium every second!
- 4 million tons of mass are converted into energy and emitted.

L'energia da fusione: è resa possibile dalla **stabilità** di un meccanismo spontaneo

Nel sole la fusione nucleare avviene in condizioni ambiente prodotte dalla sinergia di tutte le forze fondamentali della natura

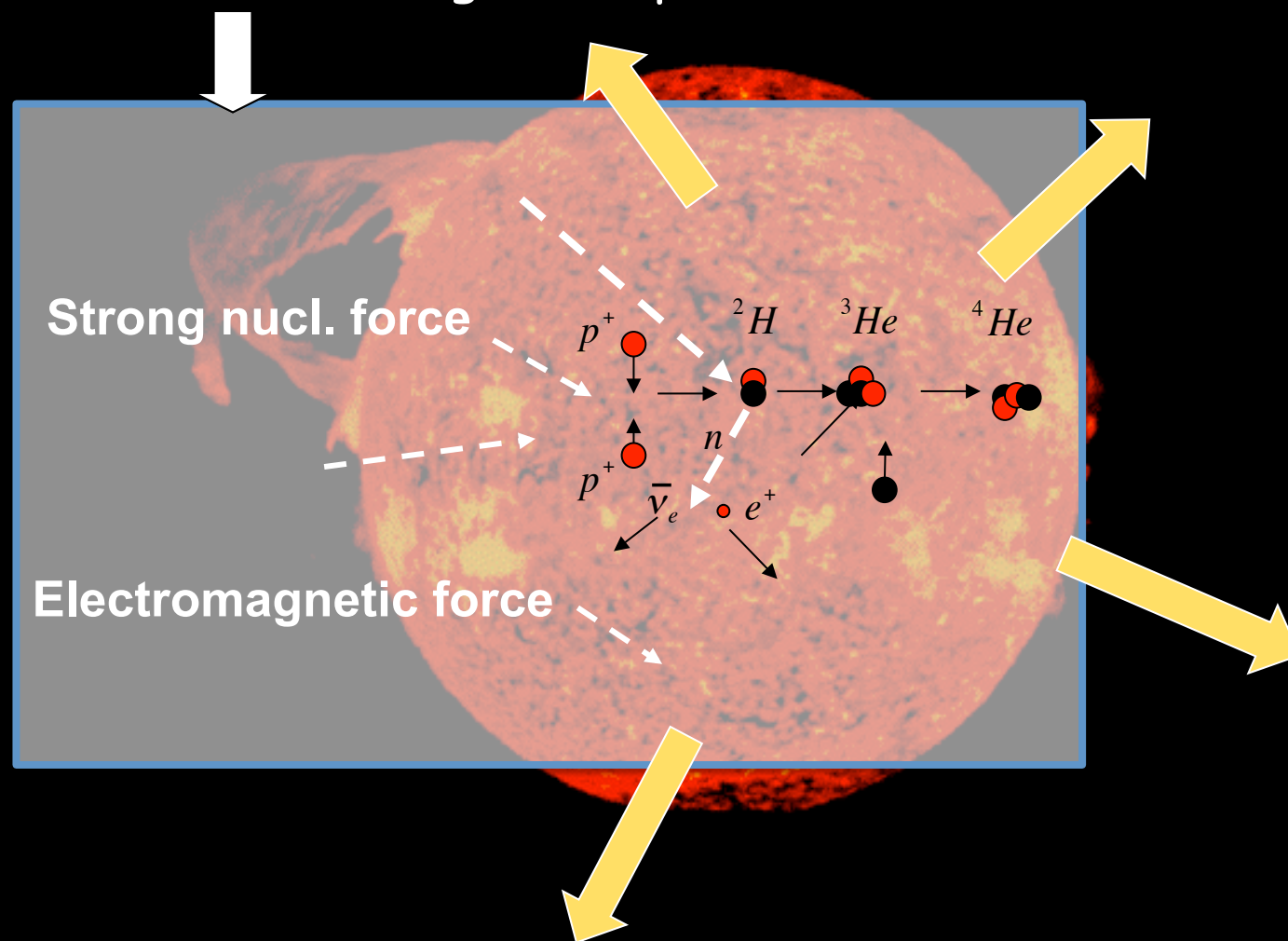
L'interazione nucleare debole consente la lenta produzione dei neutroni necessari ...



L'energia da fusione: è resa possibile dalla **stabilità** di un meccanismo spontaneo

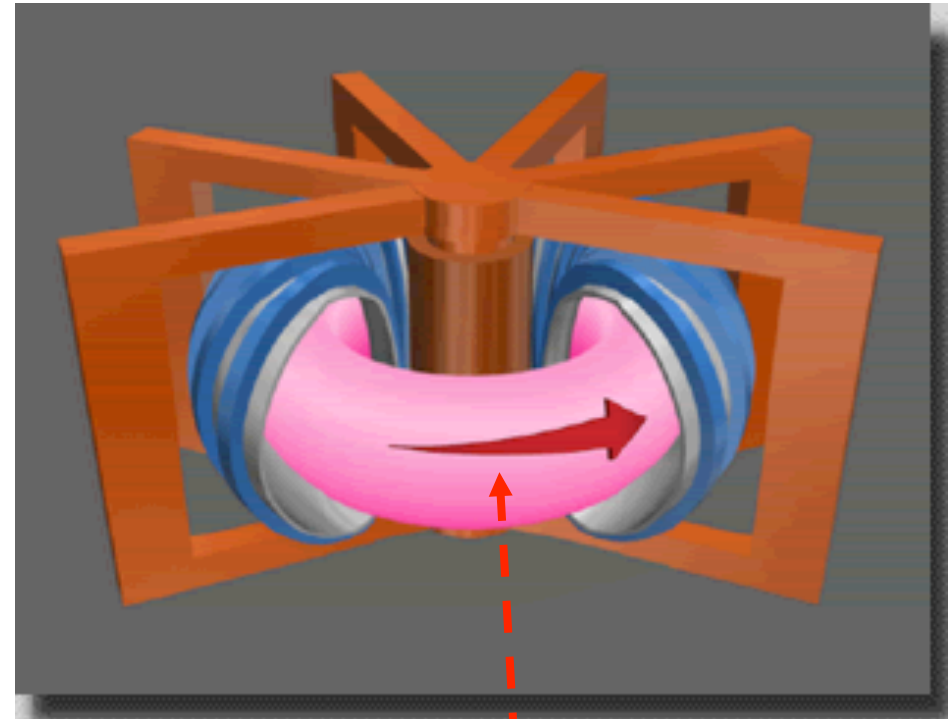
Nel sole la fusione nucleare avviene in condizioni ambiente prodotte dalla sinergia di tutte le forze fondamentali della natura

...ma sulla Terra solo l'interazione nucleare forte e la forza elettromagnetica possono essere utilizzate



Il Tokamak

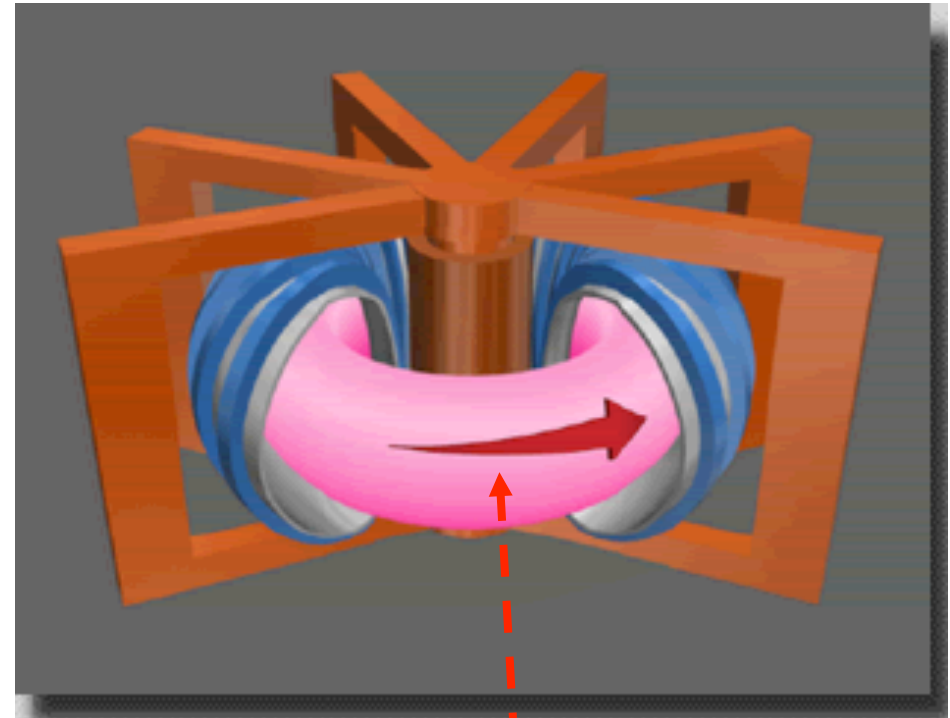
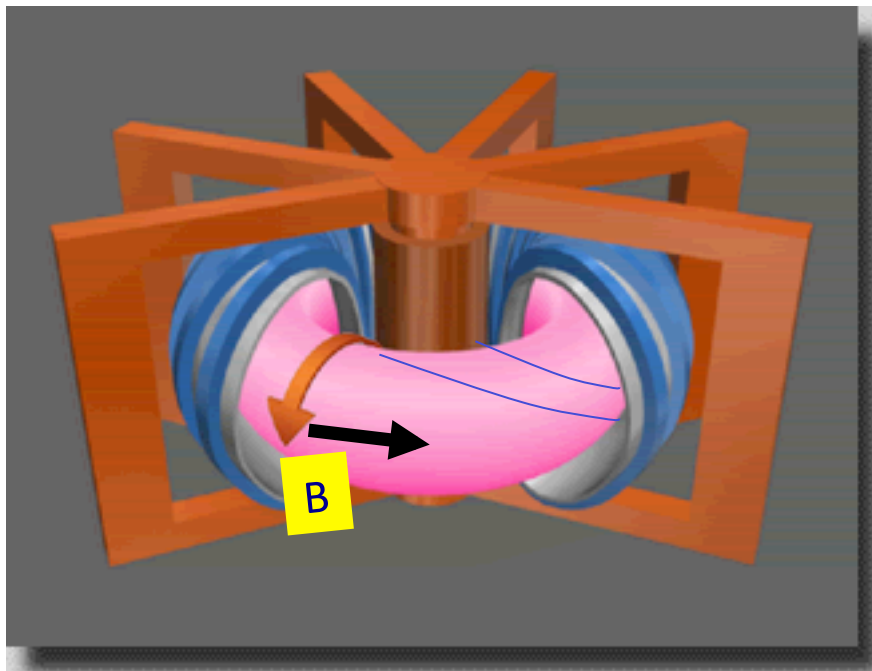
toroidalnaya kamera magnitnaya katushka = camera toroidale e spira magnetica



Corrente indotta dal trasformatore

Il Tokamak

toroidalnaya kamera magnitnaya katushka = camera toroidale e spira magnetica

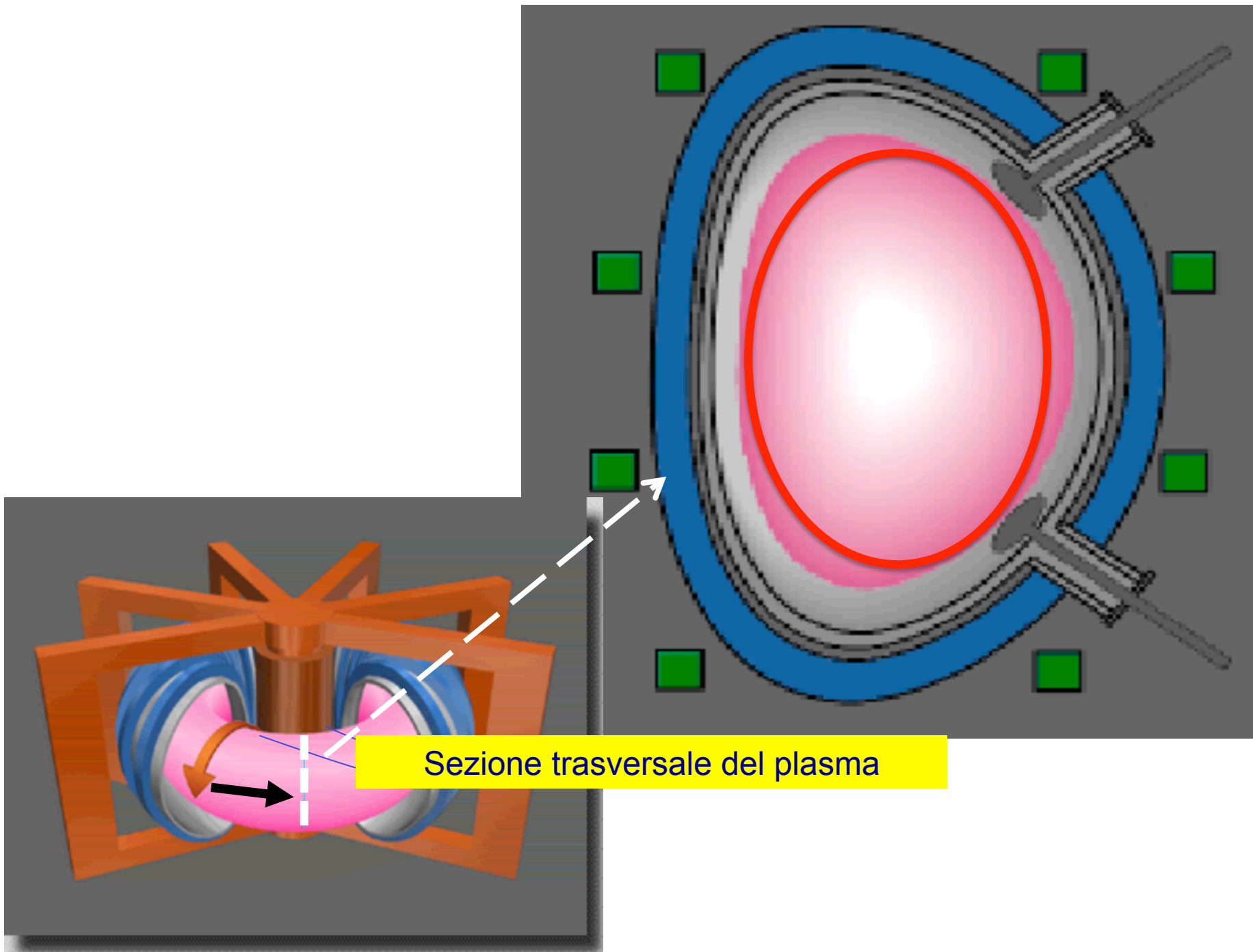


Corrente indotta dal trasformatore

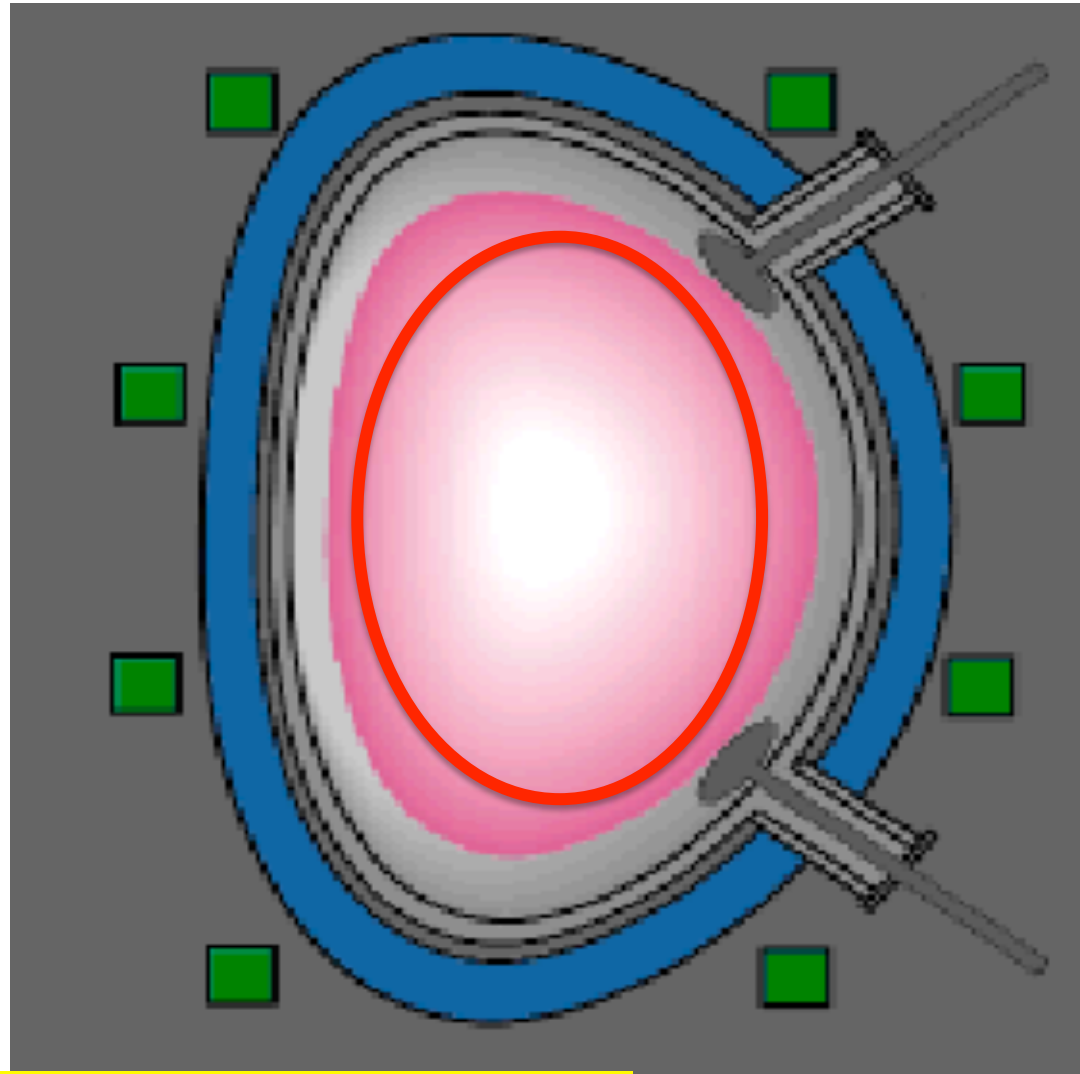
Corrente autoprodotta
dall'effetto bootstrap:

$$j_{BS} \propto T \nabla n + 0.04 \nabla T$$

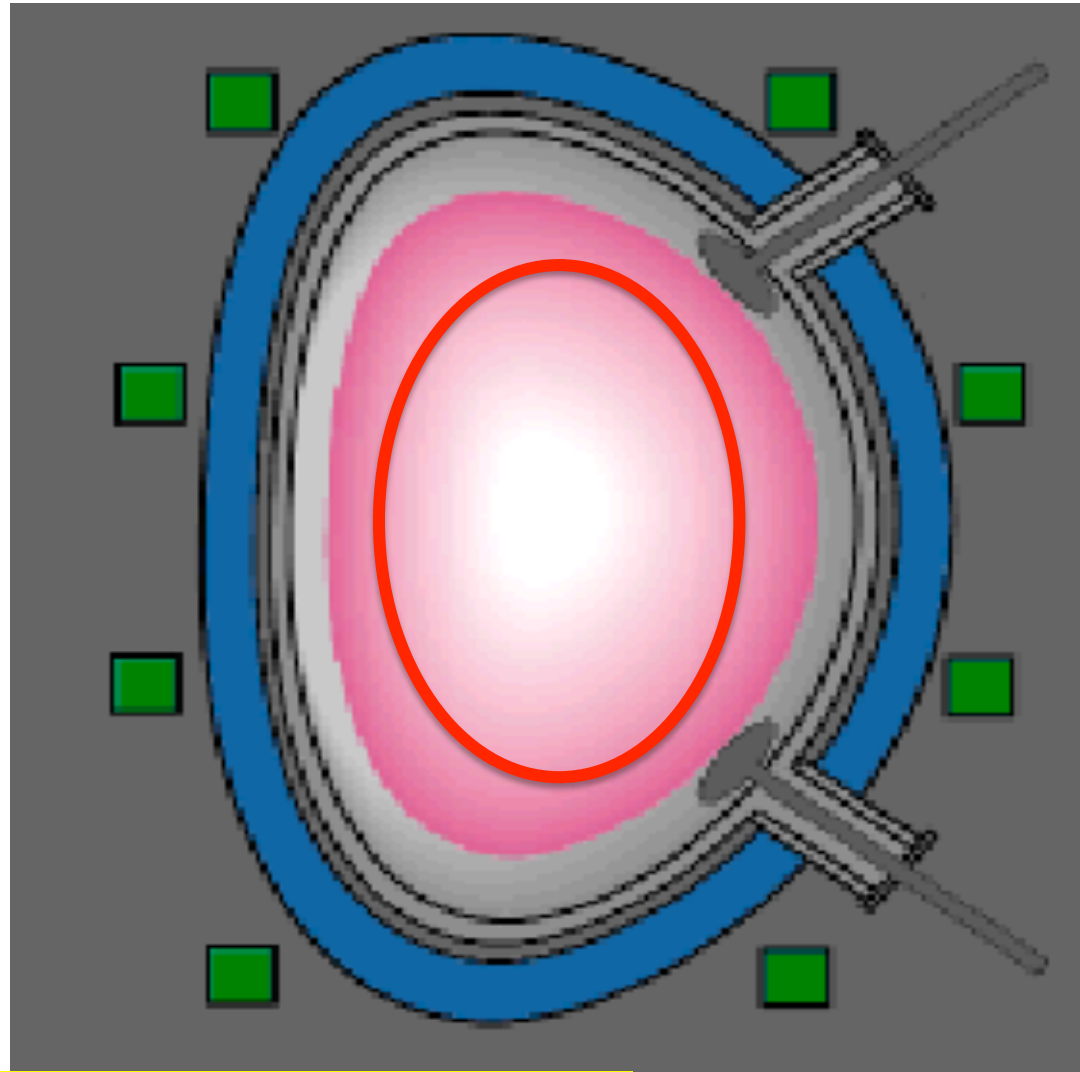
La diffusione della corrente nella colonna di plasma



La diffusione della corrente nella colonna di plasma

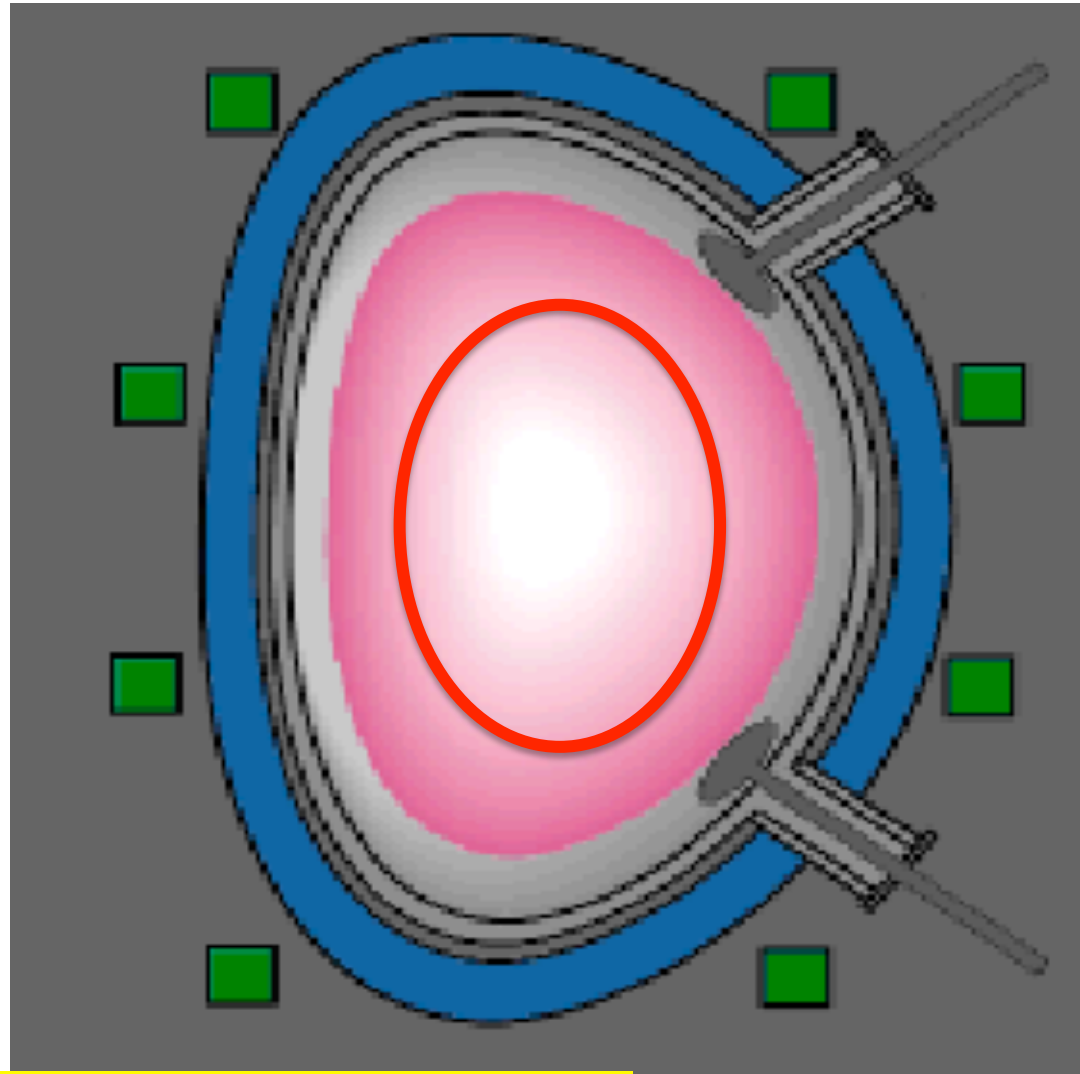


Sezione trasversale del plasma



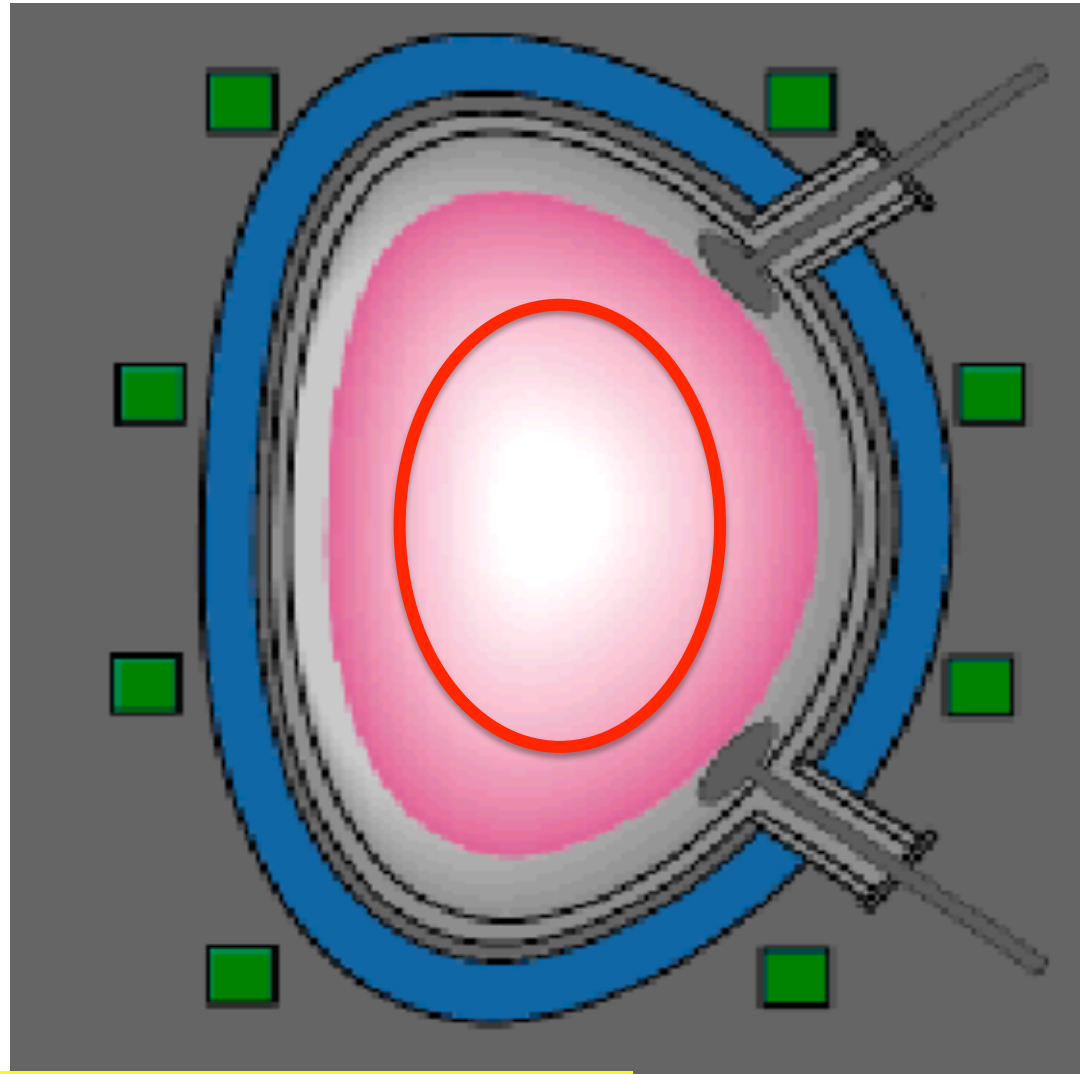
Sezione trasversale del plasma

La diffusione della corrente nella colonna di plasma



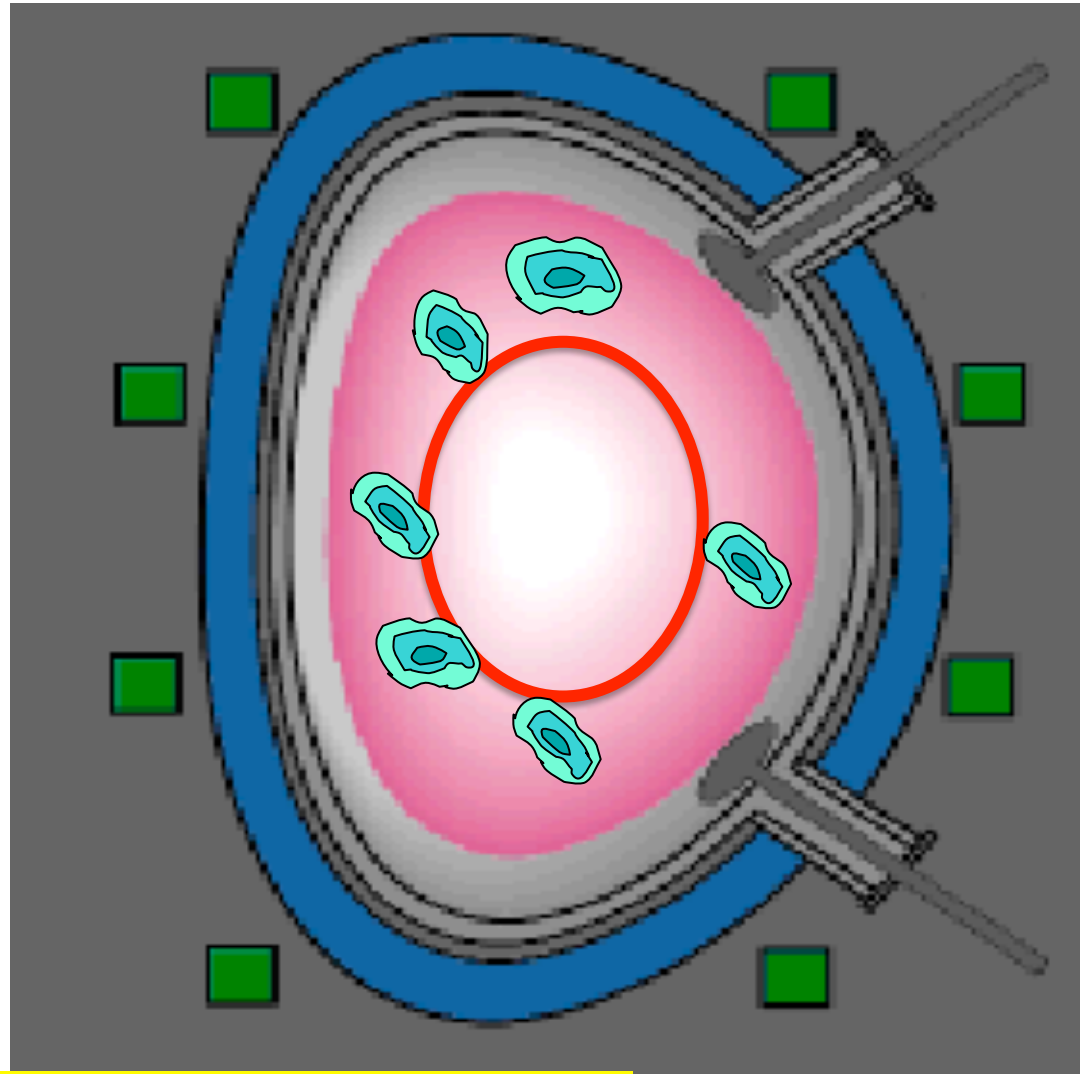
Sezione trasversale del plasma

La diffusione della corrente nella colonna di plasma



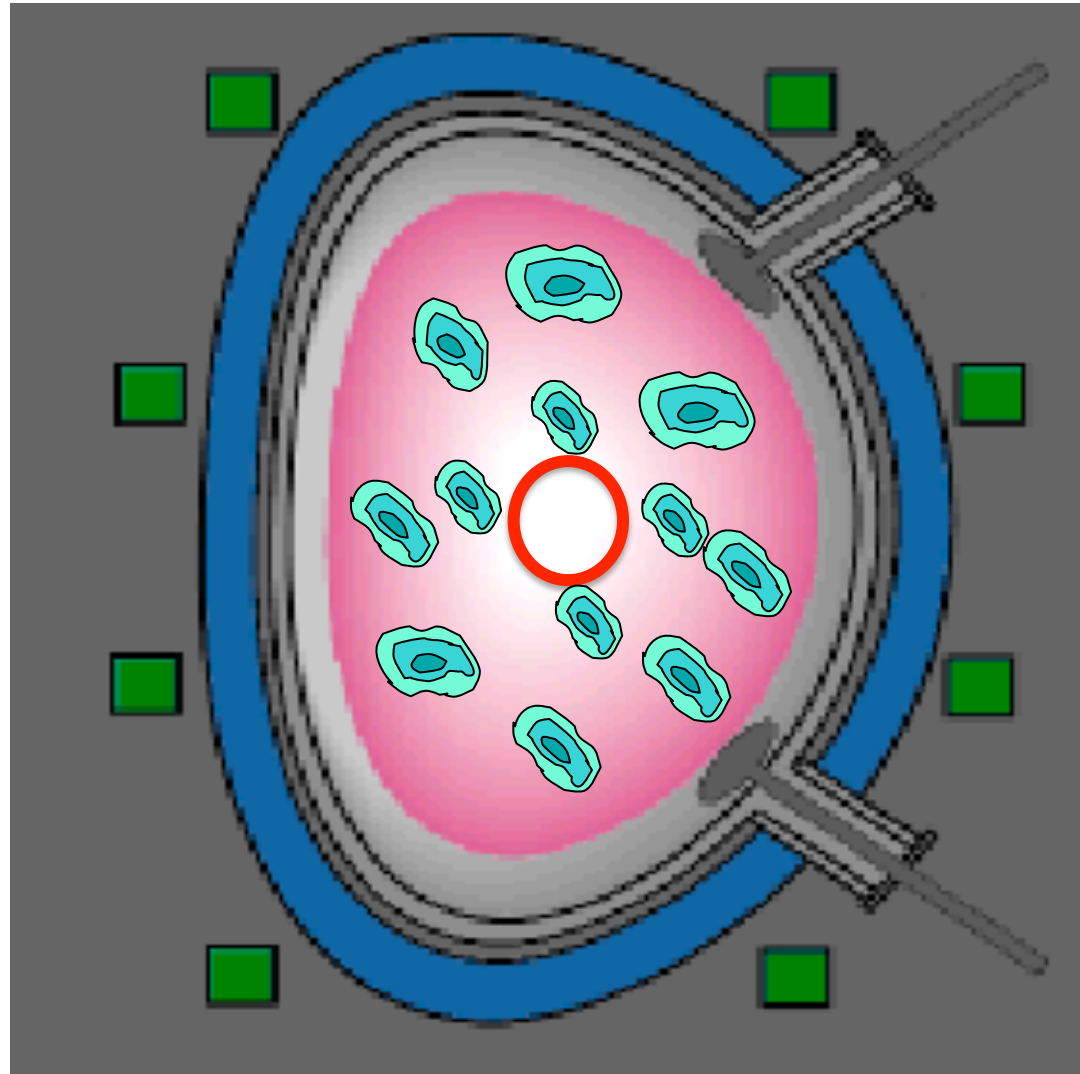
Sezione trasversale del plasma

La diffusione della corrente nella colonna di plasma



Sezione trasversale del plasma

La diffusione della corrente nella colonna di plasma

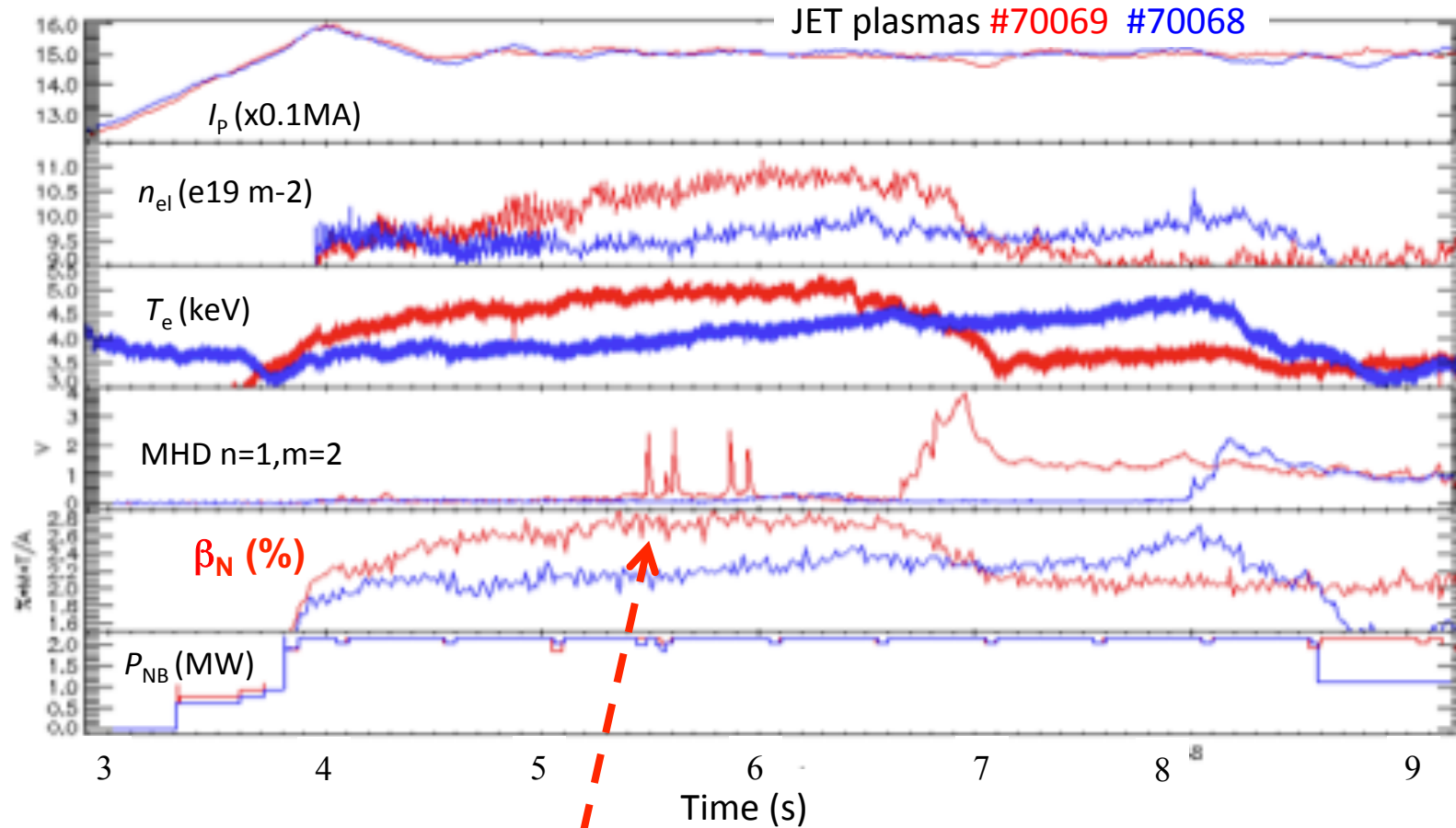


Sezione trasversale del plasma

Necessità del controllo del profilo radiale di densità di corrente del plasma

Plasma Phys Control. Fusion 55 (2013) 045005

R Cesario *et al*



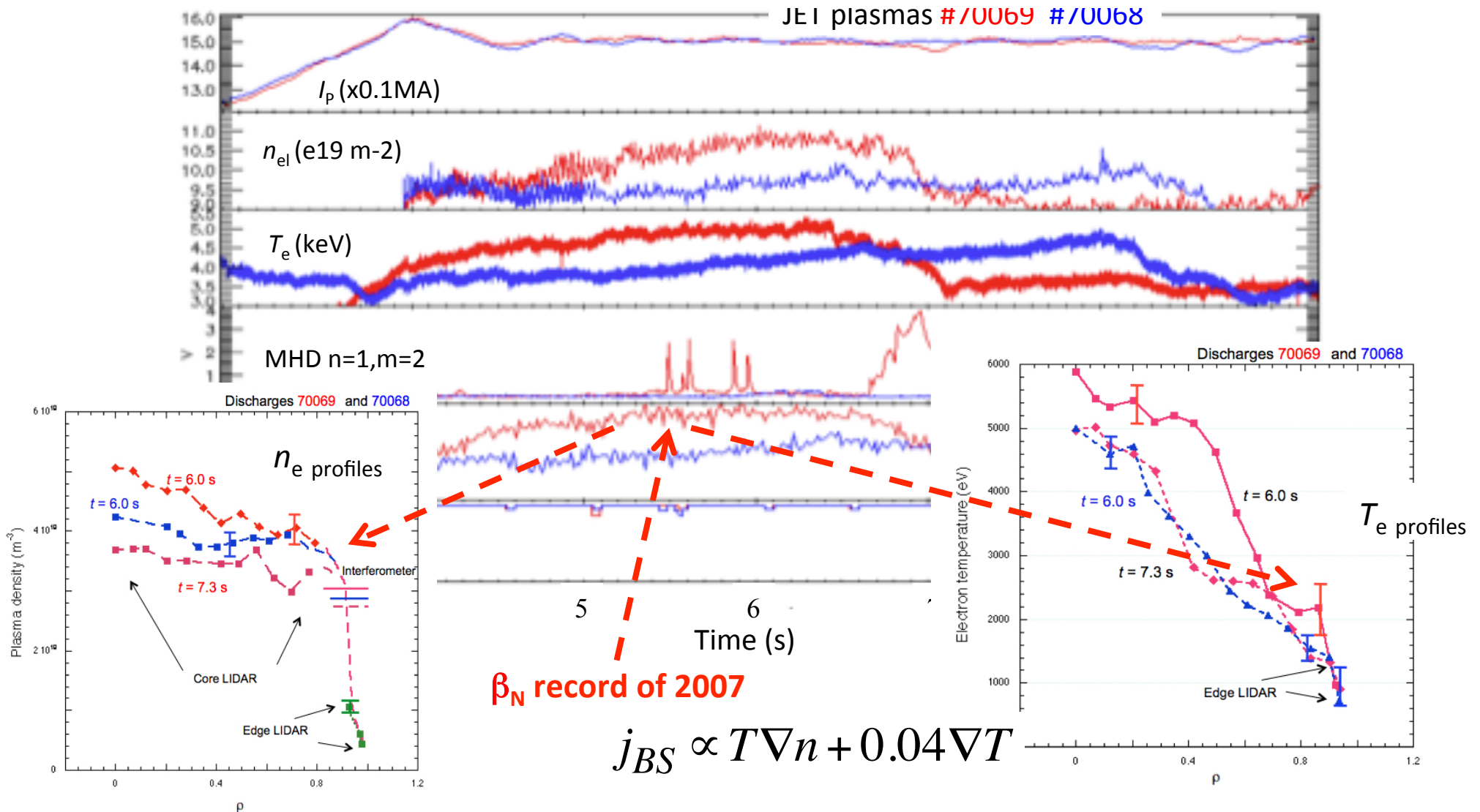
β_N record of 2007

X Litaudon *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 49 (2007)

Necessità del controllo del profilo radiale di densità di corrente del plasma

Plasma Phys Control. Fusion 55 (2013) 045005

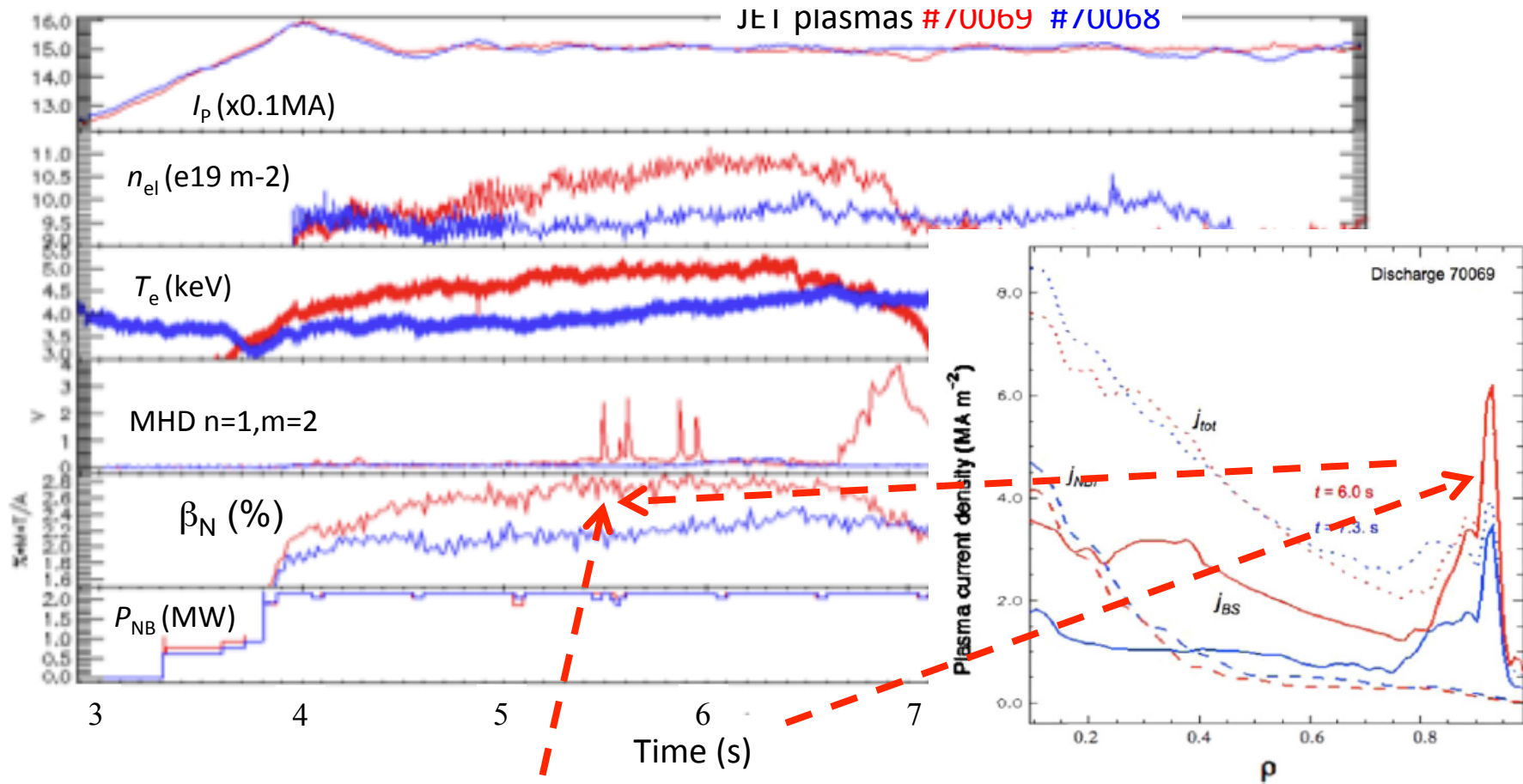
R Cesario *et al*



Necessità del controllo del profilo radiale di densità di corrente del plasma

Plasma Phys Control. Fusion 55 (2013) 045005

R Cesario *et al*

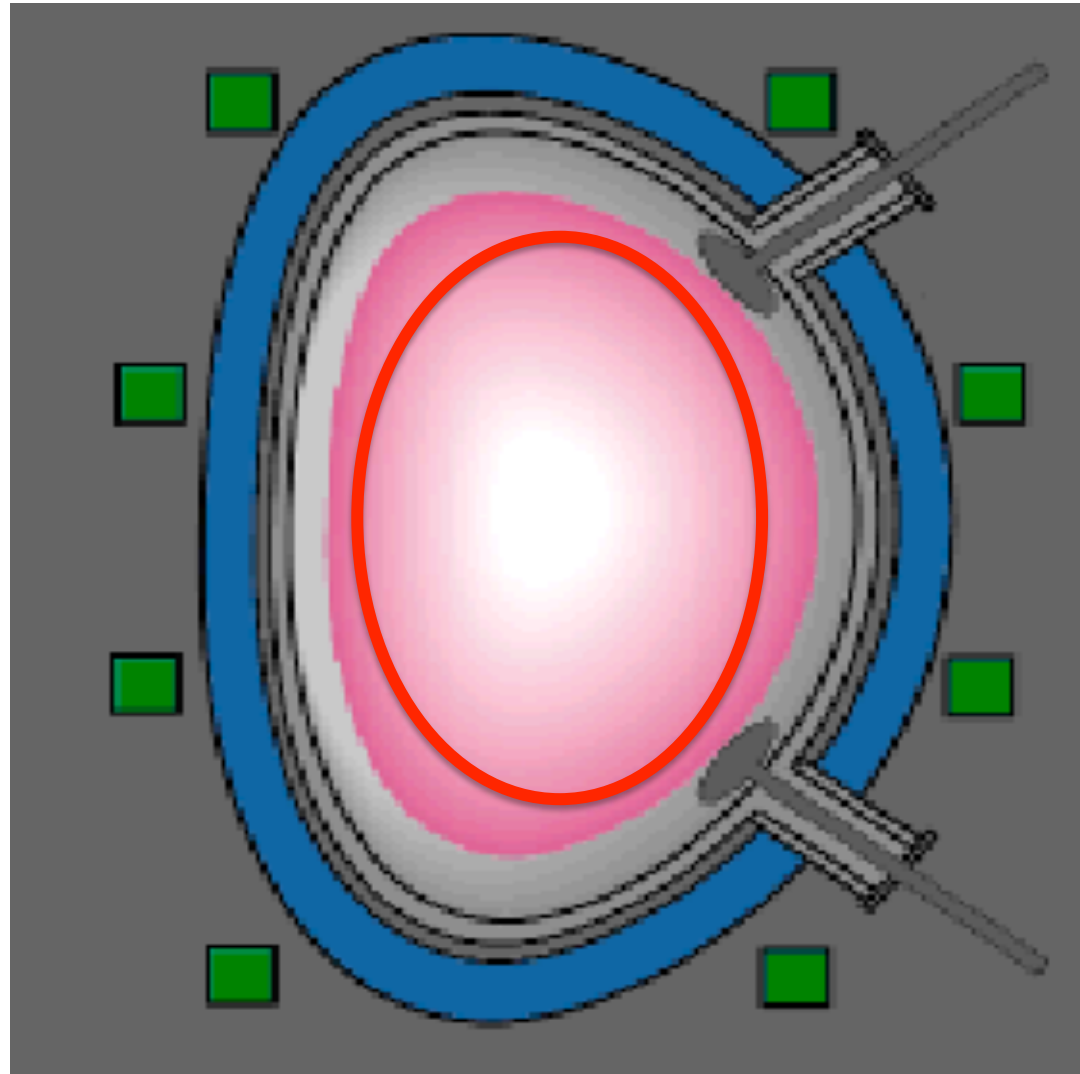


β_N record of 2007

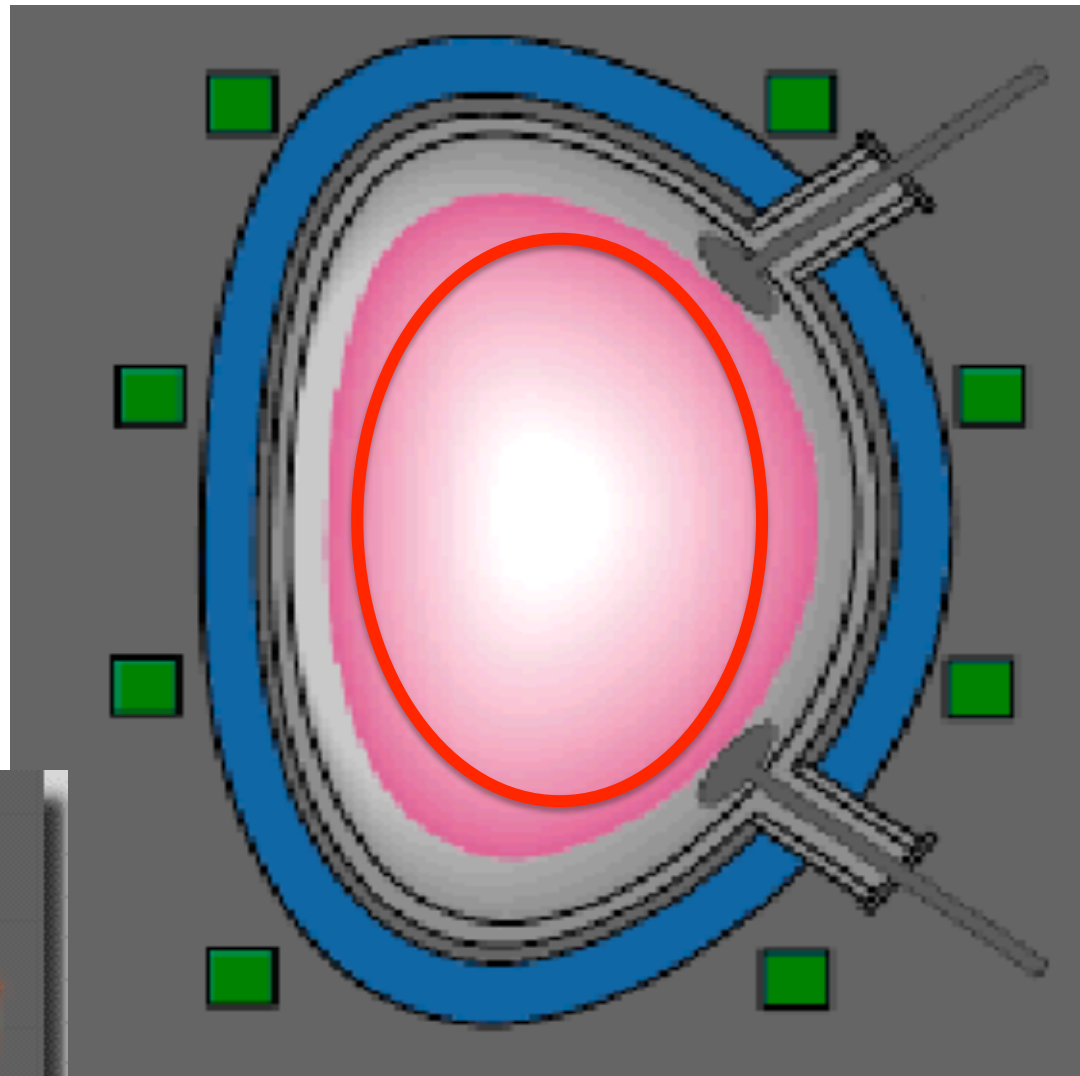
$$j_{BS} \propto T \nabla n + 0.04 \nabla T$$

First case of j_{BS_edge} simulation in high δ plasma of JET

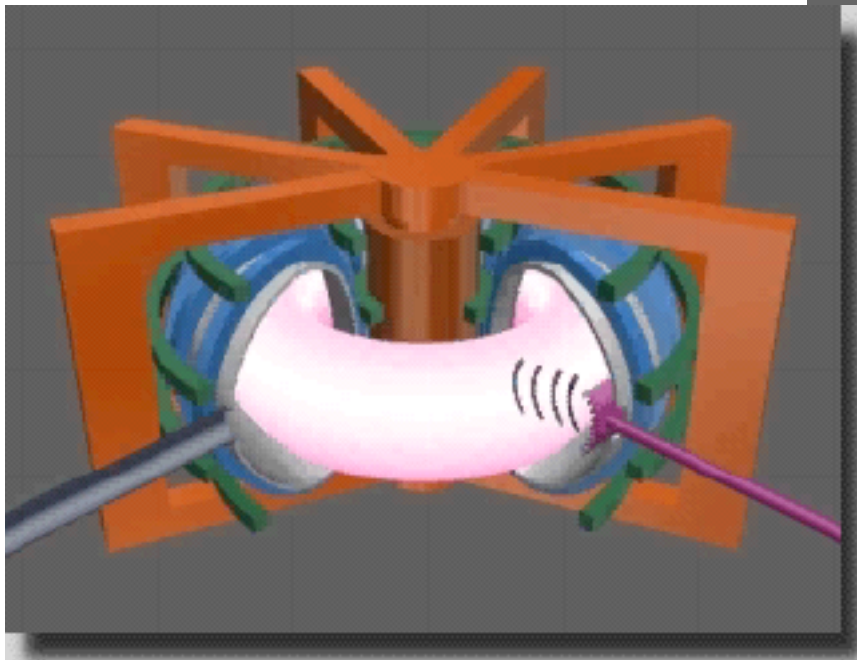
Riuscire a congelare la
diffusione della
corrente e sostenere la
frazione j_{BS}
rappresentano
condizioni fondamentali
per la stabilità di un
reattore



Riuscire a congelare la diffusione della corrente e sostenere la frazione j_{BS} rappresentano condizioni fondamentali per la stabilità di un reattore



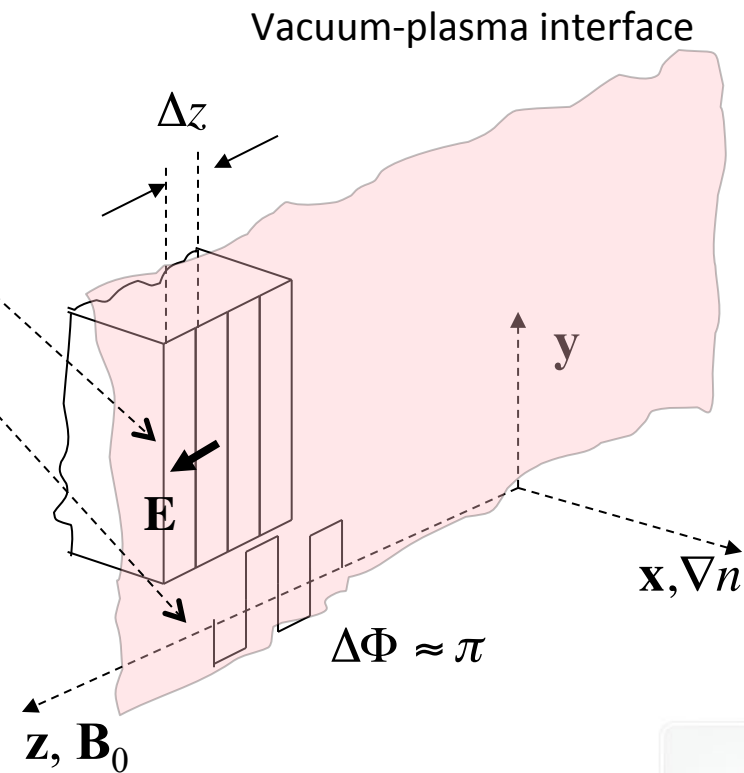
Il controllo del profilo di corrente può essere ottenuto utilizzando opportune potenze a radiofrequenza



Un'antenna a griglia di guide d'onda sfasate è utile per accoppiare potenza RF alle onde di lower hybrid (LH) di un plasma tokamak

- Condizione di polarizzazione dell'onda: $\mathbf{E} \approx z E_z$

- Condizione di onda lenta: $n_{//} \equiv \frac{c}{v_{\Phi //}} = \frac{ck}{\omega} \approx \frac{c}{\omega} \frac{\Delta\Phi}{\Delta z} > 1$
 $\Delta\Phi > 0 \quad n_{//} > 1$



Relazione di dispersione delle onde LH:

$$n_{\perp}^2 \cong n_{\parallel}^2 \frac{m_i}{m_e} \frac{\omega_{LH}^2}{\omega_0^2 - \omega_{LH}^2} \quad \text{vale per: } n_{\parallel}^2 > 1$$

$$\text{dove: } \omega_{LH}^2 \cong \omega_{pi}^2 \left(1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ce}^2} \right)$$

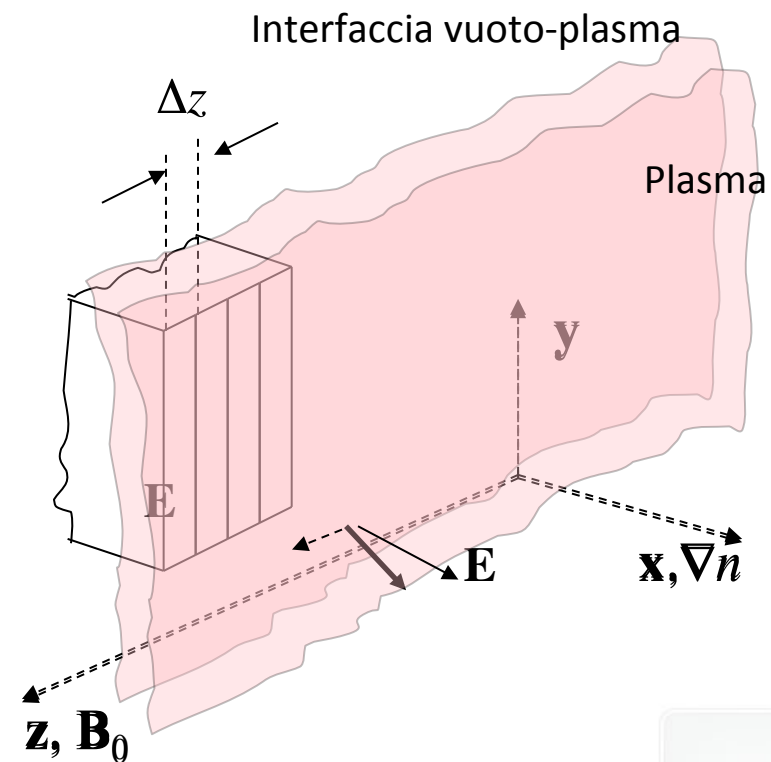
Le onde LH propagano verso l'interno della colonna di plasma nella regione compresa tra le localizzazioni di:

cut-off: $\omega_{pe} > \omega_0$

$$n_{\perp} = 0$$

e risonanza: $\omega_{LH} \leq \omega_0$

$$n_{\perp} \gg 1$$



Relazione di dispersione delle onde LH:

$$n_{\perp}^2 \cong n_{\parallel}^2 \frac{m_i}{m_e} \frac{\omega_{LH}^2}{\omega_0^2 - \omega_{LH}^2} \quad \text{vale per: } n_{\parallel}^2 > 1$$

dove : $\omega_{LH}^2 \cong \omega_{pi}^2 \left(1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ce}^2} \right)$

Le onde LH propagano verso l'interno della colonna di plasma nella regione compresa tra le localizzazioni di:

cut-off: $\omega_{pe} > \omega_0$

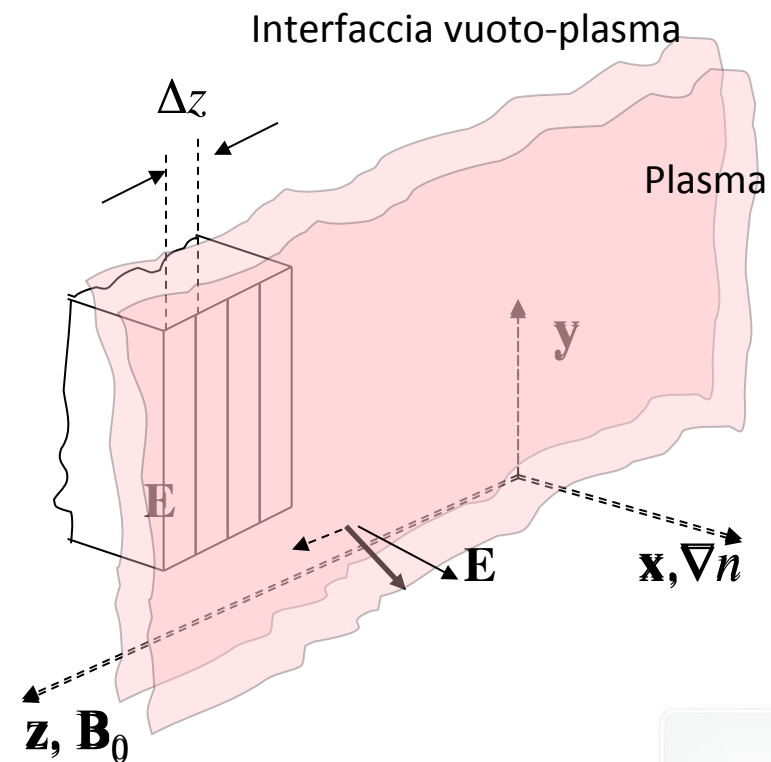
$$n_{\perp} = 0$$

La propagazione avviene in assenza di assorbimento ciclotronico ma solo alla Landau:

e risonanza: $\omega_{LH} \leq \omega_0$

$$n_{\perp} \gg 1$$

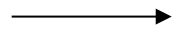
$$\frac{\omega}{k_z} \approx 4u_{the}$$



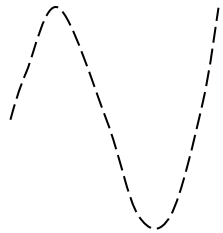
Sketch dell'assorbimento quasilineare



$$\mathbf{E}_{rf} = E_{rf} e^{i(kx - \omega t)} \underline{\mathbf{x}}$$

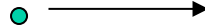


k



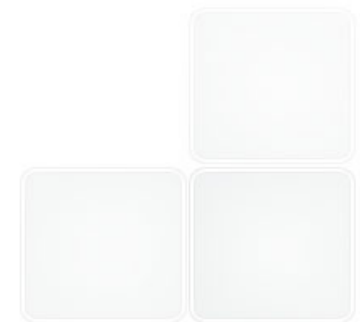
Onda quasi-elettrostatica

v_x



x

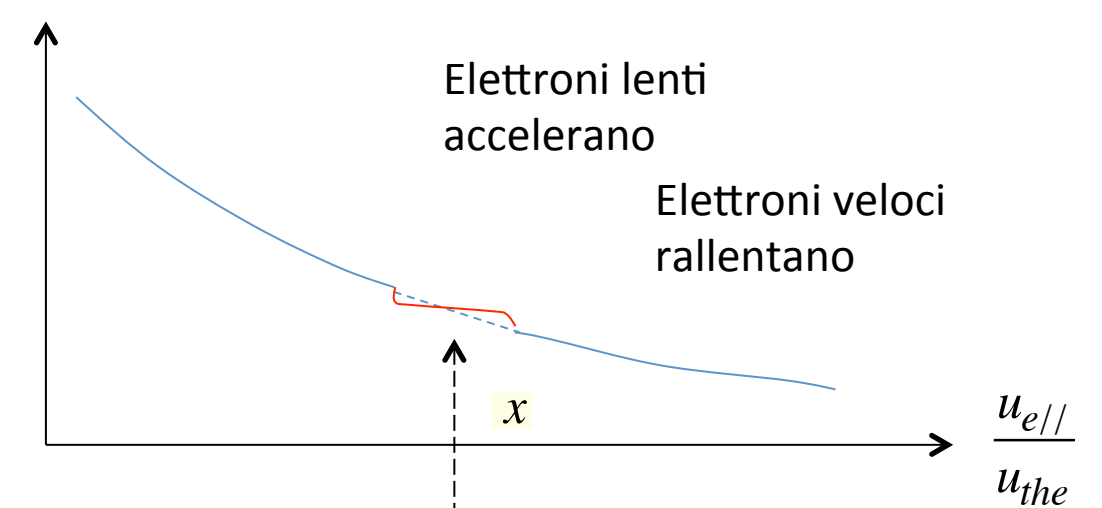
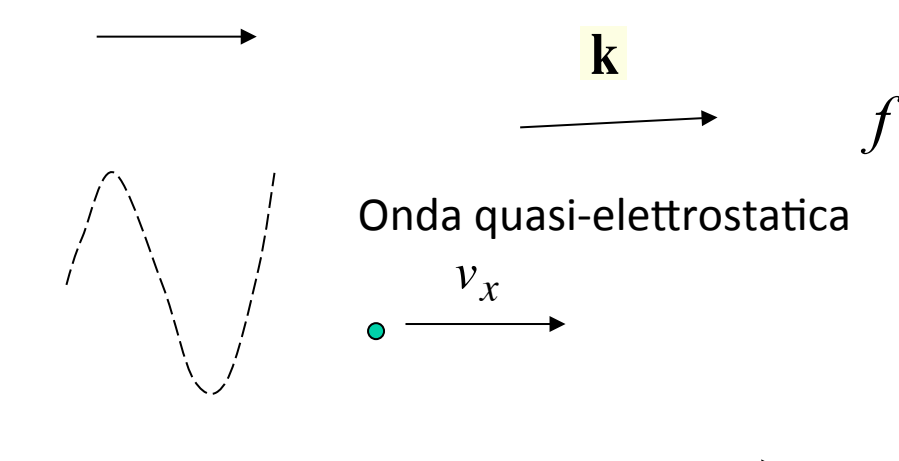
$$v_{\Phi} \equiv \frac{\omega}{k} \approx v_x$$



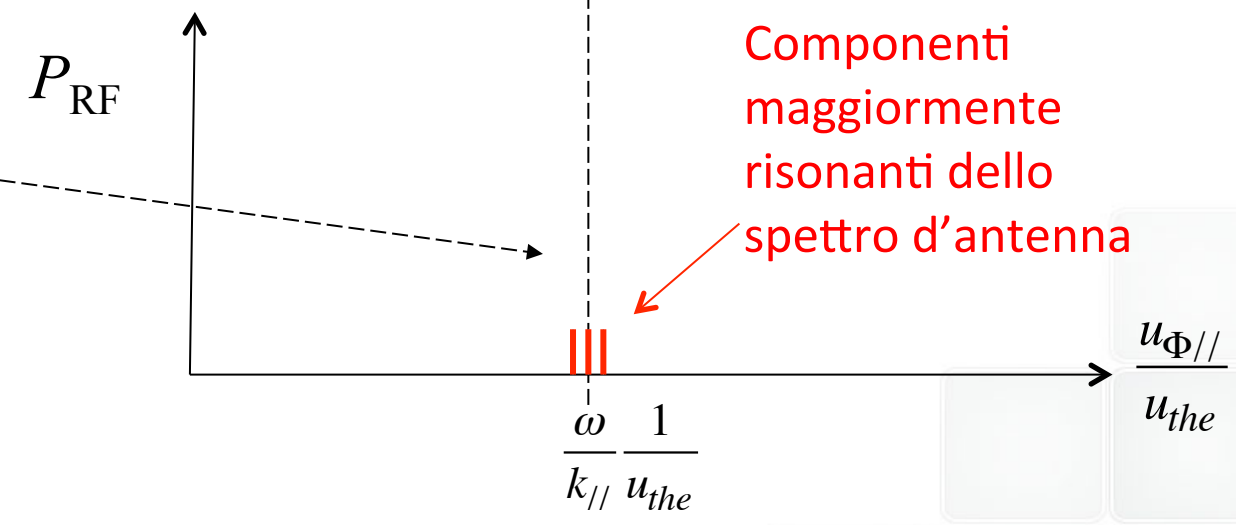
Sketch dell'assorbimento quasilineare

FDD in prossimità degli elettroni risonanti

$$\mathbf{E}_{rf} = E_{rf} e^{i(kx - \omega t)} \underline{\mathbf{x}}$$



$$v_{\Phi} \equiv \frac{\omega}{k} \approx v_x$$

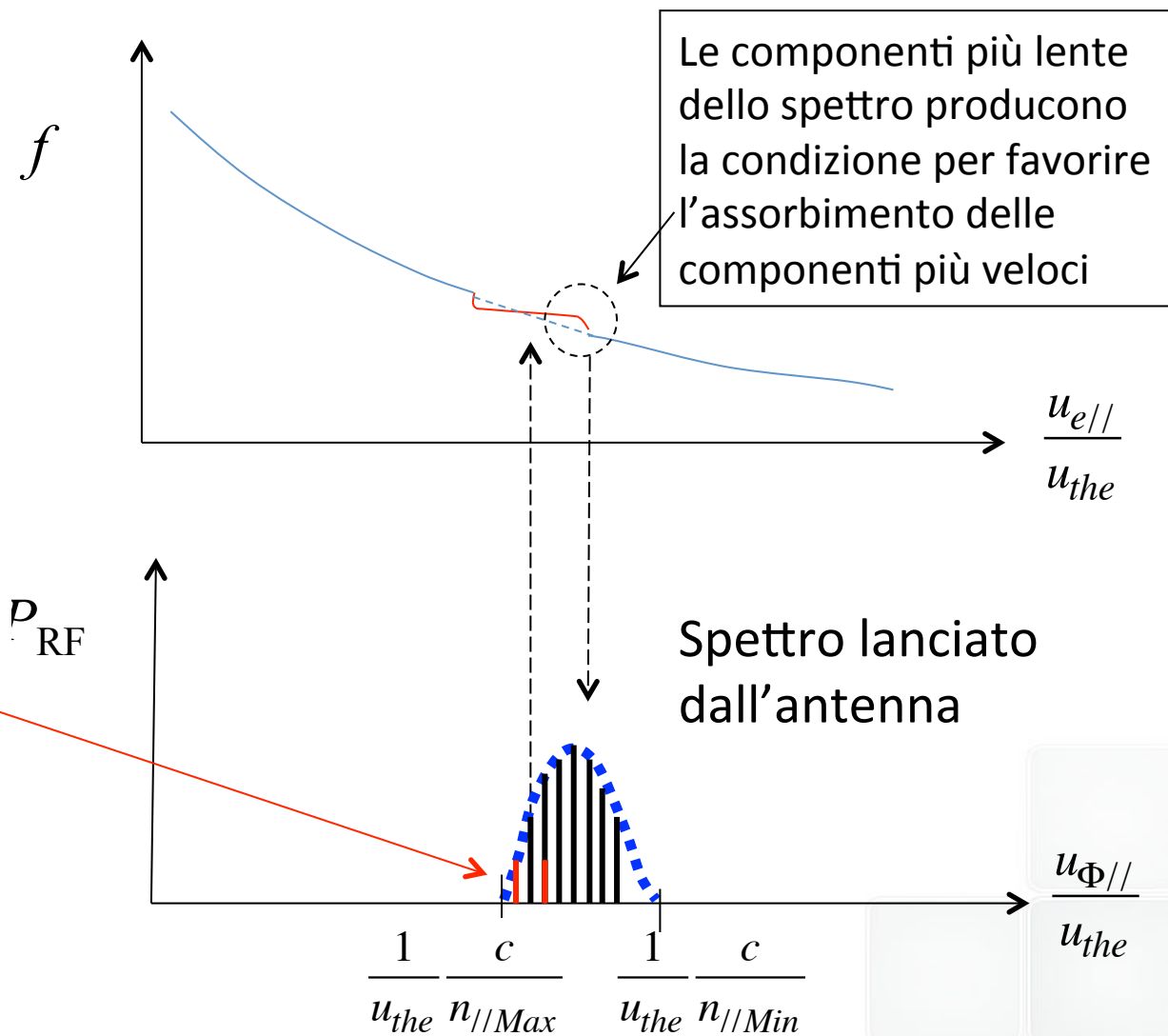


Sketch dell'assorbimento quasilineare



FDD in prossimità degli elettroni risonanti

L'interazione a feedback delle componenti più lente con quelle più veloci, utile all'assorbimento della potenza lanciata, è mediata dalla distorsione della FDD

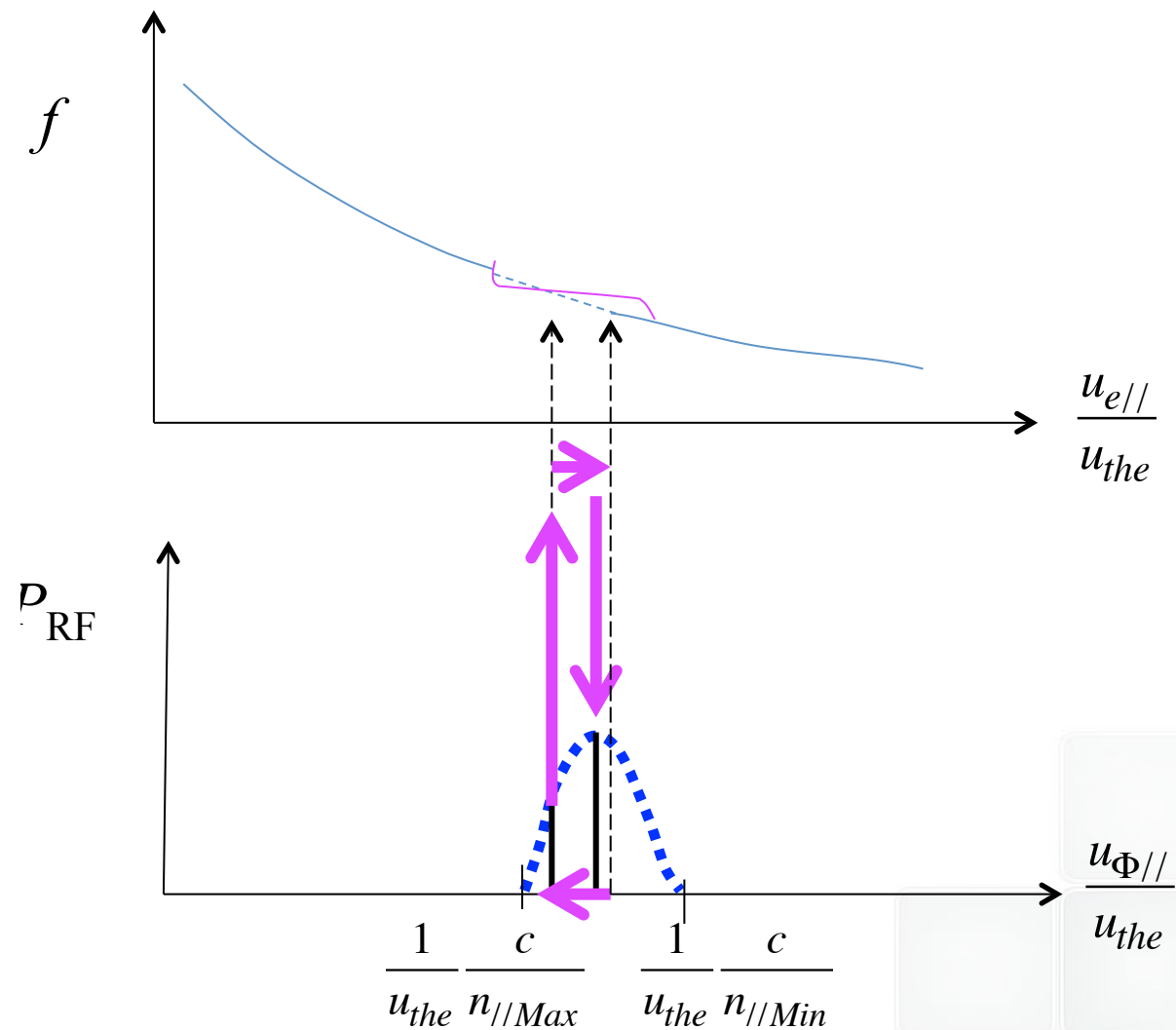


Sketch dell'assorbimento quasilineare



FDD in prossimità degli elettroni risonanti

L'interazione a feedback delle componenti più lente con quelle più veloci, utile all'assorbimento della potenza lanciata, è mediata dalla distorsione della FDD

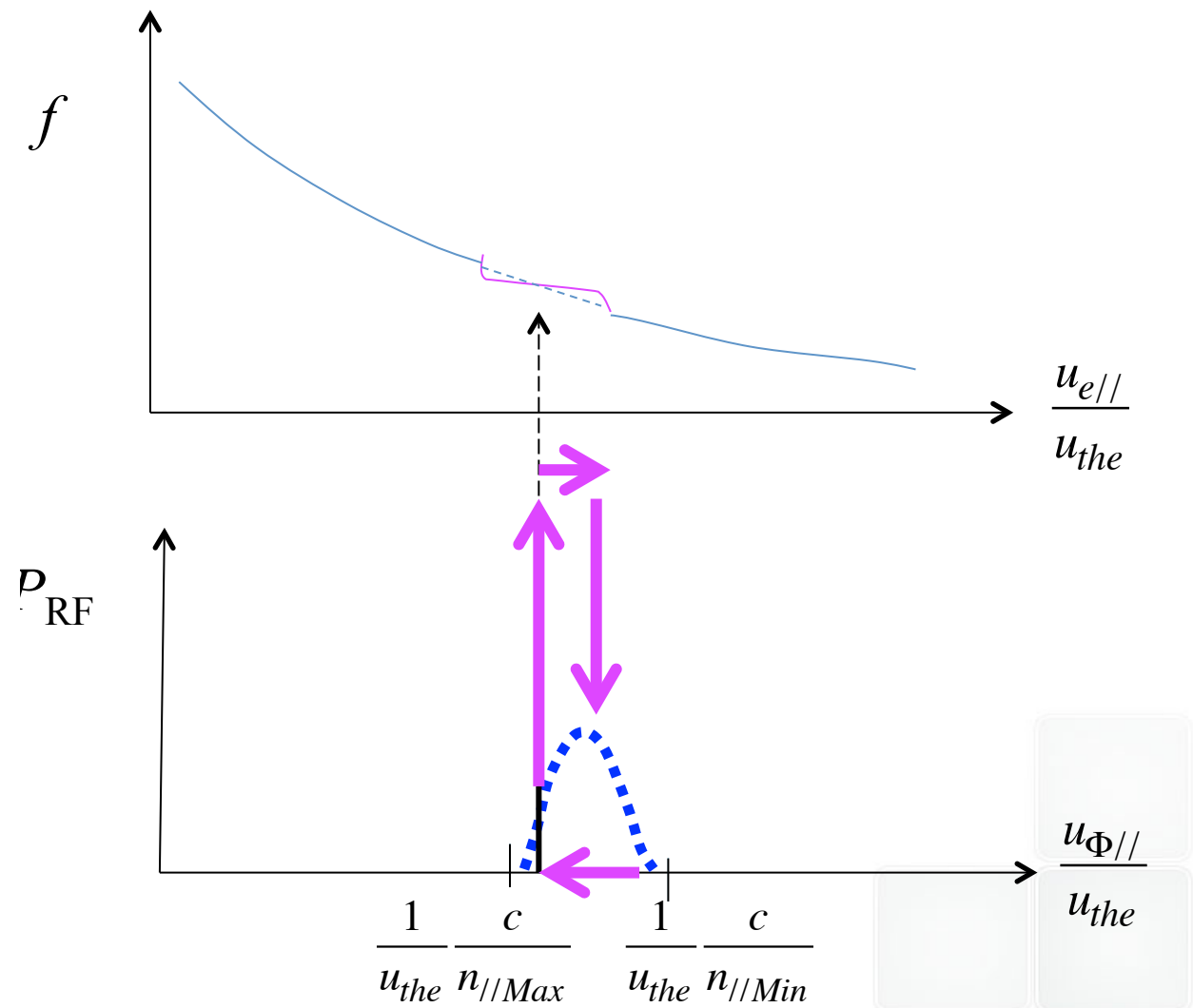


Sketch dell'assorbimento quasilineare



FDD in prossimità degli elettroni risonanti

L'interazione a feedback delle componenti più lente con quelle più veloci, utile all'assorbimento della potenza lanciata, è mediata dalla distorsione della FDD

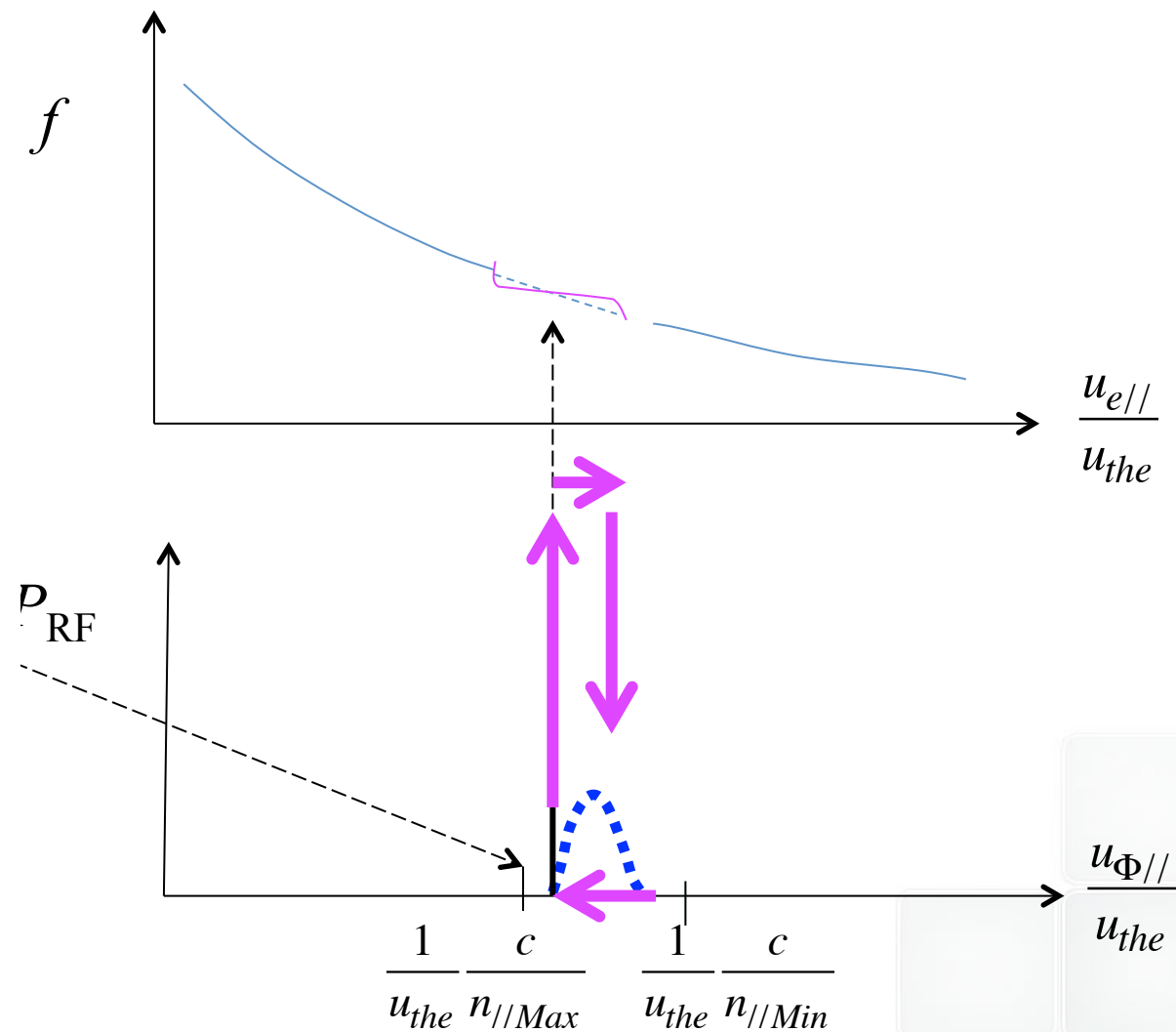


Sketch dell'assorbimento quasilineare



FDD in prossimità degli elettroni risonanti

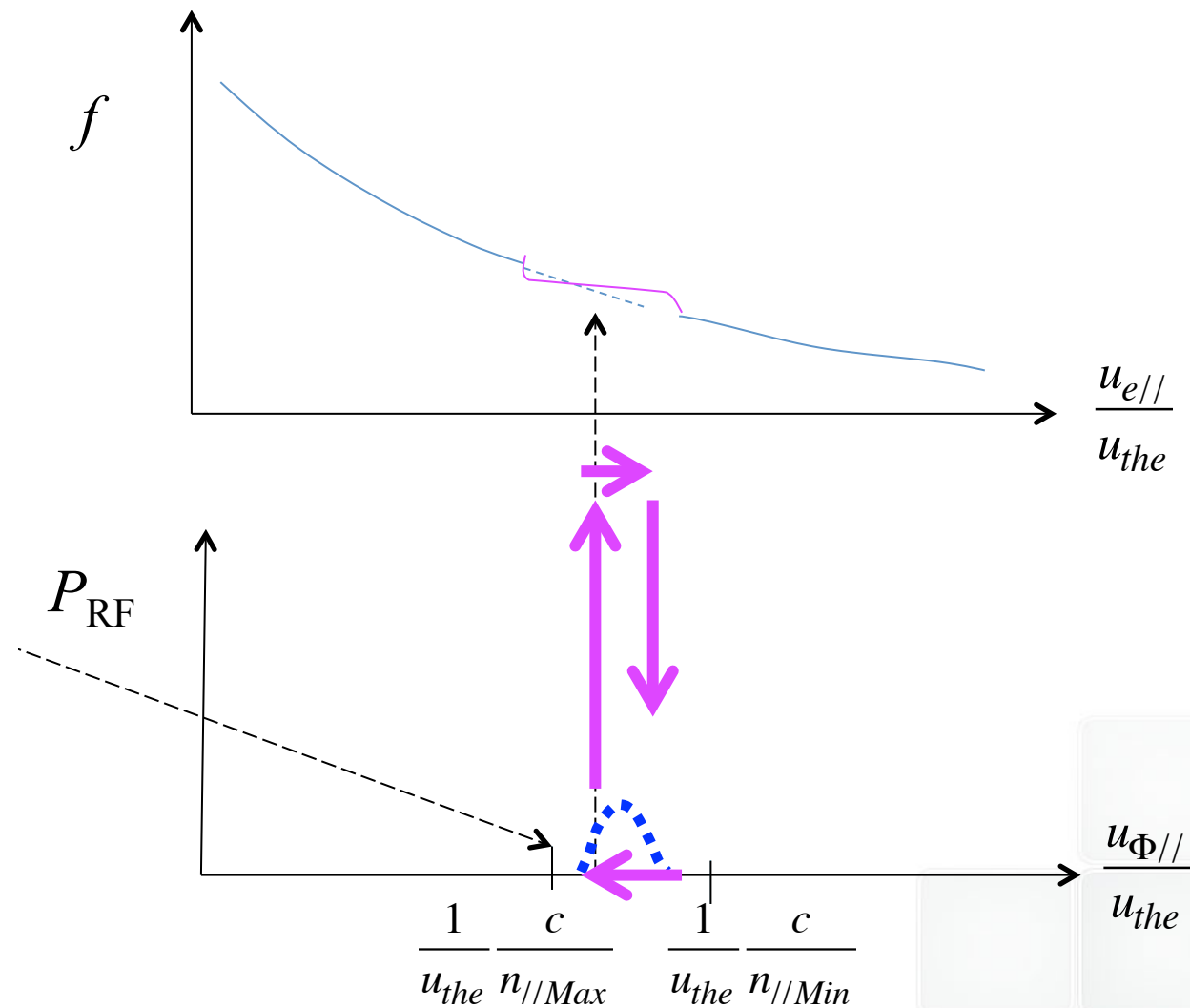
L'interazione a feedback delle componenti più lente con quelle più veloci, utile all'assorbimento della potenza lanciata, è mediata dalla distorsione della FDD



Sketch dell'assorbimento quasilineare



FDD in prossimità degli elettroni risonanti

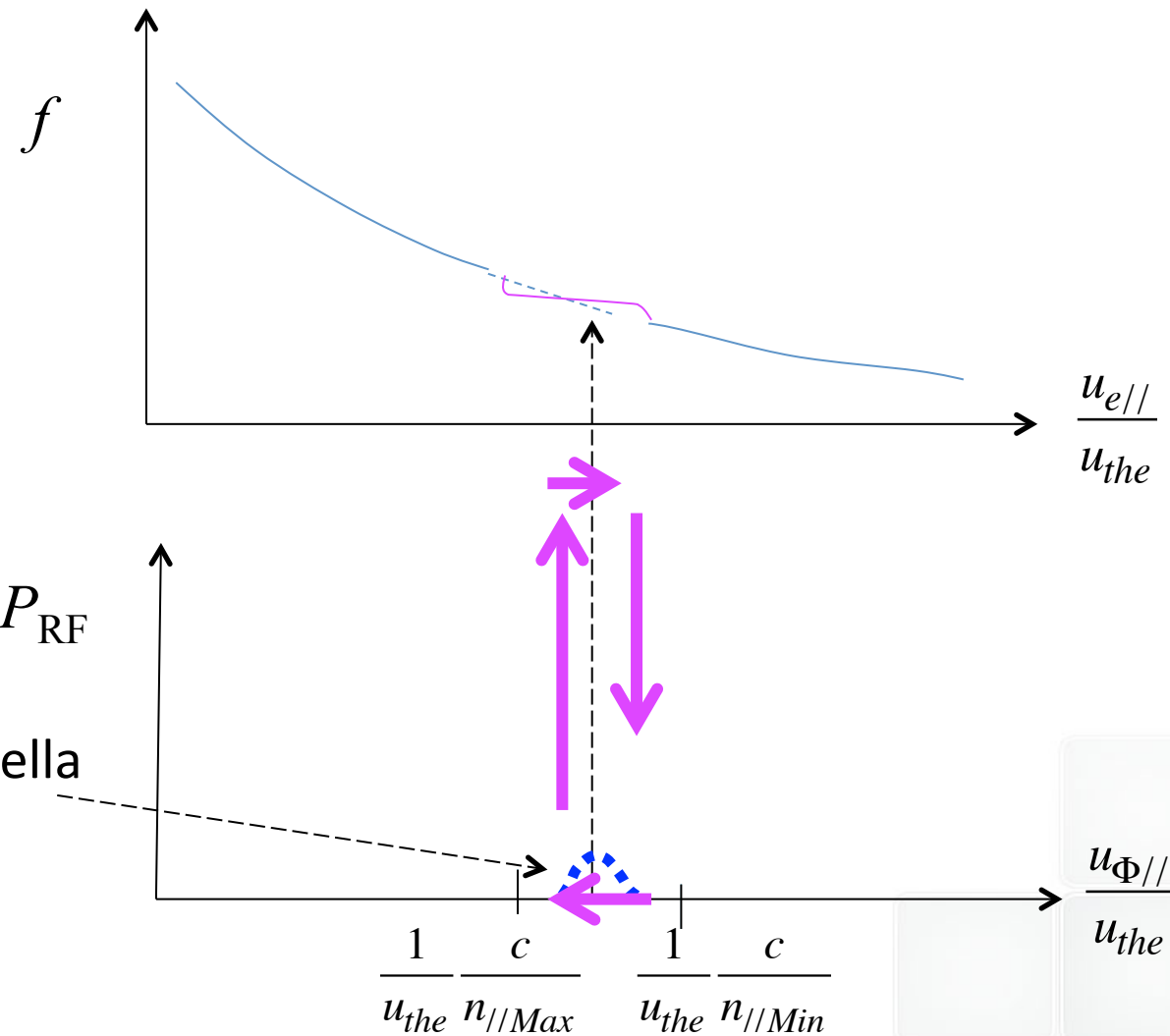


- Propagando verso regioni più calde, le componenti più lente vengono assorbite prima
- Lo stesso *film* si ripropone allora in una regione con più alta T_e ...

Sketch dell'assorbimento quasilineare



FDD in prossimità degli elettroni risonanti

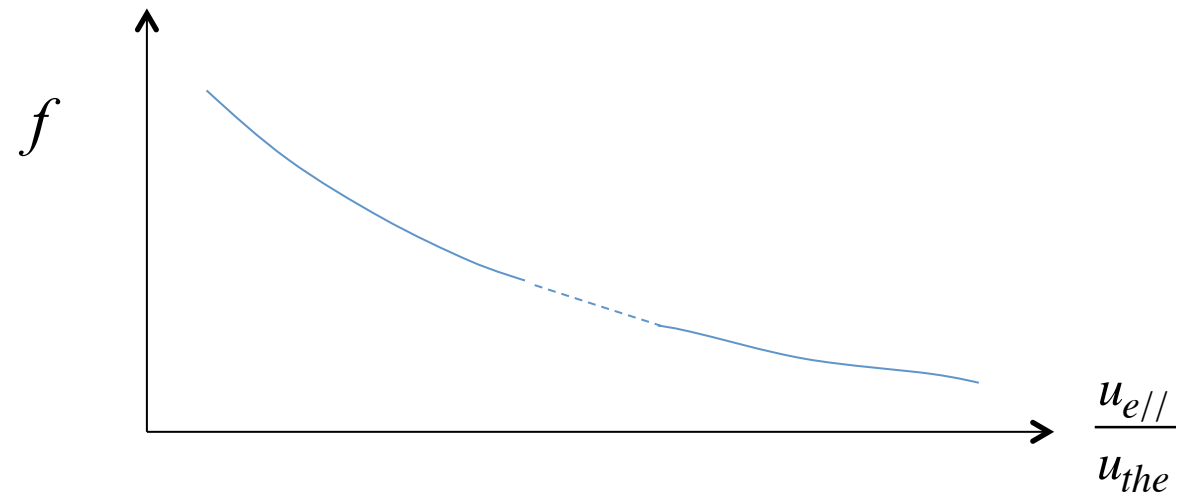


...fino a completo assorbimento della potenza lanciata

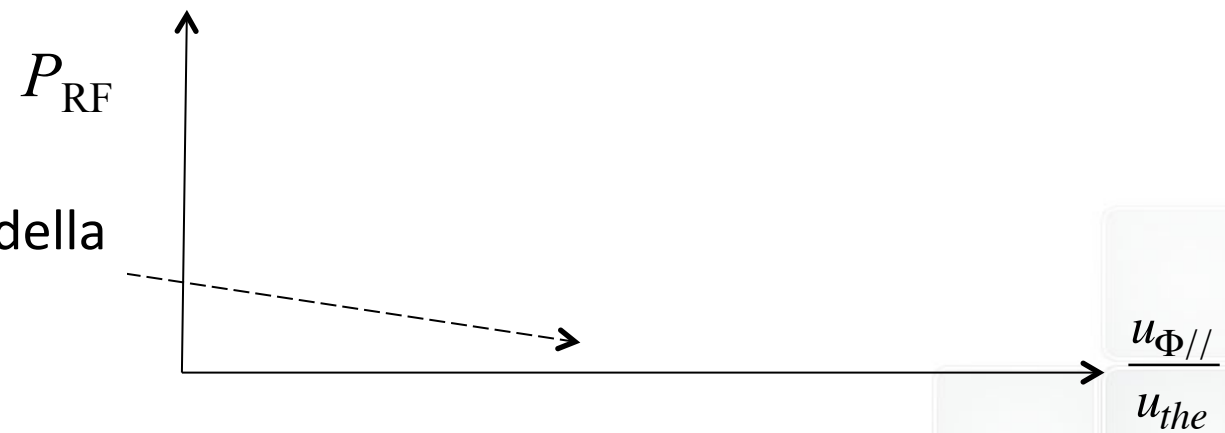
Sketch dell'assorbimento quasilineare



FDD in prossimità degli elettroni risonanti



...fino a completo assorbimento della potenza lanciata

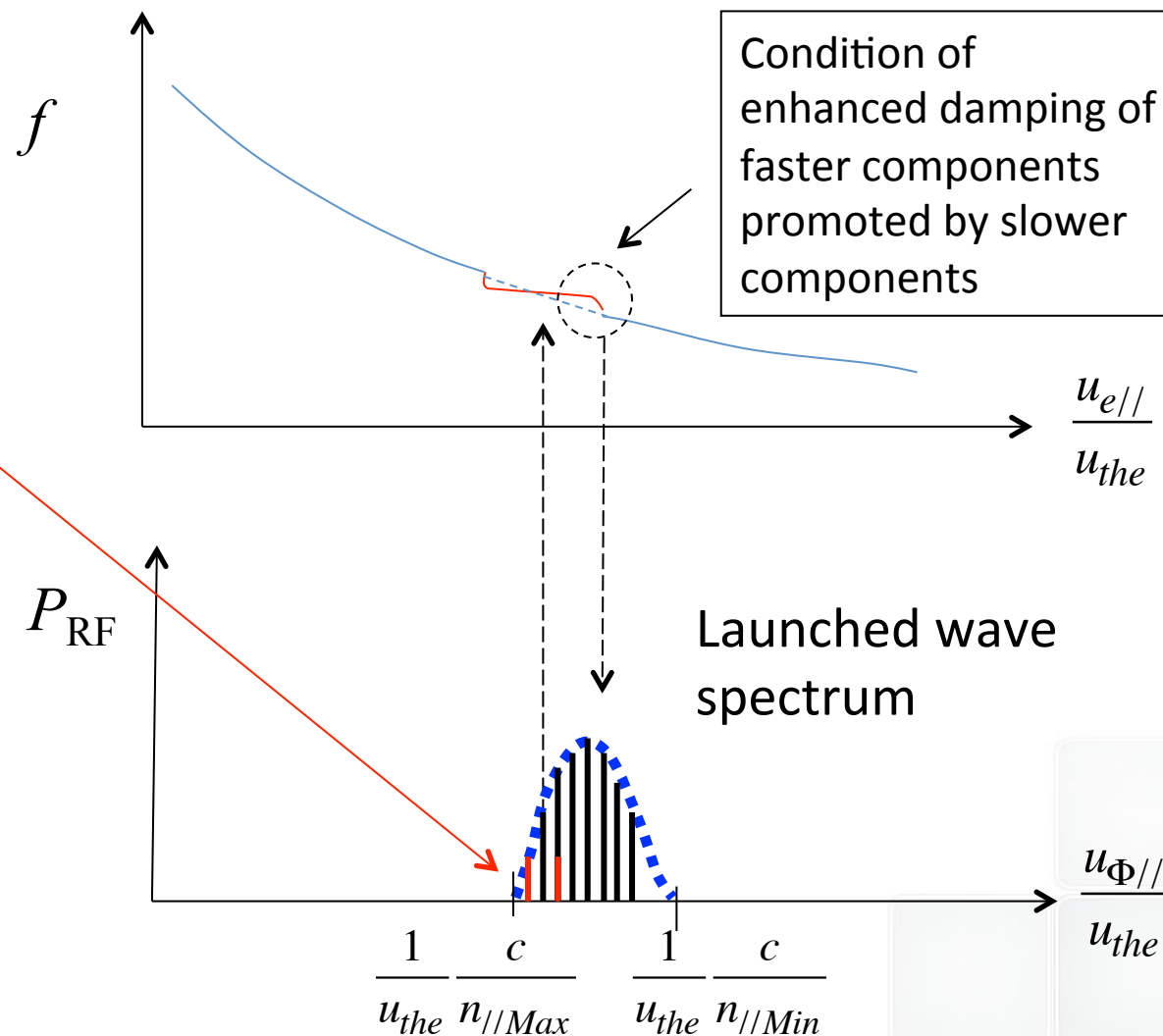


Sketch dell'assorbimento quasilineare

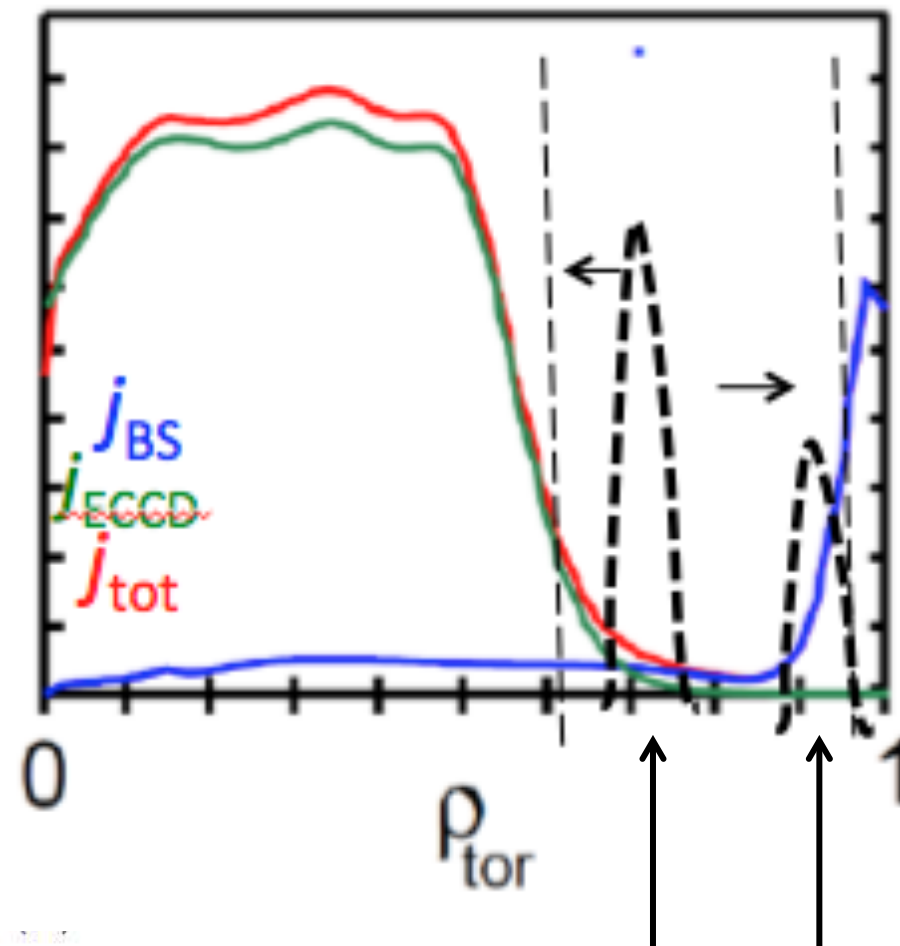


FDD in prossimità degli elettroni risonanti

- Lanciando uno **spettro più stretto**, il meccanismo di assorbimento quasi-lineare si attiva a T_e più alte
- Cosa utilissima utilmente per un reattore!



Risultati recenti di ENEA-Frascati hanno risolto il problema di come guidare corrente con onde LH alle alte T_e richieste dal reattore: A Cardinali et al, subm to PRL

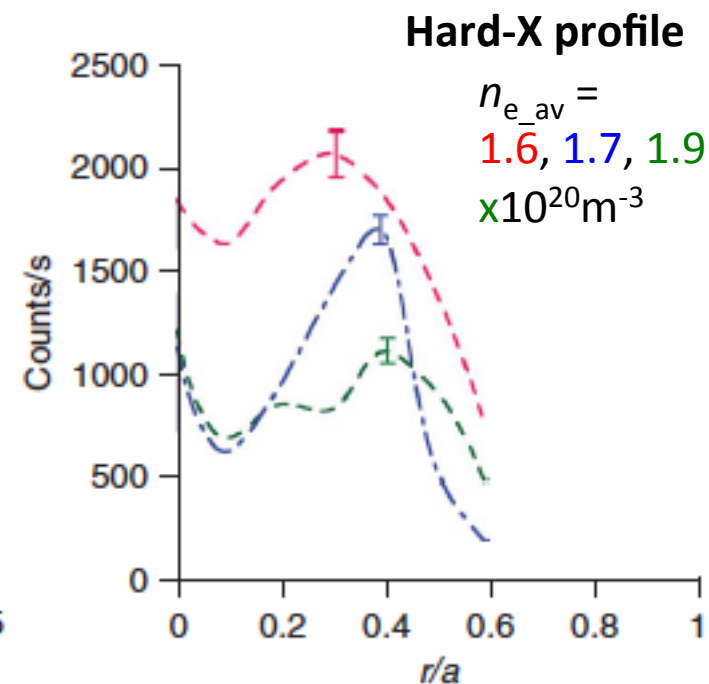
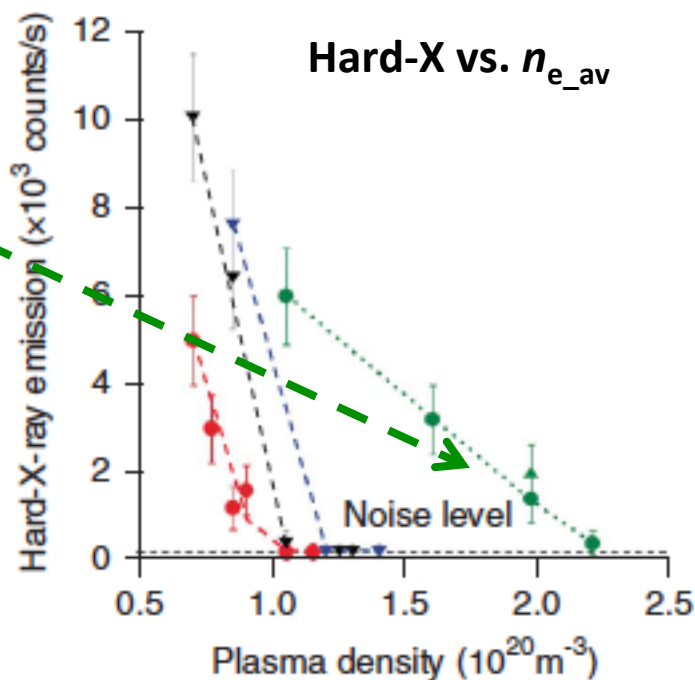


Lanciando spettri di antenna con opportuno larghezza in n_r , si riesce a determinare il profilo di corrente del reattore DEMO

Risultati di FTU confermano precedenti previsioni teoriche:

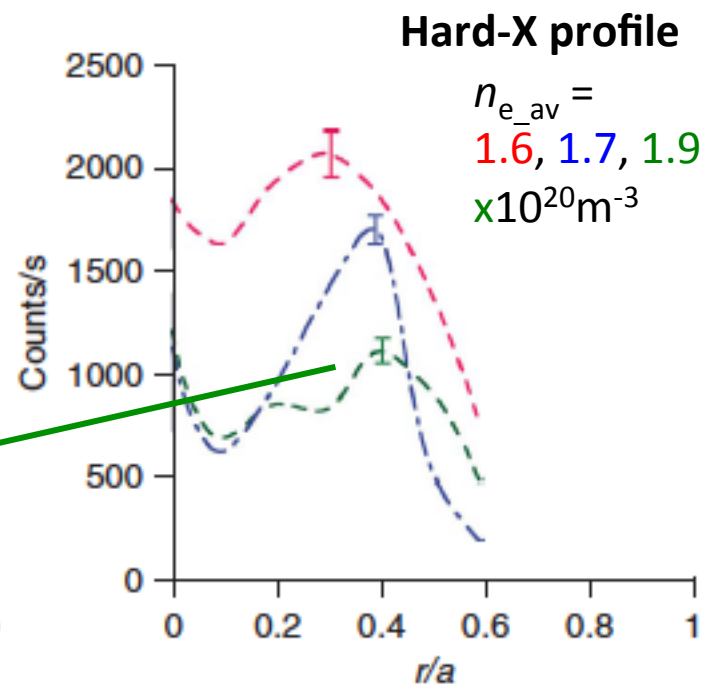
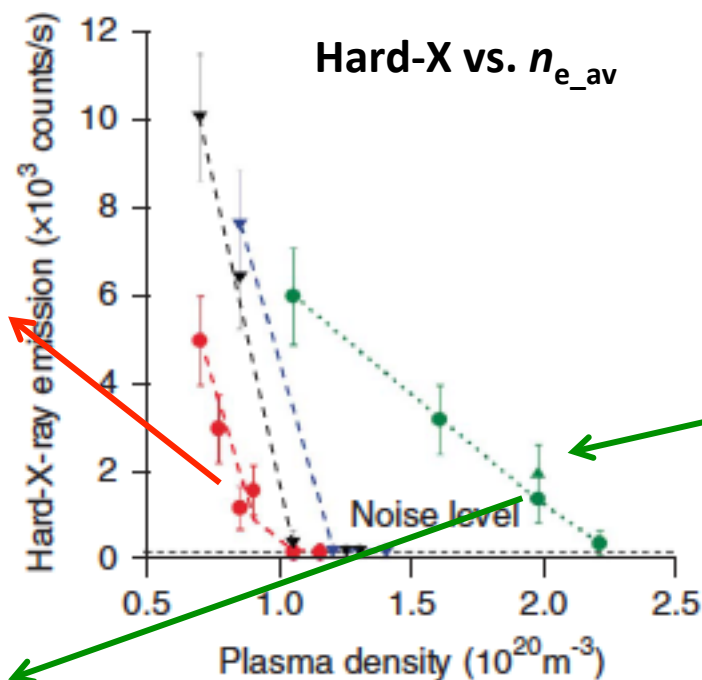
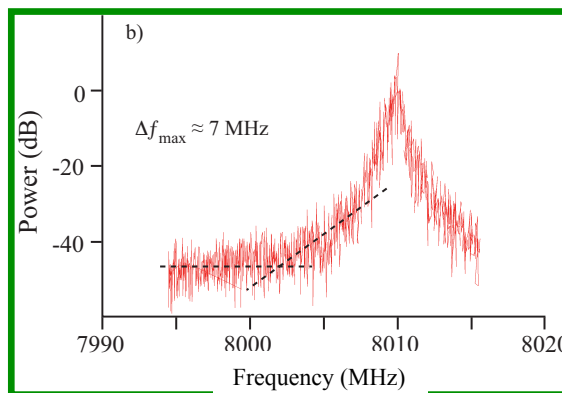
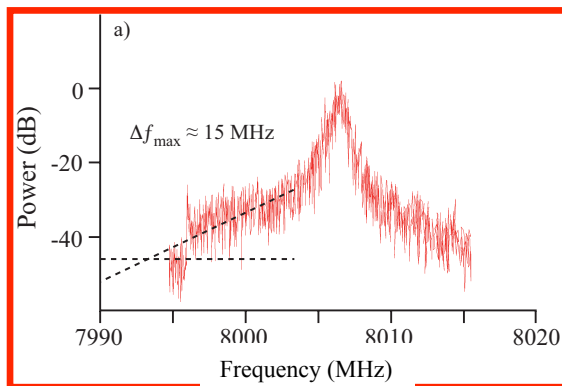
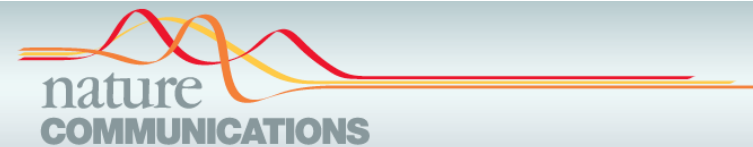
l'effetto LHCD viene prodotto per la prima volta alle alte densità che il reattore richiede anche alla periferia della colonna di plasma

R Cesario *et al.*, (2010) ncomms1052



Risultati di FTU

R Cesario *et al.*, (2010) ncomms1052



L'allargamento spettrale prodotto per effetti parassiti non lineari viene ridotto se si opera con più alte temperature di plasma di bordo

- Il reattore a fusione deve essere necessariamente dotato di un sistema di controllo del profilo di corrente di plasma
- ENEA-Frascati ha risolto i problemi di come far penetrare la potenza RF, utile a generare corrente, in condizioni di alti valori sia di densità, sia di temperatura che il reattore richiede anche alla periferia della colonna di plasma
- **L'utilizzo del concetto di lower hybrid current drive dovrebbe pertanto essere riconsiderato per ITER e DEMO**