

Dottorato di ricerca in Energia e Ambiente  
Responsabile scientifico Sapienza (Tutor): Antonella Ingenito  
Tutor scientifico ENEA: Dr. Ing. Francesco Napoli  
Dottorando: Ing. Daniele Iannarelli

Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE),  
Università di Roma La Sapienza  
Anno Accademico 2023-2024



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Progetto di propulsori al plasma per trasporto spaziale sostenibile  
Dottorato di ricerca in Energia e Ambiente

Responsabile scientifico Sapienza  
E-mail: antonella.ingenito@uniroma1.it

Coordinatore: Dr. Gianfranco Caruso  
E-mail: gianfranco.caruso@uniroma1.it



# Curriculum vitae



Nome: Daniele Iannarelli

Data di nascita: 14/08/1993

Diploma: Liceo scientifico

Studi universitari:

- Laurea triennale in ingegneria aerospaziale, 90/110
- Laurea magistrale in ingegneria spaziale e astronautica, 108/110
- Master di secondo livello in sistemi di trasporto spaziale, 109/110
- Laurea a statuto speciale in ingegneria aerospaziale, 107/110
- Dottorato di ricerca in ingegneria aerospaziale, in corso



# Progetto di propulsori al plasma per trasporto spaziale sostenibile

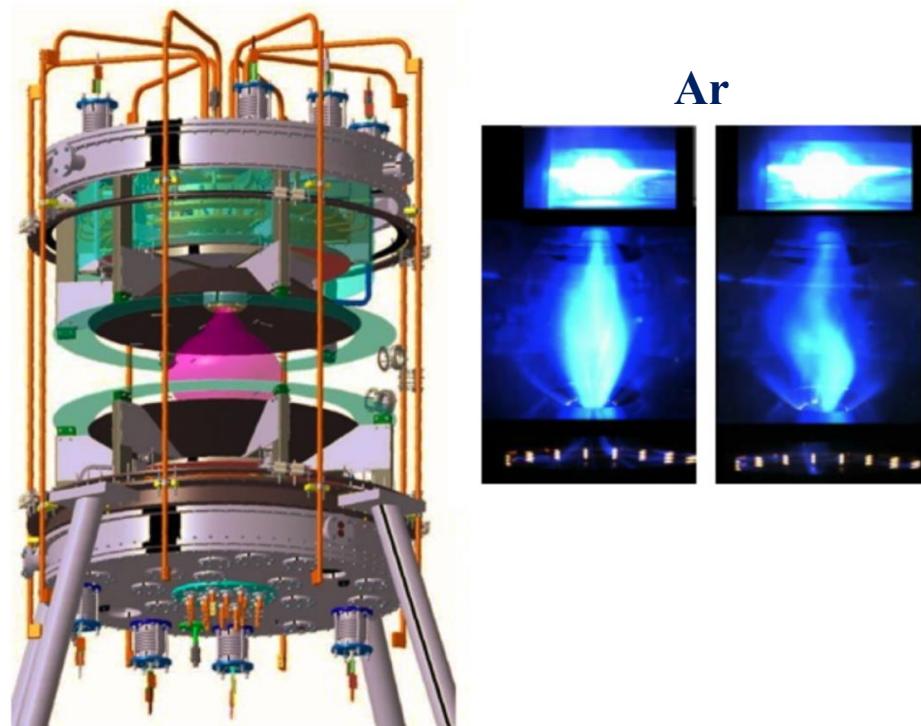
D. Iannarelli, A. De Ninno, A. Ingenito, S. Mannori, F. Napoli

Progetto di ricerca congiunto tra la Scuola di  
Ingegneria aerospaziale e l'ENEA



# Progetto concettuale di un propulsore al plasma a fusione nucleare basato sull'esperimento PROTO-SPHERA

- Modellizzazione dell'equilibrio MHD 2D dell'esperimento PROTO-SPHERA;
- Calcolo dello scaling fusionistico dell'esperimento PROTO-SPHERA;
- Utilizzo del metodo Monte Carlo per stimare la perdita di particelle alfa dalla configurazione magnetica;
- Simulazione dell'accelerazione delle particelle nell'ugello magnetico con un codice PIC.

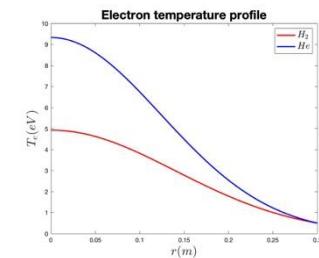
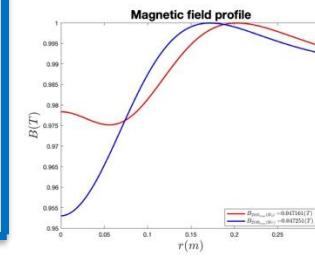
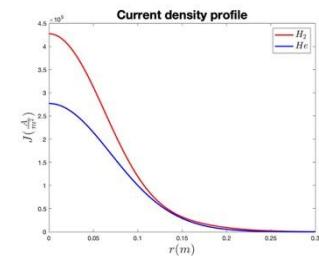
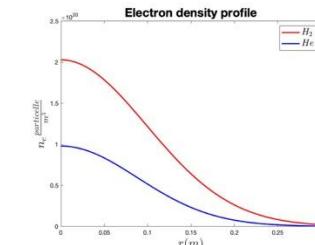
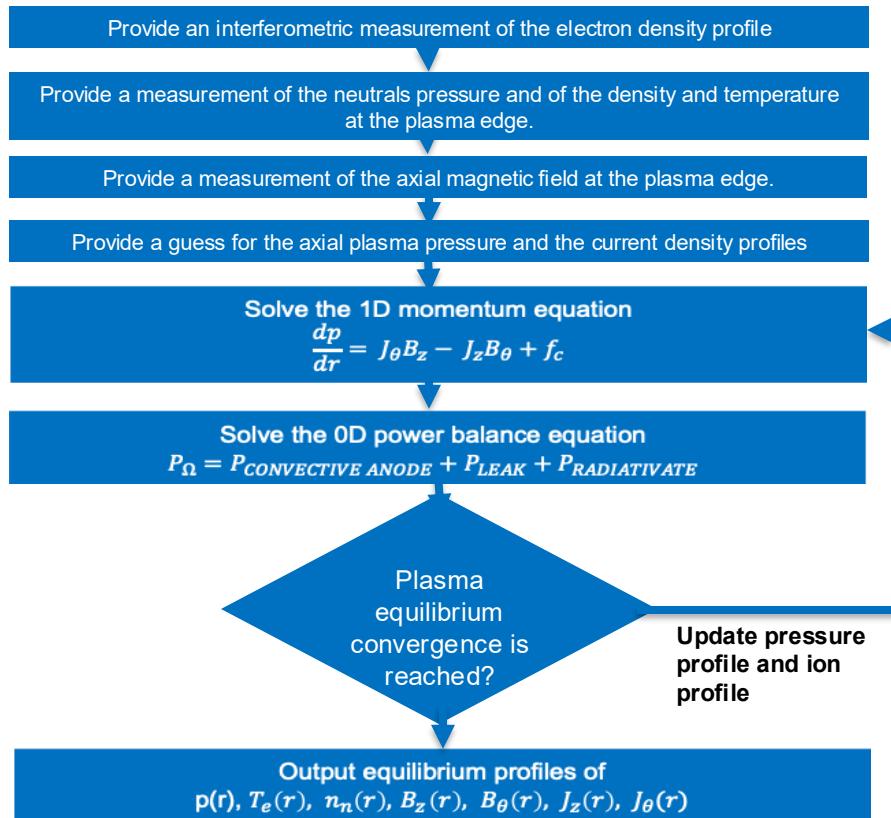




# Modello 1D di equilibrio del pinch di PROTO-SPHERA

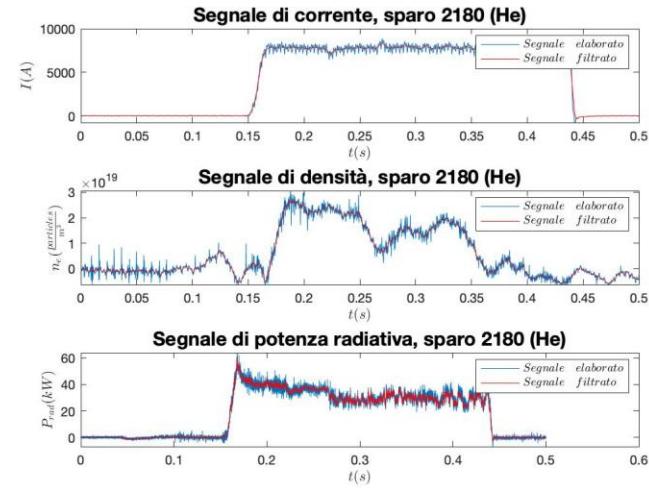
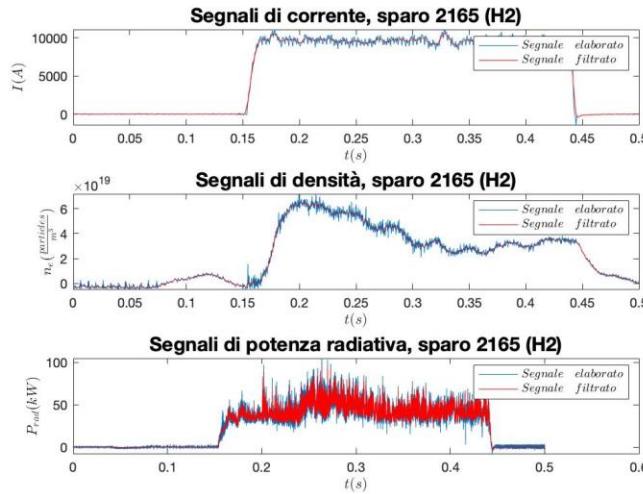
$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla x B = \mu_0 J \\ \nabla p = J x B + f_c \\ P_\Omega + P_{RF} = P_{CONVETTIVA\ ANODO} + P_{GETTO} + P_{RADIATIVA} \end{array} \right.$$

Legge di Ampère - Maxwell  
Conservazione della quantità di moto stazionaria  
Bilancio di potenza





# Modello 1D di equilibrio del pinch di PROTO-SPHERA



Specie	Shot	$I_z$ (kA)	$T_{e_{\text{num}}}$ (eV)	$T_{e_{\text{exp}}}$ (eV)	$P_{\text{rad}_{\text{num}}}$ (kW)	$P_{\text{rad}_{\text{exp}}}$ (kW)
H <sub>2</sub>	2165	10.5	3.32	N.A.	42.0	42.7
He	2180	8.5	6.21	5.5*	46.2	43.9



# Modello propulsivo per il pinch di PROTO-SPHERA

$$P_{getto} = \gamma(P_\Omega + P_{RF})$$

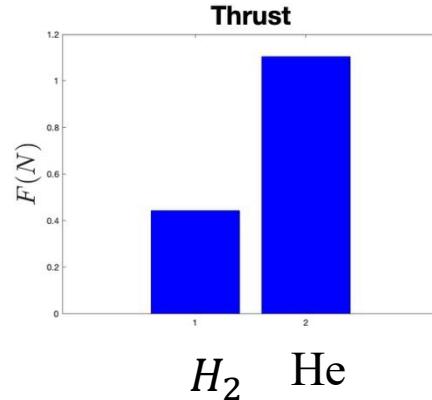
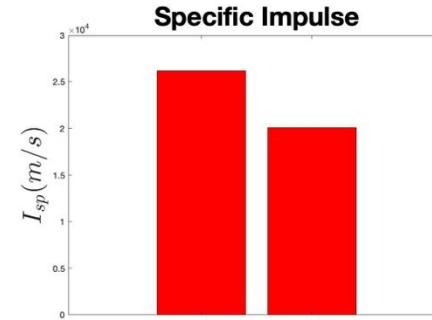
$$\gamma = 2 \frac{\Omega}{2\pi} H = 2(1 - \cos \theta)H$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[ \left( \frac{B_{z_{min}}(r=0)}{B_{z_{max}}(r=0)} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$I_{sp} = v_{th} = \left( \frac{k_B T_e}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$F = \frac{P_{getto}}{v_{th}}$$

$$\dot{m} = \frac{F}{I_{sp}}$$

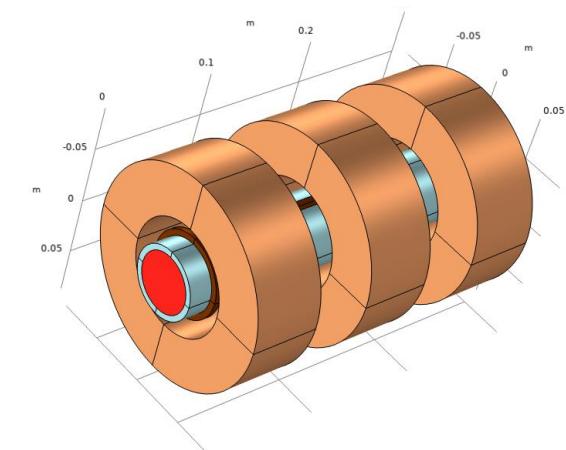
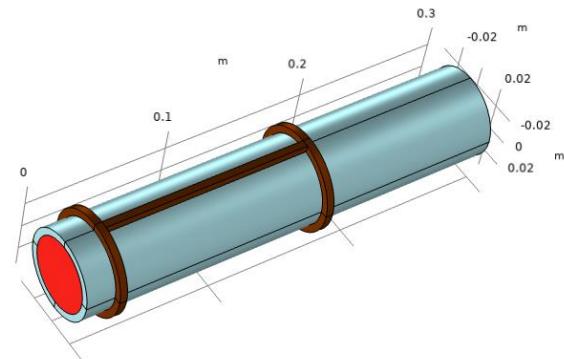
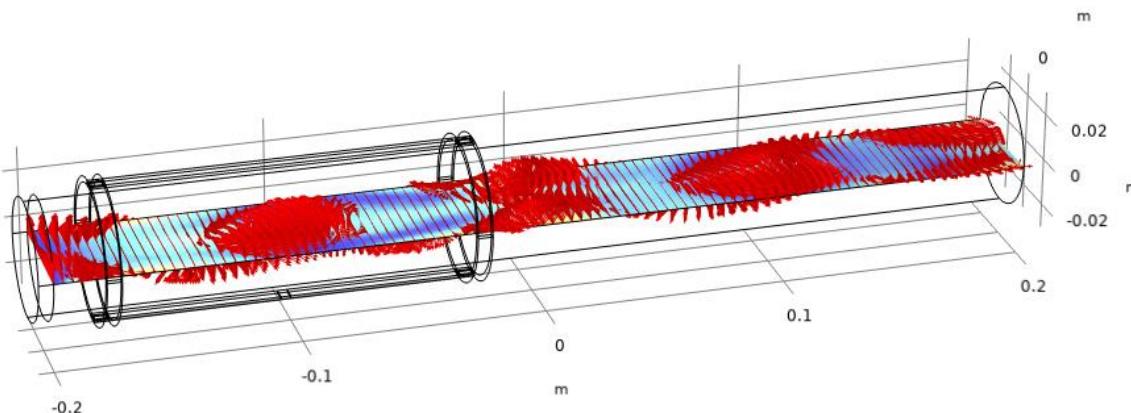




# Progetto di un propulsore helicon al plasma (in collaborazione con l'azienda IONVAC)

Progettazione e sperimentazione di:

- una sorgente helicon per la generazione di plasma
- un propulsore helicon per missioni nello spazio





# Dimensionamento di una sorgente di plasma helicon

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Legge di Faraday

$$\nabla \times B = \mu_0 J$$

Legge di Ampère - Maxwell

$$E = \frac{J \times B_0}{en_0}$$

Drift del centro di guida della traiettoria delle particelle di plasma

Hp

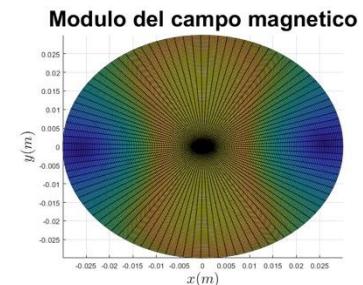
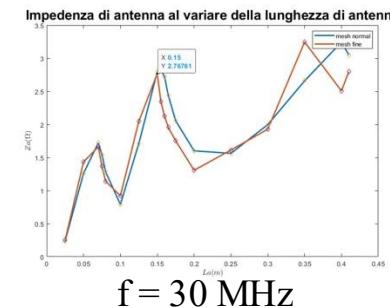
- Plasma non collisionale
- Sistema di riferimento cilindrico ( $r, \theta, z$ )
- Perturbazioni dei campi a simmetria cilindrica

$$\nabla^2 B + \alpha^2 B = 0$$

$$B_z'' + \frac{1}{r} B_z' + \left( T^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) B_z = 0 \quad \longrightarrow$$

$$\begin{cases} \alpha^2 = T^2 + k^2 \\ \alpha = \frac{\omega}{k} \frac{\mu_0 e n_0}{B_0} = \frac{\omega}{k} \frac{\omega_p^2}{\omega_c c^2} \end{cases}$$

Progetto di propulsori al plasma per trasporto spaziale sostenibile



$$\alpha = \pm \sqrt{T^2 + \sqrt{T^4 + 4 \frac{\omega^2 \omega_p^4}{\omega_c^2 c^4}}}$$

$$k = \frac{\omega}{\alpha} \frac{\omega_p^2}{\omega_c c^2}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

$$L_a = \frac{\lambda}{2} = \frac{\pi}{k}$$



# Programma delle attività svolte e da svolgere

## ATTIVITÀ SVOLTE

- Studio dell'equilibrio MHD 1D dello screw-pinch pinch di PROTO-SPHERA e del modello propulsivo derivato.
- Progettazione di un'antenna helicon per lo sviluppo di una sorgente RF di plasma e di un propulsore helicon, attraverso un modello di plasma non collisionale e un modello di plasma collisionale in corso di completamento.
- Modello di distribuzione del campo magnetico all'interno di un ugello magnetico e di evoluzione del plasma all'interno dell'ugello magnetico.
- Calcolo dello scaling fusionistico dell'esperimento PROTO-SPHERA.
- Periodo di formazione di sei mesi svolto presso l'Università di Stoccarda come 'visiting PhD student'.

## ATTIVITÀ IN CORSO

- Studio dell'equilibrio MHD 2D di PROTO-SPHERA e modello di propulsore derivato.
- Test sperimentali sull'antenna helicon e sul propulsore helicon.



# Partecipazione a conferenze e pubblicazioni scientifiche

## Pubblicazioni:

- Poster: Plasma thruster design through a predictive model of the PROTO-SPHERA experiment arc state, presso il First Symposium for Young Chemists 2022: Innovation and Sustainability.
- Poster: A new indirect measurement method of the electron temperature for the PROTO-SPHERA's pinch plasma, presso la '6° International Conference Frontiers in Diagnostic Technology'.
- Articolo: A new indirect measurement method of the electron temperature for the PROTO-SPHERA's pinch plasma, sul Journal of Instrumentation (ICFDT6).

## Conferenze programmate:

- 2° International Conference of Aerospace and Aeronautical Engineering, dal 21 al 23 Marzo 2024 a Firenze
- International Electric Propulsion Conference (IEPC) 2024, dal 23 al 28 Giugno a Tolosa



## PROPULSORE AL PLASMA A FUSIONE NUCLEARE

- Pubblicazione dello studio concettuale (primo nel suo genere) sul propulsore a fusione basato sull'esperimento PROTO-SPHERA;
- Studi concettuali sul propulsore al plasma a fusione nucleare basati su configurazioni magnetiche alternative (per es. FRC) a quelle di PROTO-SPHERA.

## PROPULSORE AL PLASMA HELICON

- Completamento della sperimentazione con la sorgente helicon in ENEA;
- Continuazione delle attività sperimentali per testare propulsori al plasma in SIA.

Dottorato di ricerca in Energia e Ambiente  
Responsabile scientifico Sapienza (Tutor): Antonella Ingenito  
Tutor scientifico ENEA: Dr. Ing. Francesco Napoli  
Dottorando: Ing. Daniele Iannarelli

Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE),  
Università di Roma la Sapienza  
Anno Accademico 2023-2024

Grazie per la Vostra Attenzione!



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Progetto di propulsori al plasma per trasporto spaziale sostenibile  
Dottorato di ricerca in Energia e Ambiente

Responsabile scientifico Sapienza  
E-mail: antonella.ingenito@uniroma1.it

Coordinatore: Dr. Gianfranco Caruso  
E-mail: gianfranco.caruso@uniroma1.it