

EPFL

Swiss Plasma Center

Powering the future with
fusion research, today



The Trapped Electrons eXperiment (T-REX)



Dr. Francesco Romano

**P. Giroud-Garampon, J. Loizu, M. Noël,
S. Antonloni, J. Genoud, D. Mykytchuk,
J.-P. Hogge, M. Podestà, T. Goodman**

École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Swiss
Plasma Center (SPC), Lausanne, Switzerland



1° Conferenza Italiana sui Plasm (CIP)
3-6 Febbraio 2026 • ENEA Frascati, Italia

**1° Conferenza
Italiana Plasm**

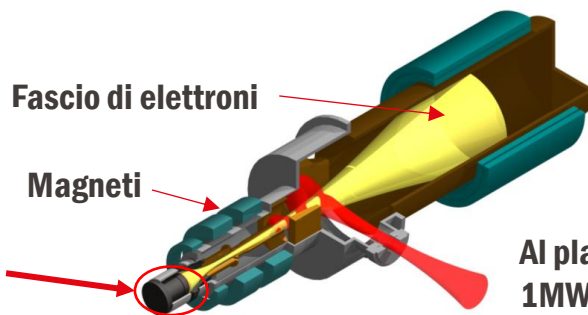
- Ho lavorato per anni all'università di Stoccarda su propulsione al plasma tipo helicon, tipo air-breathing e antenne risonanti tipo birdcage. Dal 2021 sono a EPFL-SPC per costruire e sperimentare con T-REX
- Girotroni, fusione, plasmi non-neutri
- Il TRapped Electrons eXperiment (T-REX) e il codice FENNECS
- Esperimenti e simulazioni di nubi di elettroni intrappolati
- Cosa abbiamo misurato e scoperto?
- Lavori futuri

Cosa sono i girotroni e i plasmi non-neutri?

- **Girotroni:** sorgenti di microonde (MW) per riscaldare plasmi di fusione a confinamento magnetico
 - 24-80 girotroni per ITER, 130 MW di potenza-girotronica per DEMO
 - Fascio di elettroni magnetizzati interagisce con una cavità risonante generando un fascio di microonde
- Il cannone a iniezione magnetronica (**MIG**): la sezione (di un girotrone) in cui il fascio di elettroni principale viene creato e accelerato
 - Ambiente in grado di intrappolare elettroni che non appartengono al fascio principale: **plasma non-neutro**
- **Elettroni intrappolati** possono portare a tenute in tensione instabili, archi elettrici, danni e fusioni localizzate.
 - Oggi: geometrie complesse per evitare l'intrappolamento di elettroni
 - Futuro: girotroni a più alta potenza saranno più sensibili a queste problematiche richiedendo strategie più mirate

Girotrone

MIG

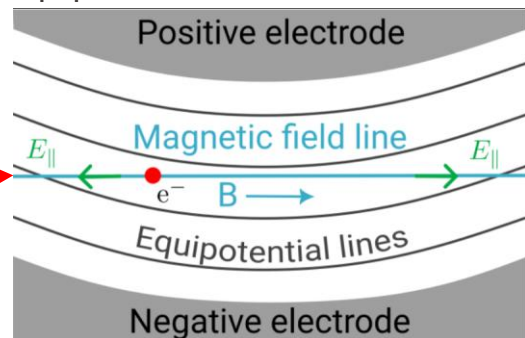
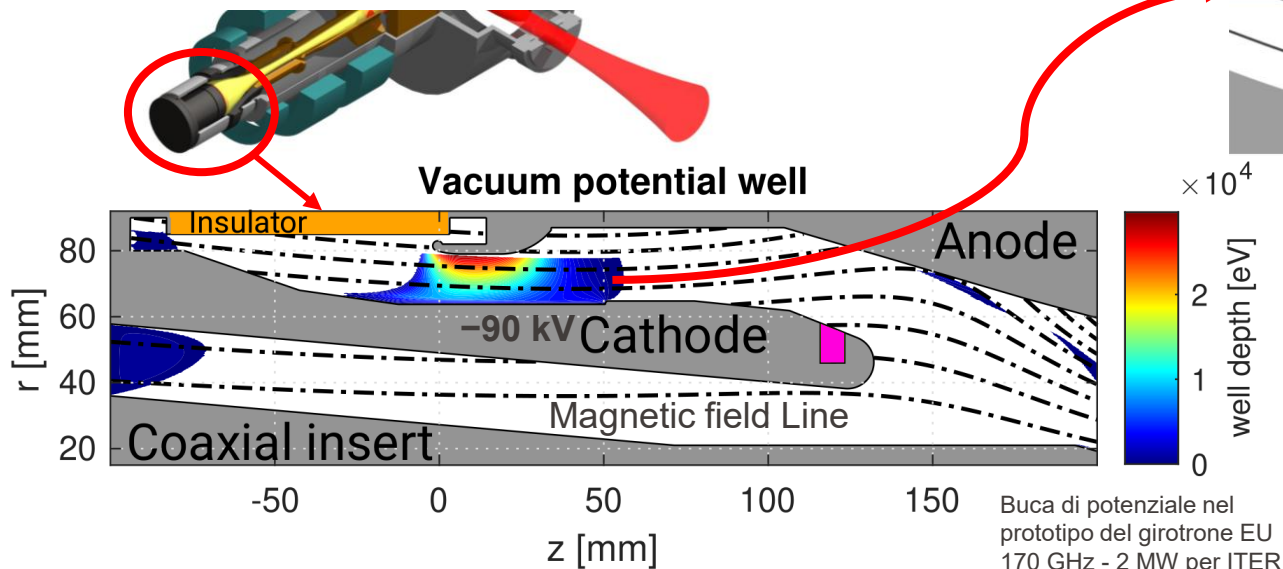


Al plasma da fusione:
1MW @ 100-200 GHz



Girotrone da 170 GHz 1 MW sviluppato per ITER e DTT in sperimentazione a SPC-EPFL.

- **Plasmi non-neutri:** plasmi di soli elettroni (singola-specie)
- **Elettroni** (secondari) vengono **intrappolati in buche di potenziale** e influenzano il funzionamento dei girotroni
- **Intrappolamento:** una linea di campo magnetico incrocia due volte una linea di equipotenziale
- **Primo elettrone:** può avere origine da diverse fonti - e.g. raggi cosmici
- L'elevata rotazione azimutale indotta dal $\mathbf{ExB}$ assicura una continua generazione di elettroni attraverso collisioni elettroni-neutri

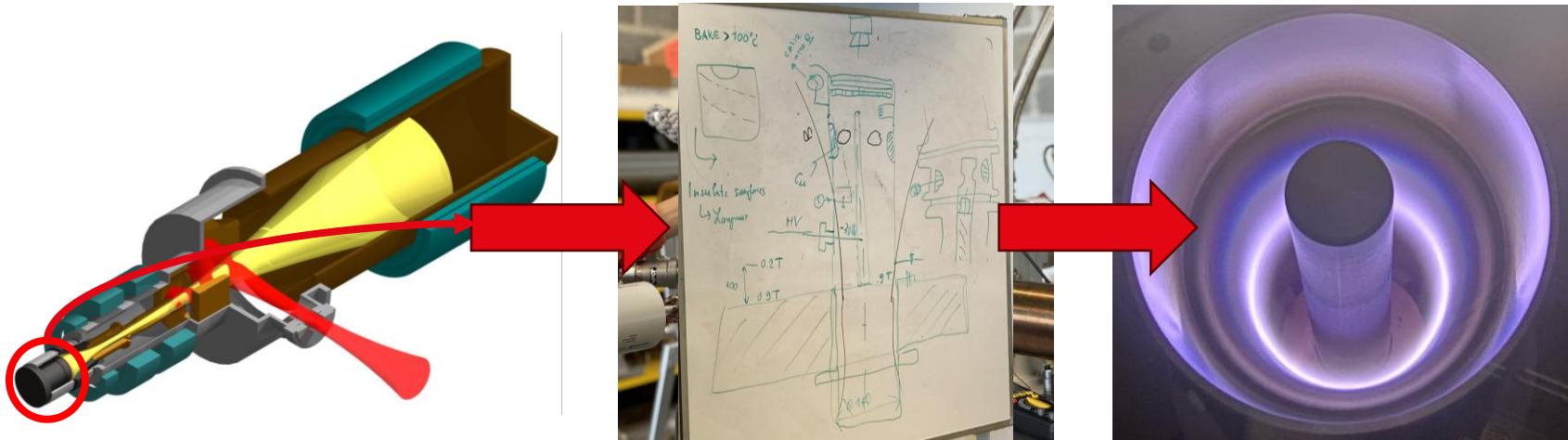


T-REX: TRapped Electrons eXperiment

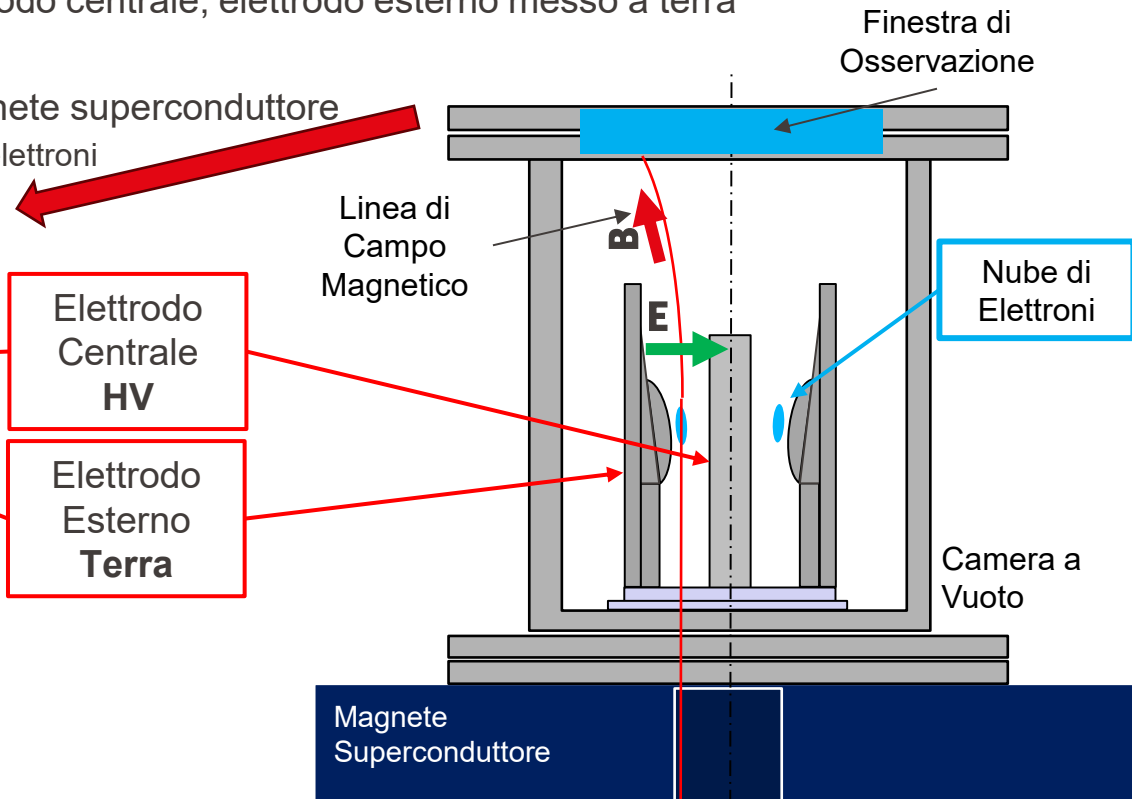
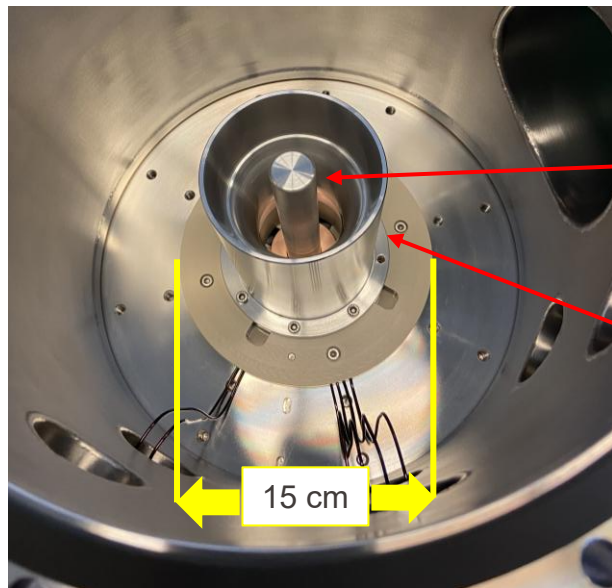
- Esperimento realizzato per riprodurre ambienti simili alle MIG dei girotroni per studiare nubi di elettroni intrappolati
- Costruito allo Swiss Plasma Center – EPFL partendo da zero
- Collaborazione sinergetica tra sperimentazione (T-REX) e simulazione (FENNECS)

Obiettivi:

- Comprendere la dinamica e la formazione di nubi di elettroni intrappolati – in MIG e oltre
- Trovare strategie che possano risultare in girotroni piu' affidabili, potenti e robusti



- **Due elettrodi:** geometrie simili a MIG in una camera a vuoto sopra un magnete superconduttore
 - Alto vuoto $p = 10^{-7} - 10^{-3}$ mbar, elettrodi sostituibili, iniezione di gas disponibile
- **Alta tensione (HV)** applicata all'elettrodo centrale, elettrodo esterno messo a terra
 - $\Delta V_{\text{bias}} < 20$ kV, $I_{\text{max}} = \pm 20$ mA
- **Campo magnetico** prodotto dal magnete superconduttore
 - $B < 0.31$ T nella regione della nube di elettroni



T-REX visto dall'esterno

Finestra di
Osservazione

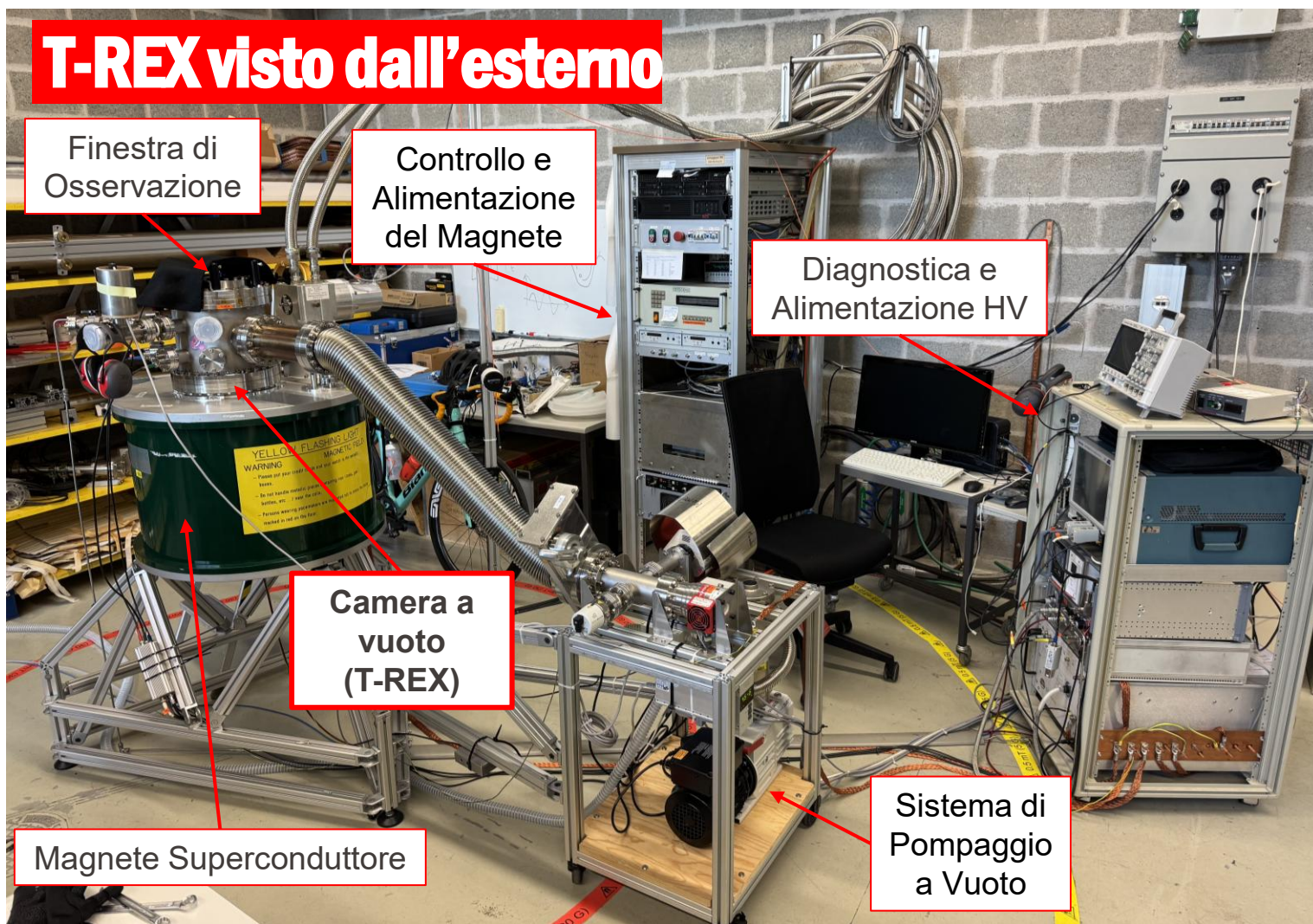
Controllo e
Alimentazione
del Magnete

Diagnostica e
Alimentazione HV

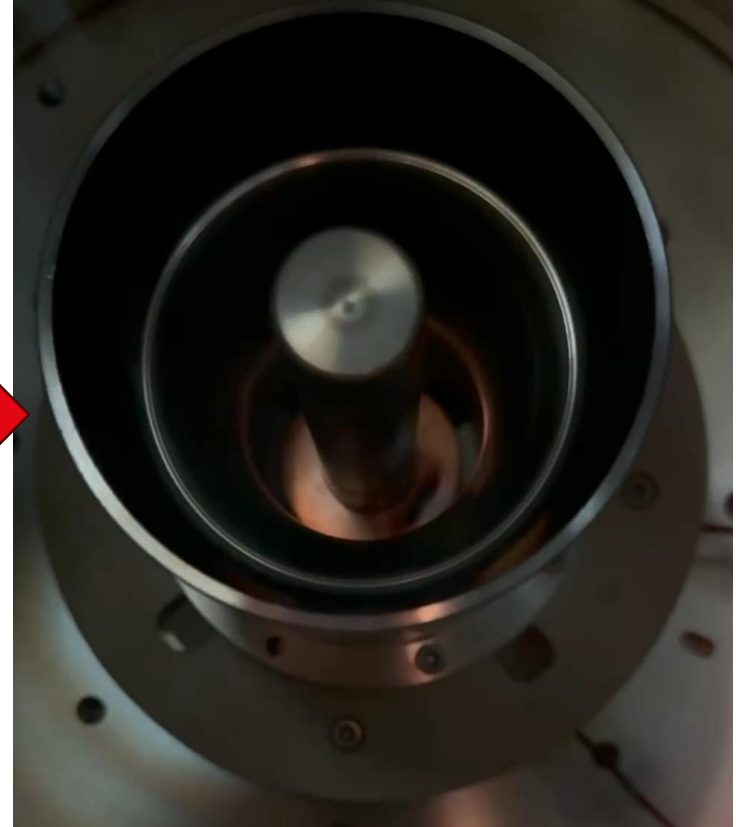
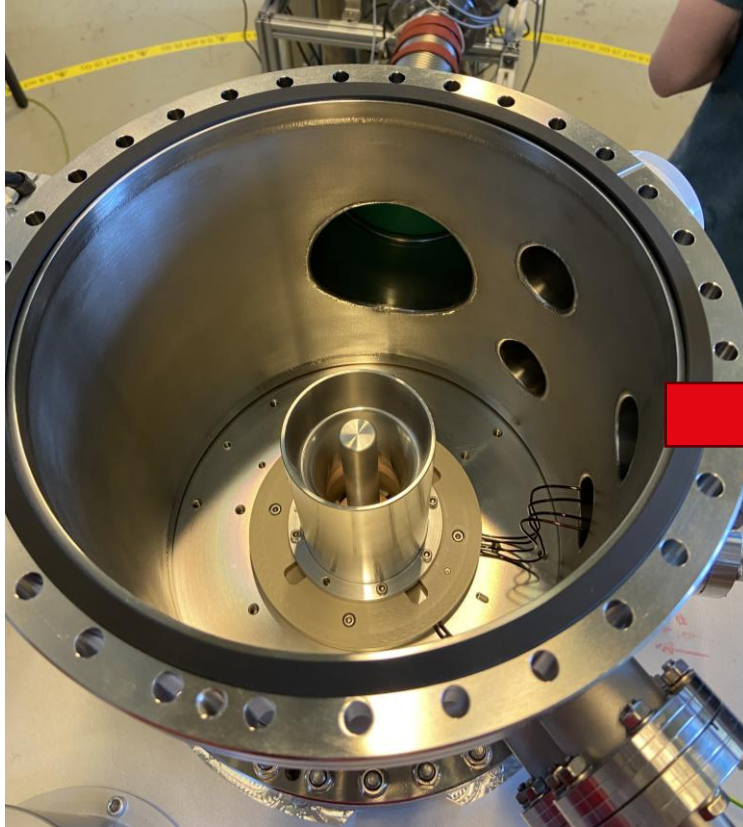
Camera a
vuoto
(T-REX)

Magnete Superconduttore

Sistema di
Pompaggio
a Vuoto



Video: Incremento lineare di ΔV_{bias} con B costante, spegnimento



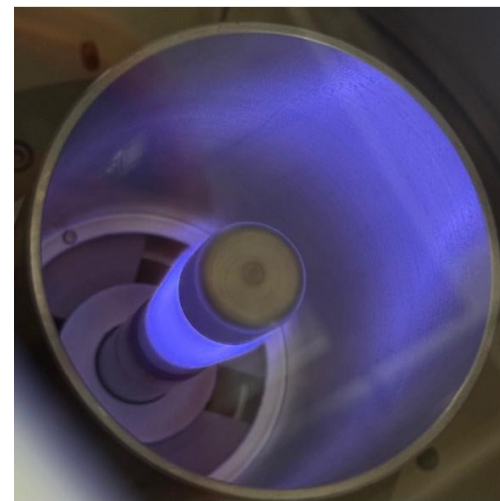
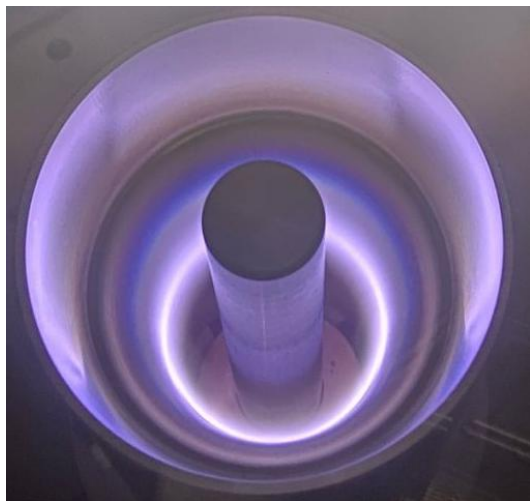
T-REX è un esperimento flessibile e ricco di diagnostiche

■ T-REX sperimentato con:

- Argon, Elio, Idrogeno
- $p = 10^{-6} - 5 \times 10^{-4}$ mbar
- $\Delta V_{\text{bias}} = 1 - 20$ kV , $B = 0.10 - 0.31$ T
- Tre configurazioni di elettrodi

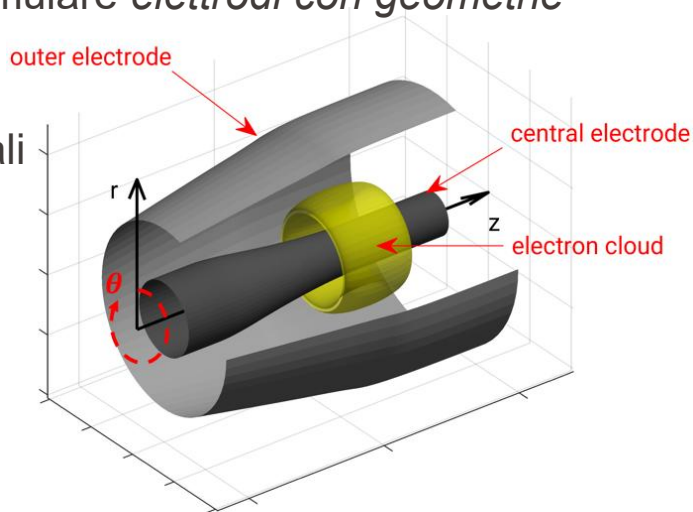
■ Misure:

- Soglie di ΔV_{bias} e B
- Distribuzione della corrente
- Corrente risolta nel tempo
- Spettroscopia a emissione ottica
- Altro in fase di sviluppo...



Il codice FENNECS include tutta la fisica necessaria per la simulazione di nubi di elettroni intrappolati

- Codice 3D PIC in coordinate cilindriche (r, θ, z) [1]
- Risolve in modo autoconsistente le equazioni di Boltzmann–Poisson per gli elettroni
- Modella collisioni *elettroni–neutri* in un gas di fondo uniforme
- Include la emissione secondaria di elettroni causata da ioni (veloci) e elettroni che impattano gli elettrodi
- Utilizza un metodo innovativo ad elementi finiti per simulare *elettrodi con geometrie complesse*
- Validato con successo mediante confronti sperimentali con MIG di girotroni [2]
- Fondamentale nella progettazione di T-REX dimostrando notevole concordanza nei risultati [3, 4]

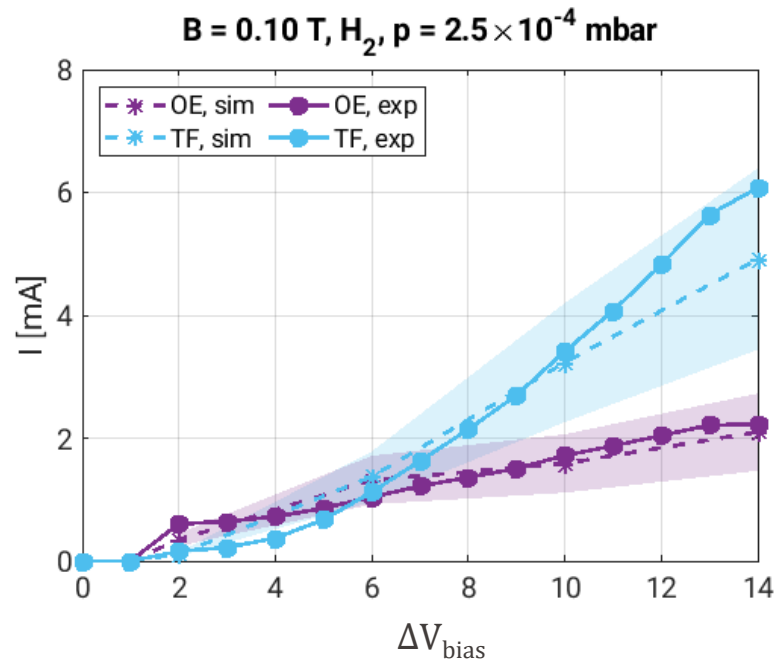
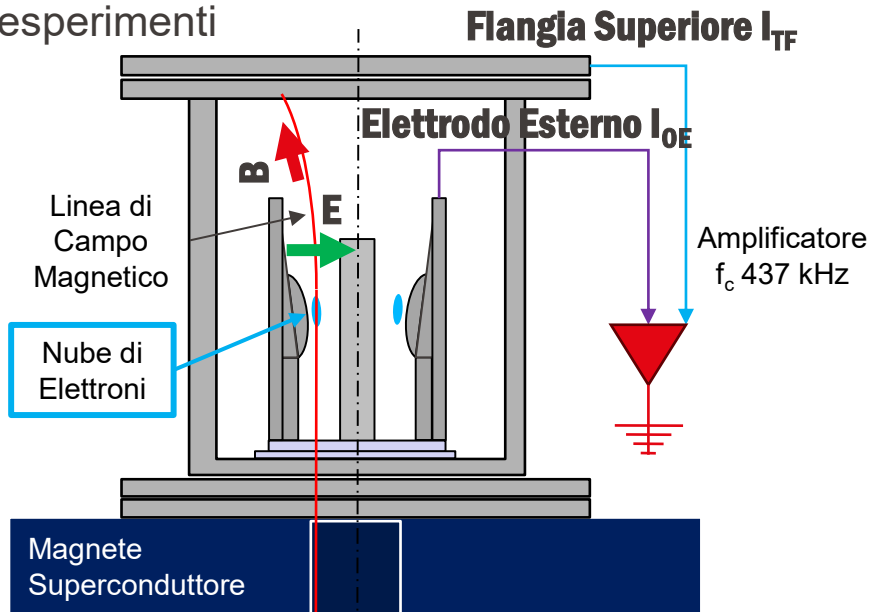


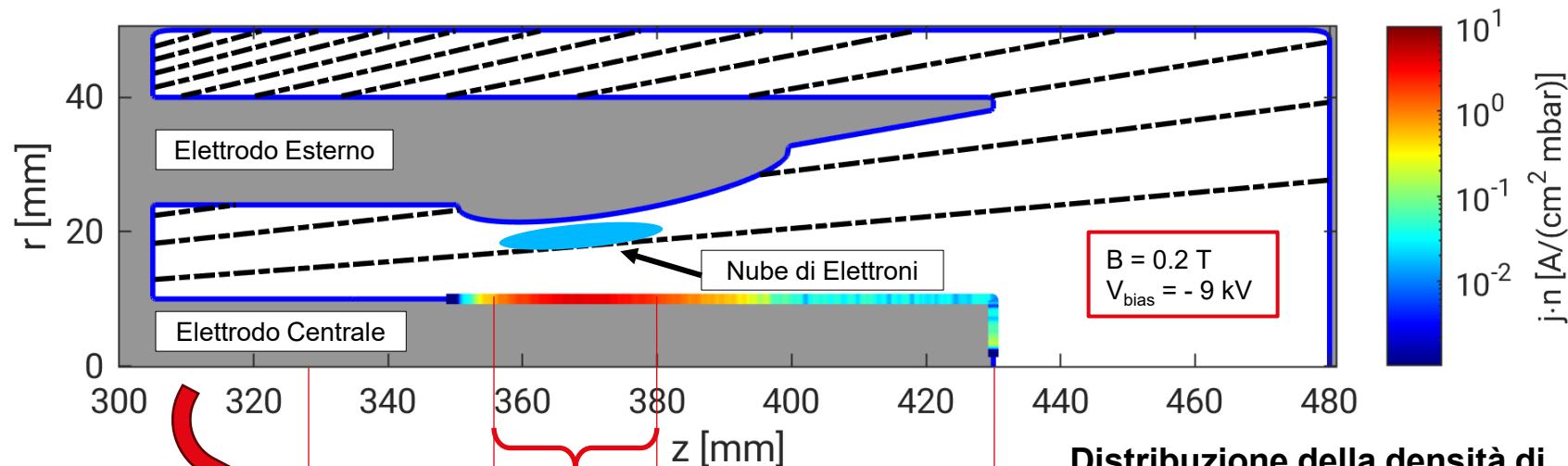
- [1] G. Le Bars et al. (2024) Computer Physics Communication
- [2] G. Le Bars et al. (2023) Physics of Plasmas
- [3] F. Romano et al. (2024) Review of Scientific Instruments
- [4] P. Giroud-Garampon et al. (2025) Physics of Plasmas

Cosa abbiamo determinato?

- La distribuzione della corrente per intervalli di ΔV_{bias} , B , p , gas
 - La distribuzione della corrente mediata sul tempo
 - Le soglie di ΔV_{bias} and B
 - La posizione della nube di elettroni
- Misurato oscillazioni che potrebbero essere ricondotte all'instabilità di diocotrone
 - Misure veloci di corrente
 - Sviluppo di una matrice di sonde di corrente
- Comportamento con diverse geometrie di elettrodi
- Valutazione preliminare di E all'interno della nube basato sulla spettroscopia a emissione ottica

- Correnti mediate sul tempo aumentano con ΔV_{bias}
- Soglia per la formazione della nube di elettroni:
 $B > 0.1 \text{ T}$ and $\Delta V_{\text{bias}} > 1.5 \text{ kV}$
- I_{TF} è dominante rispetto a I_{OE}
- Concordanza eccellente tra simulazioni ed esperimenti

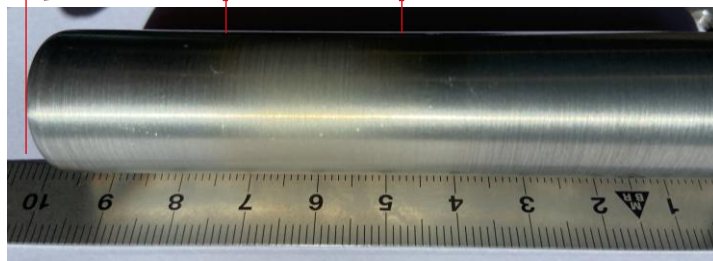




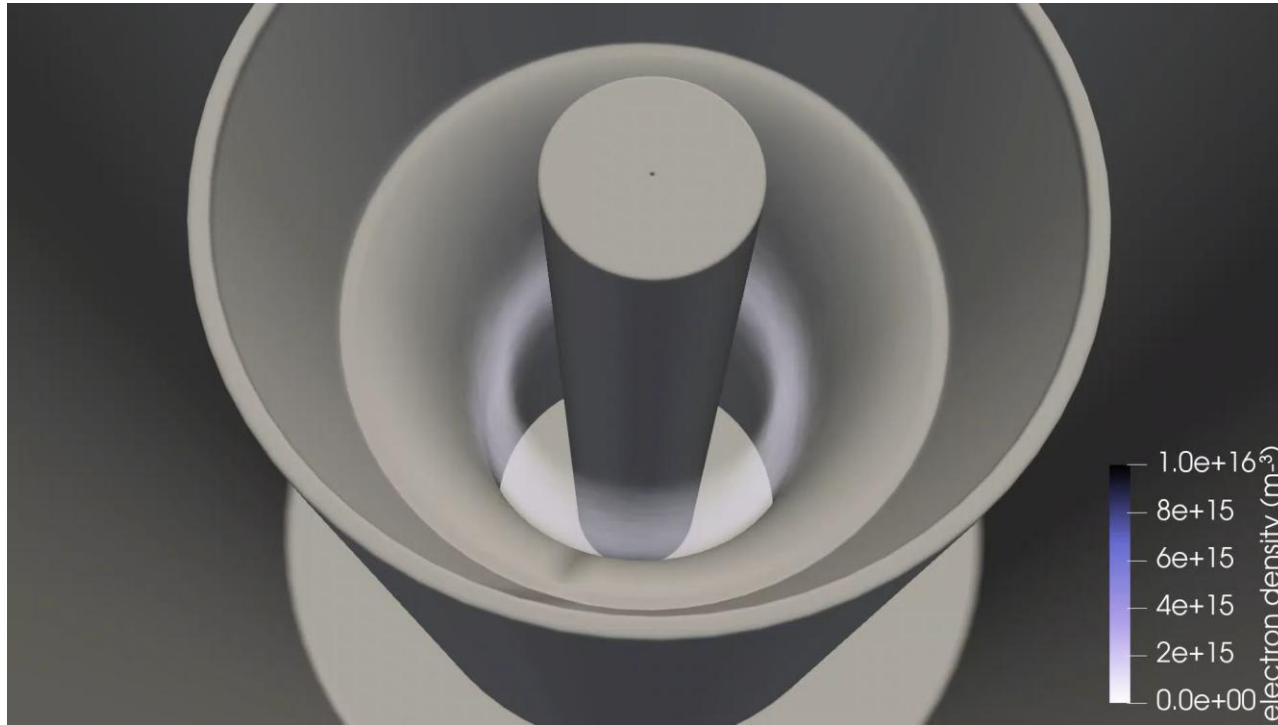
Distribuzione della densità di corrente proveniente dagli ioni

**Elettrodo centrale
(polarizzato
negativamente)**

**Coloramento
dovuto a
bombardamento di
ioni**

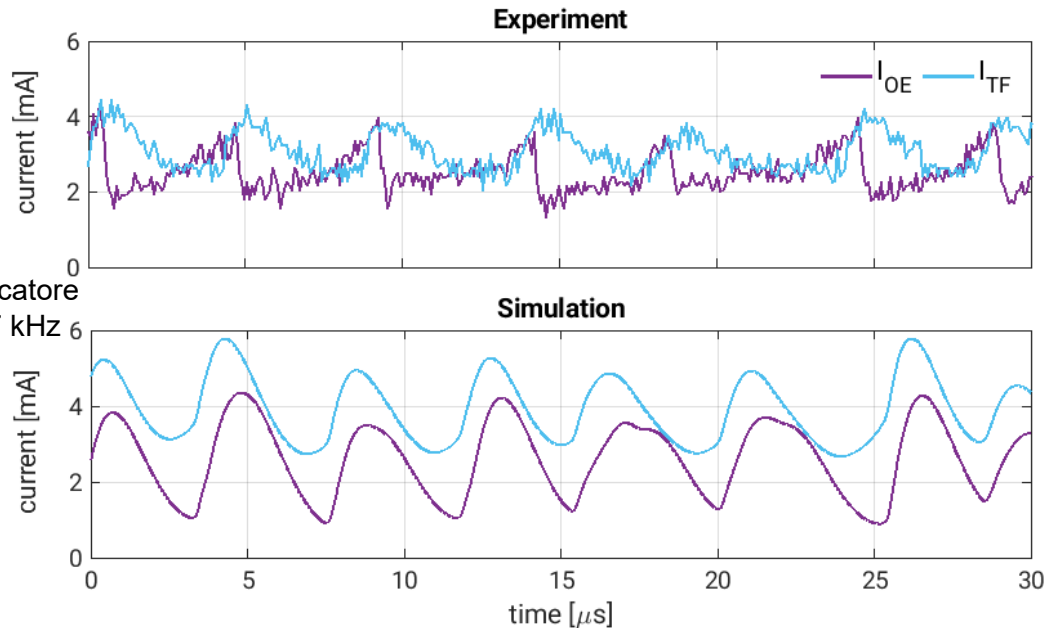
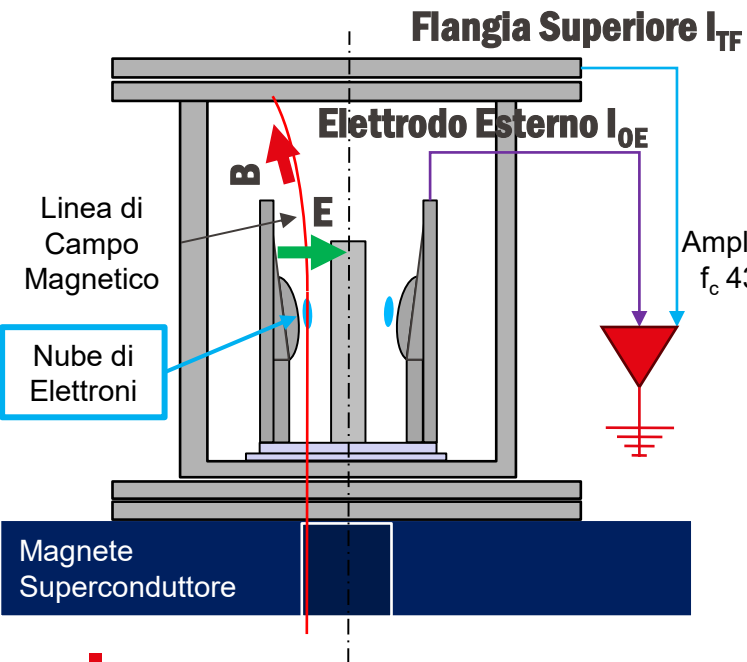


- Instabilità di diocotrone: in plasmi non-neutri a causa dei gradienti di velocità azimutale
- In T-REX, l'instabilità di diocotrone causa il collasso della nube di elettroni
- FENNECS: frequenza di diocotrone **~ 1 GHz**, rotazione della nube **$10\times$ MHz (ExB)**, collasso **$100\times$ kHz**

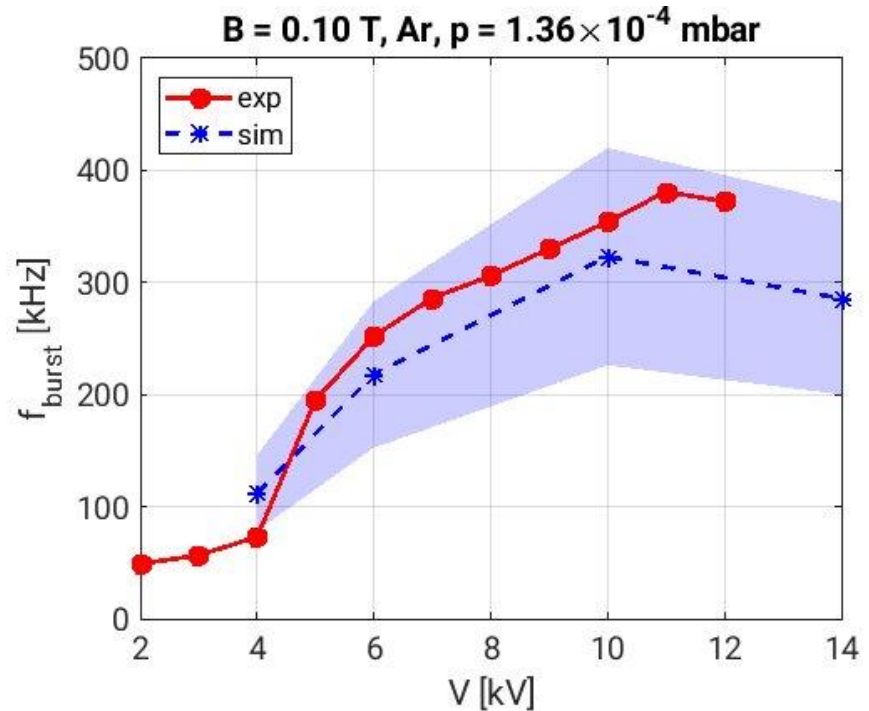
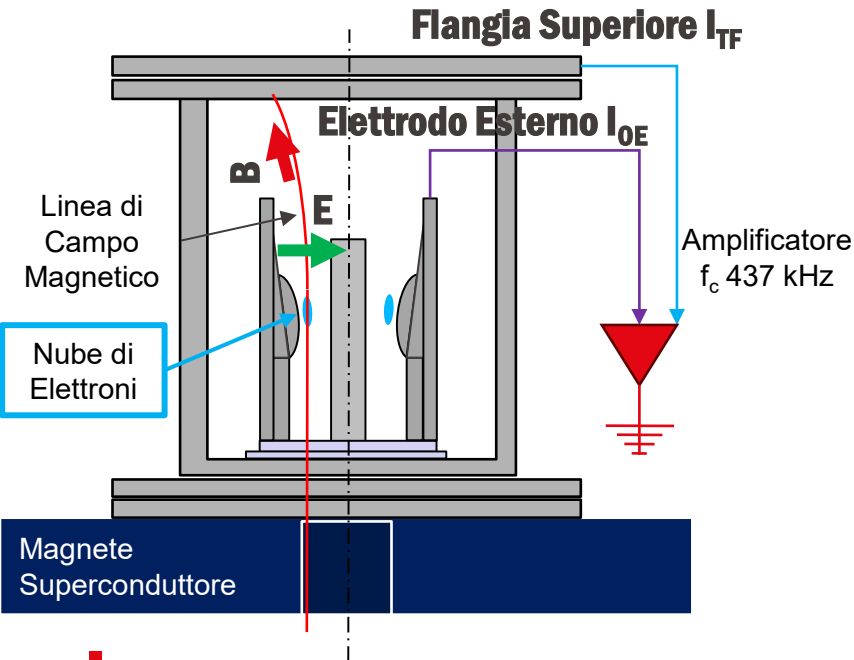


Simulazione
FENNECS
 $\Delta V_{\text{bias}} = 10$ kV
 $B = 0.1$ T,
Ar, $3\text{E-}4$
mbar,
 $10\ \mu\text{s}$ totali

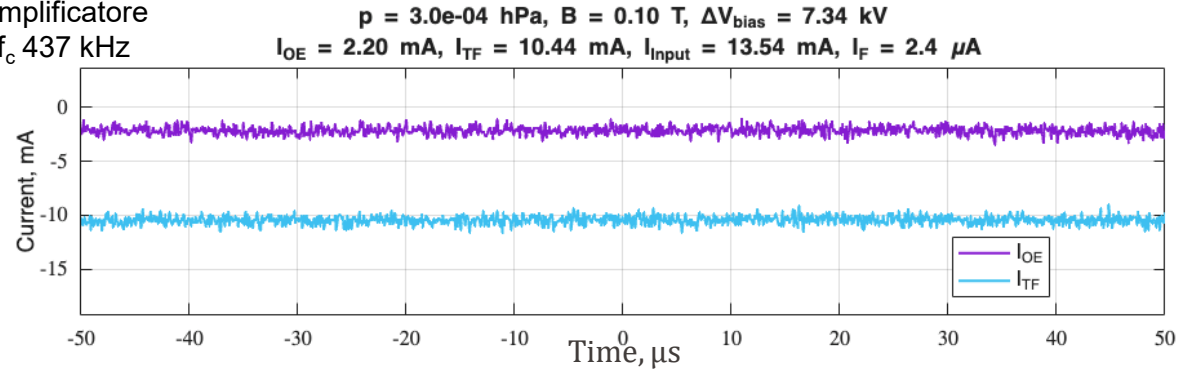
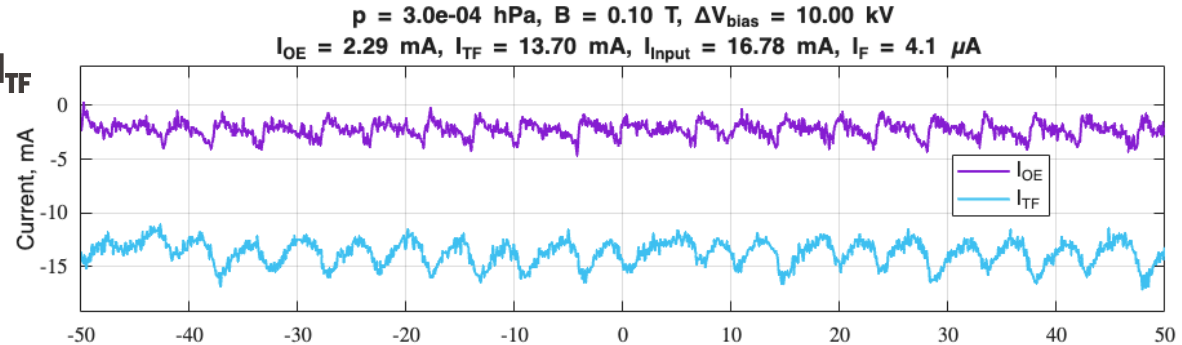
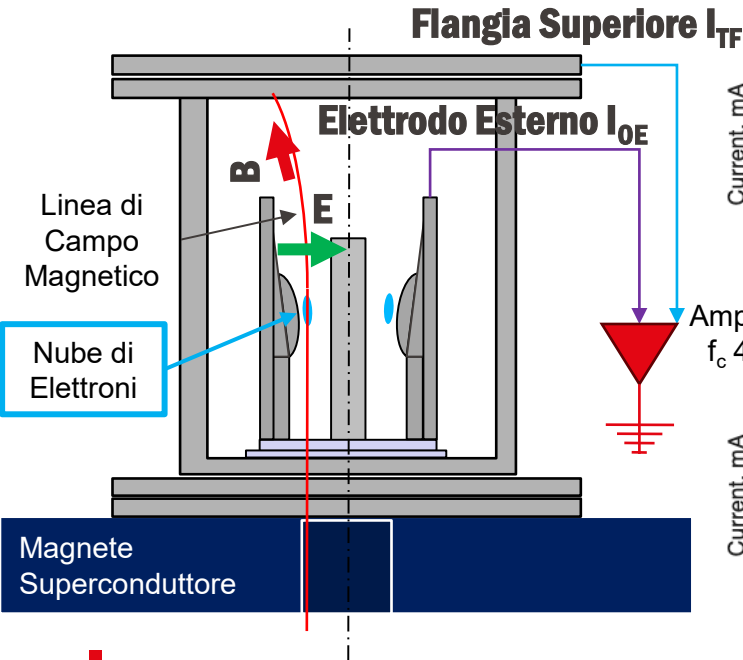
- Osserviamo oscillazioni **100x kHz** in I_{TF} e I_{OE} : collasso della nube
- La frequenza di oscillazione principale tende ad aumentare con ΔV_{bias}
- Le simulazioni riproducono correttamente l'ampiezza e frequenza delle misure sperimentali



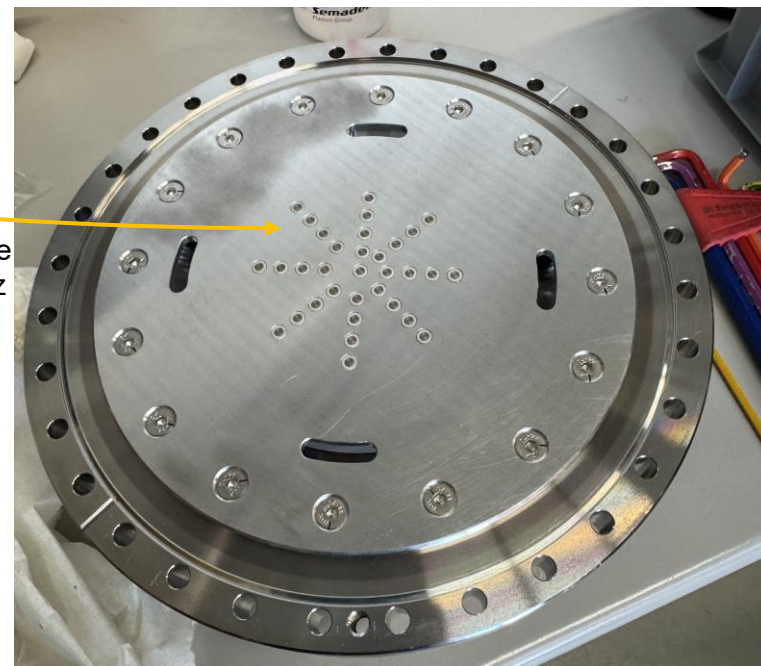
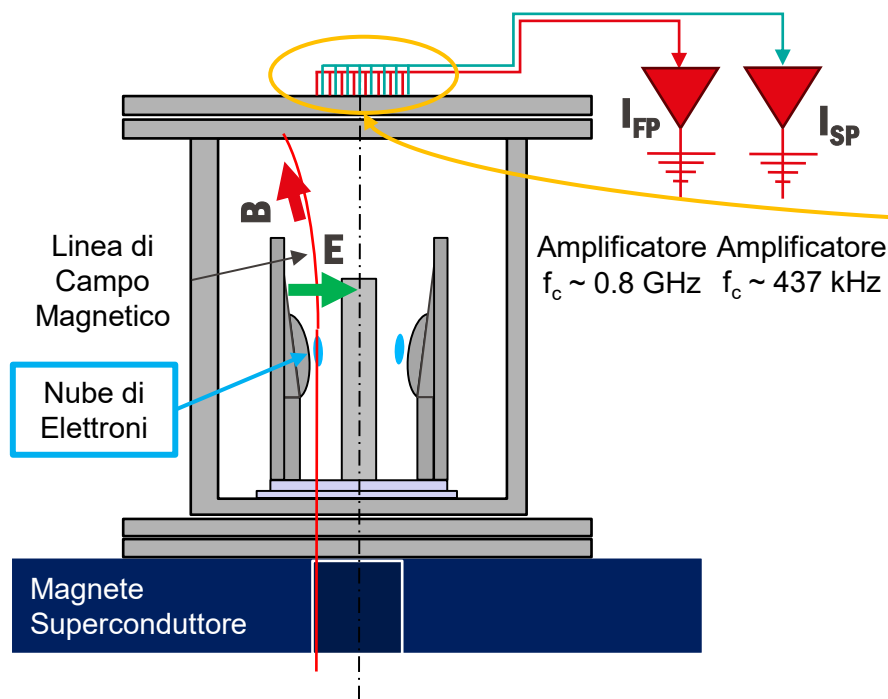
- Osserviamo oscillazioni **100x kHz** in I_{TF} e I_{OE} : collasso della nube
- La frequenza di oscillazione principale tende ad aumentare con ΔV_{bias}
- Le simulazioni riproducono correttamente l'ampiezza e frequenza delle misure sperimentali



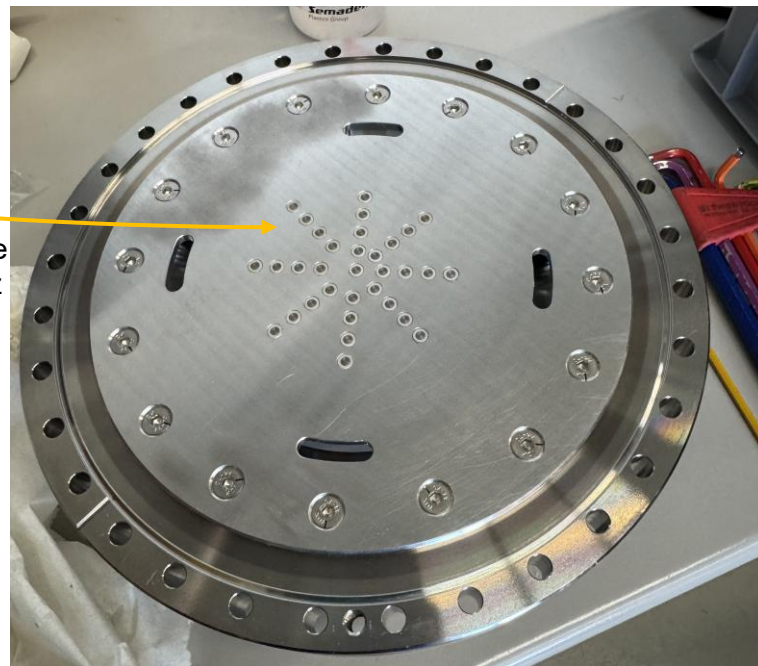
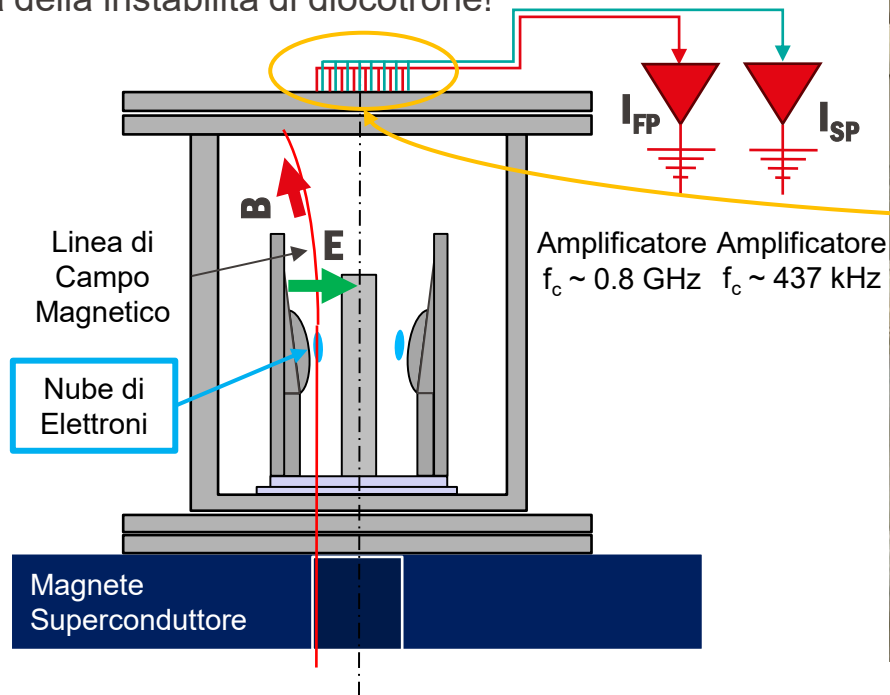
- Esistono intervalli di ΔV_{bias} per cui le oscillazioni diminuiscono improvvisamente
- Il fenomeno è in fase di studio ed è stato riprodotto con le simulazioni: le prime ipotesi includono differenti regimi di saturazione della nube di elettroni



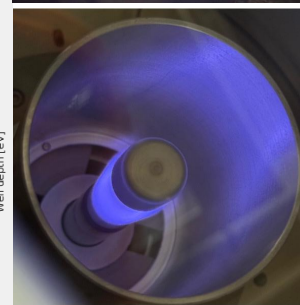
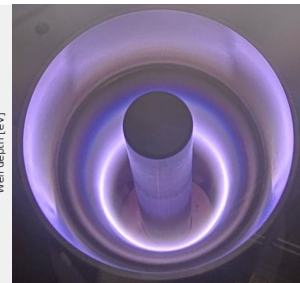
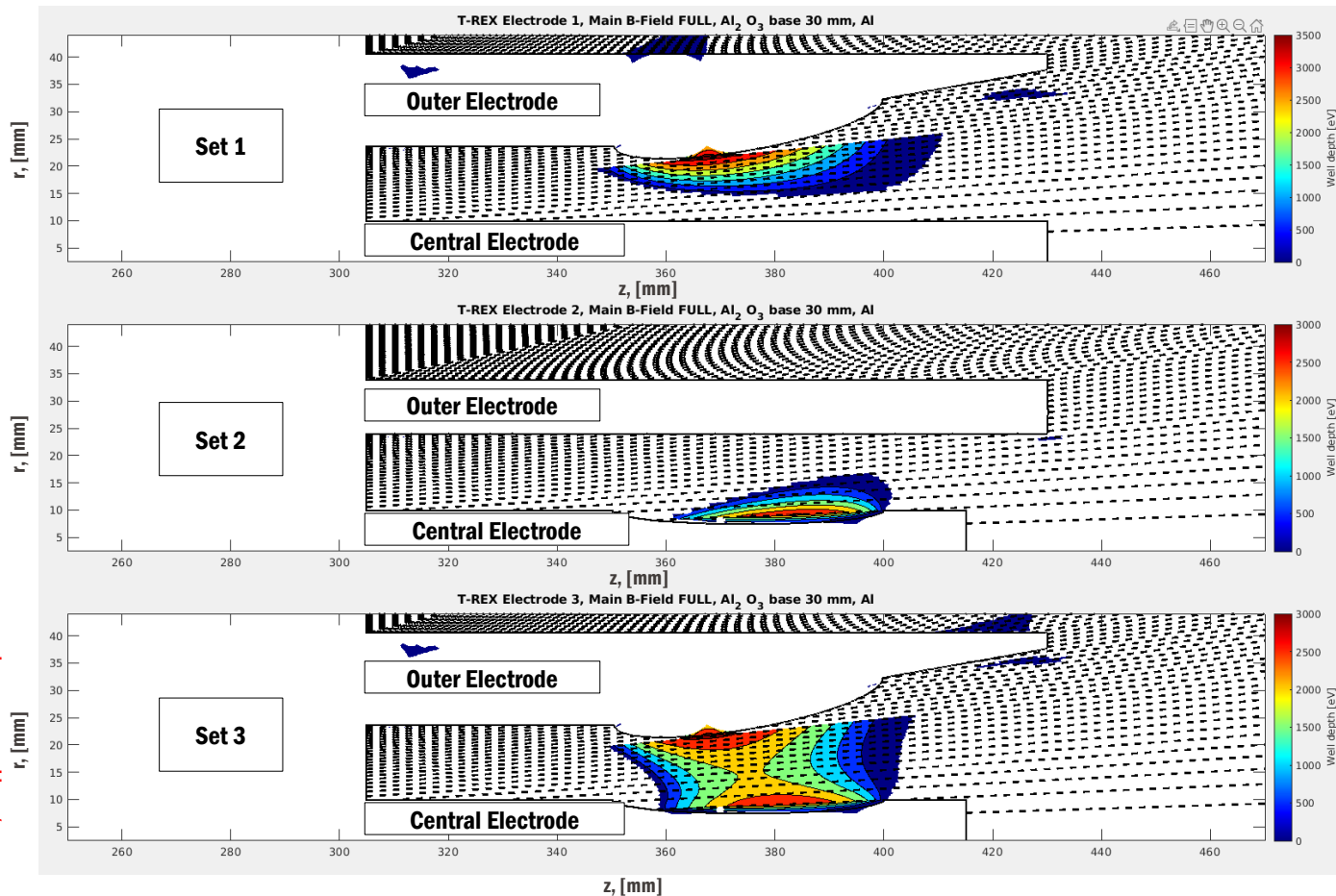
- Matrice di 33 sonde di corrente per misurare la distribuzione radiale della corrente e la rotazione della nube e delle sue strutture
 - Sonde “lente” I_{SP} con $f_c \sim 437$ kHz: misurare ampiezze e oscillazioni
 - 4-7 sonde “veloci” I_{FP} con $f_c \sim 0.8$ GHz per misurare le strutture rotanti ad alta velocità che sono il risultato della instabilità di diocotrone



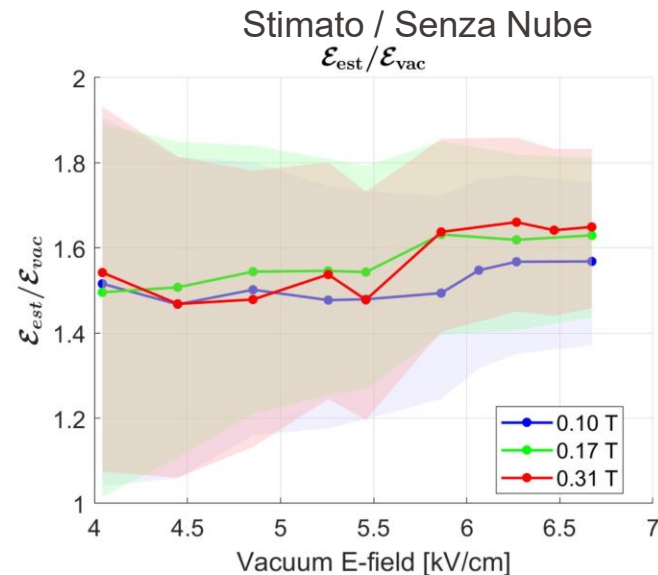
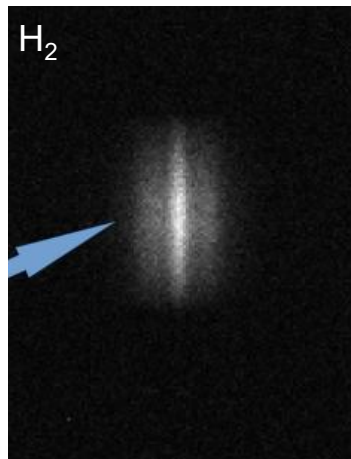
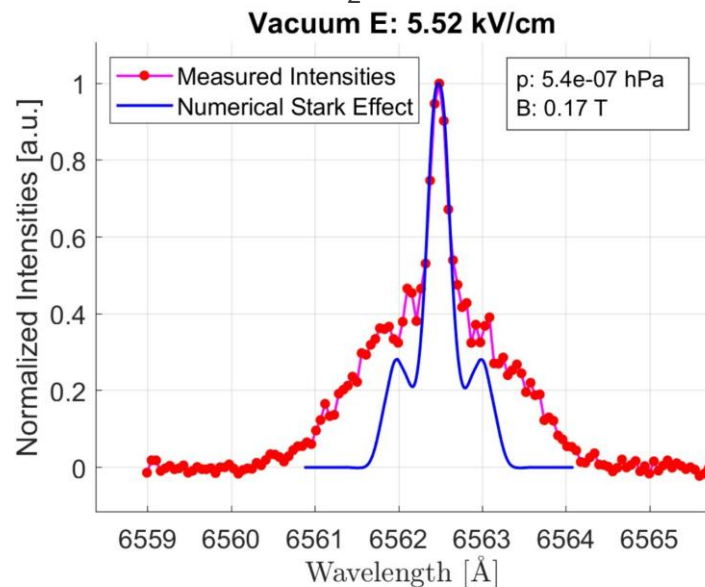
- Misuriamo lo sfasamento tra segnali su più sonde in posizioni diverse
- Abbiamo misure preliminari di $m = 1$ a ~ 30 MHz che coinciderebbero con la rotazione $E \times B$, e visualizziamo come questa aumenti o diminuisca con ΔV_{bias} e B
- Abbiamo osservato anche $m = 4, 6$ a $\sim 120 - 170$ MHz che concorderebbero con quanto simulato con FENNECS – ci stiamo lavorando!
- Traccia della instabilità di diocotrone!



Sperimentazione di 3 Geometrie di Elettrodi



- Misura di $E(r)$ nella nube di elettroni attraverso l'effetto Stark: spostamento e sdoppiamento delle linee spettrali a cause di E
- Misure preliminari attraverso le linee spettrali proibite del He per stimare E
 - Abbiamo misurato l'amplificazione di E nella regione della nube per un intervallo di ΔV_{bias} e B ed è in accordo con le simulazioni: $E_{est}/E_{vac} \sim 1.2$
- Stiamo costruendo uno spettrometro migliore per ottenere un maggiore SNR e usare direttamente l'effetto Stark con H_2



- **T-REX:** esperimento unico che ricrea le condizioni delle MIG dei girotroni per studiare la formazione e la dinamica di nubi di elettroni intrappolati
- Eccezionale sinergia e concordanza tra teoria ed esperimenti
- Abbiamo misurato il comportamento generale : distribuzione della corrente, le soglie di E e B per la formazione della nube
- Abbiamo trovato che la instabilità di diocotrone gioca un ruolo fondamentale
- Stiamo studiando i fenomeni oscillatori per rilevare sperimentalmente l'instabilità di diocotrone attraverso nuove diagnostiche
- **Oggigiorno:** le MIG dei girotroni sono progettate con limitazioni stringenti sulla geometria per evitare la formazione di buche di potenziale
- **Nel futuro:** i girotroni a più elevata potenza saranno progettati con MIG coassiali, dove le problematiche dovute ad elettroni intrappolati sono più severe
- Per questo abbiamo bisogno di una migliore comprensione della fisica alla base di questi fenomeni

Grazie della vostra gentile Attenzione!

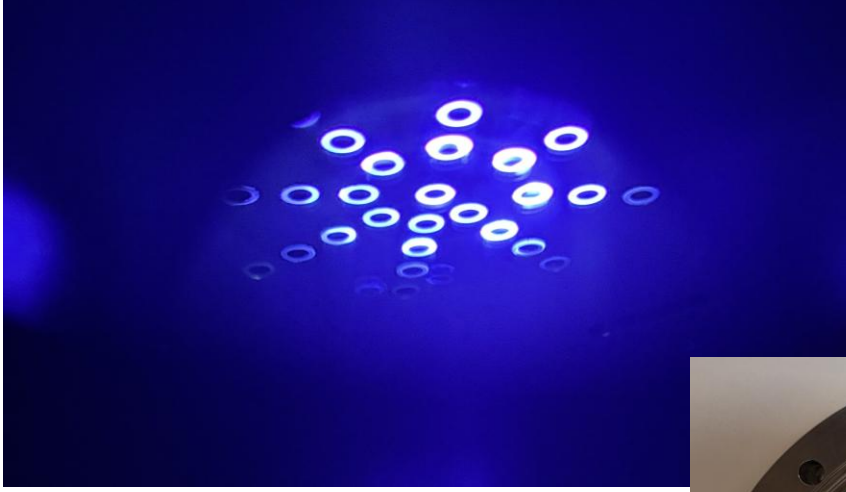


Da tutto il team di T-REX



This work was supported by the Swiss National Science Foundation under Grant No. 204631.

This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, partially funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). The Swiss contribution to this work has been funded in part by the Swiss State Secretariat for Education, Research and Innovation (SERI). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union, the European Commission or SERI. Neither the European Union nor the European Commission nor SERI can be held responsible for them.



- A larger B decreases the $\mathbf{ExB}$ velocity of electrons, lowering their ionization frequency: the cloud builds up slower and the period between disruption is longer leading to lower currents

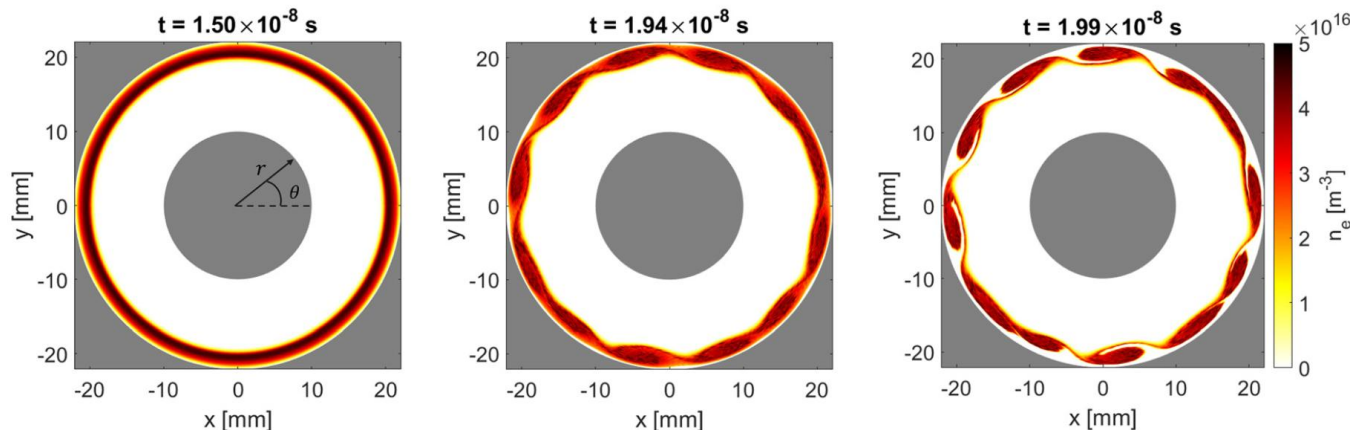


FIG. 10. Snapshots of the electron density in the radial–azimuthal plane for $B = 0.10$ T, $V_{bias} = 10$ kV, simulated with the nonlinear diocotron solver at three different times: during the linear phase (left) and during the nonlinear development (middle and right). The central and outer electrodes are represented in gray.

- [1] G. Le Bars, J. Loizu, et al., FENNECS: A novel particle-in-cell code for simulating the formation of magnetized non-neutral plasmas trapped by electrodes of complex geometries, *Computer Physics Communications*, 109268, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2024.109268>
- [2] P. Giroud-Garampon, F. Romano, et al., Electron trapping in gyrotron electron guns: Validation of the FENNECS code with the T-REX experiment. *Phys. Plasmas* 1 May 2025; 32 (5): 053903. <https://doi.org/10.1063/5.0267466>