

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



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

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



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Progetto di propulsori al plasma per trasporto spaziale sostenibile

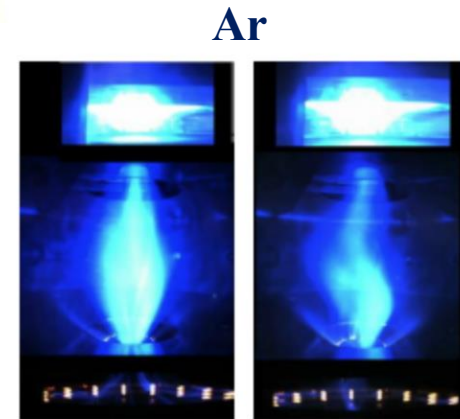
D. Iannarelli, A. De Ninno, A. Ingenito, S. Mannori, F. Napoli

**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.

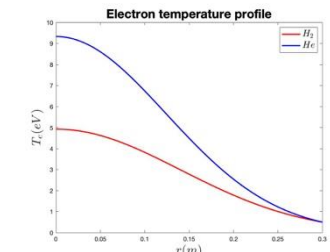
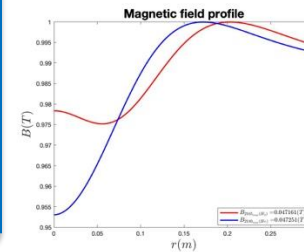
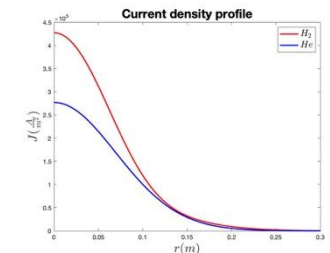
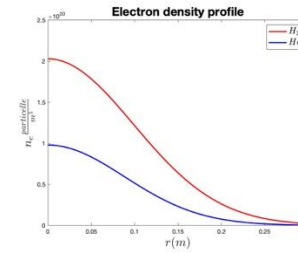
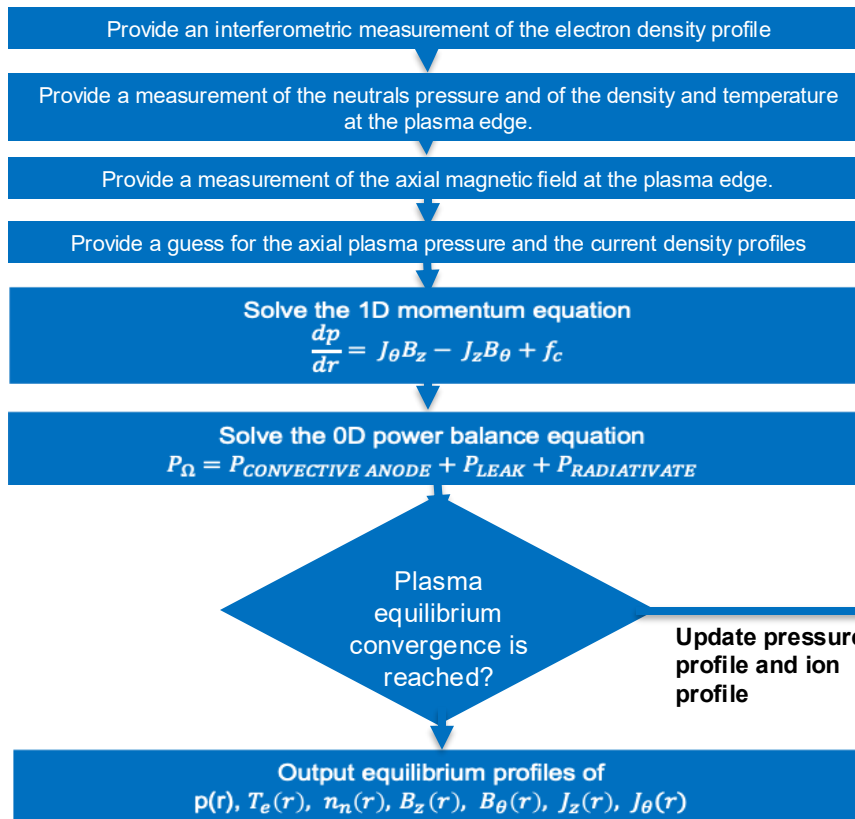




Modello 1D di equilibrio del pinch di PROTO-SPHERA

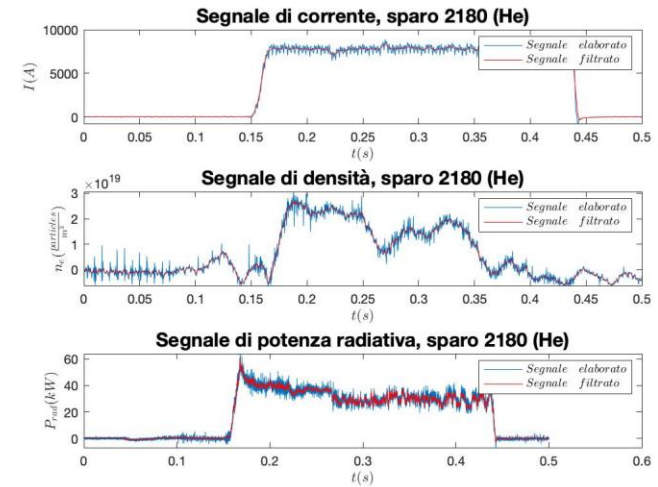
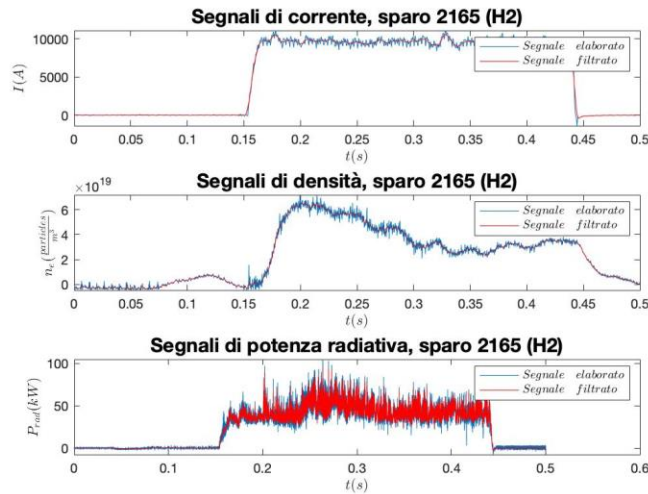
$$\begin{cases} \nabla x B = \mu_0 J \\ \nabla p = J x B + f_c \\ P_{\Omega} + P_{RF} = P_{CONVETTIVA ANODO} + P_{GETTO} + P_{RADIATIVA} \end{cases}$$

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





Modello 1D di equilibrio del pinch di PROTO-SPHERA

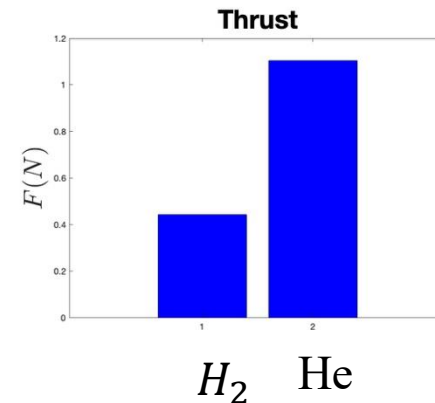
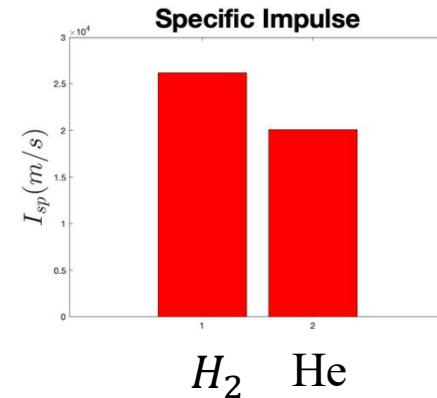


Specie	Shot	I_z (kA)	$ T_{e_{num}}$ (eV)	$T_{e_{exp}}$ (eV)	$P_{rad_{num}}$ (kW)	$P_{rad_{exp}}$ (kW)
H ₂	2165	10.5	3.32	N.A.	42.0	42.7
He	2180	8.5	6.21	5.5*	46.2	43.9



Modello propulsivo per il pinch di PROTO-SPHERA

$$P_{getto} = \gamma(P_{\Omega} + P_{RF})$$
$$\gamma = 2 \frac{\Omega}{2\pi} H = 2(1 - \cos \theta)H$$
$$\theta = \sin^{-1} \left[\left(\frac{B_{zmin}(r=0)}{B_{zmax}(r=0)} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$
$$I_{sp} = v_{th} = \left(\frac{k_B T_e}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$F = \frac{P_{getto}}{v_{th}}$$
$$\dot{m} = \frac{F}{I_{sp}}$$

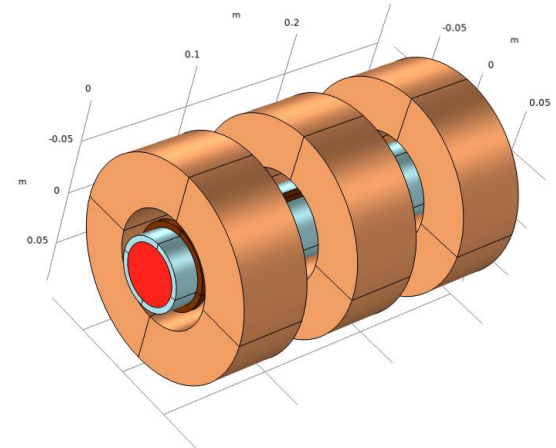
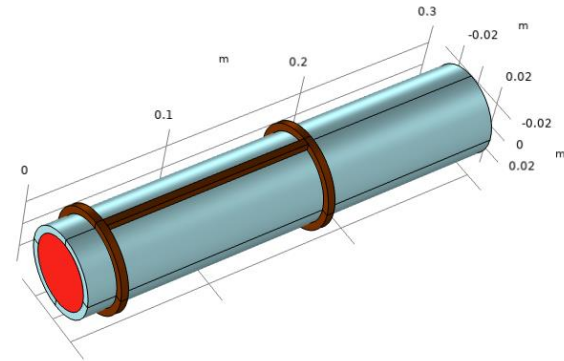
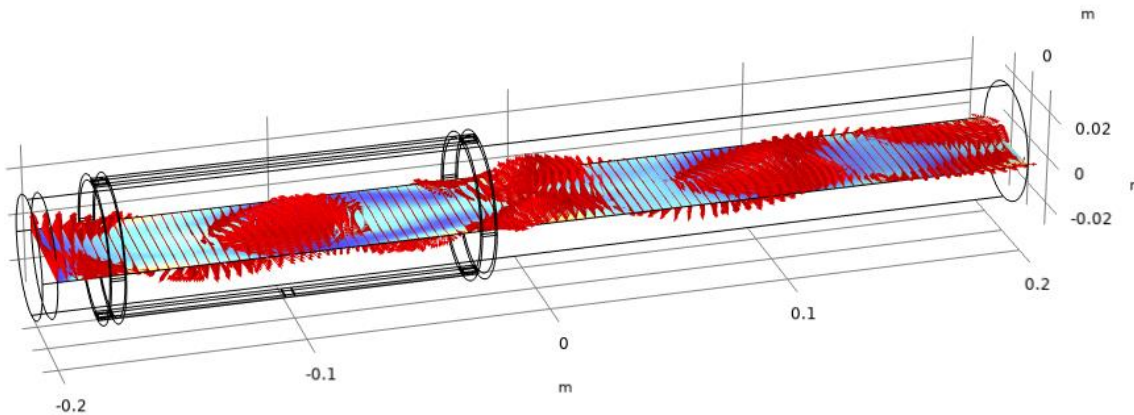




Progetto di un propulsore helicon al plasma (in collaborazione con l'azienda IONVAC)

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

H_p

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

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha^2 = T^2 + k^2 \\ \alpha = \frac{\omega \mu_0 en_0}{k B_0} = \frac{\omega}{k} \frac{\omega_p^2}{\omega_c c^2} \end{array} \right.$$

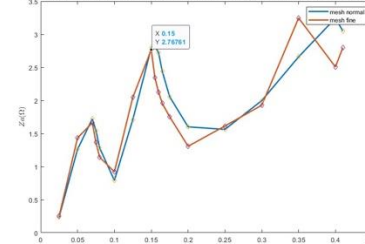
$$\alpha = \pm \sqrt{\frac{T^2 + \sqrt{T^4 + 4 \frac{\omega^2 \omega_p^4}{\omega_c^2 c^4}}}{2}}$$

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

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

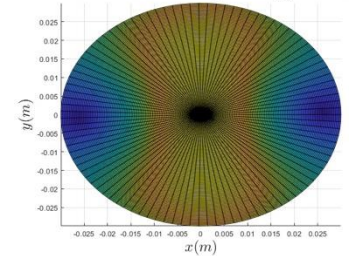
$$L_a = \frac{\lambda}{2} = \frac{\pi}{k}$$

Impedenza di antenna al variare della lunghezza di antenna



$f = 30 \text{ MHz}$

Modulo del campo magnetico





Programma delle attività svolte e da svolgere

ATTIVITÀ SVOLTE

- Studio dell'equilibrio MHD 1D dello screw-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