



Study of three-dimensional Magnetic Reconnection Phenomena in the experiment PROTO-SPHERA

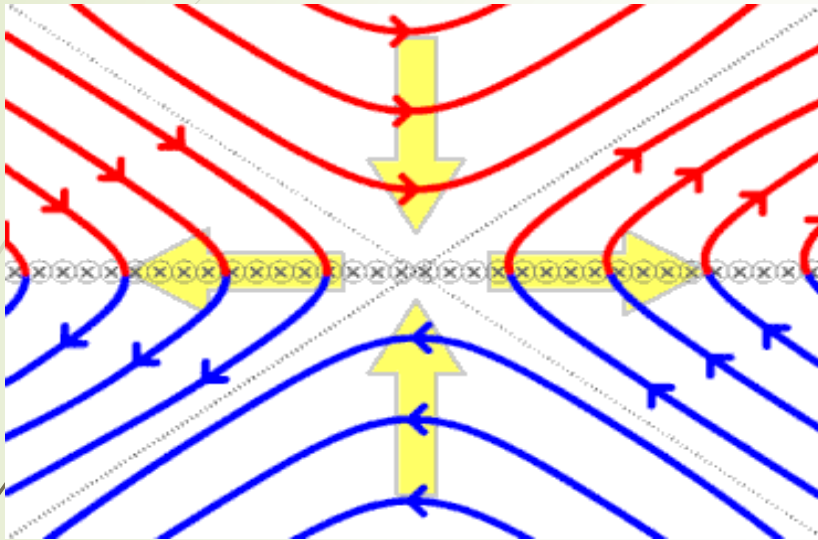
Corso di Laurea in Fisica
A.A. 2019/2020

Candidata:
Samanta Macera

Relatore:
Prof. Marco Tavani

Correlatore:
Dott. Franco Alladio

Riconnessione Magnetica



- Evoluzione ideale di un plasma (conduttività infinita):

$$\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = 0$$

↓
frozen-in

Elementi di plasma inizialmente connessi da una linea di campo magnetico rimangono connessi

- Si forma una regione di diffusione all'interno della quale la condizione di frozen-in può essere violata

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) = -\frac{\eta}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \vec{B}$$

→ $\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = \eta \vec{j}$

→ Effetti localizzati ma importanti

Riconnessione Magnetica

$$\tau_{\eta} = \frac{\mu_0 L^2}{\eta}$$



Tempo resistivo, molto lungo per plasmi caldi ed estesi.
Rappresenta la scala temporale entro cui il campo magnetico diffonde nel plasma.

$$\tau_A = \frac{L}{v_A}$$



Tempo dinamico (di Alfvén)

$$v_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho}}$$

$$S = \frac{\tau_{\eta}}{\tau_A}$$

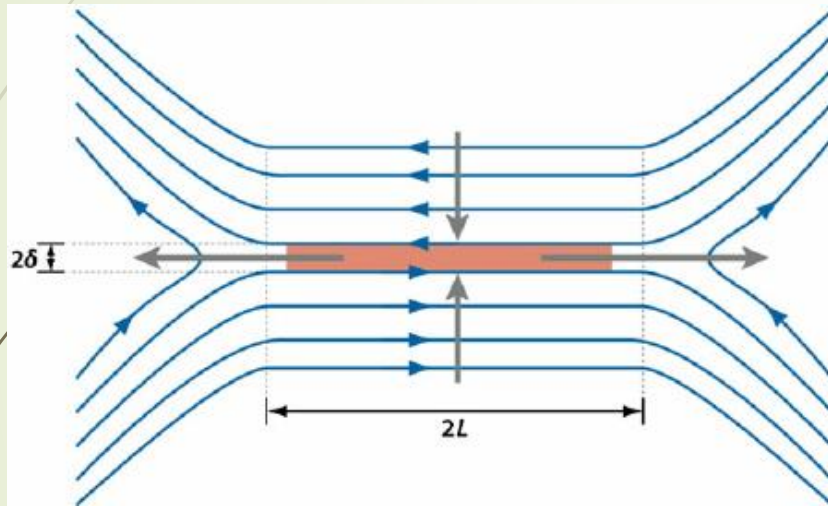


Numero di Lundquist, tipicamente grande (10^2 per esperimenti piccoli e ‘freddi’, 10^6 in macchine da fusione, 10^{12} nei flare solari)

$$\tau_{Rec} = \tau_A S^{\alpha}$$

Modello di Sweet-Parker: 2D, stato stazionario, incompressibile, collisionale

L'esponente α diminuisce verso $\frac{1}{2}$ se una dimensione della regione di diffusione collassa



- Outflow Alfvénico
- Velocità inflow $\sim V_A/S^{1/2}$

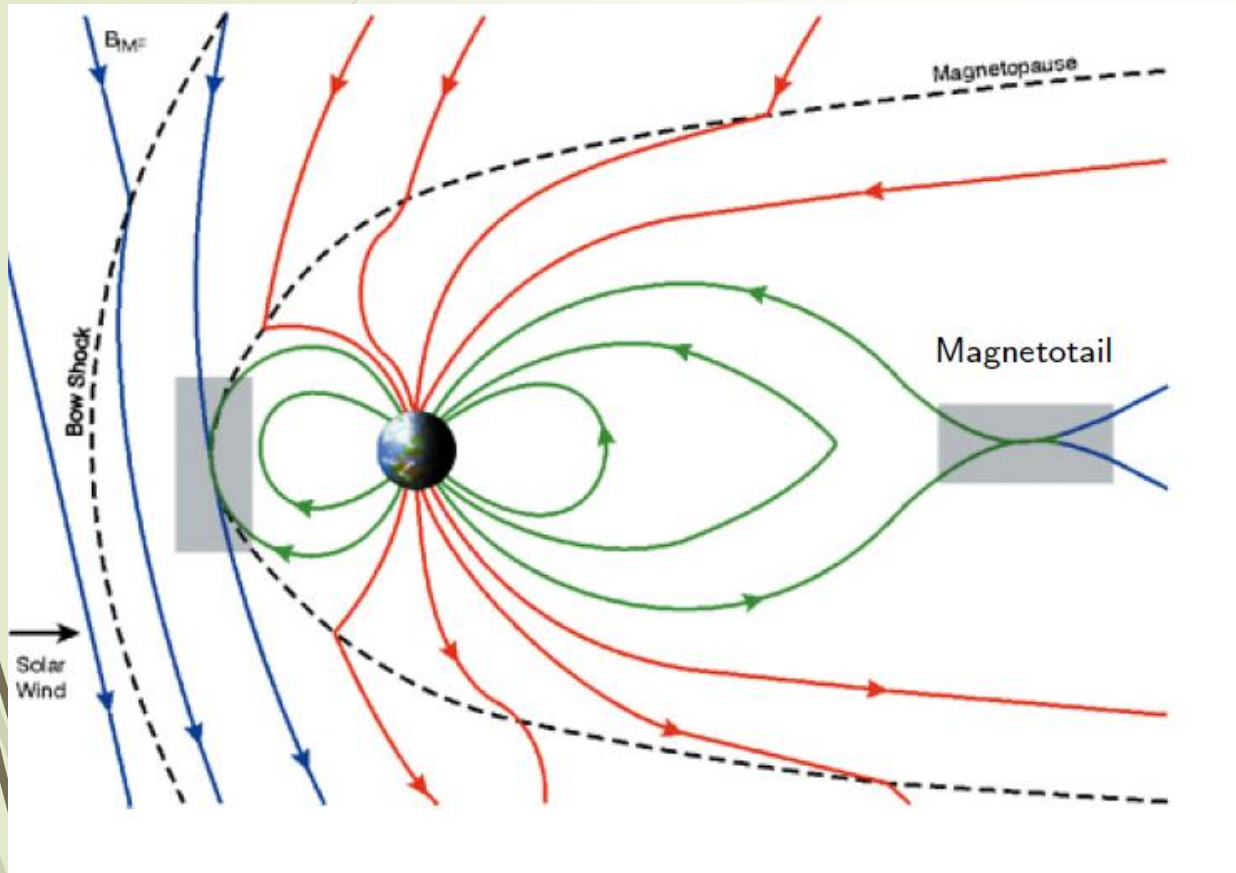
$$\tau_{SP} = \tau_A S^{1/2}$$

- Trigger problem
- Velocità di riconnessione troppo bassa
- Energia equidistribuita tra accelerazione di particelle ed energia interna del plasma
- Il sistema non è fisicamente realizzabile, current sheet instabile (*plasmoid instability*) per alti S

5/21

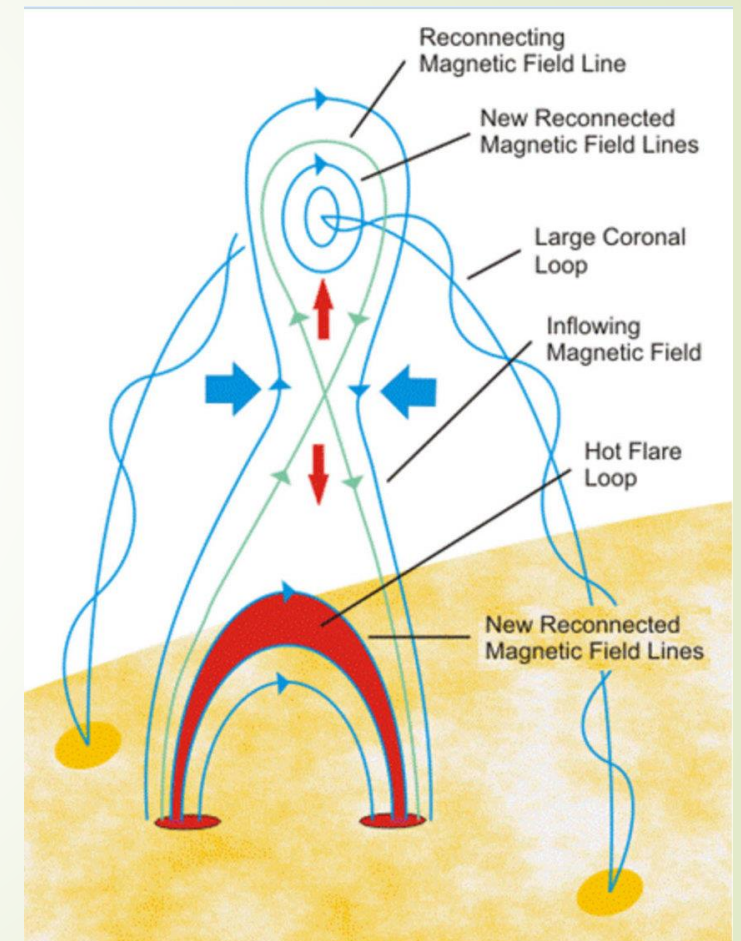
Riconnessione in plasmi spaziali

Magnetosfera



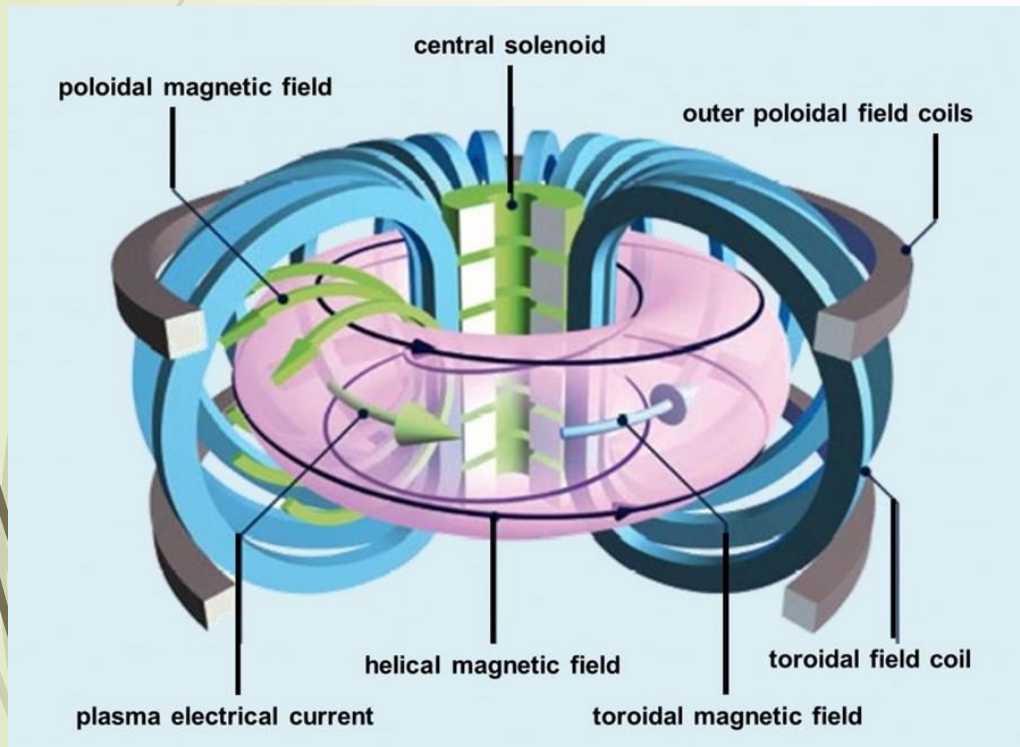
Riconnessione Collisionless

Brillamenti solari



Plasmi di Laboratorio

- Esperimenti di Fusione: configurazioni con simmetria assiale



Tokamak

Plasma confinato in un toro o in un toro sferico

Spheromak

TOKAMAK:

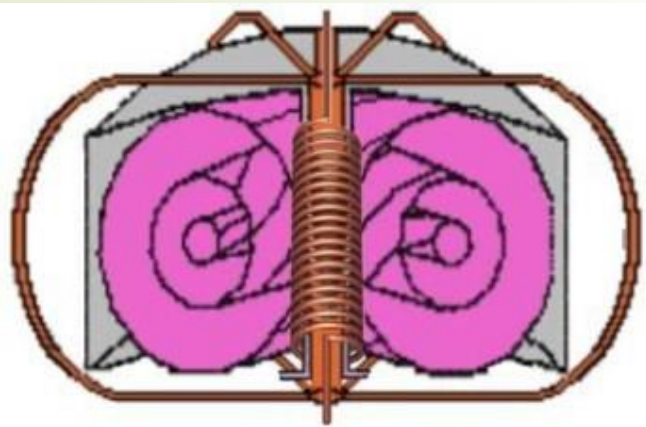
- Solenoide Centrale
- Camera da vuoto toroidale
- Composizione di tre campi magnetici: campo toroidale, campo poloidale e campo verticale
- Superfici magnetiche annidate, con linee di campo sulle superfici
- Le riconessioni rompono il confinamento

PROTO-SPHERA

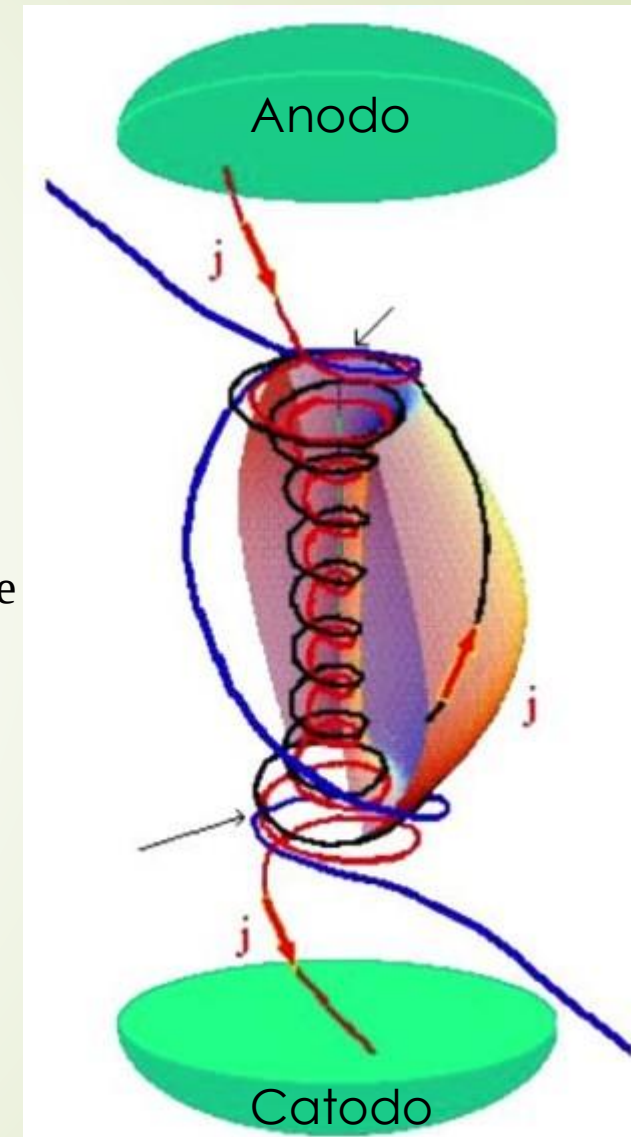
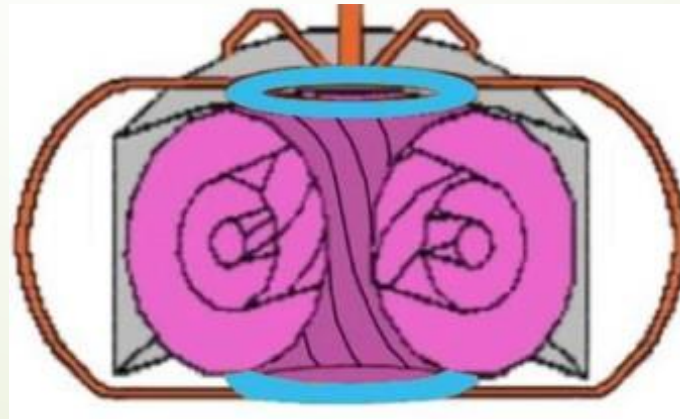
PROTOTYPE of a Spherical Plasma for HELicity Relaxation Assessment

- Configurazione semplicemente connessa
- Camera da vuoto cilindrica non conduttiva
- Toro sferico con superfici di flusso chiuse + 'Screw Pinch' alimentato da elettrodi
- Sfrutta le riconessioni per il confinamento: convertono le linee B e J aperte in linee B e J chiuse avvolte attorno al toroide sferico

Tokamak

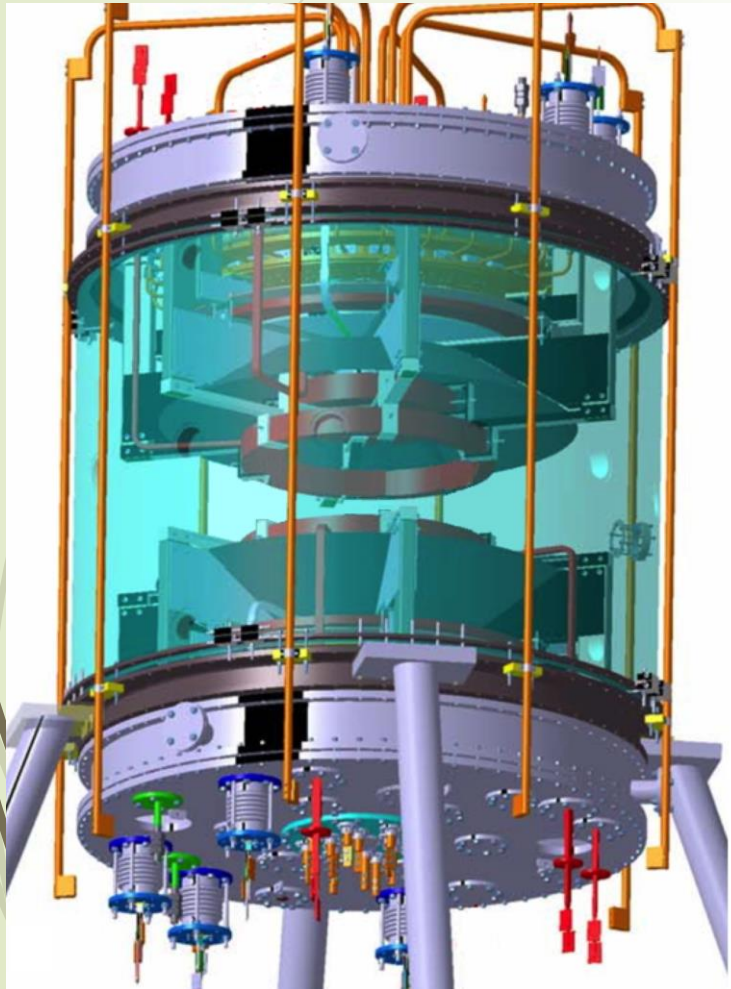


PROTO-SPHERA

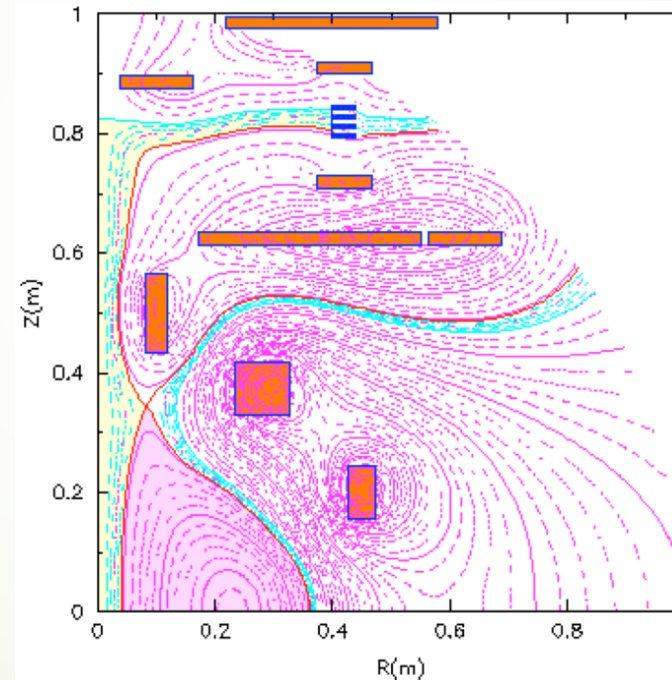


PROTO-SPHERA: Il ruolo delle riconnessioni magnetiche

- Formazione dei punti a X : campo nella colonna centrale è diretto verso l'alto, nella parte laterale è rivolto verso il basso



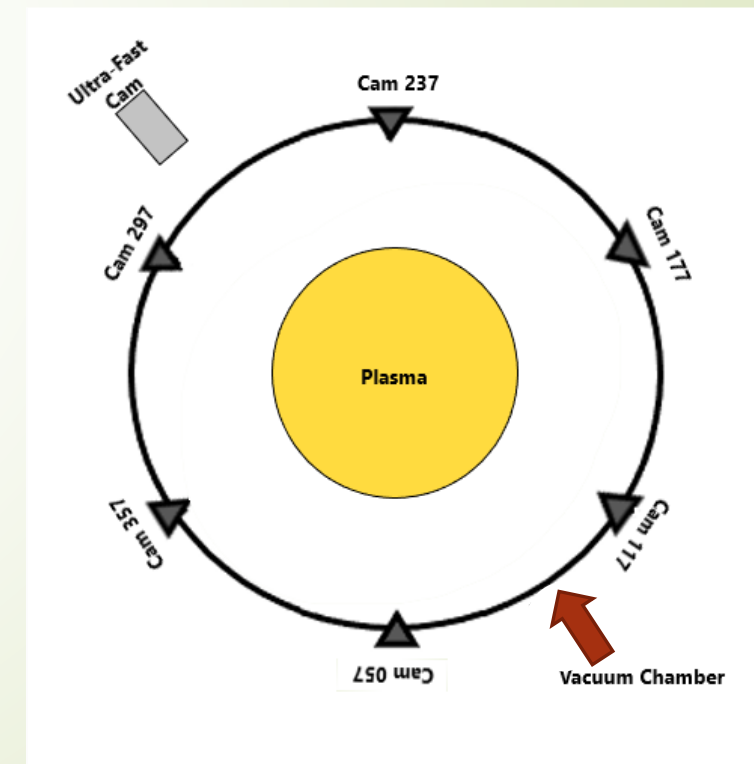
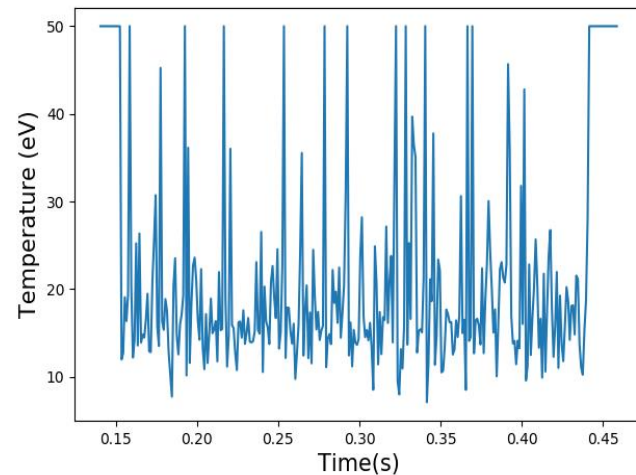
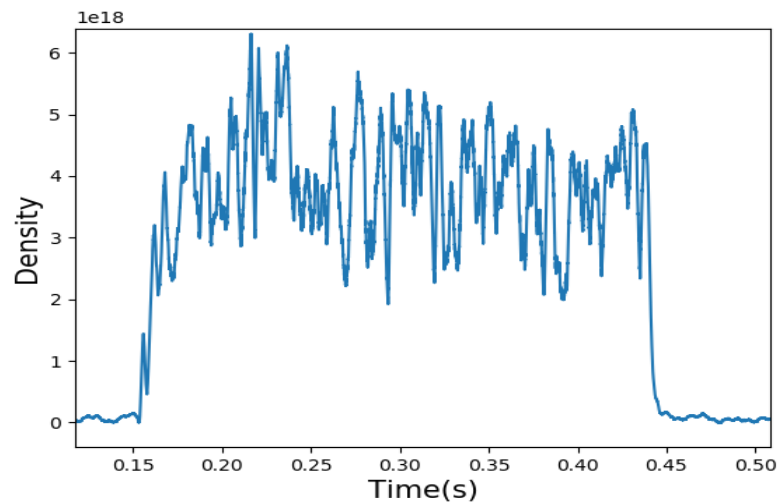
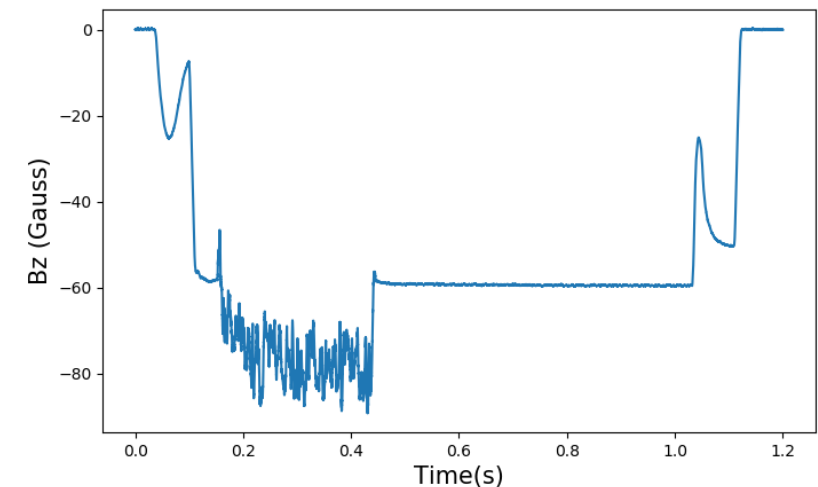
2,5 m



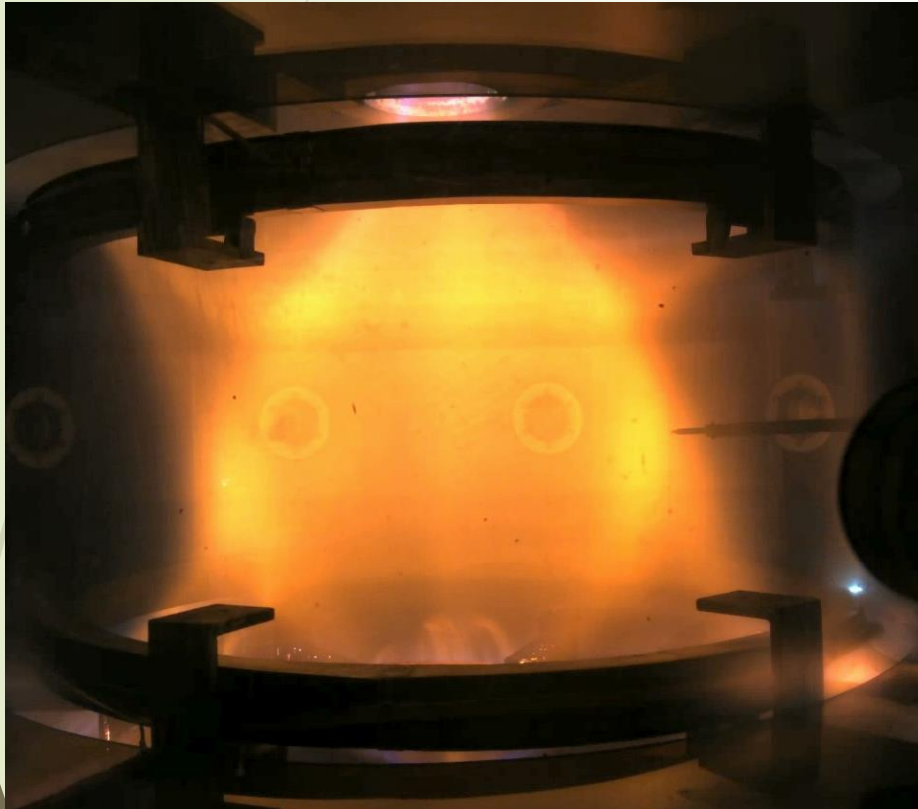
9/21

PROTO-SPHERA: Diagnostiche

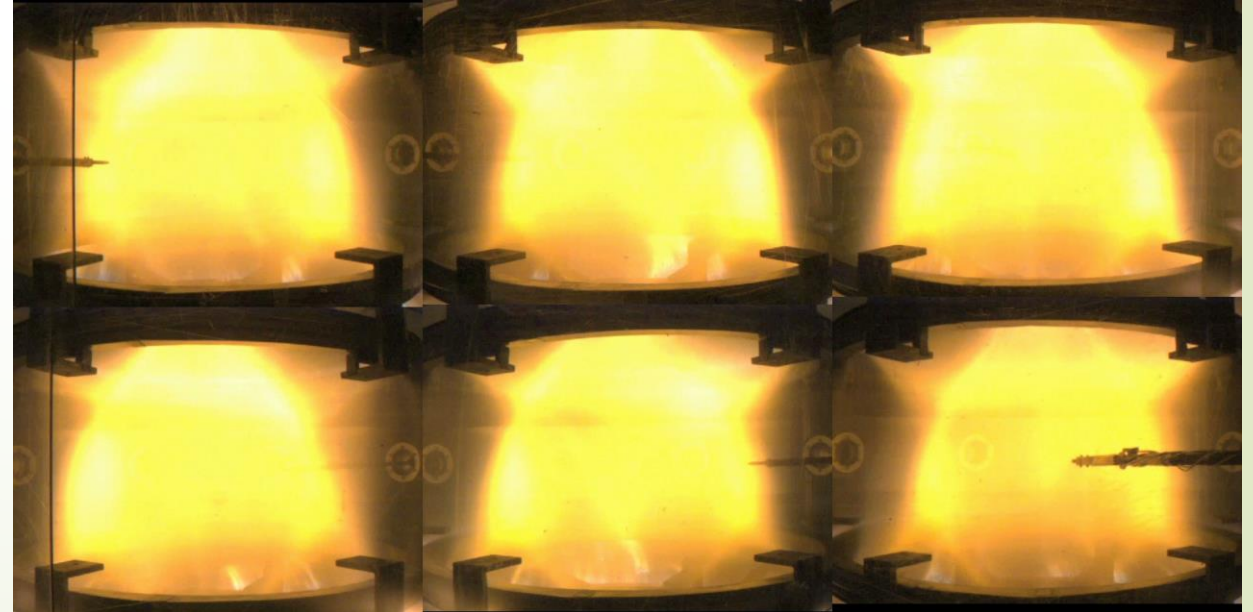
- Sonda Hall → Corrente Toroidale
- Sonda di Langmuir → Densità e Temperatura elettroniche
- Telecamere veloci → Brillanza, Diametro, posizione X-point



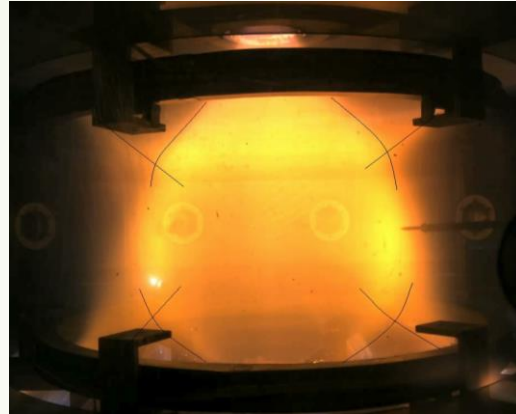
PROTO-SPHERA - evoluzione del plasma di Elio 2141



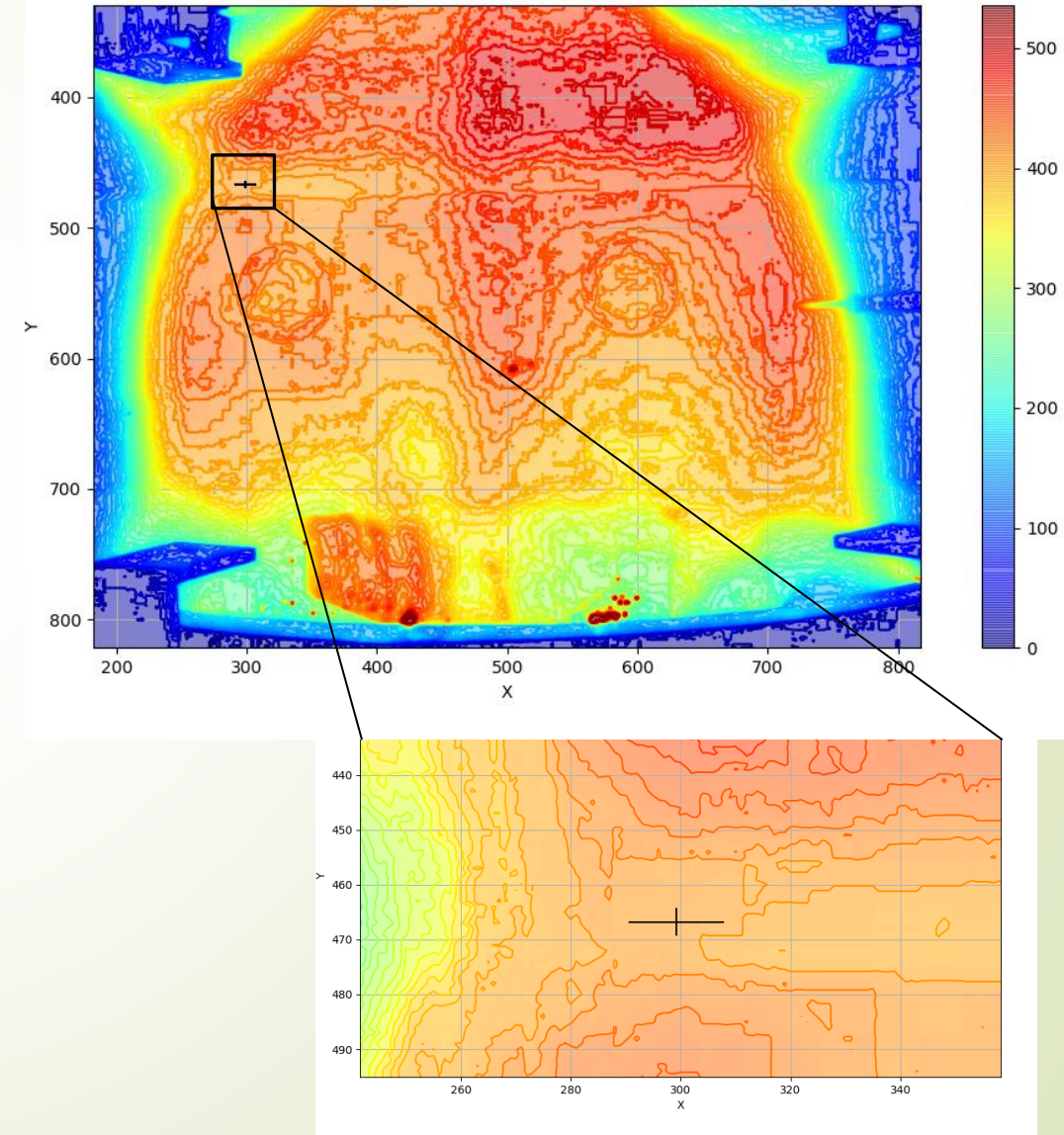
- Le riconessioni non possono essere assisimmetriche (teorema di Cowling)
- Il plasma ruota per effetto di $\vec{E} \times \vec{B}$
- Plasma spostato dal piano equatoriale

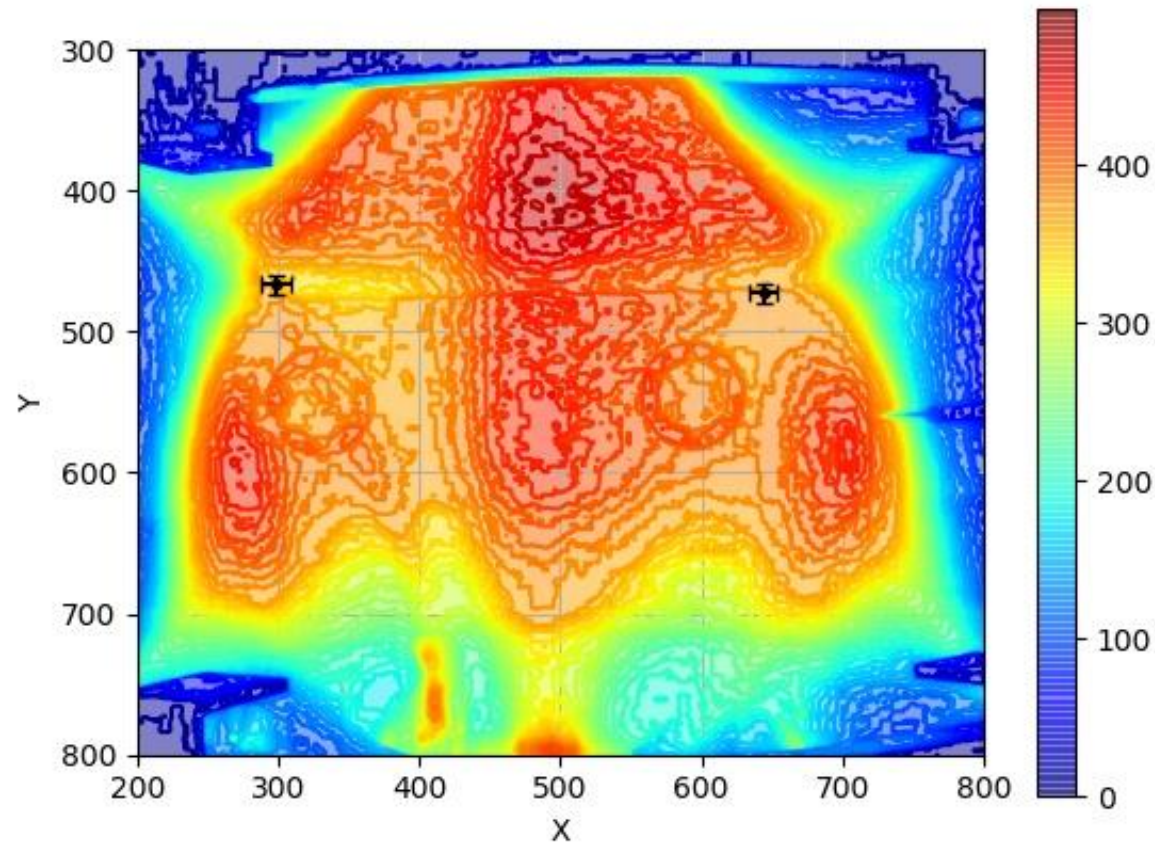


Telecamere : algoritmo per la ricostruzione della posizione dei punti a X

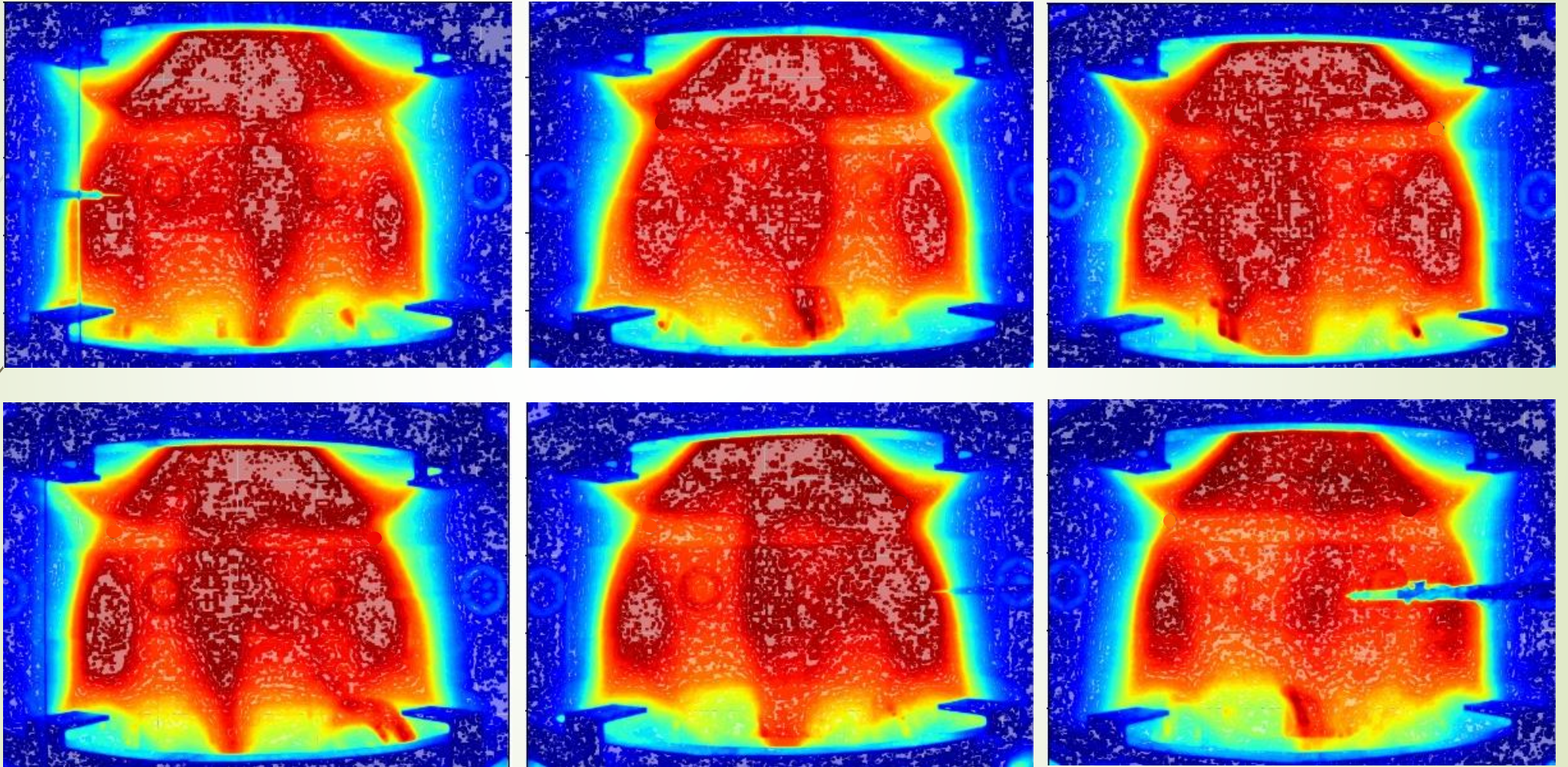


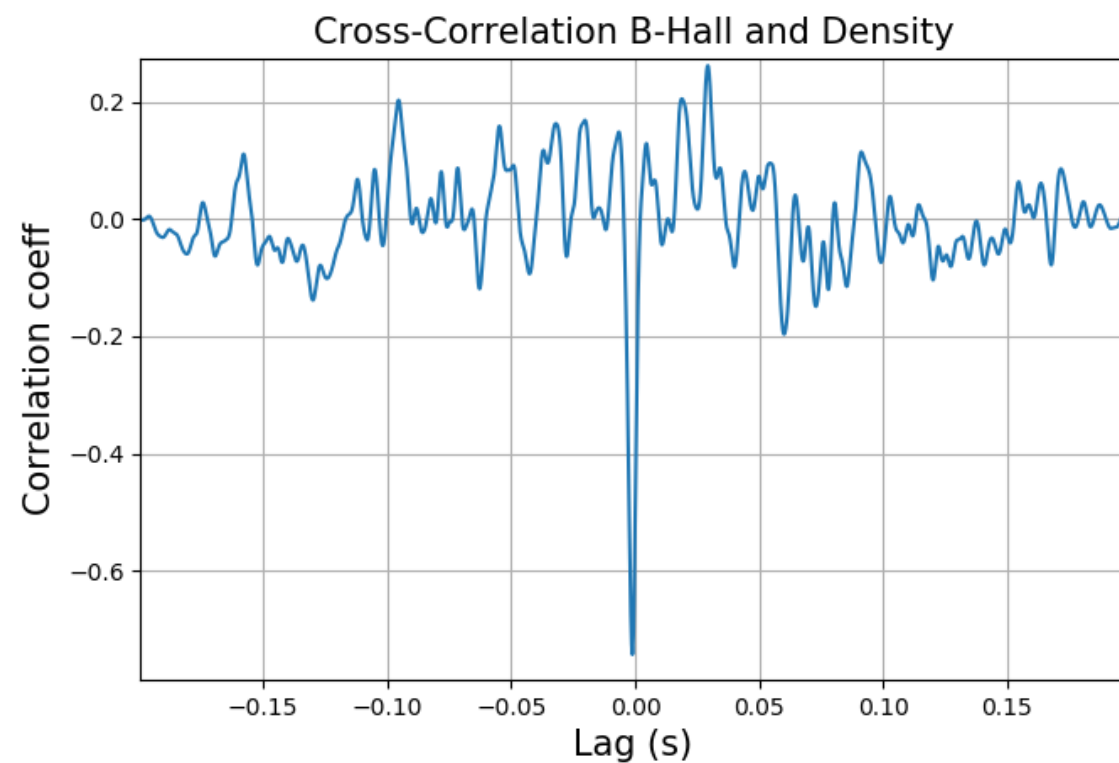
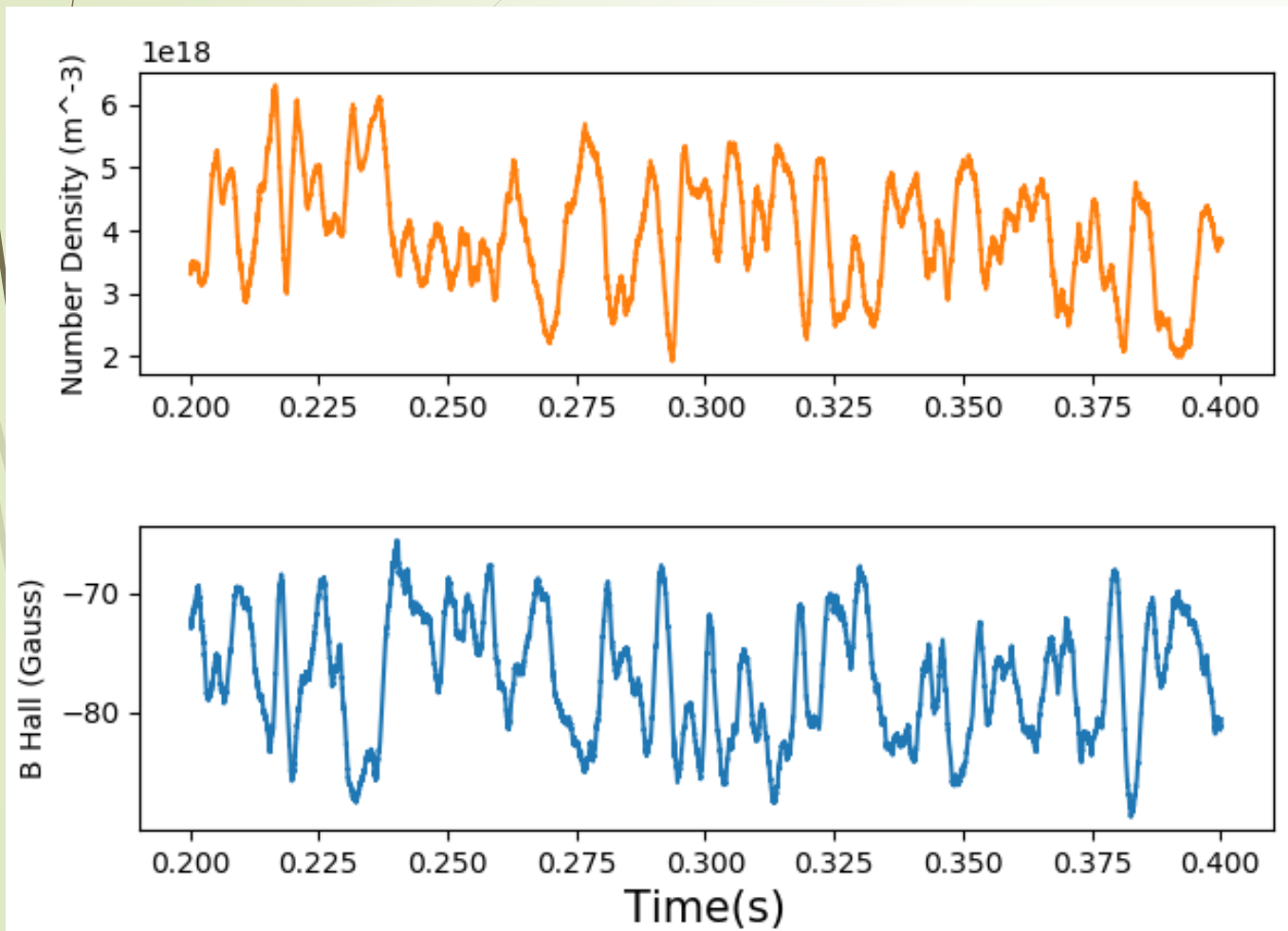
- Immagine filtrata (RGB: 100% R 86% G 25% B)
- Gradiente di brillantezza lungo X e lungo Y $\rightarrow$ Gradiente
- Ricerca dei minimi nelle zone intorno ai punti a X
- Punto medio dei minimi



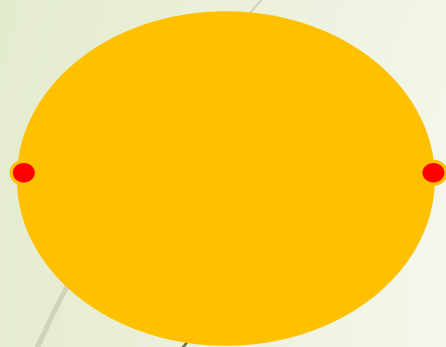


- Curve di brillantezza chiuse e annidate l'una dentro l'altra in prossimità del toro
- Oscillazione della posizione dei punti a X

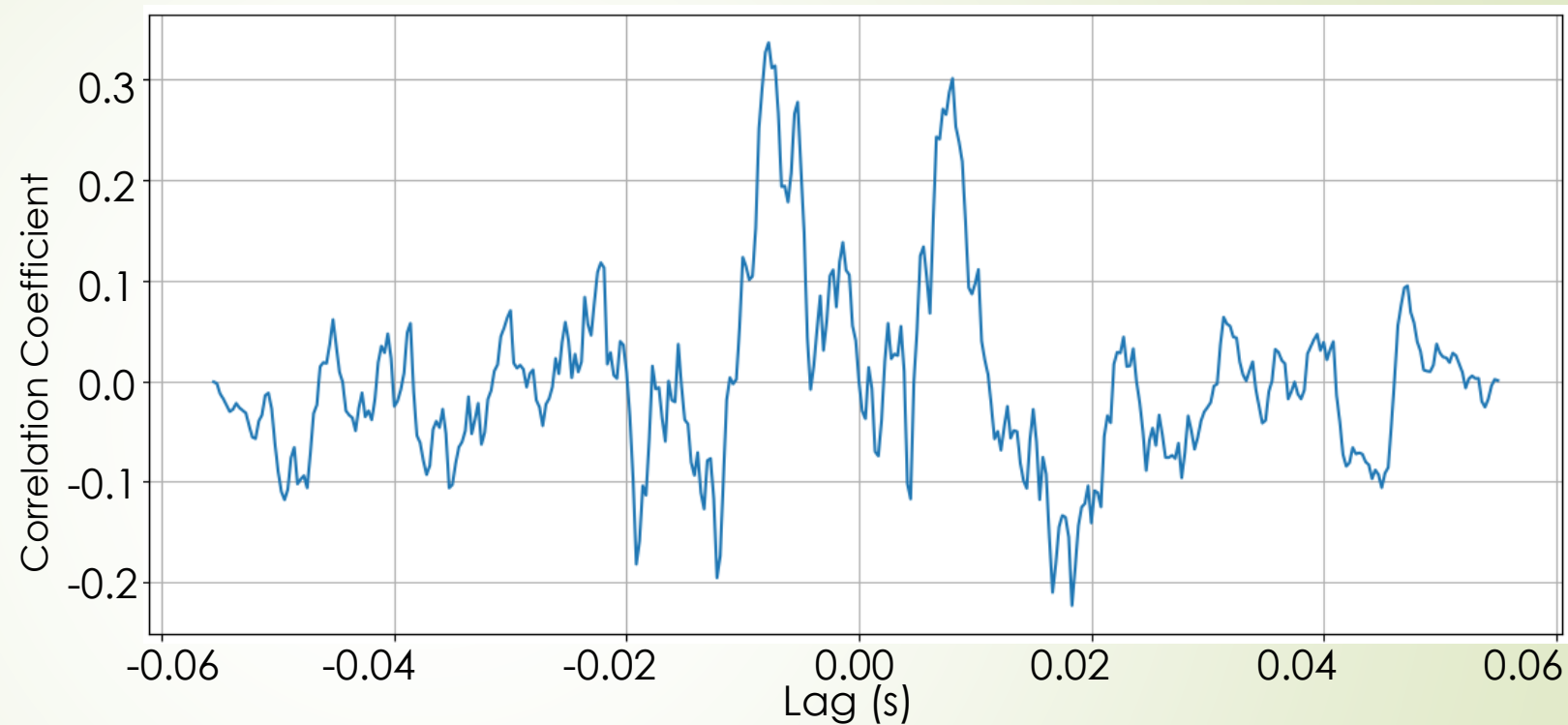




Cross-Correlazioni: Diametro e Brillanza (Camera Ultra-Fast)

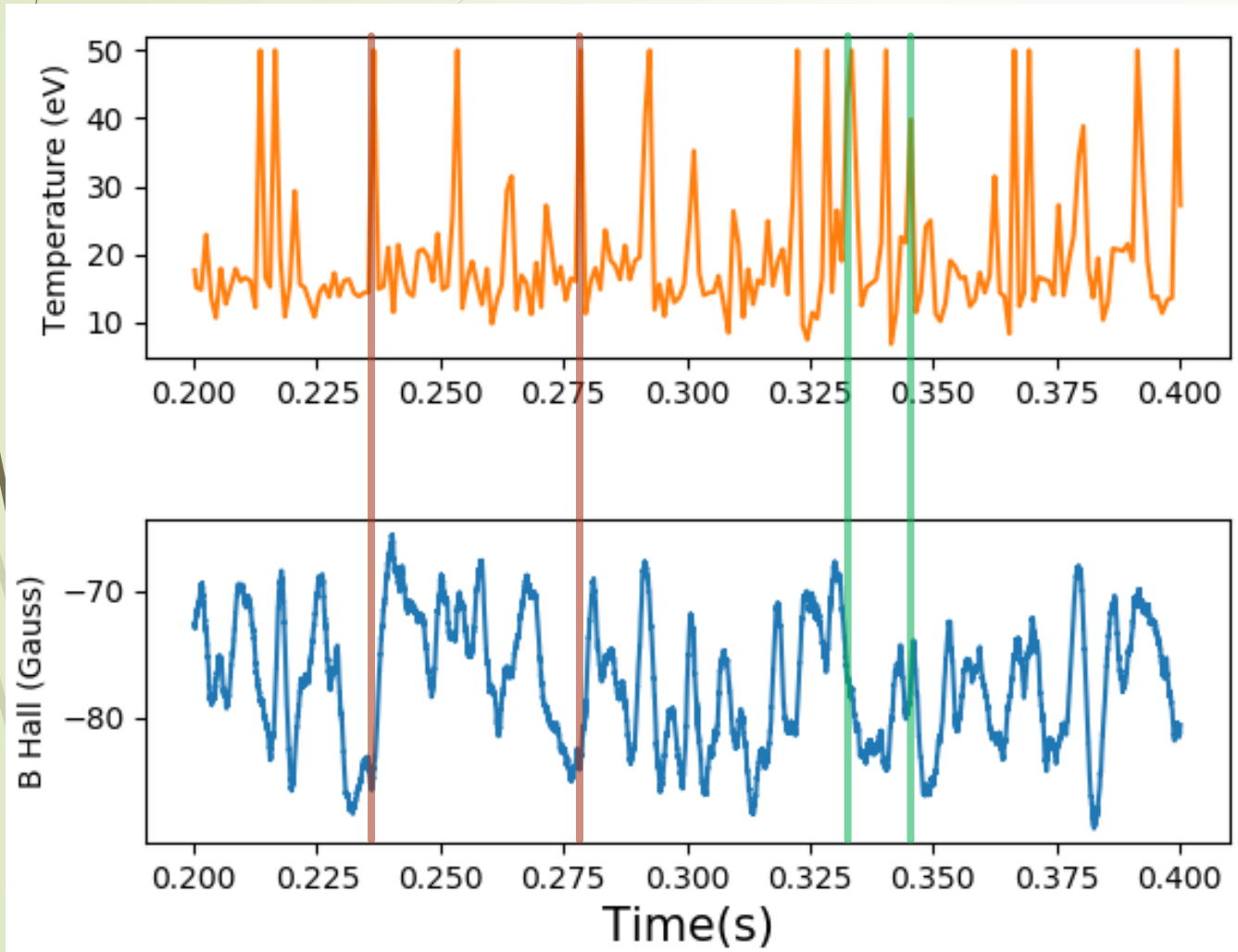


Camera



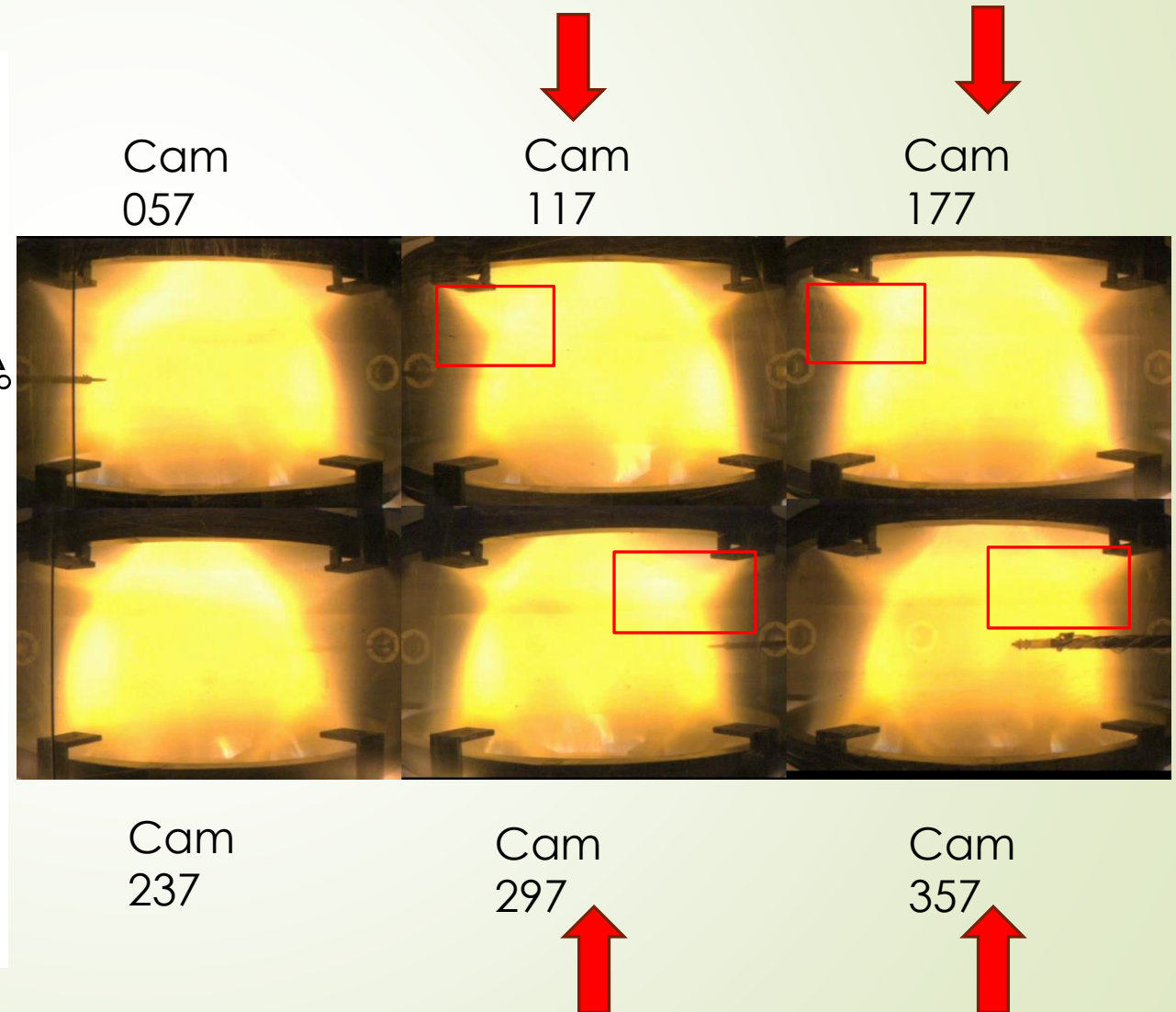
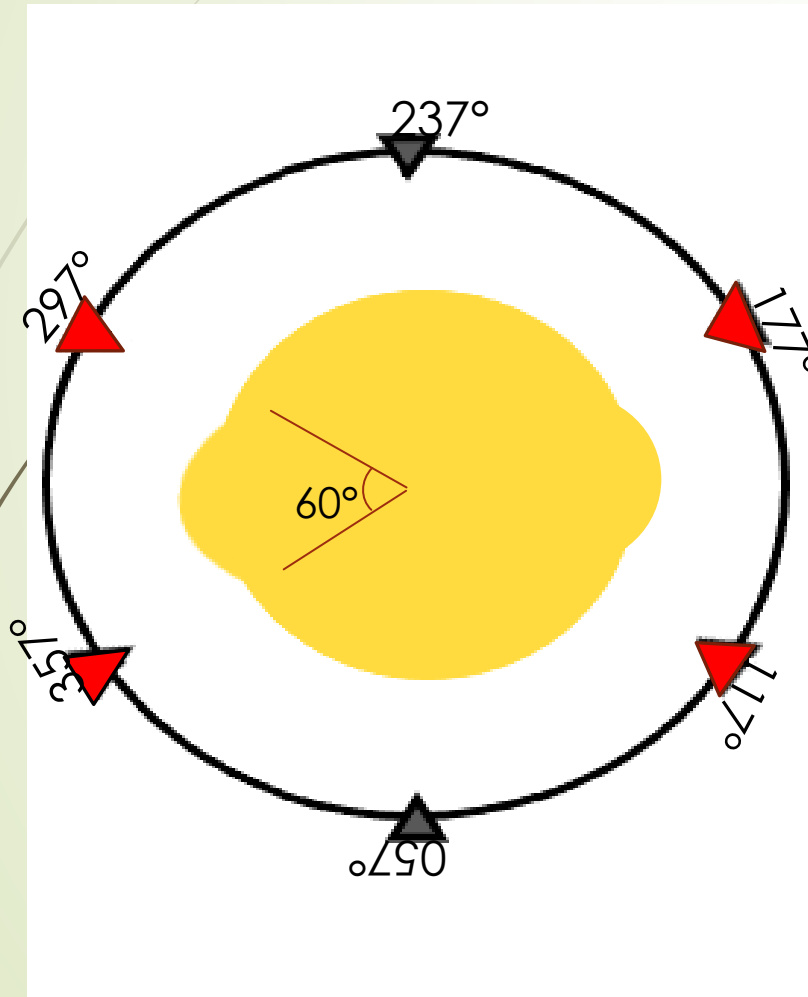
Correlazione tra i segnali con lag di circa 10 ms: potrebbe dipendere dal fatto che il plasma non è perfettamente sferico.

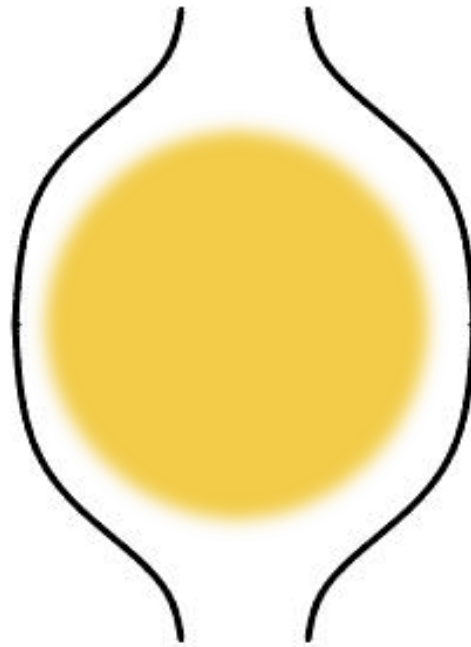
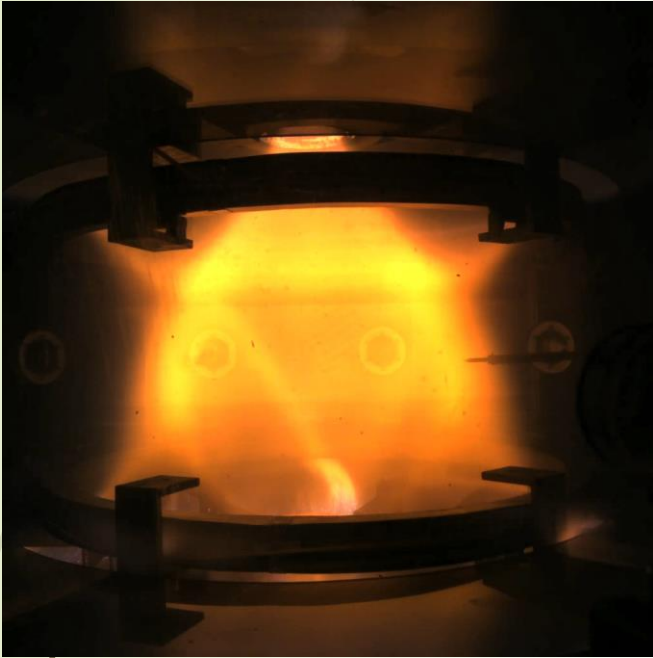
Corrente toroidale e temperatura



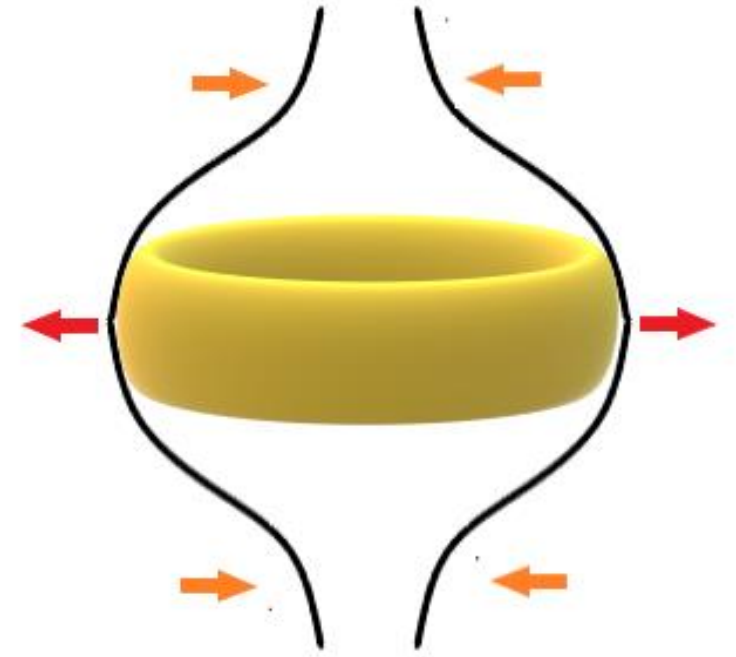
- La corrente toroidale stimata è di circa **5 kA** in presenza di una corrente di **10 kA** tra gli elettrodi
- Dalle oscillazioni di B si stima un'entrata di corrente di circa il 20% della corrente totale del toro, ovvero di circa **1 kA**
- Picchi di temperatura (rispetto alla temperatura media di circa **20 eV**) corrispondono a rapidi **aumenti** o **diminuzioni** di campo magnetico.
 - Le riconessioni portano la corrente sia dentro che fuori dal toro.

Corrente toroidale e temperatura





- Meno denso
- Diametro minore
- Distanza orizzontale e verticale X-point più grande



Entrata di corrente = Riconnessione

- Più denso
- Diametro maggiore
- Distanza orizzontale e verticale X-point più piccola

Tempi osservati vs Tempi Sweet-Parker

$$\left. \begin{array}{l} \tau_A \approx 0.1 \text{ ms} \\ \tau_\eta \approx 3 \text{ ms} \end{array} \right\} S = 30 \longrightarrow \tau_{SP} = 0,5 \text{ ms}$$

Tempi di ripetizione osservati $\approx 10 \text{ ms}$



Non stiamo osservando i singoli eventi di riconnessione, ma l'effetto globale delle riconnessioni

I segnali analizzati (campo magnetico, densità e temperatura) sono filtrati. Il segnale della sonda Hall è mediato a 1 ms, al di sotto del millisecondo l'informazione si perde nel rumore.

Conclusioni

- La 'respirazione' del plasma è dovuta ai fenomeni di riconnessione magnetica: ogni volta che c'è un'entrata di corrente il toro si 'stabilizza'.
- Le riconnessioni iniettano corrente dentro e fuori dal toro: si crea così un equilibrio dinamico nel plasma, con una predominanza delle entrate di corrente.
- I fenomeni di riconnessione sembrano essere localizzati in una zona che si estende intorno al punto a X per circa 60° in direzione toroidale (azimuth).

Conclusioni

- Con le diagnostiche attuali non possiamo risolvere i singoli eventi di riconnessione.
- Diagnostiche soft X-ray potrebbero confermare se i picchi di temperatura corrispondono ad un'entrata nel toro di particelle non termiche prodotte dalle riconnessioni.

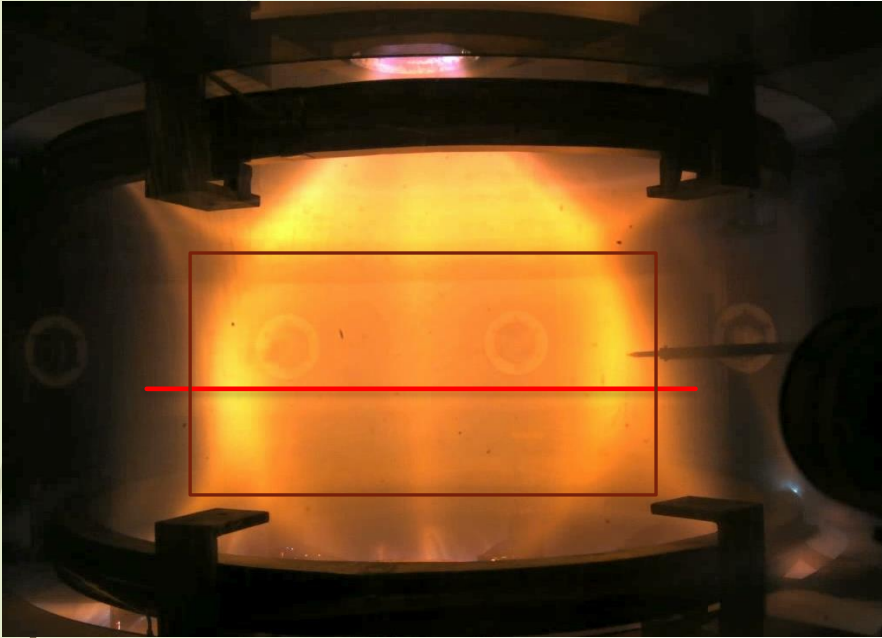
Articoli in preparazione:

- Caratterizzazione del plasma di PROTO-SPHERA tramite diagnostiche ottiche
- Misure di particelle non termiche prodotte dalle riconnessioni magnetiche in PROTO-SPHERA con diagnostiche soft X-ray

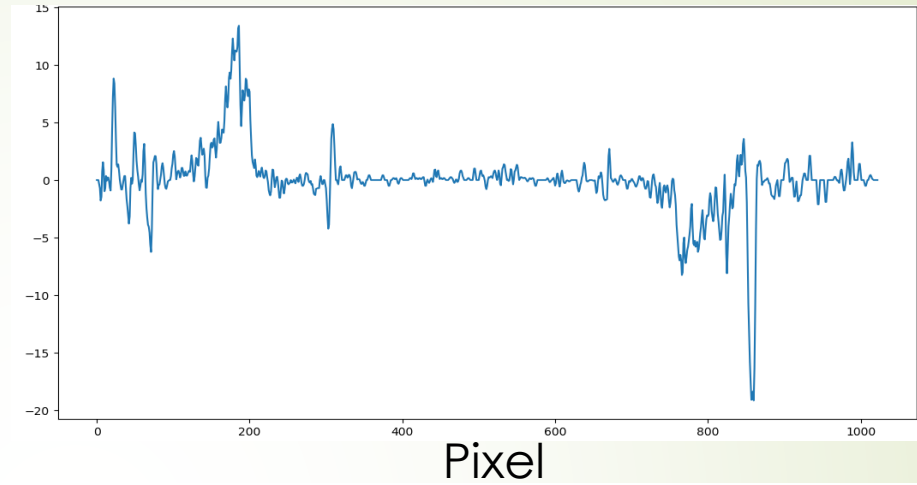
*Grazie per
l'attenzione*

The background features several thin, light green lines. One line is a long, shallow curve starting from the top center and extending towards the right edge. Another line is a steeper curve starting from the top right and extending towards the bottom right. A third line is a straight vertical line located to the right of the text.

Telecamere

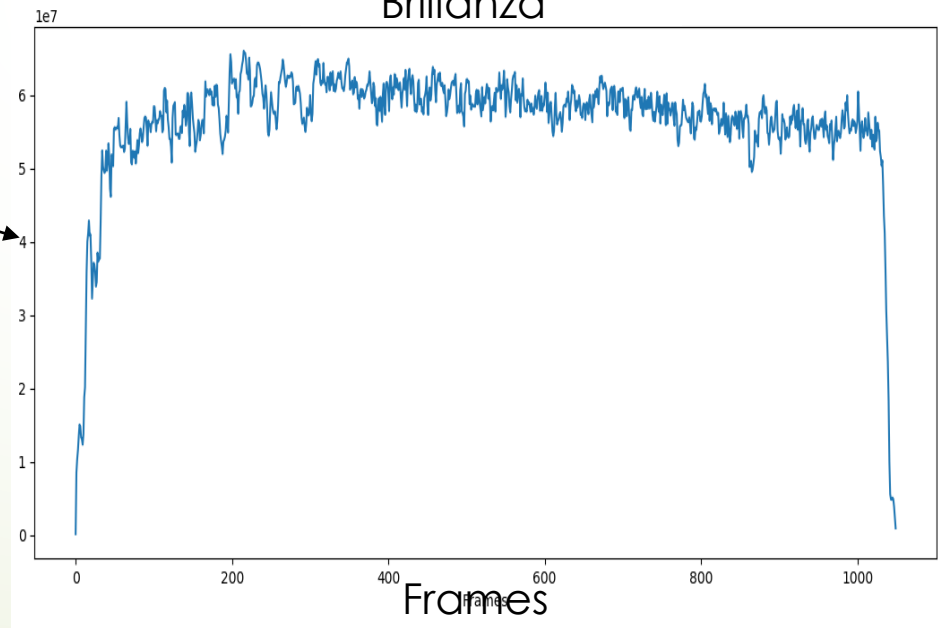


Gradiente della brillantezza equatoriale



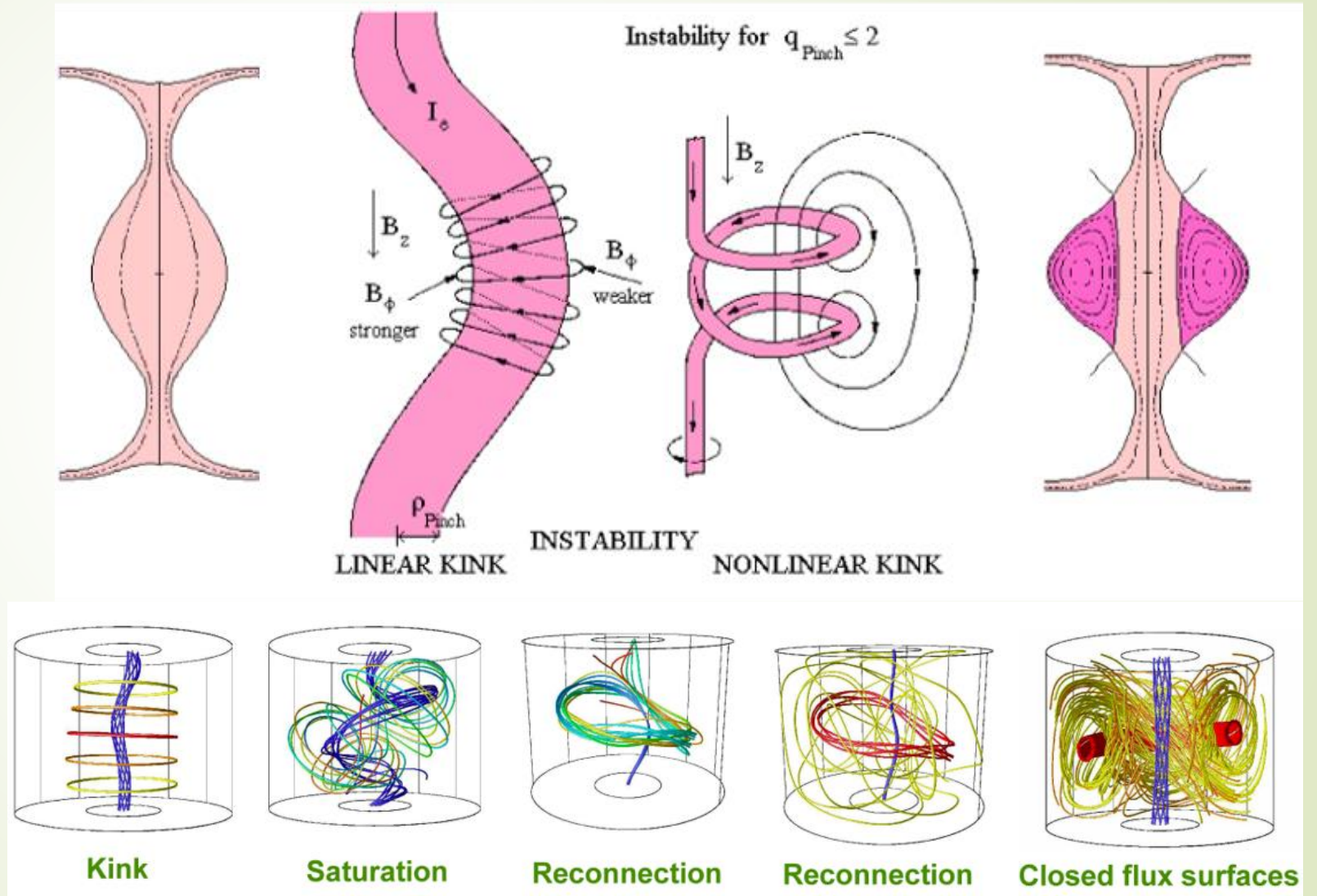
➔ Diametro

Brillanza



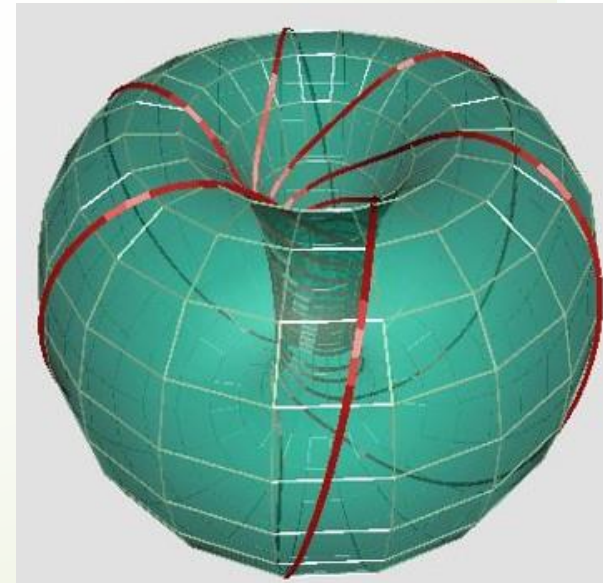
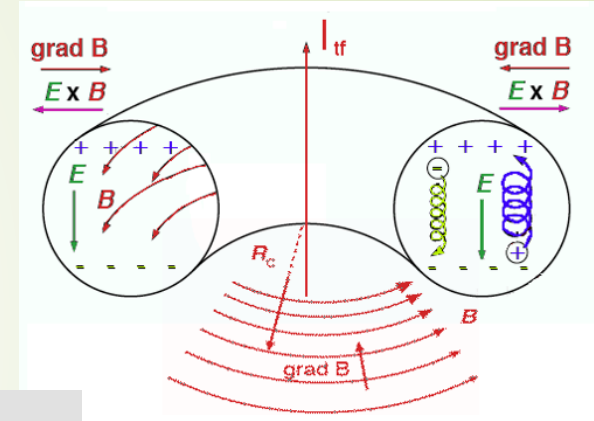
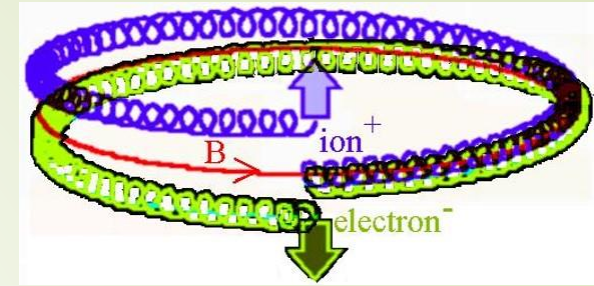
PROTO-SPHERA: Dallo Screw Pinch (SP) al Toro Sferico (ST)

1. Produzione della colonna di plasma
2. Instabilità di Kink lineare
3. Instabilità di kink non lineare
4. Riconnessioni Magnetiche
5. Formazione del toro sferico

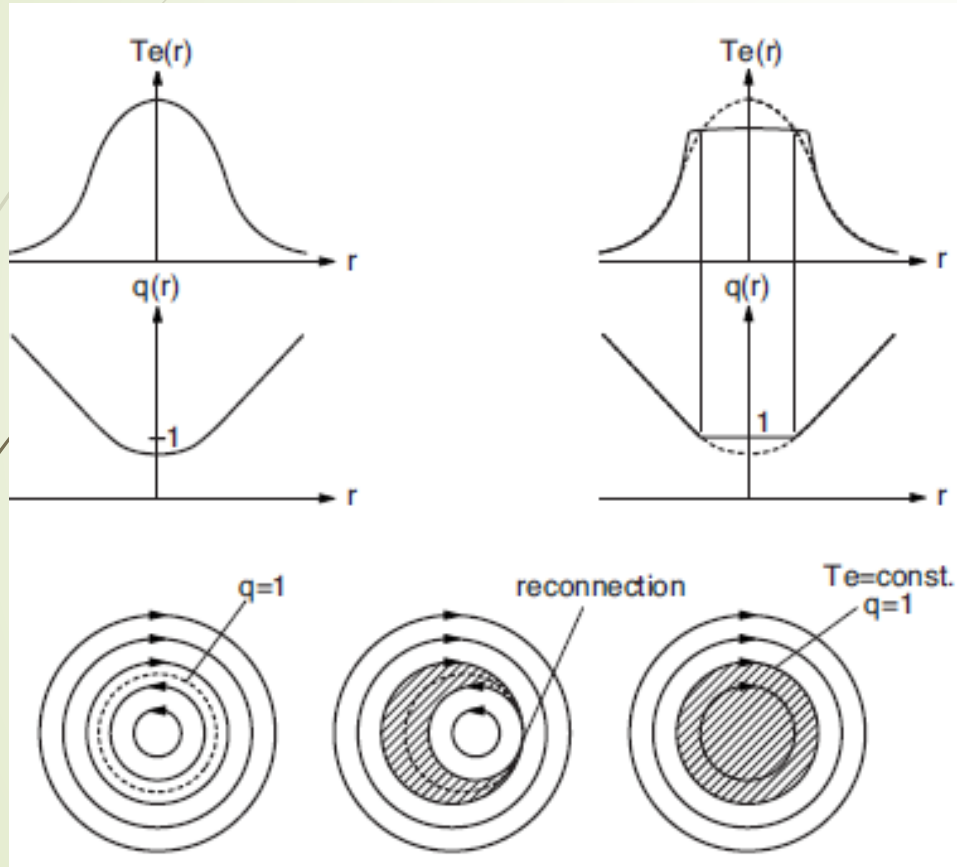


Perché il toro sferico?

- Linee di forza chiuse implicano dei moti di deriva
- La curvatura delle linee di B su una superficie ha due componenti: curvatura della superficie e la curvatura geodesica
- Se le linee di campo sono tutte geodesiche delle superfici magnetiche, tutte le derive sarebbero comprese nella superficie magnetica stessa
- Se la curvatura geodesica è nulla, il campo è costante sulle superfici magnetiche
- Il toro sferico minimizza la curvatura delle geodesiche



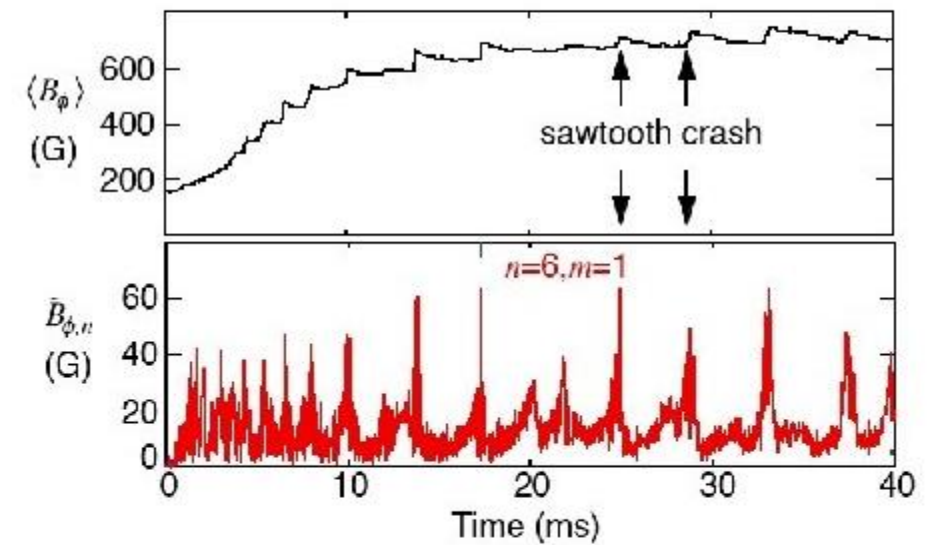
Sawtooth Oscillations



UNIVERSITY of NEW HAMPSHIRE

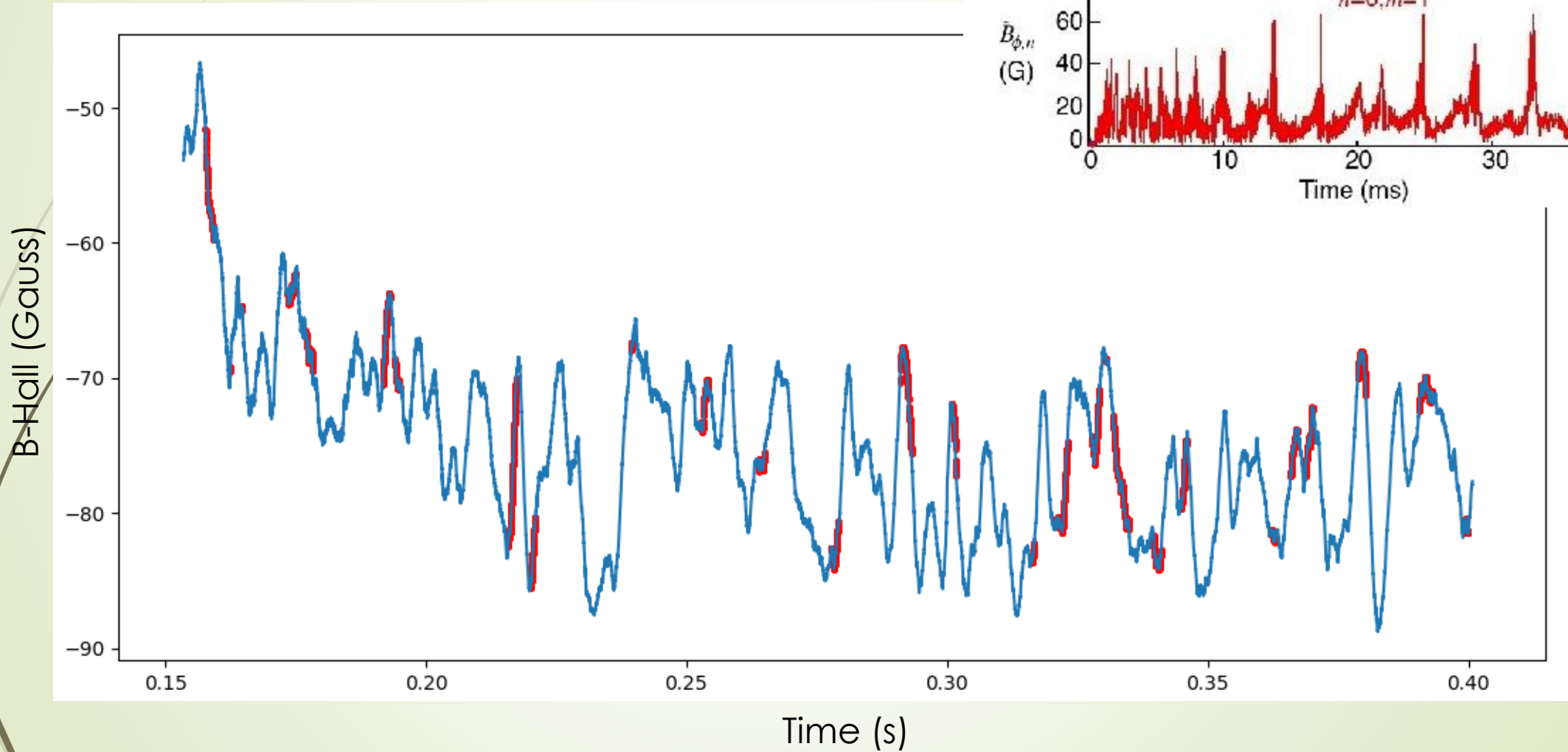
Sawtooth events in MST

Magnetic reconnection events where mean fields are generated are accompanied by increases in magnetic fluctuations



[Almagri and the MST group 2003]

Corrente toroidale e temperatura

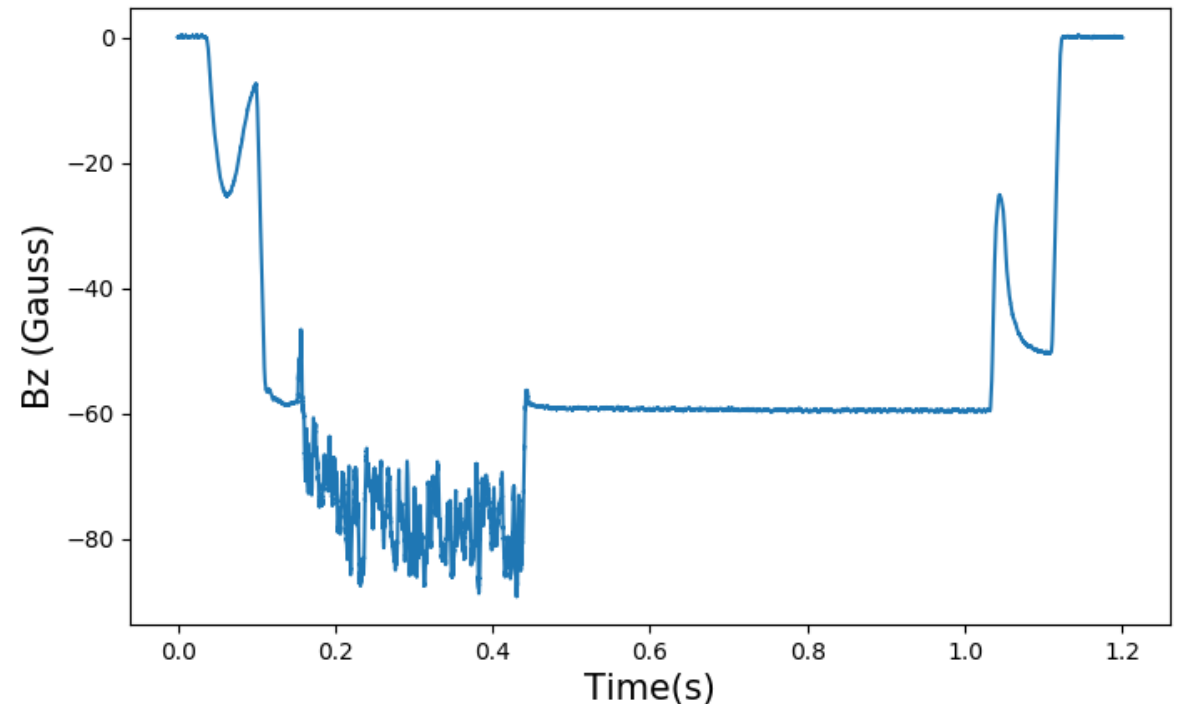


Sonda di Hall

- Misura il campo magnetico verticale di Hall sul bordo del plasma
- Un abbassamento del campo indica un'entrata di corrente
- Frequenza di campionamento a 250 kHz
- Il campo misurato oscilla intorno a 80 Gauss



Corrente toroidale (nel bordo esterno) di circa 5 kA con una corrente tra gli elettrodi di circa 10 kA

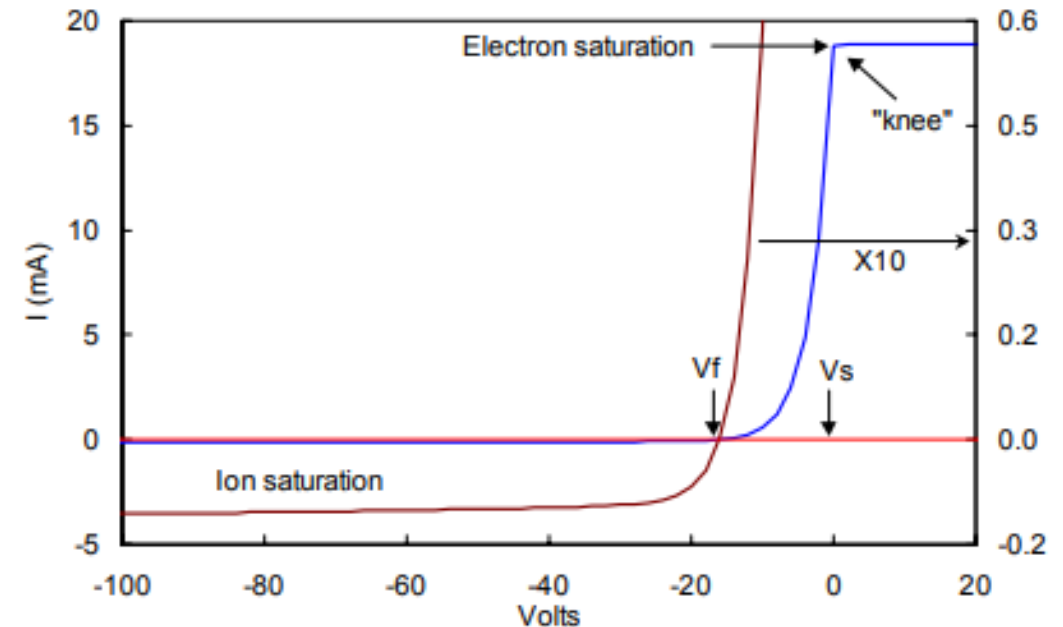


Sonda di Langmuir

- La sonda è costituita da un filo di tungsteno posto in un plasma che raccoglie corrente e tensione.
- Il filo è collegato a un alimentatore che applica una tensione tra la sonda e la camera. La misura si basa sulla caratteristica I-V della guaina Debye.
- Il fit dei dati ottenuti viene fatto con una curva esponenziale

$$I = I_{max} \left(-1 + e^{q_e(V-V_f)/(k_B T)} \right)$$

Nel caso di PROTO-SPHERA abbiamo una 'doppia sonda', polarizzata con una tensione relativa tra i due elettrodi



Fit con tangente iperbolica:

$$I = I_{max} \tanh \left(\frac{1}{2} \frac{q_e V_{bias}}{k_B T_e} \right)$$

$$V_{bias} = V_2 - V_1$$

Sonda di Langmuir

- Misura della densità e della temperatura tramite polarizzazione sinusoidale e continua
- Acquisizione a circa 250 kHz
- Picchi di temperatura non corrispondono a errori del sistema di acquisizione → vere fluttuazioni del plasma (dovute allo spostamento del plasma, a entrata di particelle non termiche o altri fenomeni)

