



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



CONSORZIO RFX
Ricerca Formazione Innovazione

Modelli Fisici e Ingegneristici per lo sviluppo e l'ottimizzazione dell'Iniettore di Neutri di ITER

G. Chitarin

Univ. di Padova e Consorzio RFX

Con i contributi di:

P. Agostinetti, V. Antoni, M. Cavenago, E. Gazza, N. Marconato, N. Pilan, G. Serianni, P. Sonato, P. Veltri

Sommario



- Introduzione e Motivazioni:
 - Requisiti per il riscaldamento addizionale di ITER
 - Iniettore di Neutri per ITER ed esperimenti SPIDER e MITICA a Padova
- Modelli per la simulazione fisica e l'ottimizzazione del progetto di:
 - Sorgente di ioni negativi
 - Acceleratore del fascio di ioni negativi
 - Filtri per la rimozione degli elettroni
 - Neutralizzatore
 - Filtro per la rimozione degli ioni residui
 - Calorimetro

Requisiti per il riscaldamento addizionale di ITER



Obiettivo scientifico/tecnologico fondamentale dell'esperimento ITER:

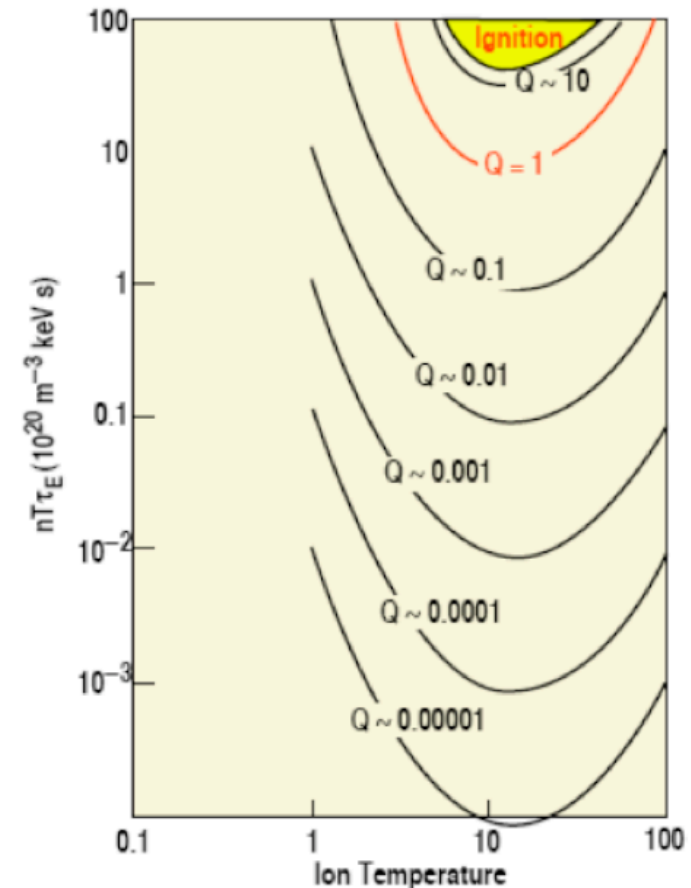
- **potenza termica prodotta da fusione:** $P_{fus} \approx 500 \text{ MW}$
- **fattore di moltiplicazione:** $Q \approx 10$
- **funzionamento in regime stazionario per:** $t_{pulse} \approx 3600 \text{ s}$

⇒ **Potenza termica che deve essere fornita dall'esterno :** $P_{ext} = P_{ohm} + P_{aux}$
(con $Q=10$) **$\approx 50 \text{ MW (minimo)}$**

P_{ohm} = potenza ohmica $\sim T^{-3/2}$ si riduce rapidamente con la temperatura

P_{aux} fornita da diversi **Sistemi di Riscaldamento Addizionale:**

- Risonanza ciclotronica degli Elettroni (170 GHz) $P_{ECH} = 20 \text{ MW}$
- Risonanza ciclotronica degli Ioni (40-55 MHz) $P_{ICH} = 20 \text{ MW}$
- **Iniezione di un fascio di Atomi Neutri (1 MeV)** $P_{NBI} = 33 \text{ MW}$



Nei sistemi a radiofrequenza (ECH, ICH e LHH) efficienza e profilo di deposizione dipendono fortemente dalla configurazione magnetica.

Il riscaldamento per Neutral Beam Injection (NBI Heating) è considerato il sistema più affidabile, dovrà fungere da "cavallo da tiro" di ITER

Perchè Ioni Negativi a 1 MeV?

Lo spessore di penetrazione λ del fascio di atomi neutri dipende dalla densità di plasma n_p e dalle sezioni d'urto di scambio carica (σ_c) e di ionizzazione (σ_i) nelle collisioni tra plasma e neutri iniettati (H^0 e D^0):

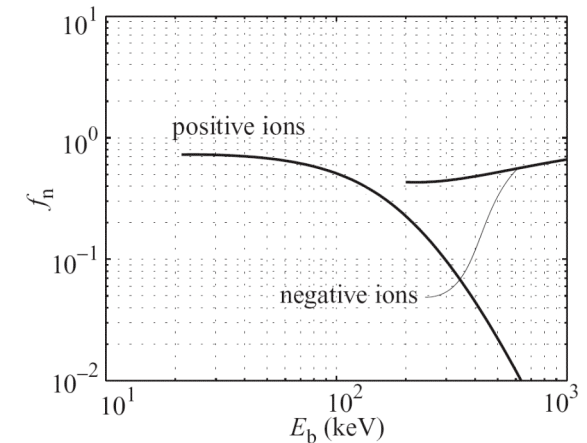
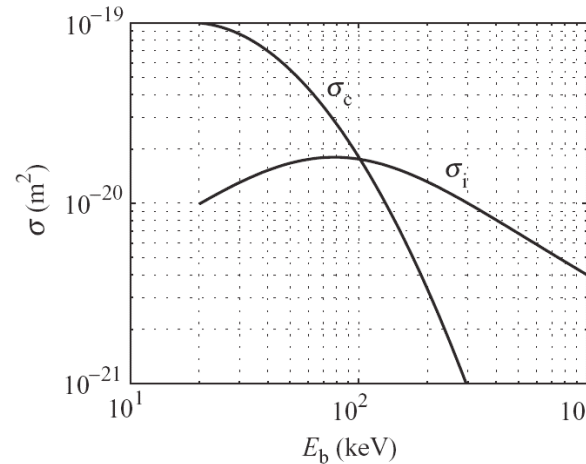
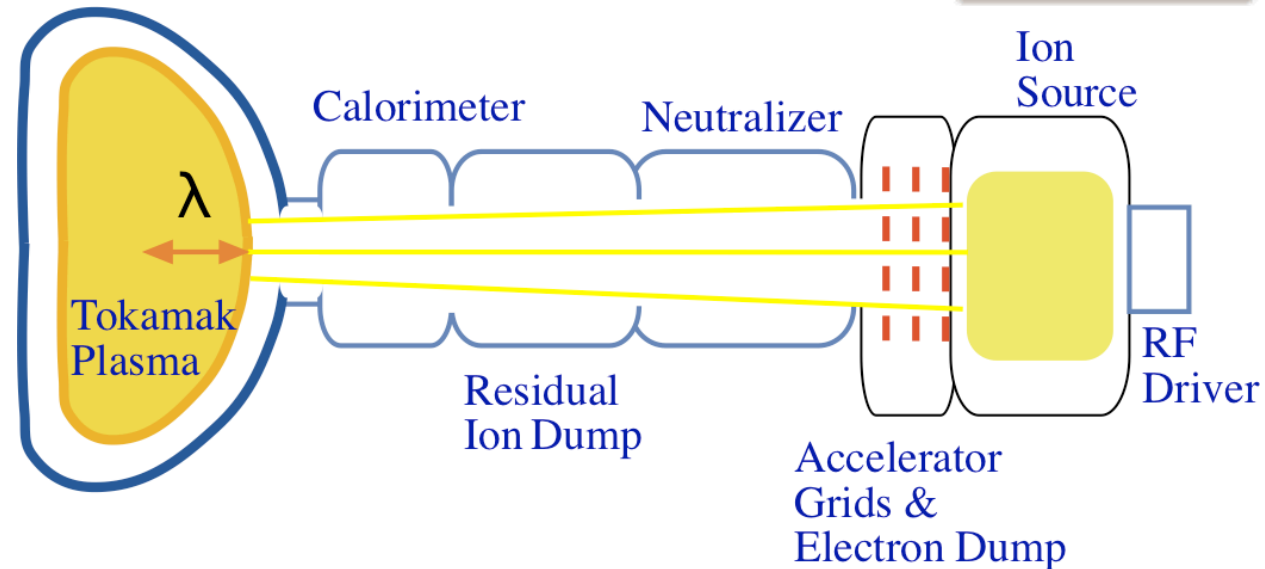
$$\lambda = \frac{1}{n_p(\sigma_c + \sigma_i)}$$

σ_c e σ_i , a loro volta, dipendono dall'energia delle particelle neutre iniettate E_0 .

Per una **ottimale deposizione della potenza** P_{NBI} nella parte centrale del plasma occorre che λ sia circa pari al raggio minore del tokamak. Nel caso di ITER ponendo $n_p \approx 10^{20} m^{-3}$ e $\lambda \approx 2.5$ m risulta un'energia specifica:

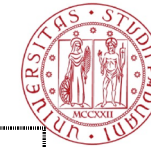
$$E_0 \approx 1 \text{ MeV}$$

Il fascio di particelle neutre (H^0 e D^0) viene prodotto accelerando un fascio di ioni (positivi o negativi) e poi neutralizzandolo.



L'efficienza di neutralizzazione f degli ioni positivi cala a valori inaccettabili per energie specifiche $E_0 > 150$ keV.

Confronto con Iniettori attualmente esistenti



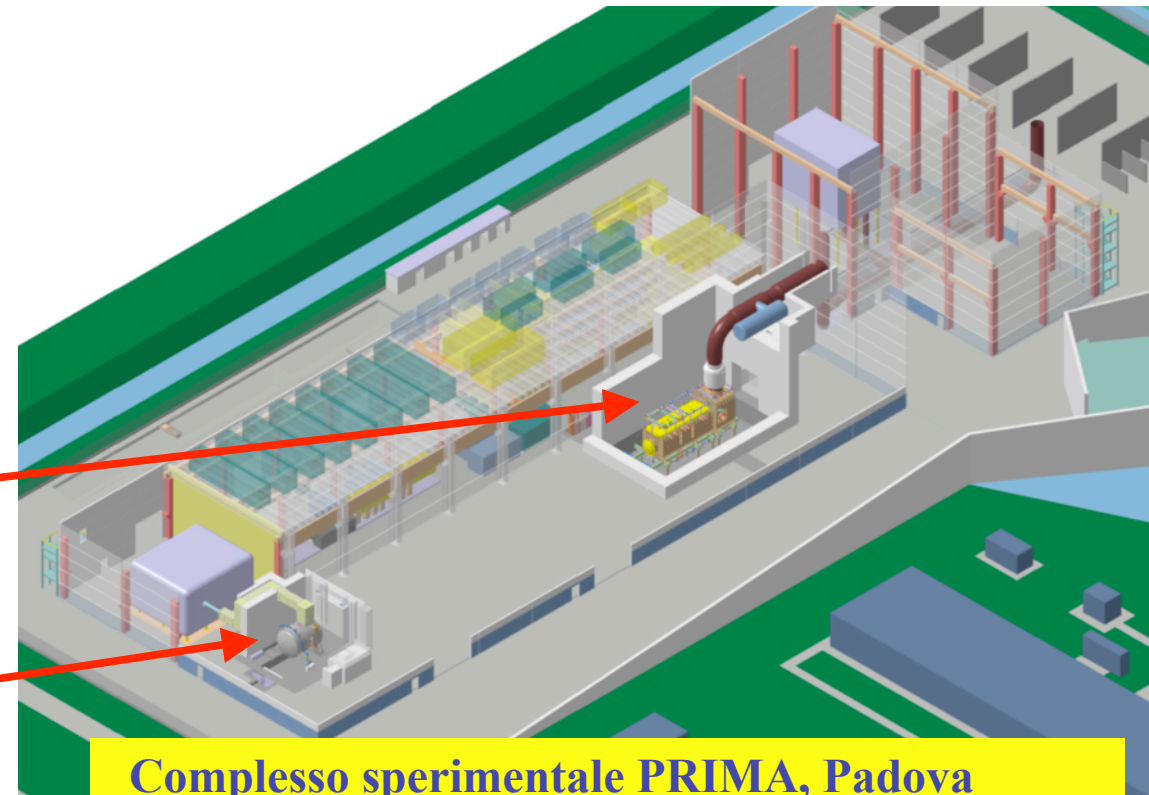
	numero di Iniettori	polarità Ioni	Energia specifica (keV)	Potenza totale (MW)	durata impulso (s)
JET (Culham, UK)	2x8	Positivi	130	20	10
ASDEX-U (Garching, D)	2x4	Positivi	90	20	10
DIII-D (San Diego, USA)	2	Positivi	84	6	3
LHD (Toki, Japan)	4	Negativi	180	23	100
	12	Positivi	85	24	30
JT60-U (Naka, Japan)	2	Negativi	340	3	30
ITER	2	Negativi	1000	33	3600

Grosso "salto" di prestazioni rispetto all'attuale stato dell'arte in termini di energia specifica del fascio e di durata temporale.

Per acquisire l'esperienza necessaria per realizzare e far funzionare in modo affidabile gli Iniettori, ITER ha approvato la costruzione a Padova di 2 esperimenti:

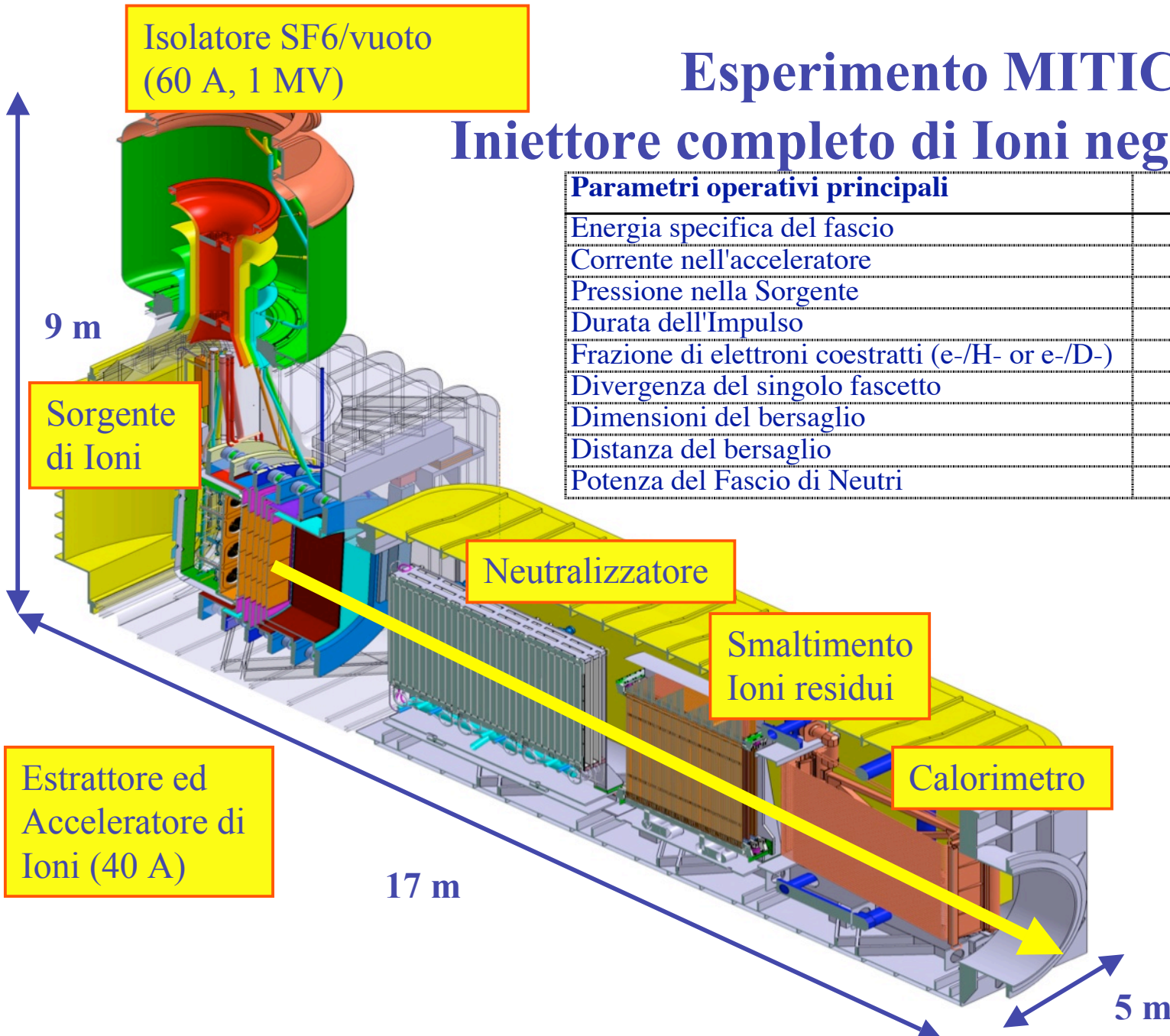
MITICA: Iniettore completo a 1000 kV "identico" a quello di ITER

SPIDER: Sorgente, Estrattore ed Acceleratore di Ioni negativi a 100 kV



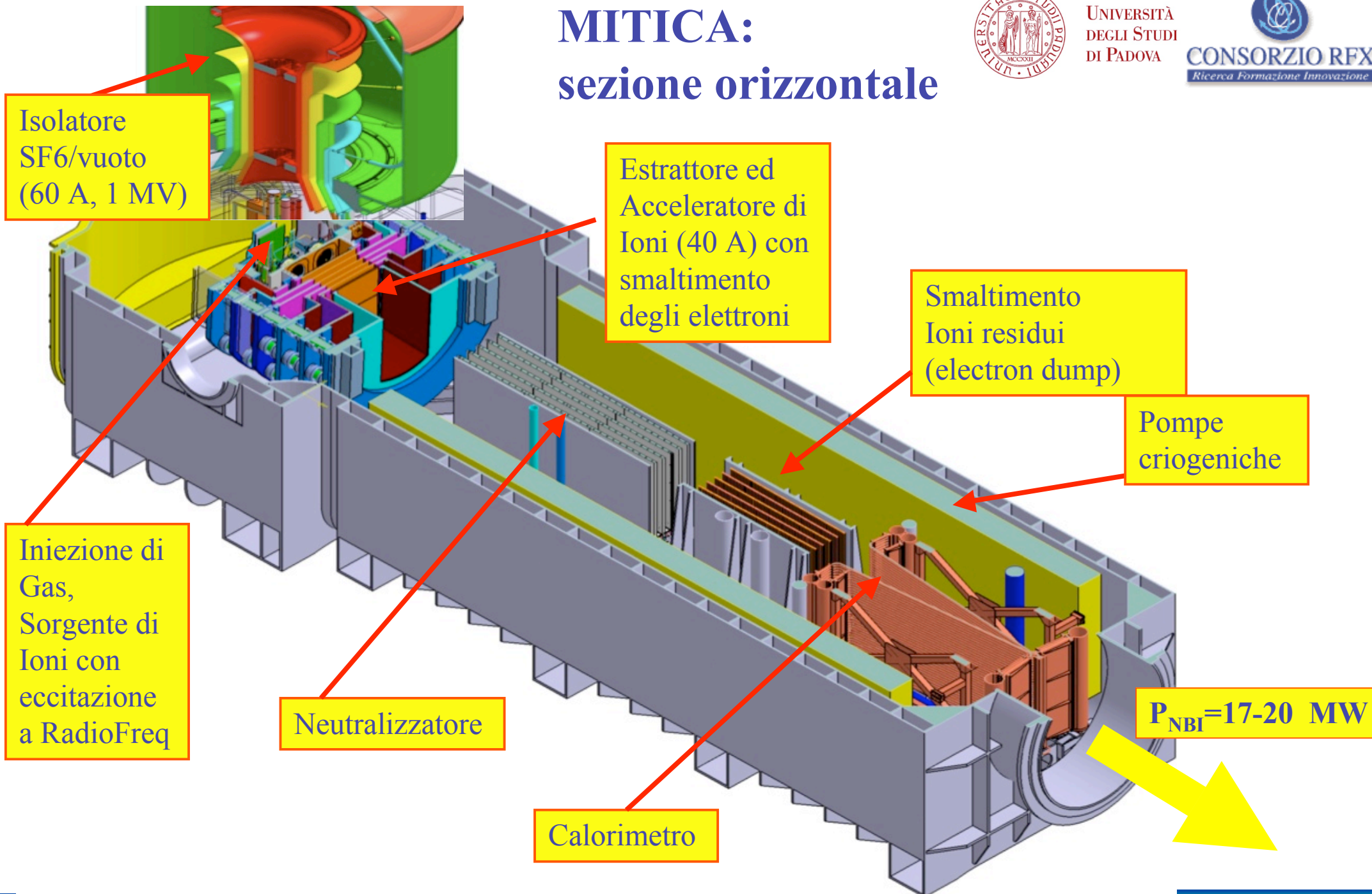
Complesso sperimentale PRIMA, Padova

Esperimento MITICA: Iniettore completo di Ioni negativi a 1 MV

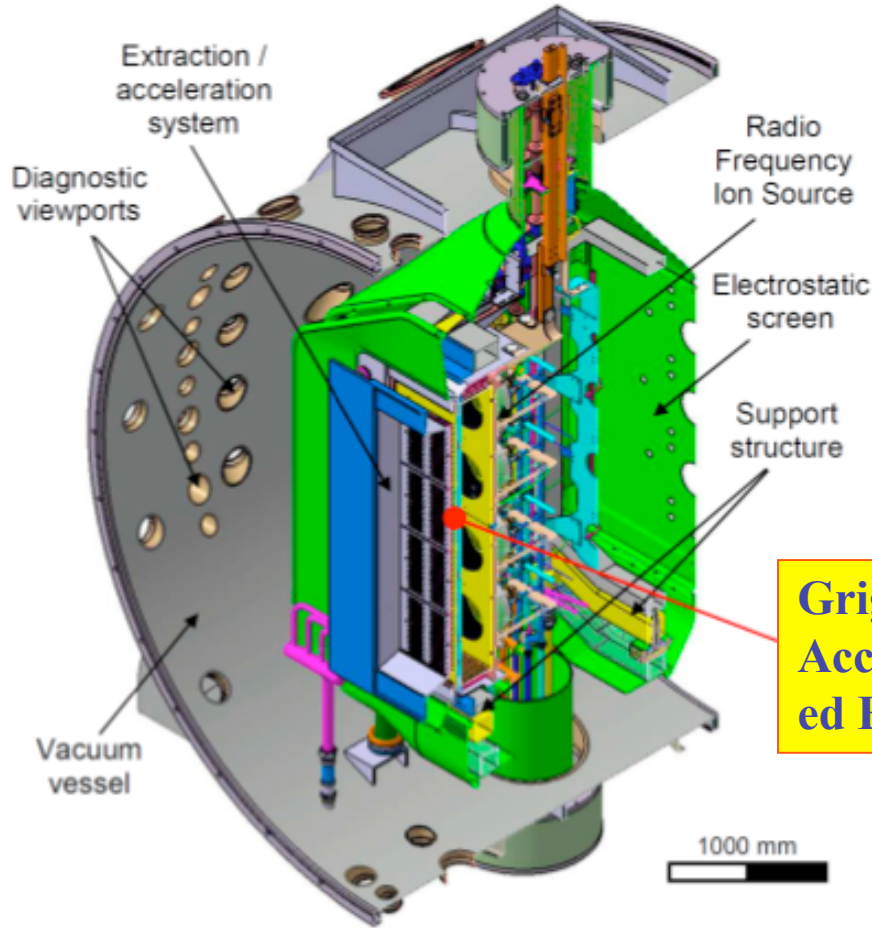


Parametri operativi principali		H ⁰	D ⁰
Energia specifica del fascio	keV	870	1000
Corrente nell'acceleratore	A	49	40
Pressione nella Sorgente	Pa	0.3	
Durata dell'Impulso	s	3600	
Frazione di elettroni coestratti (e-/H- or e-/D-)		<0.5	<1
Divergenza del singolo fascetto	mrad	<7	
Dimensioni del bersaglio	mm ²	580x780	
Distanza del bersaglio	m	23.4	
Potenza del Fascio di Neutri	MW	17-20	

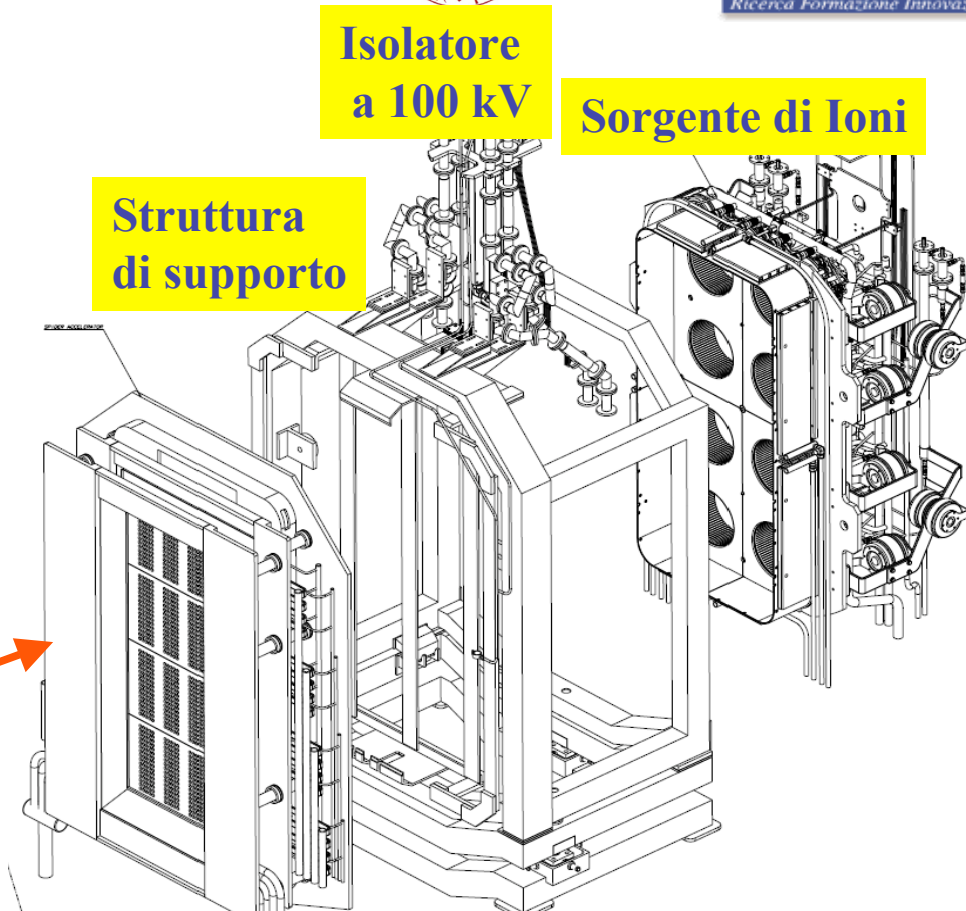
MITICA: sezione orizzontale



SPIDER: Sorgente, Estrattore ed Acceleratore di Ioni negativi a 100 kV



Griglie di Accelerazione ed Estrazione



Parametri operativi principali

		H ⁰	D ⁰
Energia specifica del fascio	keV	100	100
Densità di Corrente estratta	A/m ²	355	285
Pressione della sorgente	Pa	0.3	
Uniformità della densità di corrente		±10%	
Durata impulso	s	3600	
Frazione di elettroni coestratti (e-/H- or e-/D-)		< 0.5	< 1

Principali fenomeni fisici da modellare per il progetto, l'ottimizzazione e l'interpretazione dei risultati sperimentali:



- Produzione ed estrazione di ioni negativi (ed elettroni), accoppiamento RF, effetti del cesio, formazione del menisco, ioni ed elettroni coestratti

Sorgente

- Accelerazione e focalizzazione del fascio di ioni negativi, configurazione del campo elettrico di accelerazione, carica spaziale e configurazione di campo magnetico (filtro, soppressione e compensazione)

- Tenuta alta tensione in vuoto
- Eliminazione degli elettroni

Acceleratore

- Collisioni e interazioni tra particelle cariche e non, collisioni con pareti, carichi termici.

Neutralizzatore

- Neutralizzazione mediante gas

- Smaltimento degli Ioni residui

Ion Dump

- Interazione con il calorimetro o con il plasma

Calorimetro

Problemi e Modelli relativi alla sorgente e all'estratto:



- composizione del plasma prodotto (H_2 , H^0 , H^+ , e^- , H^-)
- effetti del cesio
- formazione del menisco
- configurazione del campo elettrico di accelerazione
- estrazione e focalizzazione di un fascetto (beamlet) di ioni negativi
- filtro per evitare co-estrazione di elettroni

Obbiettivi principali:

- => elevata densità di corrente H^- o D^- estratta
- => bassa percentuale di elettroni coestratti
- => corretta forma del menisco
- => uniformità e collimazione del fascio estratto

Produzione di Ioni negativi

Gli ioni H^- (o D^-) vengono creati in un plasma eccitato da un induttore a radiofrequenza (RF) mediante 2 meccanismi:

Produzione di "superficie":



Favorita dalla presenza di Cesio

Produzione di "volume":

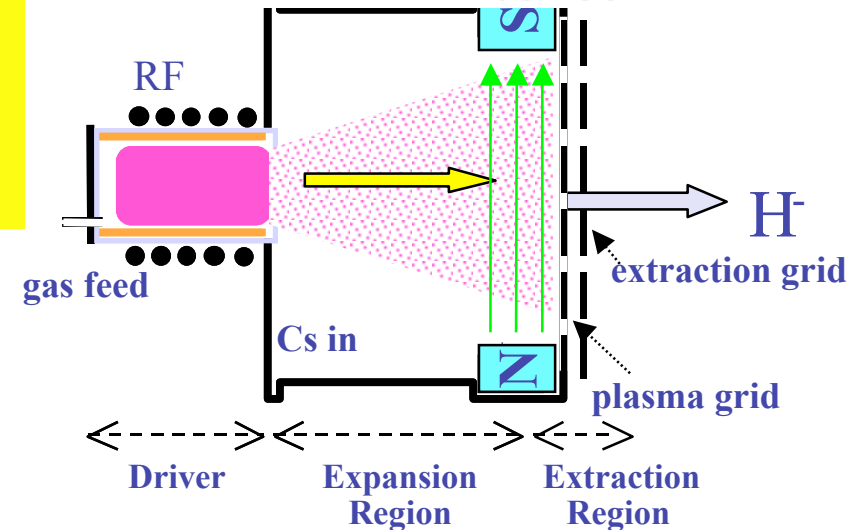
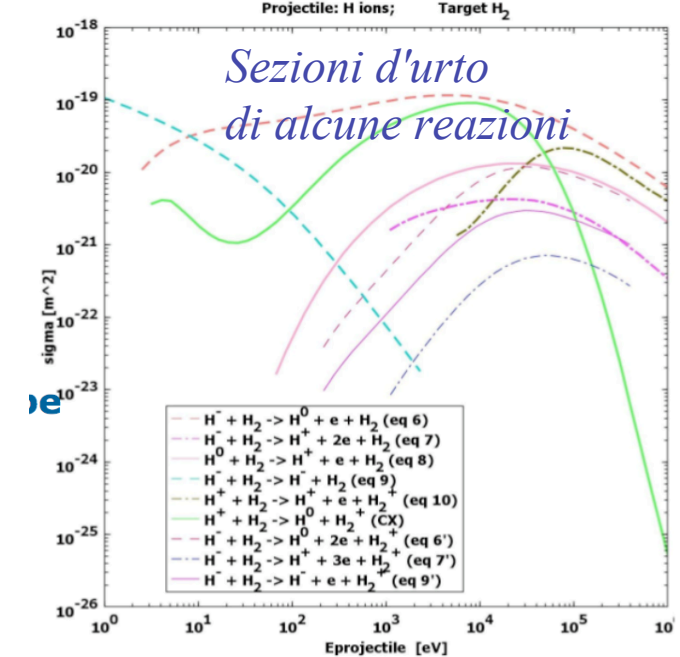


Si è sviluppato un Modello numerico dei fenomeni collisionali-radiativi nella sorgente per:

- Quantificare la densità delle specie nel plasma e il livello di popolazione dei livelli atomici/molecolari.
- Fornire le "condizioni iniziali" per i modelli che descrivono l'estrazione ed ottica del fascio.
- Fornire una base per l'interpretazione delle misure spettroscopiche.

Grande varietà di possibili reazioni tra atomi e ioni di diverse specie => ampio database di reazioni atomiche e molecolari (sezioni d'urto ed energie).

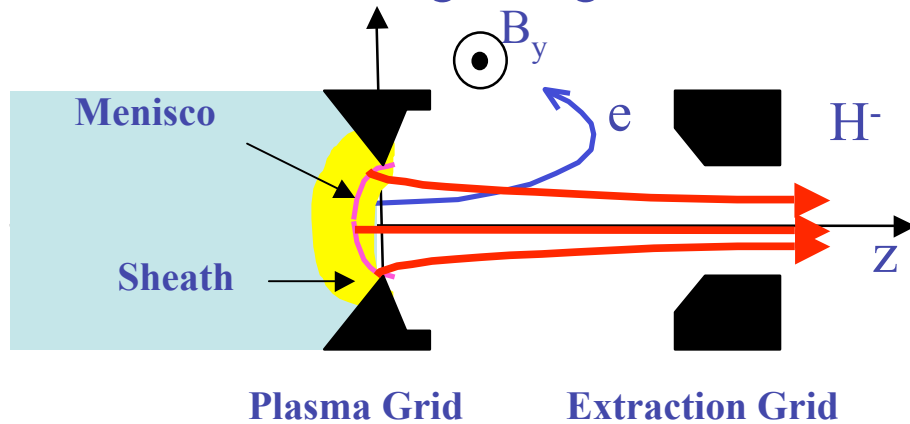
Campo magnetico trasversale (B_x) di filtro per ridurre il numero di elettroni che si avvicinano alla griglia.



Schema della sorgente di ioni negativi

Estrazione di Ioni negativi

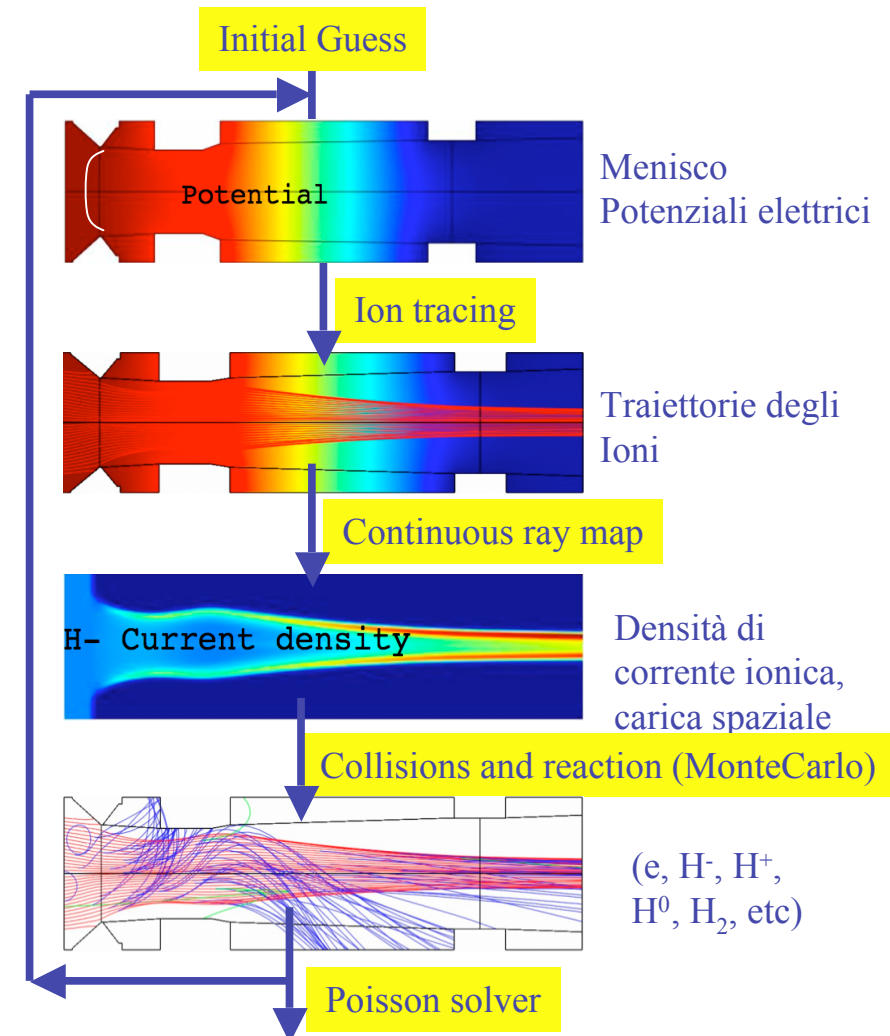
Estrazione avviene attraverso un elettrodo con fori di circa 10-15 mm (griglia), con formazione di un *menisco* che, grazie alla forma svasata dell'elettrodo, agisce come una lente elettrostatica che controlla l'ottica di ogni singolo fascetto estratto, facendolo collimare.



Schema della regione di estrazione, la tensione tra la prima griglia (Plasma Grid) e la seconda (Extraction Grid) vale circa -10 kV

E' stato sviluppato uno modello numerico per l'estrazione e per il "ray tracing" (BYPO) :

- simulazione dello strato limite (sheath) di plasma
- determinazione della forma del menisco in modo autoconsistente
- estrazione di carica di entrambe le specie (H^- , e) di un singolo fascetto



Schema di principio di BYPO

Problemi e Modelli relativi all'Acceleratore:



- Campo Elettrico di accelerazione: focalizzazione, effetto della svasatura degli elettrodi, divergenza e deflessione del singolo fascetto, effetti della carica spaziale
- Campo Magnetostatico: ottimizzazione per soppressione degli elettroni e di compensazione degli ioni (traiettorie a "chicane"), uniformità ed effetti di bordo
- Ottica multi fascio, deflessione complessiva del fascio dovuta repulsione e/o disuniformità tra le traiettorie dei fascetti
- Funzionamento in condizioni operative non ottimali
- Campo elettrostatico nell'isolatore passante a 1 MV, scariche in vuoto

Obbiettivi principali:

⇒ Collimazione e uniformità dei singoli fascetti e del fascio complessivo estratto

⇒ Minima deflessione degli ioni, massima deflessione degli elettroni (chicane)

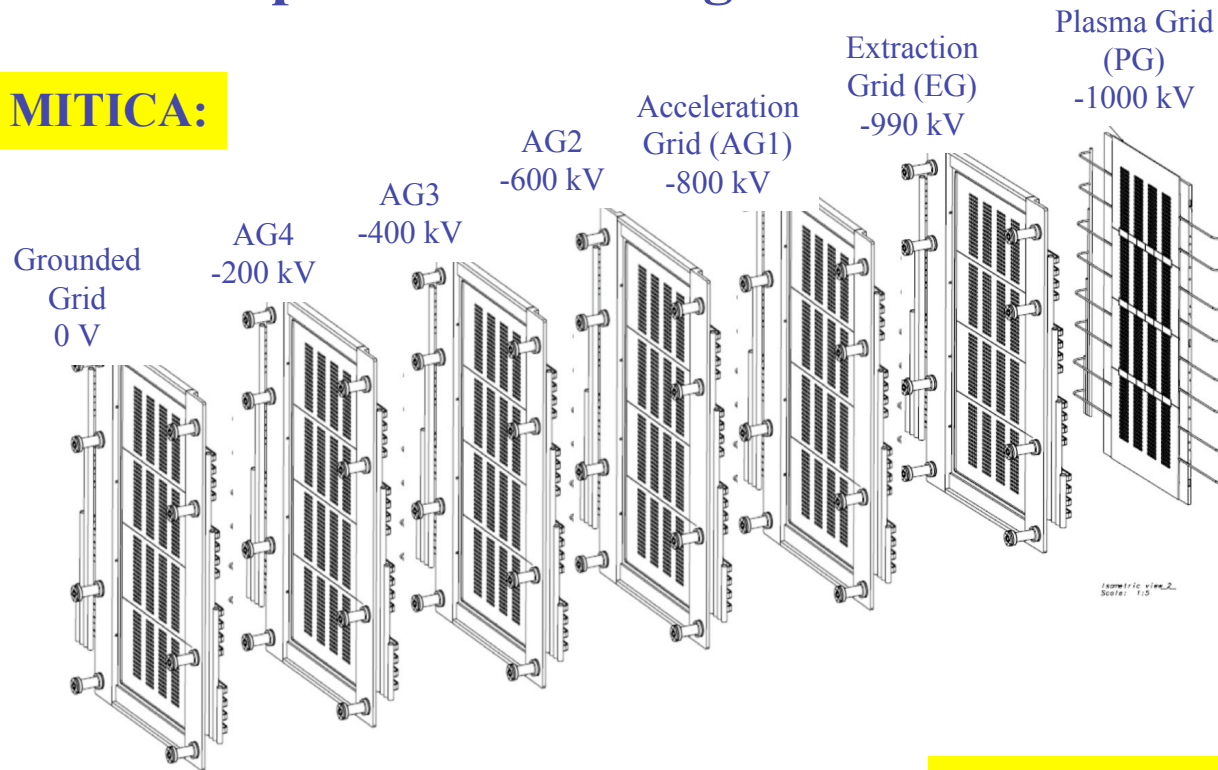
⇒ Tenuta dell'isolamento in vuoto

- E' in corso un confronto con simulazioni di altri laboratori e dati sperimentali di LHD e IPP

Vista "esplosa" delle Griglie di Accelerazione

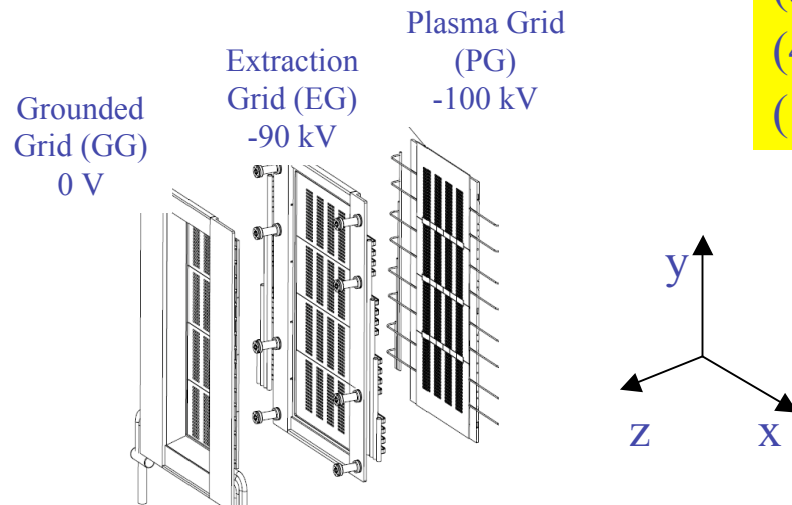


MITICA:

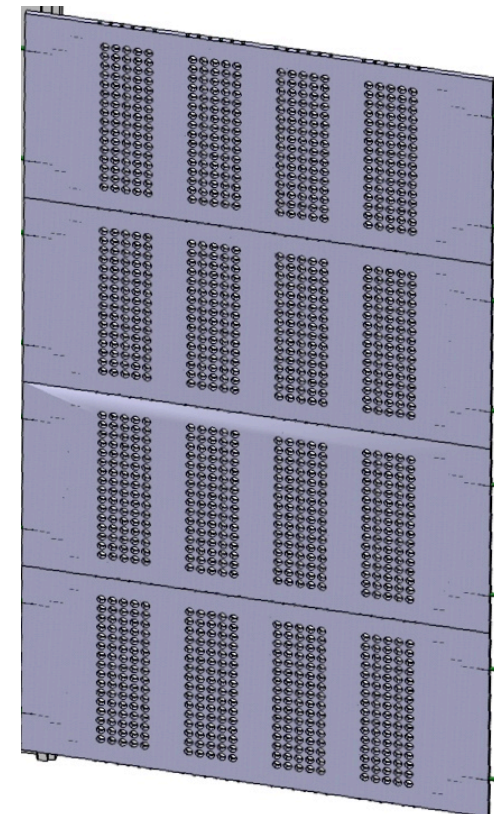


Tipica disposizione delle aperture di una griglia:

SPIDER:



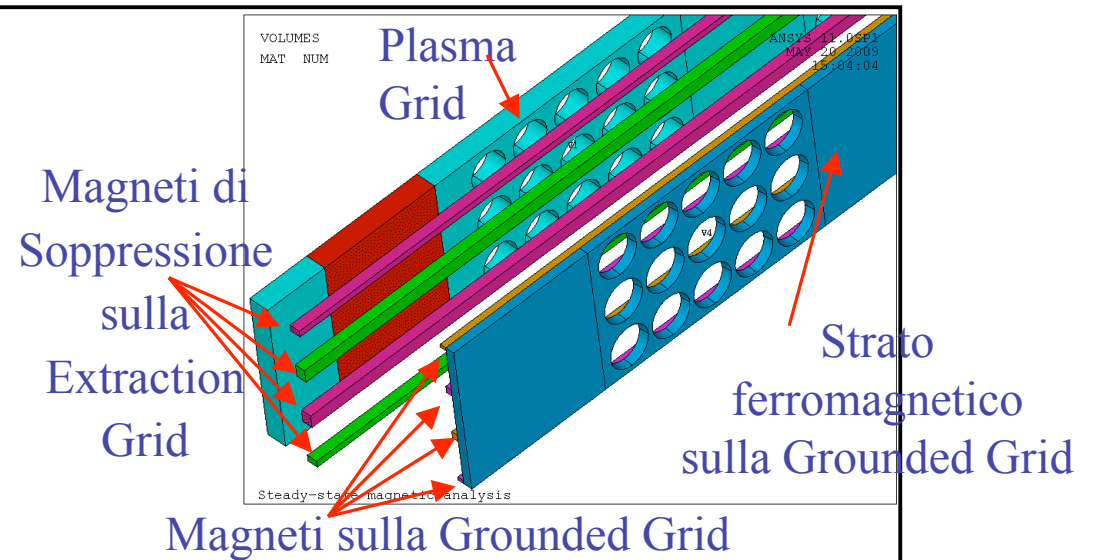
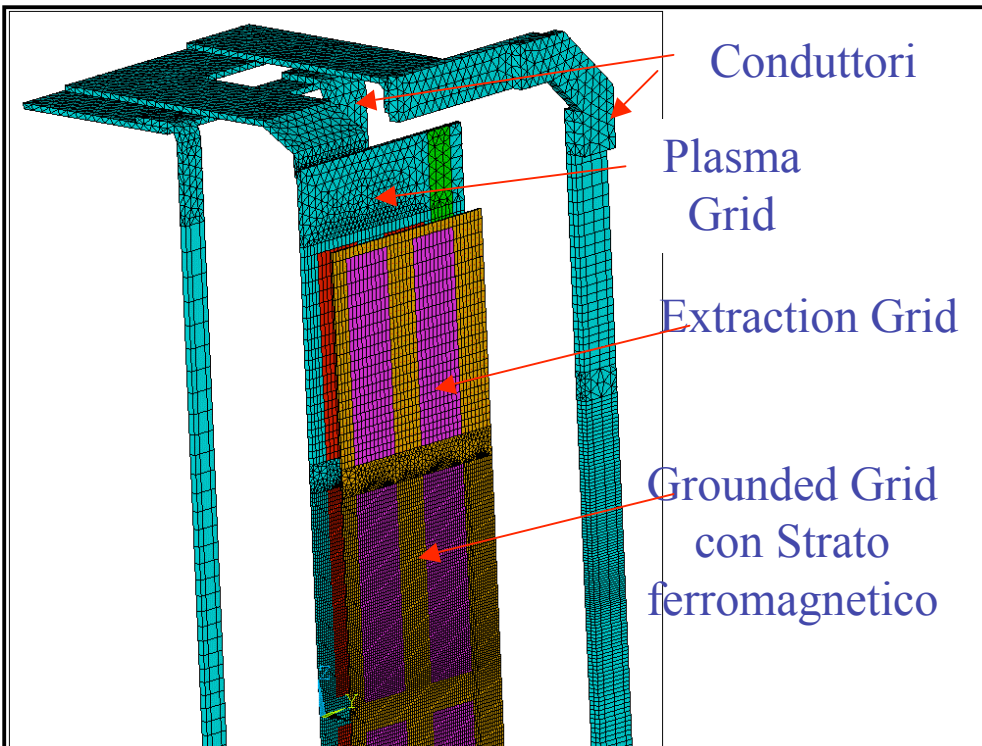
$(5 \times 16) = 80$ beamlet / group
 $(4 \times 4) = 16$ groups of beamlets
 $(16 \times 5 \times 16) = 1280$ beamlets



Ottimizzazione del campo magnetico, uniformità ed effetti di bordo



geometria complessa in cui è necessaria la descrizione contemporanea di piccoli dettagli (aperture delle griglie) e delle disuniformità complessive di tutto il fascio, dovute agli effetti di bordo



Modello dettagliato con tutti i contributi di sorgente di campo

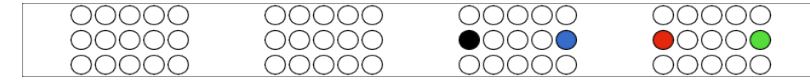
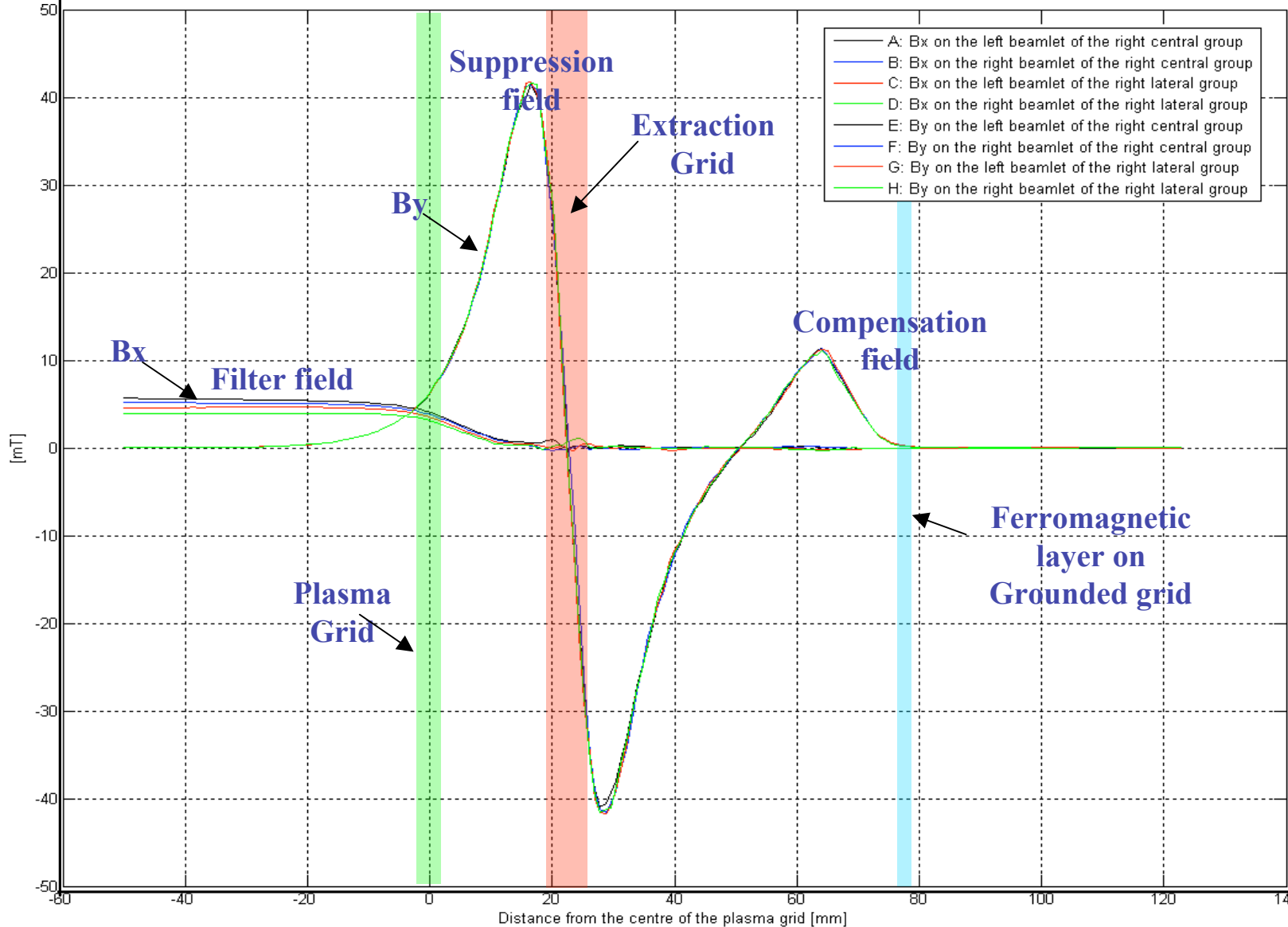
Modello globale dell'intera geometria della sorgente di campo di filtro per analizzare l'uniformità verticale e gli effetti di bordo

- Si è utilizzata una formulazione ibrida:
 - potenziale vettore magnetico nelle regioni con corrente
 - potenziale scalare magnetico nelle regioni in presenza di diversa permeabilità magnetica

Configurazione magnetica complessiva ottimizzata



Bx, By (mT)



Campo ottimizzato per realizzare traiettorie a "chicane" per minimizzare deflessione degli ioni e intrappolare gli elettroni

**Disuniformità del campo:
 $\Delta B_x \sim 10\%$
 $\Delta B_y \sim 2\%$**

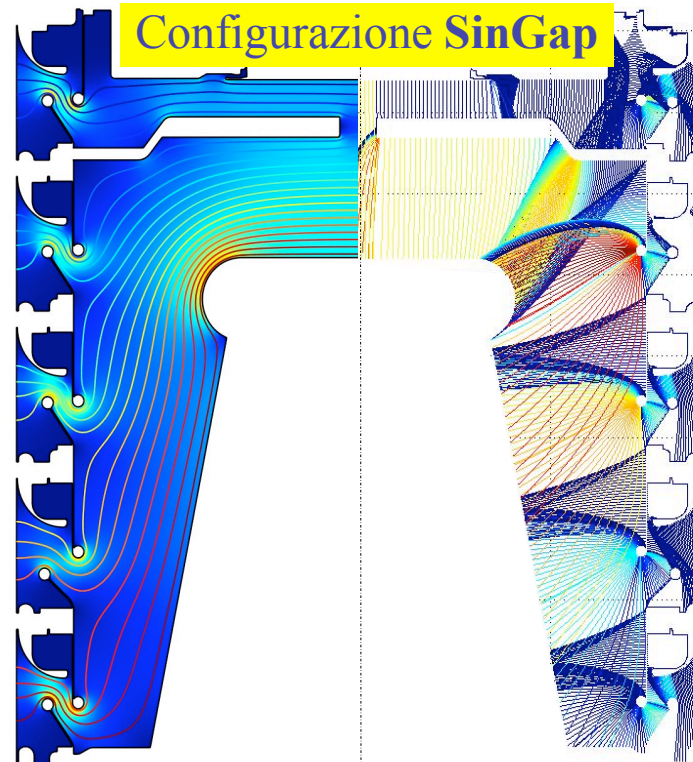
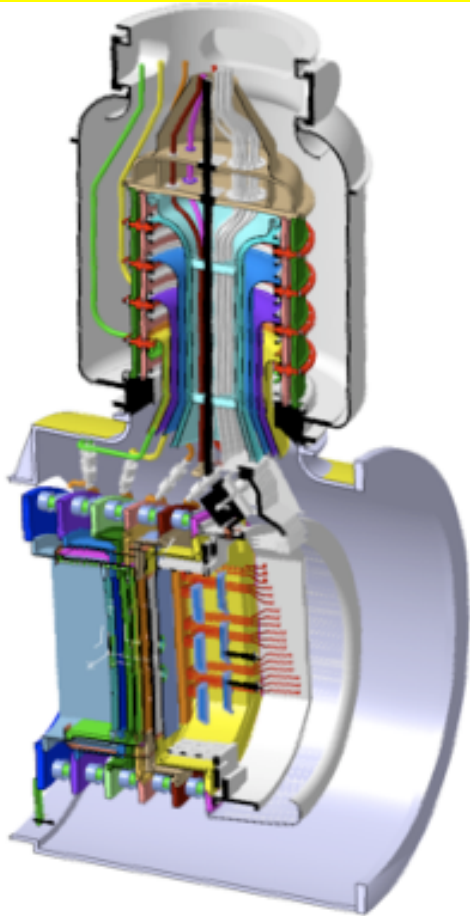
Tenuta dell'alta tensione in vuoto (bushing a 1 MV)



Ottimizzazione della forma per minimizzare probabilità di scarica sulla base del "triplo prodotto" di Slivkov (tensione totale V e campi elettrici E al catodo e all'anodo lungo il percorso di scarica):

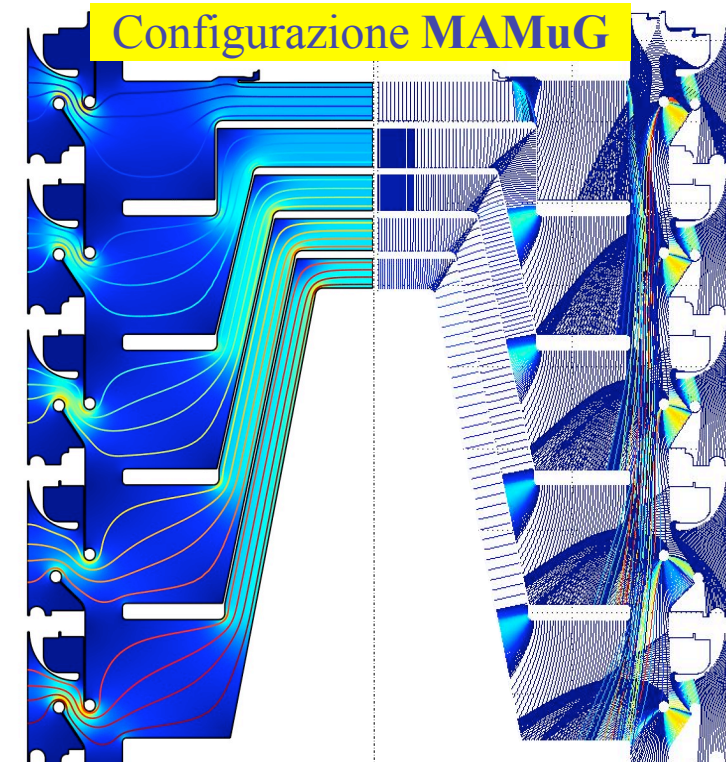
$$W_{\text{Slivkov}} = V E_{\text{cathode}} E_{\text{anode}}^{2/3} < W_{\text{Limite}} \sim 10^{16} \quad (\text{V}^{8/3} \text{m}^{-5/3})$$

Sviluppato un approccio innovativo che quantifica la probabilità complessiva su tutti i possibili percorsi di scarica



Campo elettrico Traiettorie

$E_{\text{MAX}} = 7.5 \cdot 10^6 \text{ [V/m]}$
 $W_{\text{MAX}} = 1.1 \cdot 10^{17} \text{ [V}^{8/3}\text{m}^{-5/3}\text{]}$



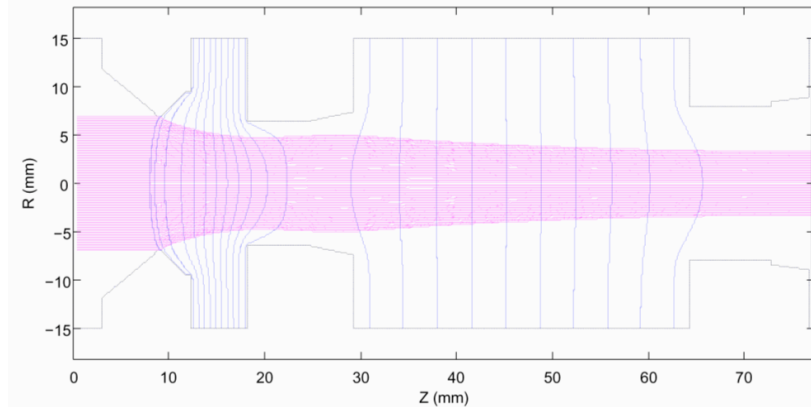
Campo elettrico Traiettorie

$E_{\text{MAX}} = 7.3 \cdot 10^6 \text{ [V/m]}$
 $W_{\text{MAX}} = 4.9 \cdot 10^{16} \text{ [V}^{8/3}\text{m}^{-5/3}\text{]}$

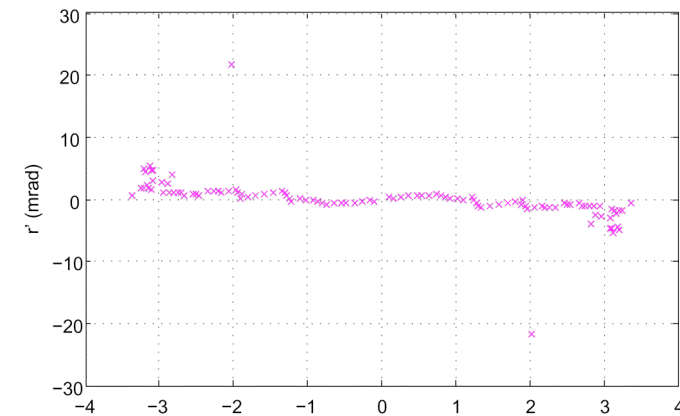
Ottimizzazione dell'ottica di un singolo fascetto di ioni



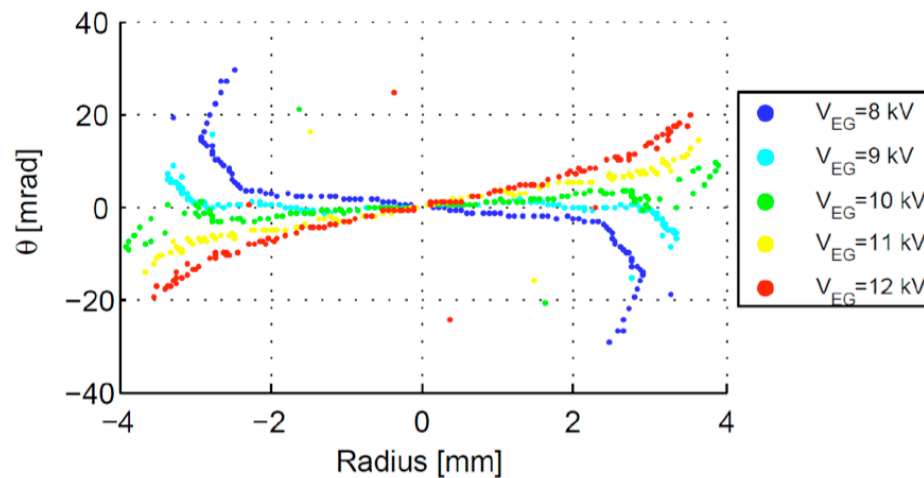
Analisi di sensitività a variazioni di potenziale e corrente estratta sul singolo beamlet mediante **SLACCAD** (codice sviluppato nella comunità degli acceleratori per alte energie e adattato al NBI)



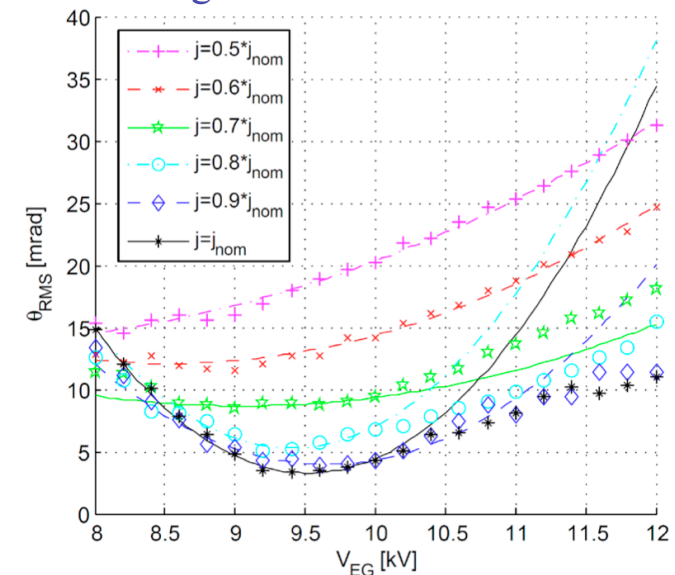
Traiettorie degli ioni H⁻ (geometria assialsimmetrica)



Divergenza del fascetto ottimizzata

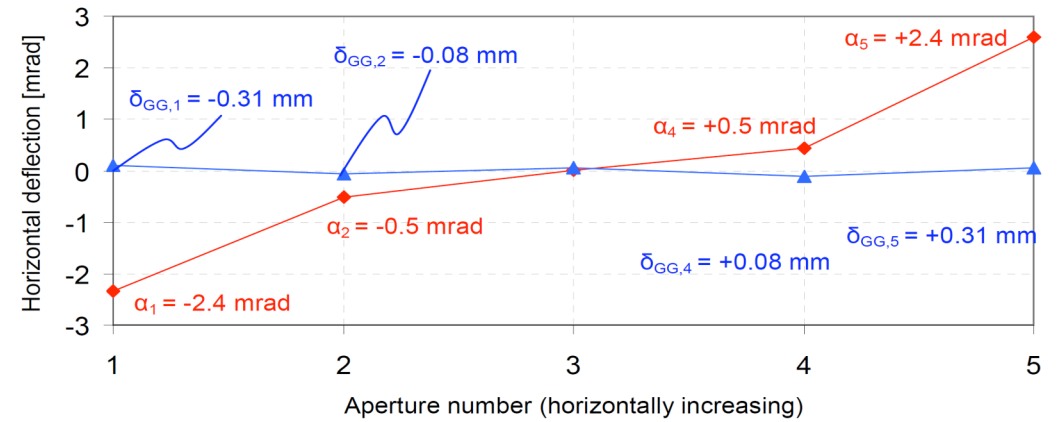
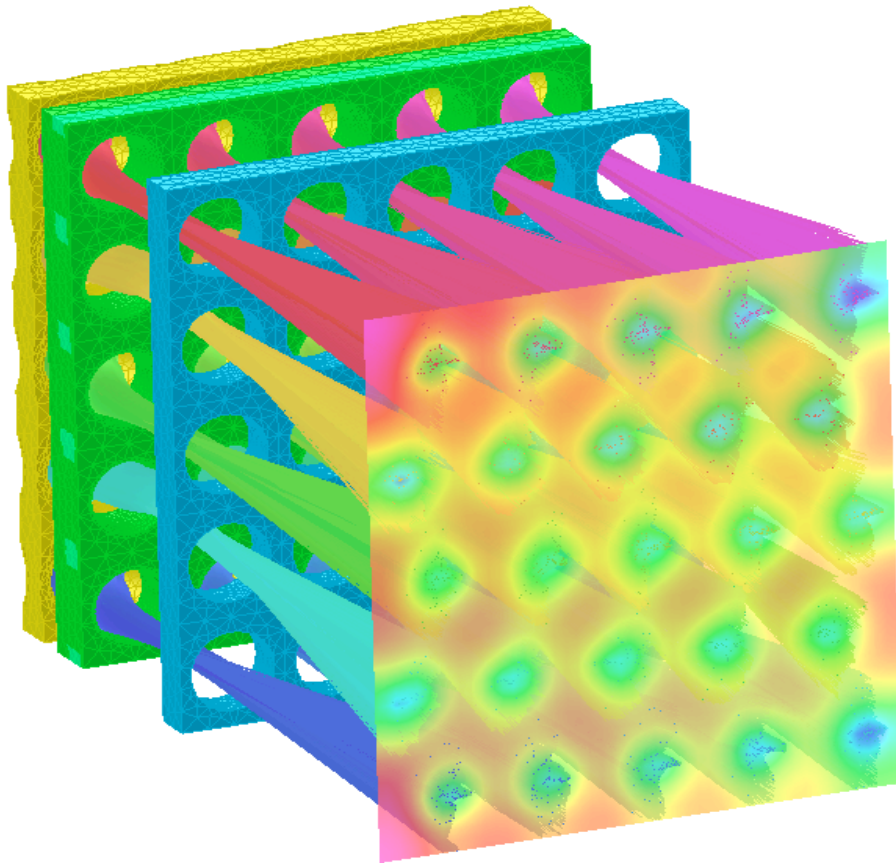


Angolo di divergenza del fascetto in funzione del potenziale della Extraction Grid

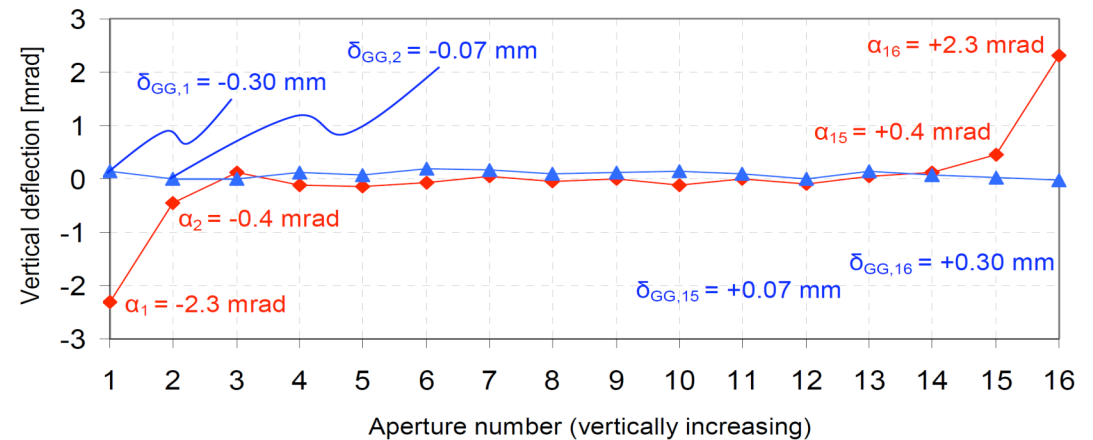


Sensibilità dell'angolo di divergenza medio in funzione della corrente estratta e del potenziale della Extraction Grid

Effetto della carica spaziale: repulsione elettrostatica tra i beamlets (OPERA)



Interazione per repulsione elettrostatica tra i beamlet nella direzione orizzontale



Interazione per repulsione elettrostatica tra i beamlet nella direzione verticale



Problemi e modelli relativi a produzione ed eliminazione di particelle indesiderate (elettroni e Ioni)

- generazione di Elettroni e di altre particelle da collisioni, stripping, scambio carica etc.
- filtri elettrostatici e magnetici per deflessione degli elettroni secondari e degli Ioni (electron dump, residual ion dump)

Obbiettivi principali:

- =>Determinazione delle particelle secondarie
- => Efficace eliminazione degli elettroni secondari
- =>Efficace eliminazione e smaltimento degli Ioni residui
- =>Riduzione e buona distribuzione dei Carichi termici dovuti a elettroni coestratti, da stripping e secondari e ioni residui
- =>Riduzione delle deformazioni dovute ai carichi termici

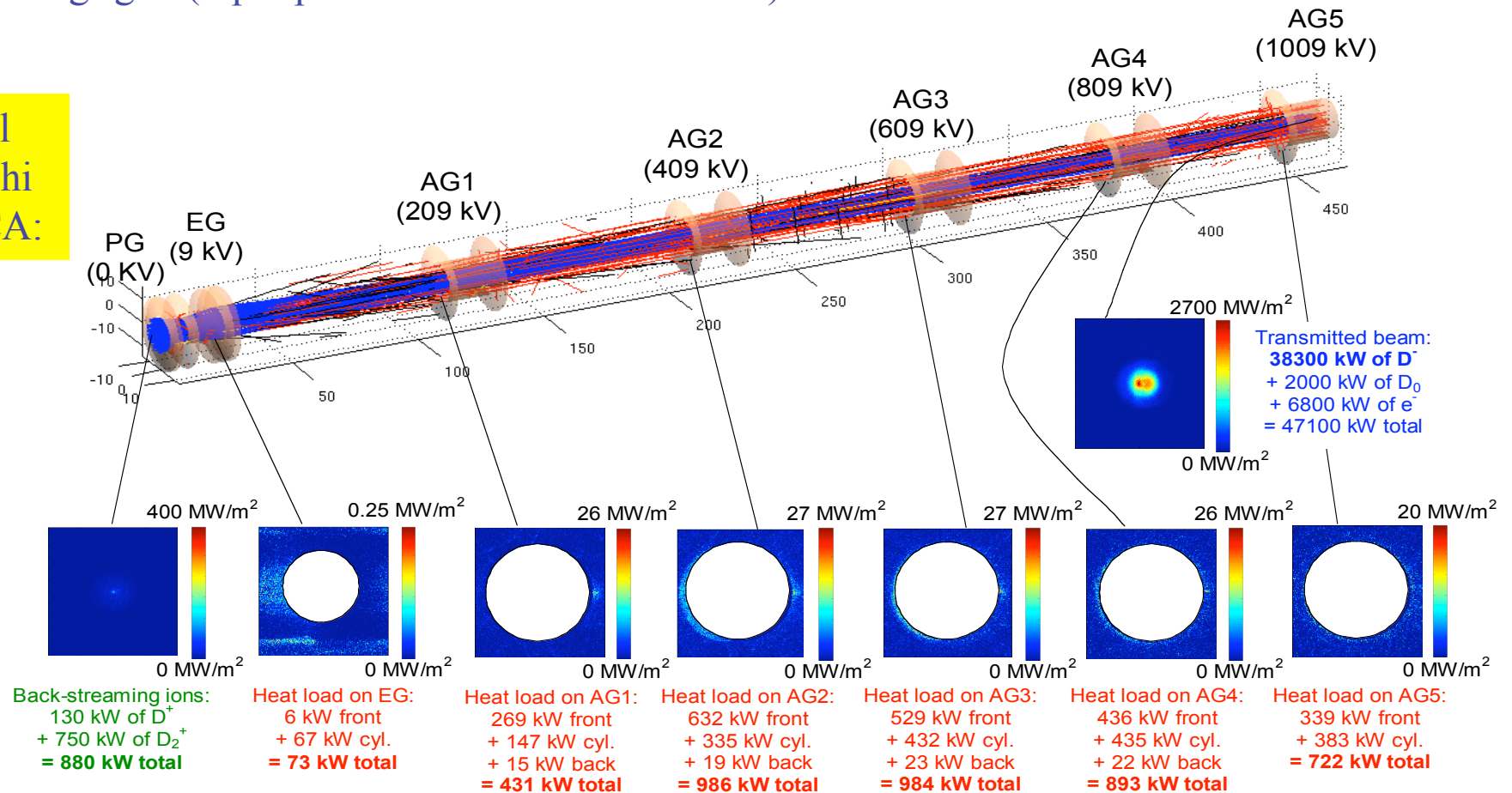
Simulazioni di fisica del fascio di ioni con EAMCC



Applicazione del codice EAMCC (sviluppato dal CEA) per calcolare:

- Reazioni di stripping e scambio carica nell'acceleratore (reazioni di volume e superficiali)
- Traiettorie Ioni H⁻ e altre particelle (elettroni co-estratti, elettroni generati per stripping, ioni positivi, particelle neutre)
- Carichi termici sulle griglie (input per le analisi termostrutturali)

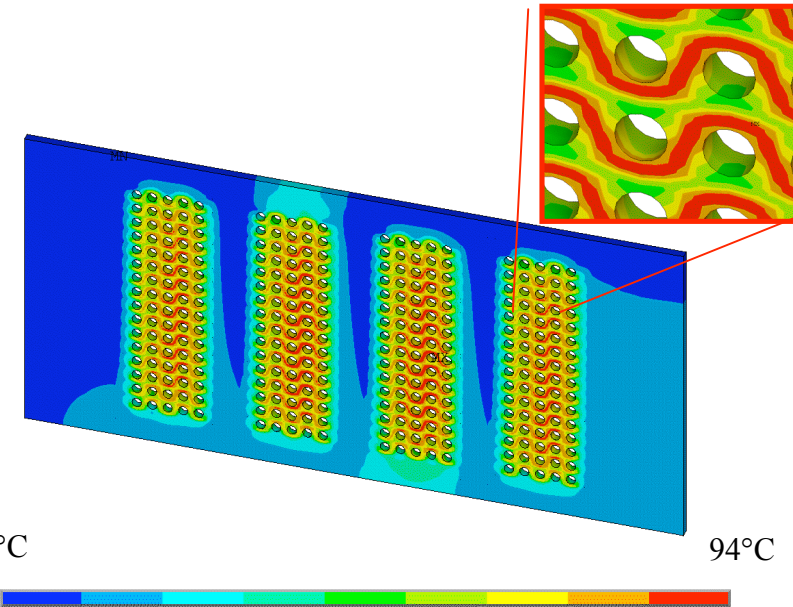
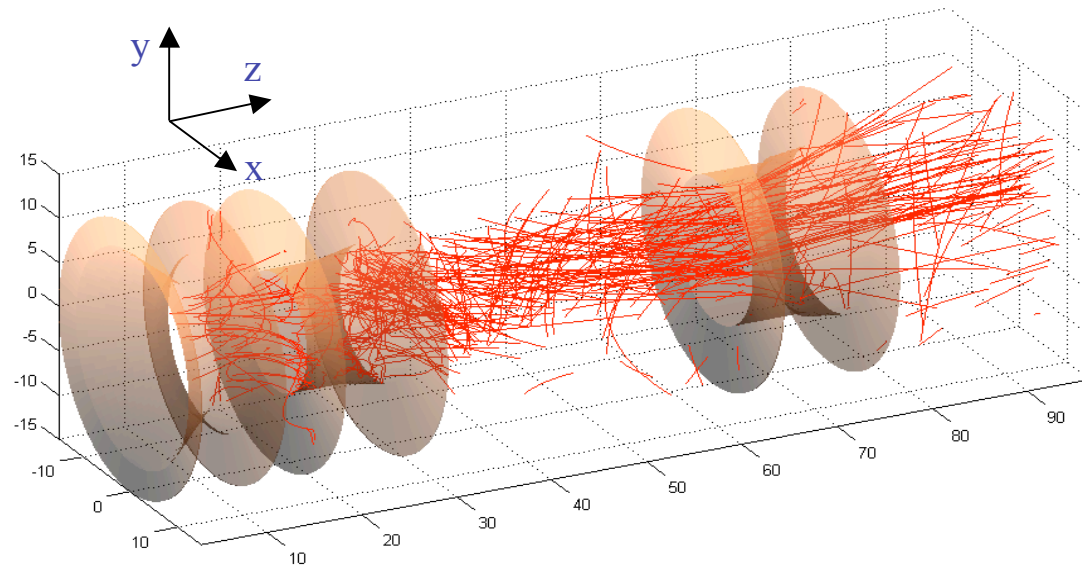
Simulazione del fascio e dei carichi termici su MITICA:



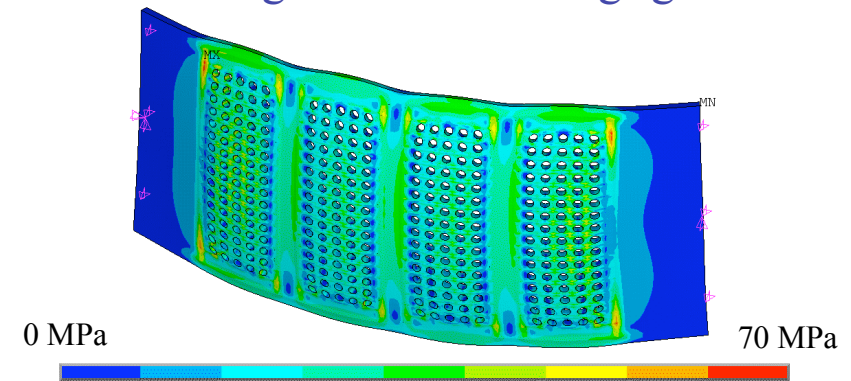
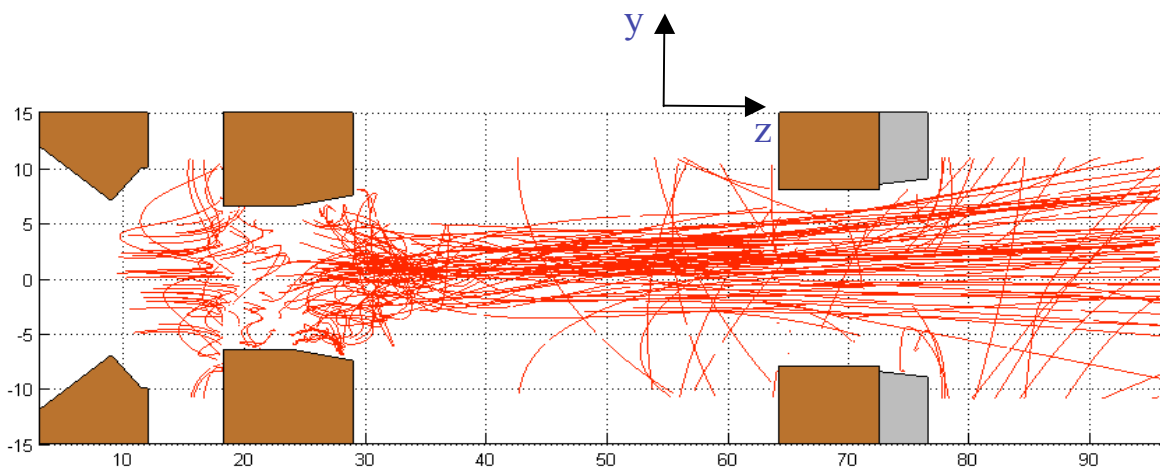
Traiettorie degli elettroni da stripping e carichi termici nell'acceleratore di SPIDER



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Carichi termici e temperatura dovuti agli elettroni sulle griglie

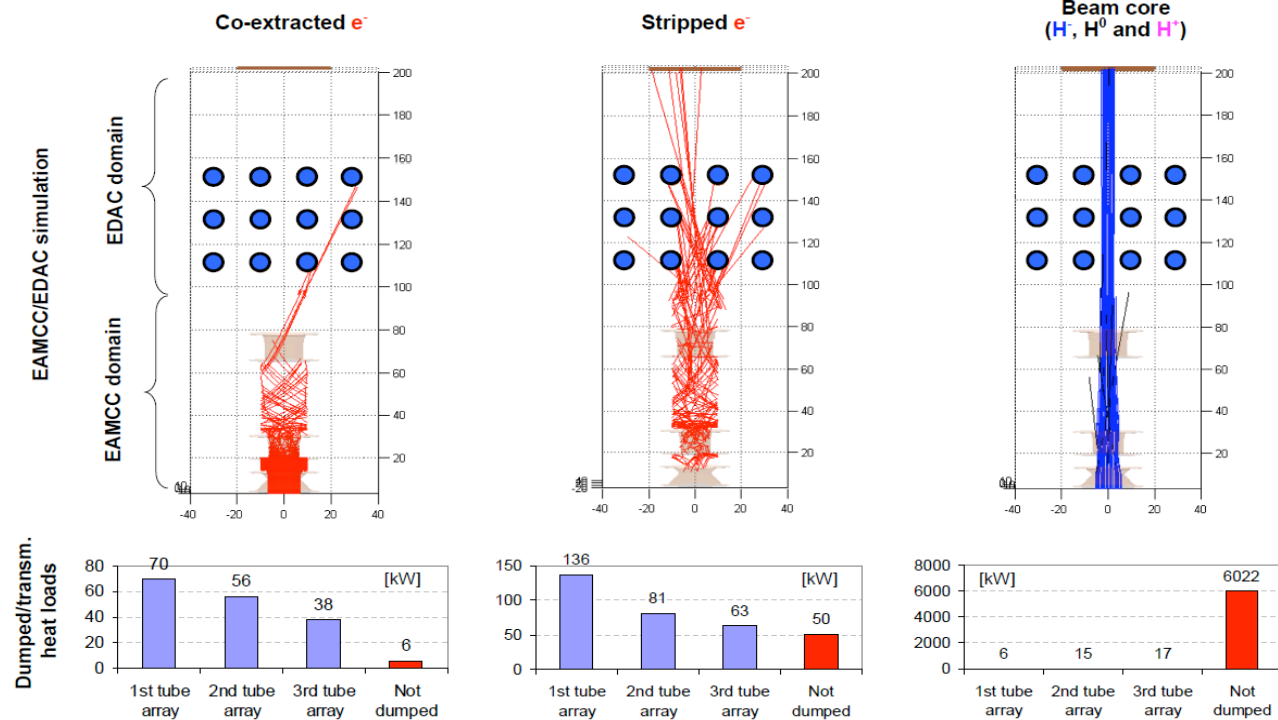


Stress termomeccanico e deformazione delle griglie

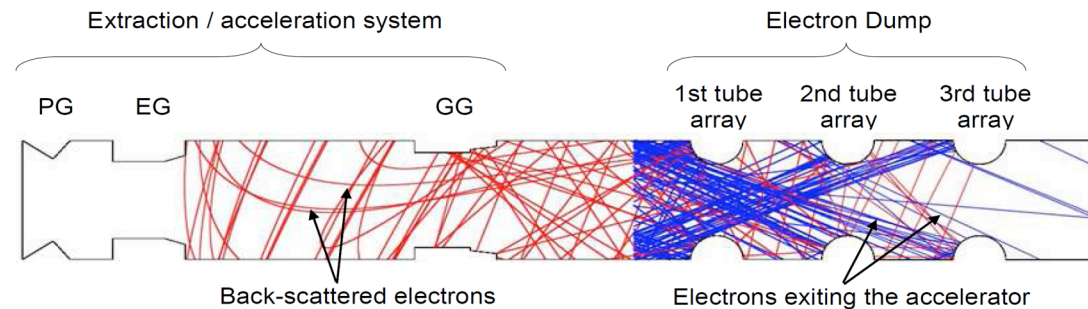
Simulazioni dell'Electron Dump con EDAC e BACKSCAT



L'Electron Dump ha la funzione di fermare gli elettroni che escono dall'acceleratore insieme agli ioni H⁻. Si tratta di un componente sottoposto ad alto flusso termico



EDAC: Codice 3D in ambiente MATLAB per simulare gli elettroni tramessi e intercettati dell'Electron Dump (e relativi carichi termici)



BACKSCAT: Codice 2D in ambiente COMSOL per simulare gli elettroni che vengono emessi dall'Electron Dump per back-scattering

Due codici (EDAC e BACKSCAT) sono stati sviluppati al Consorzio RFX per simulare il funzionamento dell'Electron Dump e ottimizzarne il progetto

Problemi e modelli relativi al Neutralizzatore e al Calorimetro:

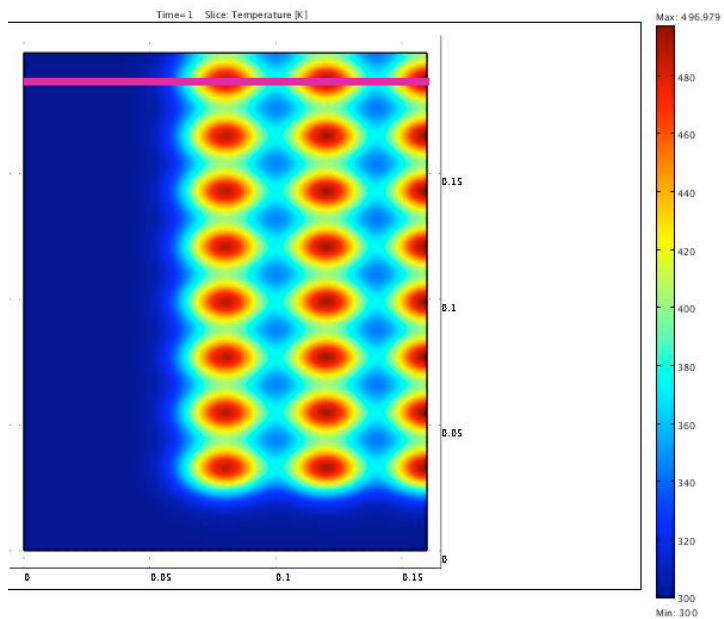


- Neutralizzazione del fascio di ioni mediante gas
- Ri-ionizzazione, ioni positivi di ritorno e creazione di carica spaziale
- Carichi termici e deformazioni termomeccaniche

Obiettivi principali:

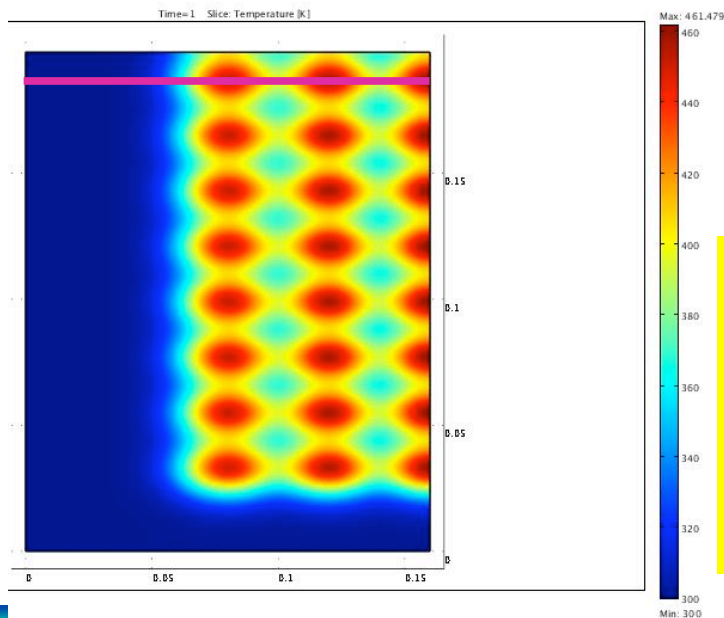
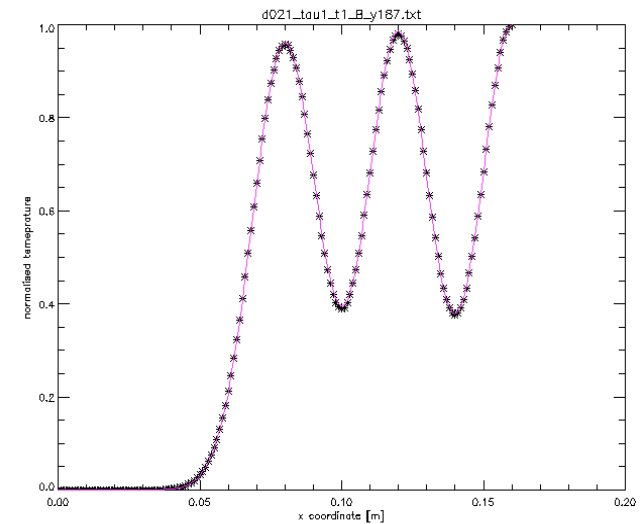
- ⇒ Efficienza di neutralizzazione
- ⇒ Calcolo e misura della focalizzazione e della potenza in uscita del fascio
- ⇒ Smaltimento dei carichi termici
- ⇒ Calcolo dei campi elettrici dovuti alla ri-ionizzazione

Simulazione dei carichi termici sul calorimetro (STRIKE)



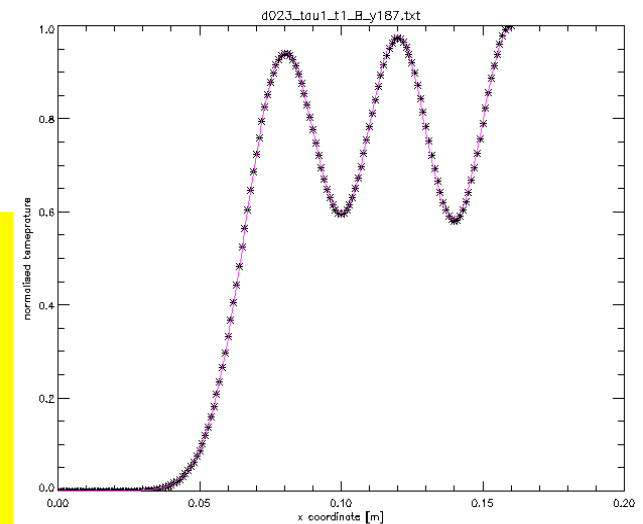
Distribuzione dei carichi termici e di temperatura:

divergenza 3mrad:
STRIKE 0.5m a valle
larghezza “misurata”: 11mm



divergenza 5mrad
STRIKE 0.5m a valle
larghezza “misurata”: 13mm

=>progettazione del
Calorimetro e interpretazione
misure sperimentali della
potenza e divergenza del
fascio



Conclusioni



Sviluppati numerosi modelli numerici specifici per :

1. Descrizione fenomeni fisici
2. Ottimizzazione progetto
3. Simulazione funzionamento anomalo
4. Interpretazione risultati sperimentali

Codici in gran parte non commerciali, sviluppati in casa o in collaborazione con altri laboratori,

- validi solo in uno o due componenti del sistema
- semplificazioni specifiche componente per componente.
- molti problemi "accoppiati"

Il "raccordo" tra i diversi modelli richiede particolare cura.

Difficoltà dovuta a diverse scale dimensionali.

Validazioni dei modelli è in corso grazie a collaborazioni con altri laboratori (CEA, LHD, IPP)

Diversi componenti hanno mostrato criticità (griglie di accelerazione, isolatore passante, electron dump, calorimetro) ed è in corso un ampio lavoro di ottimizzazione per arrivare al progetto definitivo di MITICA e di SPIDER.

Grazie per l'attenzione!

Bibliografia



- R. S. Hemsworth *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 79 (2008) 02C109.
P. Sonato *et al.*, Fusion Eng. Des. 84 (2009) 269
P. Agostinetti *et al.*, AIP Conf. Proc. 1097 (2009) 325
P. Agostinetti *et al.*, paper P2.11, 18th Int. Toki Conference, Ceratopia Toki, Japan, 2008;
G. Fubiani *et al.*, Phys. Rev. Special Topics Accelerators and Beams 11 (2008) 014202;
J. Pamela. Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) 1163;
W. B. Hermannfeld. SLAC report, SLAC-226 (1979);
H.P.L. de Esch *et al.*, Fusion Eng. Des. 73 (2005) 329
H.P.L. De Esch, R.S. Hemsworth, Fusion Eng. Des. 82 (2007) 723
G. Serianni *et al.*, 36th EPS Conference on Plasma Phys. Sofia, June 29 - July 3, 2009 ECA Vol.33E, P-4.171
P. F. Staub, J. Phys. D: Appl. Phys. 27 (1994) 1533
E. W. Thomas, in Nuclear Fusion Special Issue Data compendium for plasma surface interaction, cap 9 (1984)
I.N. Slivkov "Mechanism for electrical discharge in vacuum" Soviet Phys. Techn. 2, 1928 (1957)
M. S. Benilov, Plasma Source Sci. Technol. 18, 014005 (2009)
M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Material Processing, John Wiley, New York, 1994.
A. T. Forrester, Large Ion Beams, New York, John Wiley, 1996
P. T. Greenland, Proc. R. Soc. Lond. A 457, 1821 (2001)
P. T. Greenland, Contrib. Plasma Phys. 42, 608 (2002)
K. Sawada *et al.*, Jour. Appl. Phys. 78, 2913 (1995)
U. Fantz *et al.*, New Journal of Physics 8, 301 (2006)
M. Tuszewski, Phys. Plasmas 4, 1922 (1997) and Phys. Plasmas 5, 1198 (1998)
I.A. Brown, The physics and Technology of Ion Sources, Wiley, 1988, 1st ed
M. Cavenago, P. Veltri, E. Gazza, G. Serianni, P. Agostinetti, Negative Ion Beams and Secondary Beams, Comsol 2009 Conference
E. Surrey, AIP Conf. Proc. 925, 278 (2007).
J. Pamela, Plasma Phys. Control. Fusion 37 A325 (1995).
M. Cavenago, P. Veltri, F. Sattin, G. Serianni, V. Antoni, IEEE TPS, 36, 1581 (2008)

