



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**SVILUPPO E CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE  
DI IONIZZAZIONE AD ALTA EFFICIENZA AL PLASMA  
DEL PROGETTO SPES**

Relatore: *Prof. Giovanni Meneghetti*  
Correlatori: *Dott. Alberto Andrighetto*  
*Dott. Mattia Manzolaro*

Laureando: *Fabio Visentin*  
N° matricola: *1063953*

Anno Accademico 2015/2016



# INDICE

<b>Sommario</b> .....	<b>5</b>
<b>CAPITOLO 1: IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO: PRODUZIONE ED UTILIZZO DEI FASCI DI IONI ESOTICI</b> .....	<b>7</b>
1.1. Introduzione .....	7
1.2. Il progetto SPES.....	10
1.2.1. Il ciclotrone .....	11
1.2.2. Le aree di produzione: <i>Target Ion Source</i> .....	12
1.2.2.1. <i>Il target</i> .....	12
1.2.2.2. <i>Le sorgenti di ionizzazione</i> .....	14
1.2.3. Trasporto di fascio, selezione di massa e post accelerazione .....	17
1.3. Applicazione dei fasci di ioni esotici .....	18
1.3.1. Applicazioni in fisica nucleare [1].....	18
1.3.1.1. <i>Miglioramento e verifica del Modello Standard</i> .....	18
1.3.1.2. <i>Studio della struttura di nuclei complessi</i> .....	19
1.3.1.3. <i>Misura della dimensione del nucleo: i nuclei "halo"</i> .....	19
1.3.1.4. <i>Produzione di elementi superpesanti</i> .....	20
1.3.2. Applicazioni in fisica dello stato solido.....	20
1.3.2.1. <i>Drogaggio dei semiconduttori</i> .....	20
1.3.3. Applicazioni mediche: la Tomografia ad Emissione Positronica [9] .....	21
1.3.4. Applicazioni in astrofisica [1] .....	23
1.4. Conclusioni.....	23
Bibliografia Capitolo 1 .....	24
<b>CAPITOLO 2: LA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA</b> .....	<b>25</b>
2.1. Introduzione.....	25
2.2. Fisica del Plasma <sup>[1] [2] [14]</sup> .....	25
2.2.1. Teoria cinetica del Plasma <sup>[1]</sup> .....	28
2.3. Il processo di ionizzazione .....	30
2.3.1. Affinità elettronica .....	32
2.3.2. Elettronegatività.....	32
2.4. Le sorgenti a bombardamento di elettroni .....	33
2.5. Controllo della corrente elettronica.....	37
2.6. Parametri di lavoro: Efficienza ed Emittanza .....	39
2.7. Moto di particelle cariche .....	40
2.8. Conclusioni.....	41
Bibliografia Capitolo 2 .....	42
<b>CAPITOLO 3: SVILUPPO MECCANICO DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA PER IL PROGETTO SPES</b> .....	<b>43</b>

3.1.	Introduzione .....	43
3.2.	Sorgente al plasma MK5 utilizzata ad ISOLDE al CERN.....	43
3.2.1.	Il catodo "ISOLDE" .....	44
3.2.2.	L'Anodo .....	45
3.2.3.	Sistema di supporto dell'anodo.....	45
3.2.4.	La camera di scarica .....	46
3.2.5.	Sistema di estrazione "ISOLDE" .....	46
3.2.6.	Camera e flangia di supporto .....	47
3.2.7.	Elettromagnete.....	47
3.3.	Sviluppo meccanico della sorgente di ionizzazione al plasma.....	48
3.3.1.	Il sistema di supporto .....	49
3.3.2.	Il catodo SPES <sup>[1]</sup> .....	51
3.3.3.	La crociera di allineamento.....	52
3.3.4.	Sistema di estrazione SPES .....	54
3.4.	Risultati in termini di efficienza del nuovo design .....	55
3.5.	Ulteriori migliorie apportate.....	57
3.5.1.	Schermatura della sorgente.....	58
3.5.2.	Modifica della connessione elettrica.....	59
3.6.	Materiali utilizzati per le sorgenti di ionizzazione al Plasma <sup>[6]</sup> .....	63
3.7.	Conclusioni.....	66
	Bibliografia Capitolo 3.....	68
	<b>CAPITOLO 4: CARATTERIZZAZIONE TERMICA DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA</b> .....	<b>69</b>
4.1	Introduzione .....	69
4.2	Analisi accoppiate Elettro-Termiche <sup>[3]</sup> .....	69
4.3	Modello numerico della sorgente con supporto in Grafite .....	71
4.3.1	Carichi e condizioni al contorno.....	74
4.3.2	Risultati delle analisi sulla sorgente.....	75
4.3.3	Calcolo della corrente elettronica.....	82
4.4	Validazione del modello numerico .....	83
4.4.1	Modello numerico per misure di temperatura (modello HT).....	83
4.4.2	Descrizione apparato sperimentale HT .....	86
4.4.3	Risultati delle misure HT .....	90
4.5	Confronto tra il catodo ISOLDE e il catodo SPES.....	95
4.6	Confronto tra supporto in Grafite e supporto in Acciaio Inossidabile.....	98
4.7	Analisi dei parametri di influenza del campo di temperatura.....	101
4.8	Conclusioni.....	105
	Bibliografia Capitolo 4.....	106
	<b>CAPITOLO 5: CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA IN PRESENZA DI FASCIO</b> .....	<b>107</b>
5.1.	Introduzione .....	107
5.2.	Descrizione apparato sperimentale FE.....	107



5.2.1.	Camera da vuoto .....	108
5.2.2.	Sistema di estrazione e focalizzazione del fascio .....	110
5.2.2.1.	<i>Distanza Puller – Sorgente</i> .....	112
5.2.3.	Stazioni di diagnostica.....	113
5.2.3.1.	<i>La Faraday Cup</i> <sup>[5]</sup> .....	113
5.2.3.2.	<i>Il Beam profiler</i> .....	114
5.2.3.3.	<i>L’Emittance meter</i> .....	115
5.2.4.	Separatore di massa .....	117
5.2.4.1.	<i>Scansioni di massa (mass scan)</i> .....	118
5.2.4.2.	<i>Contaminazione del fascio</i> .....	119
5.3.	Schemi e modelli di calcolo per la stima sperimentale dei valori di efficienza ed emittanza... 121	
5.4.	Caratterizzazione della sorgente al plasma con estrazione SPES .....	126
5.4.1.	Misure di efficienza con estrazione SPES.....	130
5.4.2.	Misure di emittanza con estrazione SPES.....	132
5.5.	Caratterizzazione della sorgente al plasma con estrazione ISOLDE .....	135
5.5.1.	Misure di efficienza con estrazione ISOLDE .....	138
5.5.2.	Misure di emittanza con estrazione ISOLDE .....	139
5.6.	Conclusioni.....	143
	Bibliografia Capitolo 5 .....	144
	<b>CAPITOLO 6: ANALISI NUMERICA DEL SISTEMA DI ESTRAZIONE DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA.....</b>	<b>145</b>
6.1	Introduzione.....	145
6.2	Generalità sui campi elettromagnetici <sup>[1]</sup> .....	145
6.2.1.	Moto di una particella carica in un campo elettromagnetico uniforme, $\theta$ generico .....	148
6.3	Analisi elettromagnetiche con il software Ansys® <sup>[1][2]</sup> .....	149
6.3.1.	Ansys® Particle Tracing <sup>[2]</sup> .....	151
6.4.	Modello numerico per analisi elettrostatiche.....	152
6.4.1.	Risultati delle analisi elettrostatiche .....	158
6.5	Sviluppi futuri .....	162
6.6	Conclusioni.....	163
	Bibliografia Capitolo 6 .....	164
	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>165</b>
	<b>APPENDICE A. OPERAZIONI DI ASSEMBLAGGIO .....</b>	<b>167</b>
A.1.	Introduzione.....	167
A.2.	Smontaggio PIS SPES in Acciaio Inox.....	167
A.3.	Dati storici .....	171
A.4.	Lavaggio componenti.....	172
A.5.	Sostituzione del filtro del gas: “Leak” .....	174
A.6.	Montaggio nuova PIS in Grafite.....	178
A.7.	Montaggio del sistema per prove ad alta temperatura (HT) .....	190
A.8.	Conclusioni.....	193

Bibliografia Appendice A.....	193
<b>APPENDICE B. MACRO MATERIALI .....</b>	<b>195</b>
B.1. Introduzione .....	195
B.2. Tantalio .....	195
B.3. Molibdeno .....	206
B.4. Acciaio inossidabile AISI 316L .....	209
B.5. Allumina .....	210
B.6. Lega di Alluminio 5083 .....	213
B.7. Grafite POCO C_EDM3.....	214
<b>APPENDICE C. CODICI APDL PER LE ANALISI NUMERICHE .....</b>	<b>218</b>
C.1. Introduzione .....	218
C.2. APDL per analisi in campo Elettro-Termico della sorgente FEBIAD con maschera in Grafite .....	218
C.3. APDL per analisi Elettrostatiche.....	227
C.4. Elaborazione dei risultati.....	232
<b>APPENDICE D. DISEGNI TECNICI DEI COMPONENTI PROGETTATI.....</b>	<b>237</b>
D.1. Introduzione .....	237

# Sommario

Dall'inizio del ventesimo secolo la fisica nucleare esplora i confini della natura per produrre materia mai osservata prima in laboratorio; le ricerche di base e le complesse tecnologie appositamente create, hanno spesso portato alla nascita di un gran numero di applicazioni nel campo della medicina, dell'industria e della fisica applicata, arrivando in molti casi ad influenzare usi e costumi della società: basti pensare alla nascita del "Web" presso i laboratori del CERN.

Nel corso degli anni l'Europa ha assunto la leadership nel campo della ricerca nucleare e sta pianificando la costruzione di una nuova generazione di *facility* per la produzione di fasci radioattivi, con lo scopo di esplorare la materia esotica e di fornire un valido strumento per applicazioni di tipo medico ed industriale. All'interno del programma partecipa attivamente, con il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*), anche l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Legnaro; tale progetto prevede la costruzione di una *facility* per la produzione di fasci di ioni radioattivi ricchi di neutroni (*neutron-rich*) e di alta qualità, nell'intervallo di massa compreso tra 80 e 160 *uma*.

Il progetto SPES prevede il bombardamento di un bersaglio (*target*) in Carburo di Uranio con un fascio primario di protoni: in modo da generare, tramite una reazione nucleare, specie radioattive all'interno del *target*. Le particelle radioattive così generate vengono successivamente estratte, ionizzate, separate in massa ed accelerate come fascio di ioni radioattivo.

Solitamente, il *target* si presenta come un unico blocco cilindrico racchiuso all'interno di una scatola in grafite; l'idea innovativa introdotta dal progetto SPES è la suddivisione del *target* in sette dischi opportunamente spazati; questo consente, a parità di volume, di aumentare la superficie di scambio termico radiativo tra il *target* e la scatola che lo contiene: tale particolare è di fondamentale importanza in quanto permette al *target* di smaltire con maggiore efficienza la potenza termica dissipata dal fascio protonico che lo investe.

Gli isotopi prodotti vengono estratti dalla scatola grazie alla linea di trasferimento; attraverso tale dispositivo le particelle vengono indirizzate verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove avviene il processo di conversione degli atomi in ioni (tipicamente ioni +1). La scelta della sorgente di ionizzazione è di fondamentale importanza, in quanto il suo funzionamento influenza l'intensità e la qualità del fascio radioattivo. A seconda del tipo di elemento, di cui si vuole produrre il fascio, vengono impiegate sorgenti di ionizzazioni differenti; in particolare si possono avere: sorgenti con ionizzazione superficiale, sorgenti laser (RILIS) oppure sorgenti al plasma (FEBIAD). Quest'ultima tipologia sarà oggetto di studio in questo lavoro di tesi.

Gli ioni prodotti dalla sorgente di ionizzazione vengono accelerati da un elettrodo estrattore (*electrode*), il quale viene mantenuto ad una differenza di potenziale di 60 kV rispetto alla sorgente. Si crea pertanto un fascio che attraverso l'applicazione di forze elettromagnetiche esterne viene indirizzato prima in un *charge breeder* (dispositivo capace di aumentare la carica degli ioni) poi in un separatore isobaro a media risoluzione, successivamente prosegue verso dei *post-acceleratori* ed infine viene inviato alle sale sperimentali.

Lo studio della distribuzione di temperatura e delle deformazioni termiche presenti nei componenti che costituiscono il *target*, la linea di trasferimento, la sorgente di ionizzazione e l'elettrodo estrattore è assai complesso. Per tale motivo i Laboratori Nazionali di Legnaro hanno avviato delle strette collaborazioni con l'ENEA (Bologna), i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova, il CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA). Per poter fare questo ci si appoggia a dei metodi numerici; in particolare si fa riferimento al metodo degli Elementi Finiti ed al codice di calcolo Ansys® (con il quale sono state effettuate tutte le analisi esposte nel presente lavoro).

La tesi si articola in sei capitoli, il cui contenuto viene di seguito brevemente riassunto:

- **Capitolo 1:** La prima parte del primo capitolo si sofferma nella descrizione della metodologia ISOL per la produzione di fasci di ioni radioattivi. Successivamente, si passa ad illustrare le principali caratteristiche del progetto SPES, in fase di sviluppo presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Infine, vengono elencate le principali applicazioni dei fasci di ioni radioattivi nei campi di interesse della fisica nucleare, dell'astrofisica, della scienza dei materiali e della medicina.
- **Capitolo 2:** Nel presente capitolo vengono descritti i principi base del funzionamento delle sorgenti di ionizzazione al plasma. Vengono inoltre fornite nozioni di base riguardanti le proprietà del Plasma e il suo comportamento se sottoposto a campi elettromagnetici. La trattazione teorica presentata fornisce delle importanti indicazioni sulla generazione degli ioni all'interno della camera di anodo. Tali indicazioni risultano utili per comprendere il lavoro svolto nel capitolo 6 dove viene riportato lo studio del sistema di estrazione della sorgente.
- **Capitolo 3:** In questo capitolo viene presentato il modello di sorgente MK5 utilizzato nell'impianto ISOLDE al CERN dalla quale è stata ricavata la sorgente attualmente in uso presso i laboratori nazionali di Legnaro. Viene quindi riportato lo sviluppo meccanico proposto in questo lavoro di tesi,

in particolare viene descritta la modifica del sistema di supporto, la modifica delle connessioni elettriche e l'adozione di un sistema di bloccaggio e centraggio del catodo. Verranno spiegate in dettaglio le scelte progettuali adottate, con particolare attenzione alla produzione di fasci ad elevata purezza. Le scelte progettuali adottate hanno riscosso successo in quanto si è riusciti a ridurre la quantità di contaminanti nel fascio e ad aumentare l'efficienza complessiva della sorgente. Per un livello di corrente tale da mantenere una temperatura del catodo inferiore ai 2200°C (limite di sublimazione del Tantalio in vuoto) si è passati da un fascio contenente il 35,5% di Argon ad un fascio contenente il 76,5% di Argon, mentre l'efficienza è aumentata dallo 0,12% al 1,54%.

- **Capitolo 4:** In questo capitolo viene presentato lo studio effettuato, impiegando il metodo degli Elementi Finiti, per la valutazione del comportamento termico della sorgente di ionizzazione al plasma con le modifiche apportate questa tesi. I risultati ottenuti sono stati confrontati con i dati raccolti grazie ad una campagna di misure, termiche ed elettriche, effettuate presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) per validare il modello utilizzato. In particolare la differenza tra modello sperimentale e numerico risulta inferiore al 3% per il campo di interesse.
- **Capitolo 5:** In questo capitolo viene descritto l'apparato sperimentale (*Front End*) utilizzato per effettuare i test per la caratterizzazione sperimentale in presenza di fascio. Vengono riportati i risultati ottenuti durante le prove per le due diverse configurazioni di sorgenti di ionizzazione al plasma analizzate (con estrazione SPES e con estrazione ISOLDE), sia dal punto di vista della produzione di ioni (efficienza) che di qualità del fascio (emittanza). Questi dati hanno permesso di effettuare un confronto diretto tra le due soluzioni a disposizione. Il risultato finale sancisce una miglior prestazione dell'estrazione ISOLDE, in quanto l'aumento di efficienza rilevato (+50%) sopperisce al lieve aumento di emittanza (+16%).
- **Capitolo 6:** Nell'ultimo capitolo viene illustrato un metodo numerico per la valutazione di emittanza ed efficienza di ionizzazione della sorgente di ionizzazione al plasma. L'attenzione si sposta sul campo elettromagnetico presente all'interno dell'anodo ed in particolare sullo studio del moto delle particelle (ioni di Argon) dovute a tale campo. L'obiettivo di questo studio è capire fino a che punto è possibile impiegare il codice di calcolo Ansys® per poter fornire uno strumento adatto all'ottimizzazione del sistema di estrazione.

In futuro si cercherà innanzitutto di migliorare i modelli numerici presentati nel capitolo 6 aggiungendo il campo magnetico per avere una soluzione il più vicino possibile alla realtà. Successivamente verrà ottimizzata la geometria di estrazione sulla base di quanto ricavato numericamente. Inoltre, una volta accertata la bontà dei modelli elettromagnetici, sarà possibile studiare anche altri componenti che influenzano la formazione di ioni come la griglia di anodo.

# **CAPITOLO 1:**

## **IL PROGETTO SPES AI LABORATORI NAZIONALI DI LEGNARO: PRODUZIONE ED UTILIZZO DEI FASCI DI IONI ESOTICI**

### **1.1. Introduzione**

L'atomo è l'unità che determina le proprietà degli elementi presenti in natura: le proprietà chimiche sono dovute principalmente alla nube elettronica esterna, mentre le proprietà fisiche sono dovute alla combinazione di più atomi disposti ed organizzati in reticoli cristallini. La maggior parte della massa dell'atomo (più del 99,9%) si concentra nel nucleo; i nuclei sono entità composite costituite da protoni (particelle a carica positiva) e neutroni (particelle elettricamente neutre), chiamati entrambi nucleoni ed aventi massa circa 1800 volte più grande degli elettroni [1]. La stabilità del nucleo è garantita dalla presenza di una forza di attrazione tra i nucleoni molto intensa definita interazione forte; tale forza si manifesta con efficacia a distanze inferiori alle dimensioni nucleari e bilancia la repulsione elettrostatica tra i protoni carichi positivamente. L'interazione forte vincola il moto dei nucleoni attorno alla massa nucleare centrale ed a causa della sua notevole intensità, la rottura del nucleo richiede molta energia.

Il numero di protoni ( $Z$ ) presenti in un atomo identifica in maniera esclusiva l'elemento di appartenenza, mentre il numero di neutroni ( $N$ ) può essere variabile. La somma di questi due numeri viene detta numero di massa ed è convenzionalmente indicata con  $A = Z + N$ . Atomi con lo stesso numero di protoni ma diverso numero di neutroni sono detti isotopi dello stesso elemento, e vengono identificati mediante il numero di massa.

I nuclei stabili possiedono, approssimativamente, ugual numero di neutroni e di protoni [2], e costituiscono la cosiddetta "valle di stabilità" nella carta dei nuclidi (vedi Figura 1.1); il motivo fondamentale della maggiore stabilità dei nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni è da ricercarsi nel fatto che l'interazione neutrone-protone è leggermente più intensa rispetto alle interazioni protone-protone e neutrone-neutrone.

Poiché nel nucleo sono presenti particelle cariche dello stesso segno, tra di esse insorge un'azione repulsiva di tipo coulombiano che tende a rendere instabile il nucleo causandone la disgregazione. Tuttavia la stabilità e quindi l'integrità dal nucleo è garantita dalla presenza di una forza nucleare detta interazione forte, la quale contrasta efficacemente la repulsione elettrostatica tra protoni carichi positivamente. Tale interazione si manifesta con particolare intensità in distanze tipiche delle dimensioni nucleari, per questo motivo la rottura di un nucleo richiede molta energia. Il ramo della fisica che si occupa della definizione e dello studio delle proprietà dei nuclei è detto fisica nucleare.

Per nuclei con numero di massa  $A \geq 40$ , la forza coulombiana sposta la linea di stabilità lontano dalla retta in cui giacciono i nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni, verso nuclei ricchi di neutroni (che essendo privi di carica, non alimentano la forza repulsiva elettrostatica); come se non bastasse, la forza coulombiana limita pure l'esistenza di elementi super pesanti, dato che il corto raggio di azione della forza nucleare forte non permette un'efficace opposizione alla forza elettrostatica, agente invece a più lungo raggio.

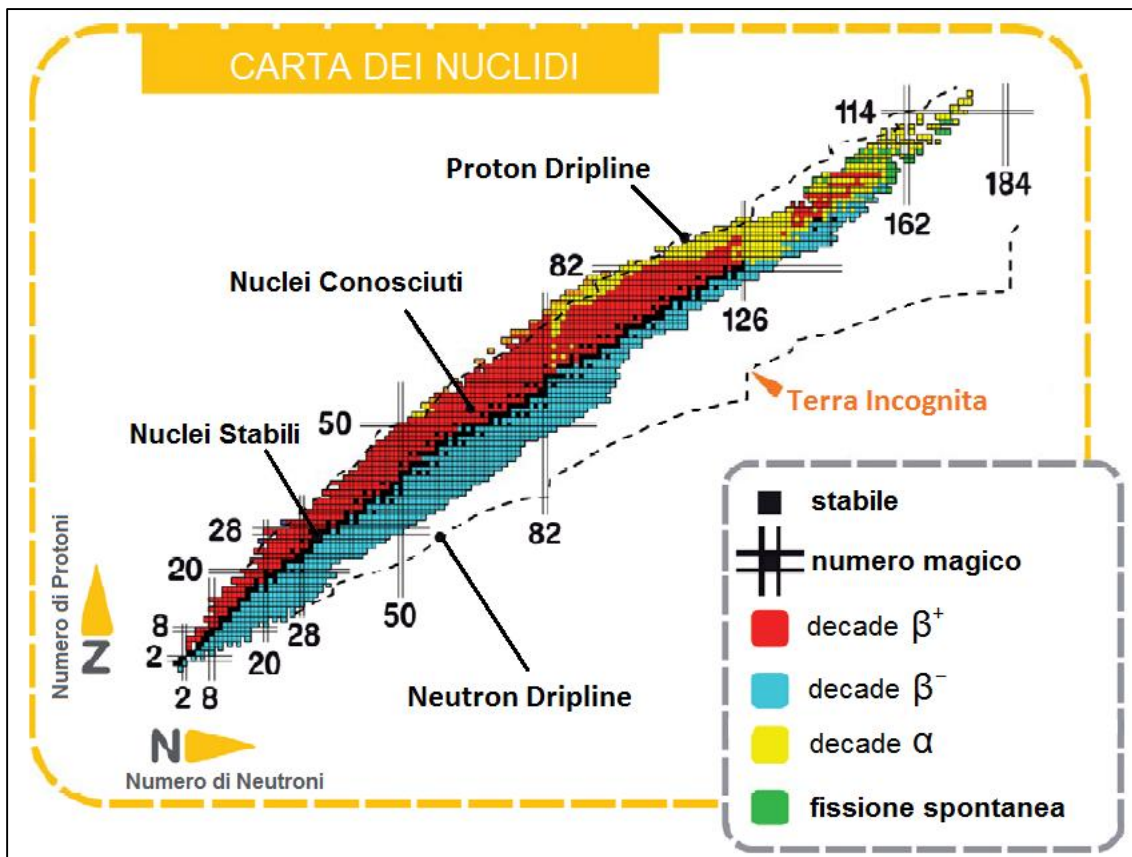


Figura 1-1: carta dei nuclidi.

I nuclei con eccesso o difetto di neutroni, e quindi lontani dalla valle di stabilità, sono radioattivi e decadono con emissione di particelle ( $\alpha$ ,  $\beta$ , neutrini, ...) e raggi  $\gamma$ . Tali nuclei instabili vengono comunemente chiamati “esotici” ed al momento circa 2000 di essi sono stati prodotti e caratterizzati in laboratori di ricerca di tutto il mondo. Calcoli teorici prevedono tuttavia l’esistenza di un numero di nuclei esotici molto più elevato (più di 6000), cosicché è possibile che un gran numero di essi sia presente nella cosiddetta “terra incognita”, che comprende la regione ricca di neutroni (*neutron-rich*) e quella dei nuclei *superpesanti* (SHE, *Super Heavy Elements*).

La carta dei nuclidi individua e classifica i nuclei in base al numero di protoni ( $Z$ ) e al numero di neutroni ( $N$ ). I nuclei definiti “stabili” (caselle nere di Figura 1-1) sono quelli non radioattivi oppure aventi tempo di decadimento comparabile all’età della terra (o addirittura superiore); la regione dei nuclei artificiali (di colore giallo) rappresenta che gli isotopi possono avere vita più o meno breve a seconda dei casi; aggiungendo neutroni o protoni ad un nucleo ci si allontana dalla valle di stabilità fino a raggiungerne i limiti, detti *drip lines*, caratterizzati da una diminuzione della forza di attrazione tra neutroni e protoni tale da non garantire più la stabilità del nucleo: calcoli teorici hanno dimostrato che al di fuori delle *drip lines* i nuclei emettono nucleoni molto rapidamente per formare nuovi nuclei, con combinazioni di protoni e neutroni tali da poter rientrare nell’area di potenziale stabilità, nella quale l’interazione forte è nuovamente capace di garantire il grado di coesione necessario.

La regione indicata in verde, ancora inesplorata, è definita “terra incognita” ed è caratterizzata dalla presenza di nuclei radioattivi con rapporti  $N/Z$  molto piccoli o molto grandi; la figura mostra che l’area *proton-rich* è relativamente ben definita teoricamente, mentre quella *neutron-rich* è molto più vasta ed indefinita. Tali nuclei sono comunemente chiamati “esotici”.

Come vedremo nei paragrafi successivi lo studio dei nuclei instabili, ed in particolare dei nuclei esotici, ha aperto nuovi campi di ricerca in fisica nucleare, ha permesso di confermare precedenti ipotesi di fondamentale importanza ed ha infine suggerito promettenti applicazioni in fisica dello stato solido ed in medicina.

Per l’utilizzo pratico e la produzione di ioni radioattivi di questo tipo è necessaria la costruzione di sistemi acceleratori ed attrezzature (*facilities*) capaci di garantire fasci ionici (RIB, *Radioactive Ion Beams*) di elevata purezza, intensità ed energia; sono numerose le *facilities* per la produzione di fasci radioattivi operanti sia in Europa che in altre parti del mondo; la maggior parte di queste sono basate sul metodo ISOL.

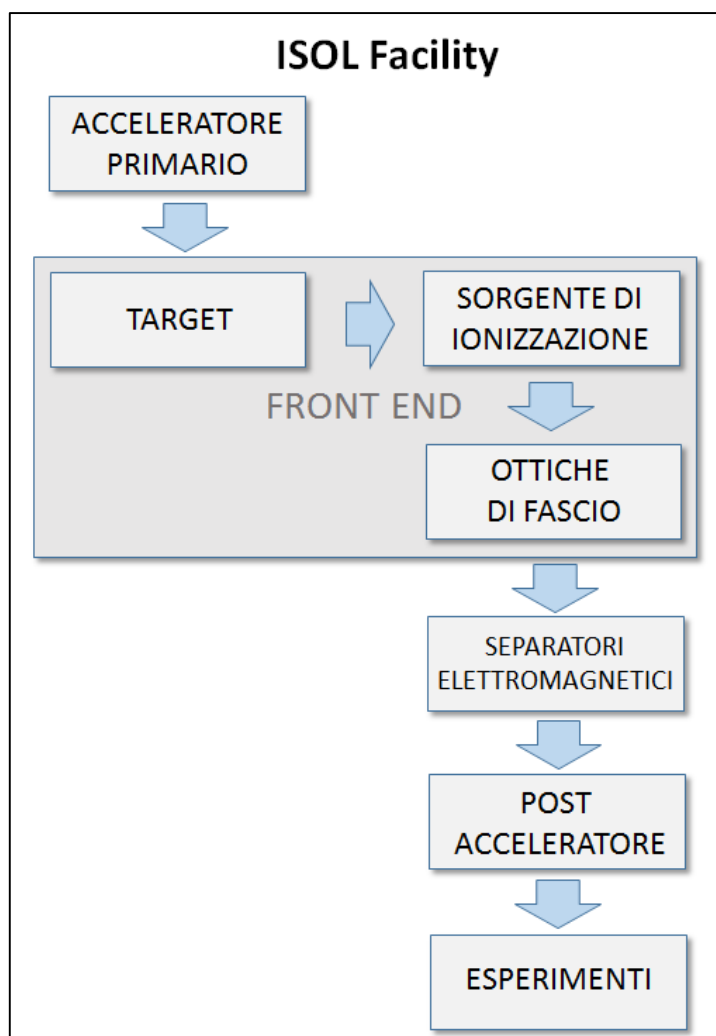


Figura 1-2: schema di una facility di tipo ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici.

La tecnica ISOL (*Isotope Separation On-Line*), schematizzata in Figura 1-2, utilizza la separazione degli isotopi in linea [3]; i principali costituenti di tale tipologia di *facility* sono:

- L'acceleratore primario;
- Il complesso *target*-sistema di estrazione e ionizzazione;
- I separatori di massa ed isobari;
- Il post acceleratore.

Un fascio di particelle della voluta energia, proveniente dall'acceleratore primario, viene fatto collidere con un bersaglio (*target*) contenete dischi di materiale fissile; in questo modo si ottiene la produzione degli isotopi radioattivi tramite reazioni nucleari (fissione, spallazione, frammentazione, ecc.). Attraverso un opportuno sistema i radioisotopi prodotti vengono estratti e ionizzati; in questo modo potranno essere accelerati per differenza di potenziale. Il primo stadio di accelerazione avviene nel *front end* che attira gli ioni e li invia verso dei separatori elettromagnetici all'interno dei quali il fascio viene opportunamente selezionato e purificato; i separatori sono quindi necessari se si vuole ottenere un fascio chimicamente ed isobaricamente puro. Successivamente, gli ioni vengono post accelerati al livello di energia richiesto dal particolare esperimento. L'intensità del fascio radioattivo prodotto è usualmente descritta dalla seguente equazione:

$$I = \sigma \cdot \Phi \cdot N \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \quad (1.1)$$

dove  $\sigma$  è la sezione d'urto per le reazioni nucleari,  $\Phi$  è l'intensità del fascio primario,  $N$  è lo spessore del *target*,  $\varepsilon_1$  è l'efficienza di rilascio del *target*,  $\varepsilon_2$  è l'efficienza di ionizzazione e  $\varepsilon_3$  è l'efficienza del processo di estrazione. Una corretta configurazione del complesso *target* - sistema di estrazione e ionizzazione è cruciale

per un efficiente funzionamento di una *facility* di tipo ISOL. Gli obiettivi che stanno alla base del dimensionamento sono:

- La riduzione del tempo di ritardo;
- La massimizzazione della produzione senza deterioramento della purezza del fascio.

La separazione dei prodotti radioattivi dal substrato del *target* e l'estrazione dei nuclei esotici, sono processi fortemente dipendenti dalla temperatura; in particolare, all'aumentare del livello termico, la diffusione delle particelle risulta accelerata. Chiaramente, più breve è la vita media degli atomi radioattivi, più rapido deve essere il tempo di rilascio, e di conseguenza, per quanto appena affermato, il sistema deve essere mantenuto alla più alta temperatura possibile.

In ambito europeo, le opportunità scientifiche offerte dai RIB ed i notevoli problemi tecnologici ad essi associati, hanno portato la comunità scientifica a proporre la costruzione di una rete di *facilities* complementari, definite di "intermedia generazione", fondamentali per arrivare alla costruzione di un'unica grande *facility* europea di tipo ISOL, chiamata EURISOL [4]: tale progetto rappresenta un'iniziativa che vede coinvolti i principali laboratori nucleari europei, è dedicato allo studio ed alla progettazione di una struttura per la produzione di fasci radioattivi di qualità significativamente superiore a quella attualmente disponibile. In tale direzione sono orientati anche i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), nei quali è prevista la costruzione di una *facility* ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici: il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*). Tale programma è coordinato a livello nazionale e prevede la collaborazione tra sei sezioni INFN, l'ENEA (Bologna), i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova e, a livello internazionale, strette collaborazioni con il CERN (Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

Nel prossimo paragrafo sarà descritto il progetto SPES e la struttura della *facility* in fase di costruzione ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), mentre nel paragrafo 1.3 si fornirà una descrizione delle principali applicazioni dei fasci di ioni radioattivi.

## 1.2. Il progetto SPES

Il principale obiettivo del progetto SPES è di fornire un acceleratore che permetta di svolgere ricerca all'avanguardia in fisica nucleare attraverso lo studio di nuclei lontani dalla valle di stabilità. Il progetto è basato sulla produzione di nuclei radioattivi *neutron-rich* attraverso la fissione nucleare (con una resa massima di  $10^{13}$  fissioni/s) indotta bombardando un *target*, realizzato in carburo di uranio, con un fascio di protoni di  $40\text{ MeV}$  a  $200\ \mu\text{A}$  di corrente (per una potenza totale di  $8\text{ kW}$ ) [8]. Essendo il livello di radioattività stimato nel *target* di produzione molto elevato, è necessaria la progettazione di speciali infrastrutture in modo da garantire la sicurezza in termini di radio protezione.

La *facility* SPES prevede inoltre la realizzazione di un acceleratore di neutroni (*Neutron Facility*) attraverso l'impiego di un secondo fascio di protoni ad alta energia.

Nella Figura 1-3 viene presentata la struttura dei laboratori esistenti, dove si distinguono: il ciclotrone per la produzione dei fasci protonici, le aree di produzione del fascio radioattivo, il CB (Charge Breeder) per aumentare lo stato di carica del fascio e l'MRMS (Medium-Resolution Mass Separator) per selezionare isobaricamente il fascio voluto. Essi sono collegati ed integrati al laboratorio SPES, che si inserisce quindi perfettamente nel complesso delle strutture esistenti dei Laboratori Nazionali di Legnaro. Viene di seguito fornita una descrizione dei componenti principali appartenenti alla RIB *facility* attualmente in fase di costruzione ai Laboratori.





Figura 1-3: Il complesso SPES integrato agli acceleratori già presenti ai Laboratori di Legnaro

### 1.2.1. Il ciclotrone

Il ciclotrone ha la funzione di produrre un fascio primario di particelle, il quale deve essere direzionato verso il *target* dove la reazione nucleare ha luogo [5].

Tale dispositivo è in grado di garantire le performance richieste per la produzione di fasci di ioni esotici ed offre la possibilità di utilizzare una seconda linea di fascio in modo completamente indipendente per alimentare la *Neutron Facility*. Il mercato offre oggi la possibilità di produrre, con la tecnologia del ciclotrone, fasci di intensità molto vicina alle richieste del progetto SPES; questo ha portato alla scelta di una soluzione commerciale.

Il ciclotrone scelto per il progetto SPES è il BEST® 70p, sviluppato dalla Best Cyclotron e mostrato in Figura 1-4; il quale è in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti fino a 70 MeV di energia ed aventi una corrente massima di 750 μA.



Figura 1-4: Il ciclotrone BEST® 70p.

## 1.2.2. Le aree di produzione: *Target Ion Source*

Sia il *target* di produzione dei radioisotopi, sia il sistema di estrazione e ionizzazione degli stessi sono contenuti all'interno di una camera di forma cilindrica (*camera target*), la quale viene raffreddata mediante un opportuno circuito, viste le elevate temperature in gioco (Figura 1-5). Sempre a causa delle alte temperature, per evitare l'ossidazione dei componenti presenti, l'interno della camera viene mantenuto in condizioni di alto vuoto (con pressione dell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar); la mancanza di atmosfera è inoltre necessaria per aumentare il cammino libero medio delle particelle radioattive prodotte. Il volume della camera è delimitato dallo spallamento di una flangia (*plate*) e da un coperchio (*cover*) a forma di pentola, entrambi realizzati in lega di Alluminio, mentre la tenuta a vuoto è garantita da un O-Ring.

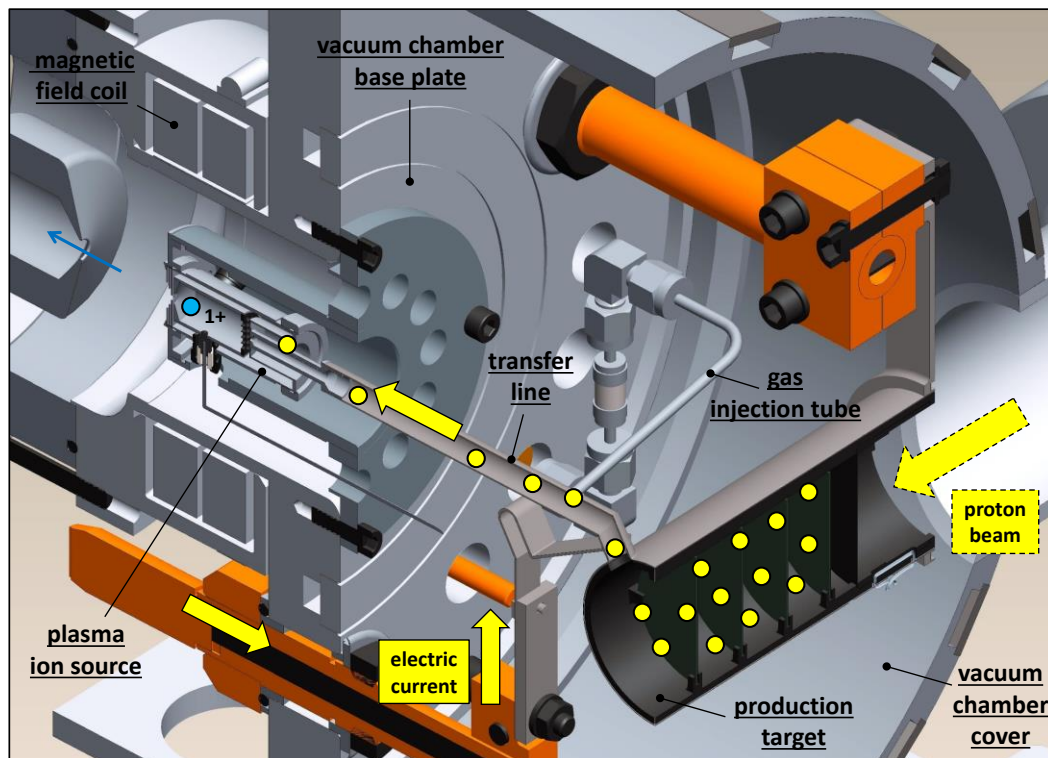


Figura 1-5: rappresentazione del sistema di estrazione e ionizzazione del progetto SPES.

### 1.2.2.1. Il target

Il *target* è composto da sette dischi coassiali in  $UC_x$ , aventi 40 mm di diametro e circa 1 mm di spessore ed opportunamente distanziati in direzione assiale, al fine di dissipare attraverso radiazione termica la potenza sviluppata dal fascio di protoni. Essi sono contenuti in un tubo cavo di Grafite (*Box*), avente un diametro esterno e una lunghezza di 49 e 200 mm rispettivamente (vedi Figura 1-6). Il fascio di protoni, prima di impattare contro i dischi, attraversa due finestre in Grafite (*windows*), molto sottili per non attenuare l'intensità del fascio, ma di fondamentale importanza in quanto consentono di schermare la zona attiva e di evitare un eccessivo raffreddamento del materiale fissile in corrispondenza dell'ingresso del fascio. Dopo aver investito le due finestre di Grafite e i dischi di  $UC_x$ , il fascio primario va ad impattare su tre *dumper* e sul fondo scatola (*box base*); questi elementi provvedono sia all'assorbimento definitivo del fascio (che così non va ad attivare la camera esterna), sia ad evitare la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del *target* <sup>[5]</sup>.

La *Box* deve mantenere la temperatura media di 2000°C, in modo da migliorare l'estrazione dei prodotti di fissione. Essendo la potenza del fascio di protoni non sufficiente a portare il *target* al livello di temperatura richiesto, è necessario introdurre un dispositivo indipendente avente la funzione di riscaldare e schermare il *target*. Inoltre, il sistema di riscaldamento supplementare deve essere in grado di sostenere il target durante i transitori, evitando improvvisi sbalzi di temperatura molto pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi. Il riscaldatore (*heater*) è composto da un tubo molto sottile (*tube*) in Tantalio, saldato ai bordi a due ali (*wings*) direttamente collegate ai morsetti in Rame (*clamps*); attraverso i morsetti è possibile far scorrere una ben definita quantità di corrente elettrica capace di fornire, per effetto Joule, il desiderato quantitativo di potenza al riscaldatore. La dissipazione di potenza (dovuta all'effetto Joule) in aggiunta al calore sviluppato dalla

fissione nucleare, fa in modo che la temperatura del sistema scatola-dischi sia mantenuta al valore di utilizzo ottimale. Il Tantalio è altamente utilizzato per produrre i vari componenti del sistema *target* ed estrazione poiché si tratta di un metallo altamente resistente alla corrosione, in grado di condurre energia elettrica e termica e di raggiungere temperature molto elevate.

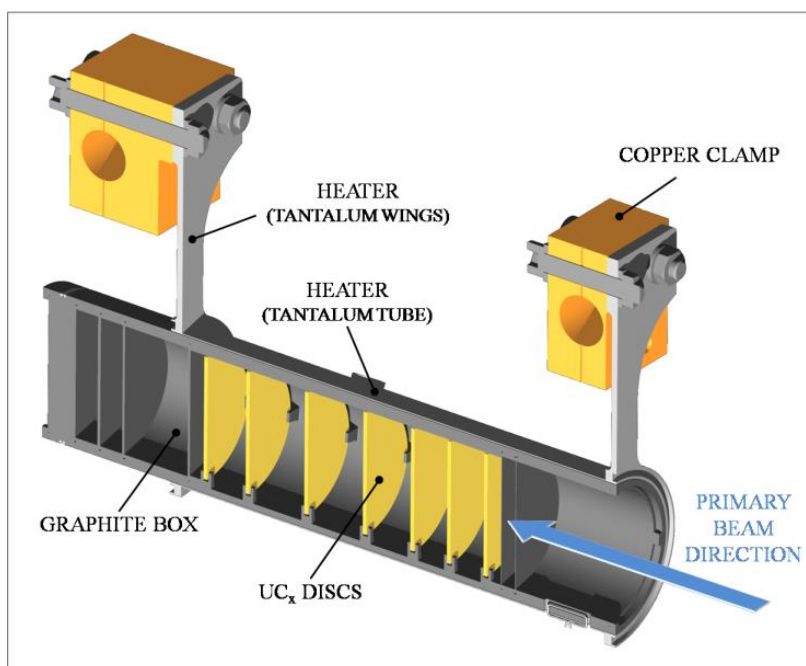


Figura 1-6: Rappresentazione del prototipo di bersaglio diretto del progetto SPES.

Il processo di fissione nucleare, che si manifesta quando il fascio di protoni investe i sette dischi in carburo di uranio, produce nuclei radioattivi aventi massa compresa tra gli 80 ed i 160 *uma*; per la produzione di un RIB la specie esotica desiderata deve essere estratta dal *target* e ionizzata. Tale processo richiede del tempo e non può essere applicato ad isotopi aventi una vita media inferiore a poche decine di millisecondi.

Il processo di estrazione avviene mediante l'utilizzo di sistemi studiati appositamente per garantire elevate efficienze (quindi tempi di produzione molto bassi). Gli isotopi in uscita dal *target* attraversano la linea di trasferimento (*transfer line*) e vengono indirizzati verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove perdono un elettrone; si formano quindi ioni positivi (ioni +1). In realtà gli atomi, per particolari sorgenti (come ad esempio quella al plasma), possono anche essere ionizzati più volte (ioni +2,+3,ecc.). Nell'attuale configurazione la linea di trasferimento (*transfer line*) è un tubo sottile di Tantalio saldato al riscaldatore ad un'estremità e connesso meccanicamente alla sorgente di ionizzazione all'estremità opposta (vedi Figura 1-5). Come accade per il riscaldatore, anche il sistema linea di trasferimento - sorgente di ionizzazione viene riscaldato mediante dissipazione di potenza per effetto Joule; in questo modo la temperatura della sorgente arriva a sfiorare i 2400°C. Si tende comunque a mantenere tale temperatura ad un livello inferiore (2200°C) per evitare la sublimazione dei componenti metallici (Catodo).

La camera *target* viene collegata al *front end*; tra i due componenti è presente una differenza di potenziale ( $V_{camera} - V_{front\ end}$ ) pari a 60 kV ed è quindi necessario, al fine di evitare il contatto diretto, interporre un isolante elettrico (*electrical insulator*) come rappresentato in Figura 1-7. La differenza di potenziale presente attira gli ioni radioattivi verso il *front end*; in particolare il componente che accoglie gli ioni in uscita dalla sorgente di ionizzazione è un elettrodo (*electrode*) realizzato in lega di titanio (Ti6Al4V) e visibile in Figura 1-5. In questo modo si forma il fascio di ioni radioattivi che verrà, dopo il passaggio attraverso i separatori elettromagnetici ed il post acceleratore, inviato alle sale sperimentali.



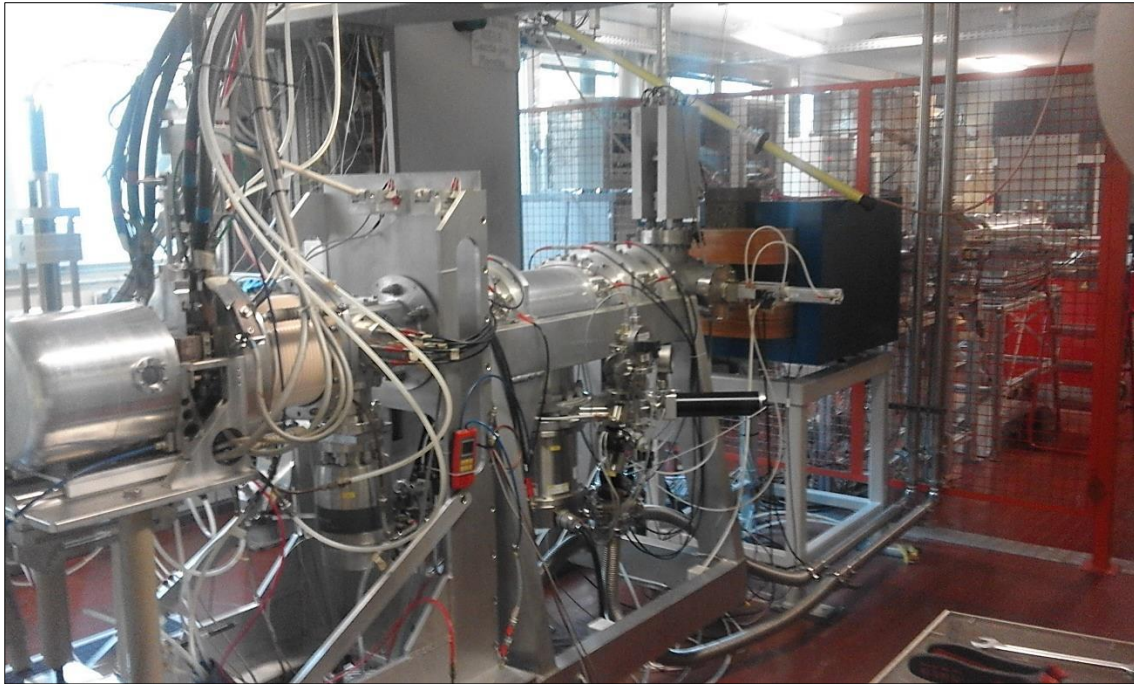


Figura 1-7: Front end off-line del progetto SPES.

#### 1.2.2.2. *Le sorgenti di ionizzazione*

Le sorgenti di ionizzazione adottate per il progetto SPES possono essere di tre tipi:

- Plasma Ion Source (PIS)
- Surface Ion Source (SIS)
- Resonant Ionization Laser Ion Source (RILIS)

Vengono illustrate di seguito le tre tipologie, soffermandosi sugli aspetti più importanti.

##### Plasma Ion Source (PIS)

Questa tipologia di sorgente permette di ionizzare tutti gli elementi, seppur con efficienze più basse rispetto a quelle elencate in precedenza. Il fascio viene ionizzato attraverso il meccanismo per urto di elettroni: il gas dell'elemento voluto viene inviato attraverso la *transfer line* in una cavità (anodo) nel quale viene inviata una corrente di elettroni (*electron beam*), prodotta all'interno della stessa sorgente (in un componente detto catodo), accelerati attraverso una differenza di potenziale presente tra anodo e catodo. Questa corrente di elettroni ionizza gli atomi del gas, facendolo passare allo stato di plasma; tale stato consente di confinare gli ioni senza che questi arrivino a superfici dove possano essere neutralizzati, perciò questo dispositivo viene anche chiamato Sorgente di Ionizzazione al Plasma. Esistono varie tipologie di Sorgenti al Plasma, ma quella usata nel progetto SPES è la FEBIAD, che sarà l'oggetto di studio principale di questa tesi; per questo motivo non vengono qui dati ulteriori approfondimenti ma si rimanda il lettore ai capitoli successivi.

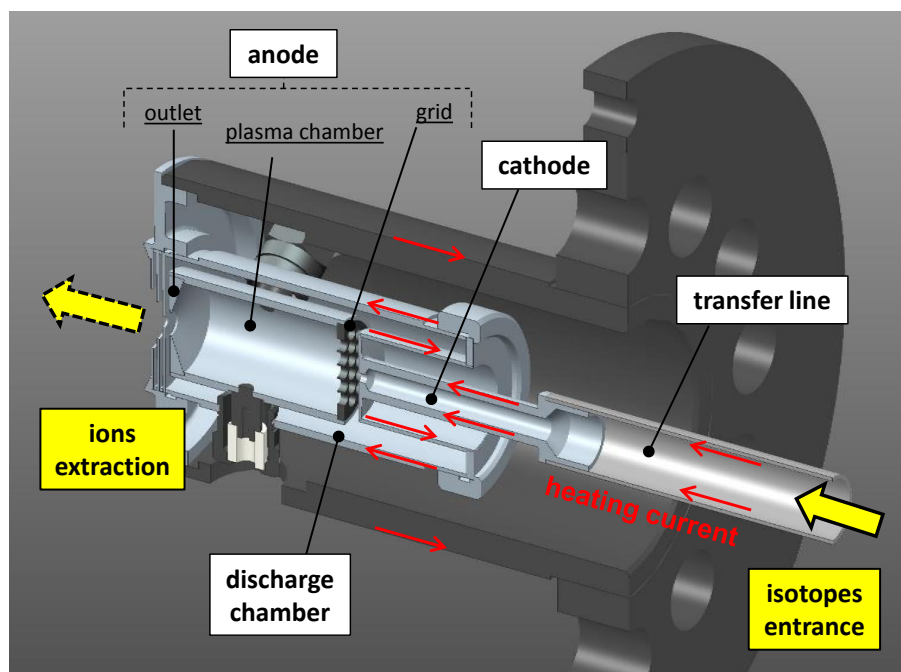


Figura 1-8: Sorgente di ionizzazione al plasma (PIS)

Di seguito viene riportata una tavola periodica degli elementi nella quale vengono indicati in rosso gli elementi di cui, attraverso il progetto SPES, è possibile la produzione degli isotopi. In particolare sono evidenziati gli isotopi che possono essere prodotti con le tecniche di ionizzazione superficiale, laser o entrambe; per la produzione degli altri isotopi si dovrà ricorrere ad altri tipi di sorgente, come ad esempio la sorgente ECR. La sorgente tipo FEBIAD, come già detto, è in grado di ionizzare qualsiasi tipo di elemento, mentre la ECR è particolarmente adatta alla produzione di elementi aventi un potenziale di ionizzazione molto elevato (come i gas nobili, di grande interesse per le applicazioni nucleari).

		surface ionization mechanism																laser ionization mechanism																electron impact ionization mechanism																not extracted															
1	1	2													13	14	15	16	17	18																																													
	H														B	C	N	O	F	Ne																																													
2	3	4													5	6	7	8	9	10																																													
	Li	Be													Al	Si	P	S	Cl	Ar																																													
3	11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																															
	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																																															
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																															
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																																															
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																																															
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																																															
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																																															
	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																																															
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110																																																							
	Fr	Ra	Ac	Unq	Unp	Unh	Uns	Uno	Une	Unn																																																							

Main fission (p-> <sup>238</sup>U) fragments

Figura 1-9: Tavola periodica degli elementi in cui sono evidenziati i fasci prodotti dal progetto SPES con le varie tipologie di ionizzazione.

### Surface Ion Source (SIS)

Attraverso la *Surface Ion Source* la ionizzazione è causata dallo strisciamento degli isotopi radioattivi provenienti dal *target* sulla superficie interna della *hot cavity*. A causa di tale strisciamento gli isotopi cedono un elettrone e vengono quindi ionizzati positivamente (ioni +1). Questo è possibile se la minima energia necessaria per rimuovere un elettrone da una superficie (funzione di lavoro) è maggiore del potenziale di ionizzazione dell'isotopo. Nel caso in esame si riescono a produrre con elevata efficienza ioni positivi per elementi con potenziale di ionizzazione inferiore alla funzione di lavoro del tungsteno pari a circa 5 eV. L'elevata temperatura a cui si trova la sorgente permette di avere un processo di ionizzazione efficiente; si favorisce infatti il moto Browniano e si incrementano i contatti isotopo-superficie.

In tale tipologia di sorgente il processo di ionizzazione è selettivo, cioè vengono ionizzati soltanto gli isotopi della specie desiderata. Questa caratteristica rappresenta sia un vantaggio, poiché il fascio avrà un elevato grado di purezza, che uno svantaggio poiché si potranno ionizzare poche specie. Si possono comunque predisporre dei separatori elettromagnetici in grado di selezionare, in base alla massa, le particelle presenti nel fascio; la purezza del fascio non è però garantita in quanto vi sono isotopi di diversa specie, tra loro isobari, aventi cioè lo stesso numero di massa  $A$  ma un diverso numero atomico  $Z$  (come ad esempio il  $^{132}\text{Cs}$  e lo  $^{132}\text{Sn}$ ). Per separare tali elementi sono necessari dei separatori isobari; tali dispositivi, oltre ad essere molto complicati e costosi sono anche poco affidabili e riducono notevolmente l'intensità del fascio.

Questa tipologia di sorgente permette di ottenere anche ioni negativi. La produzione di fasci di atomi esotici ionizzati negativamente è comunque molto complicata; non tanto per la produzione degli ioni, per cui è sufficiente realizzare la *hot cavity* con un materiale la cui funzione di lavoro sia più piccola dell'affinità elettronica degli isotopi, bensì per la loro accelerazione. La differenza di potenziale presente tra la camera *target*, il *front end* ed i sistemi di post accelerazione deve essere invertita; questo è possibile soltanto se si dispone di particolari dispositivi denominati *charge exchange devices*.

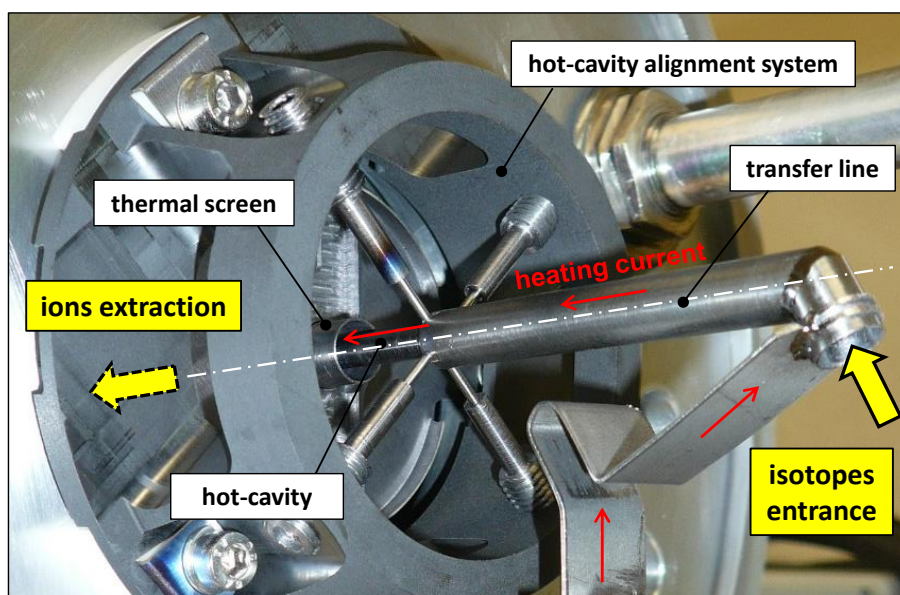


Figura 1-10: Surface Ion Source (SIS)

### Resonant Ionization Laser Ion Source (RILIS)

Il metodo *RILIS* (il cui principio di funzionamento è schematizzato in Figura 1-11) è oggi il più potente strumento per la produzione di fasci di ioni radioattivi per gli impianti di tipo ISOL, in quanto fornisce un processo di ionizzazione selettiva e garantisce la soppressione di contaminazioni indesiderate a livello della sorgente di ionizzazione. Vale la pena notare che il metodo *RILIS* utilizza la stessa architettura della tecnica di ionizzazione superficiale.

Un laser caratterizzato dalla sovrapposizione di più raggi (due o tre a seconda dell'elemento chimico da ionizzare) aventi lunghezze d'onda differenti, corrispondenti a diversi valori energetici ( $E = hf$ , dove  $h$  è la costante di Planck ed  $f$  è la frequenza d'onda), viene proiettato all'interno della *hot cavity*. Tale laser irradia gli isotopi e fornisce loro l'energia necessaria per far compiere all'elettrone più esterno dei salti quantici verso orbitali più esterni fino alla separazione dall'atomo; in questo modo si ha la formazione di uno ione positivo +1.

La metodologia di ionizzazione RILIS permette di acquisire soltanto ioni radioattivi della specie di interesse e si riesce quindi ad ottenere un fascio nel quale le contaminazioni sono minime. In ogni caso, a causa dell'architettura della sorgente, c'è la possibilità che alcuni elementi (in particolare il Cesio) vengano ionizzati per strisciamento; gli ioni così prodotti sporcano il fascio. Per risolvere tale inconveniente si può pensare di sostituire il materiale che costituisce la *hot cavity*; passando al Niobio la ionizzazione superficiale viene notevolmente attenuata.

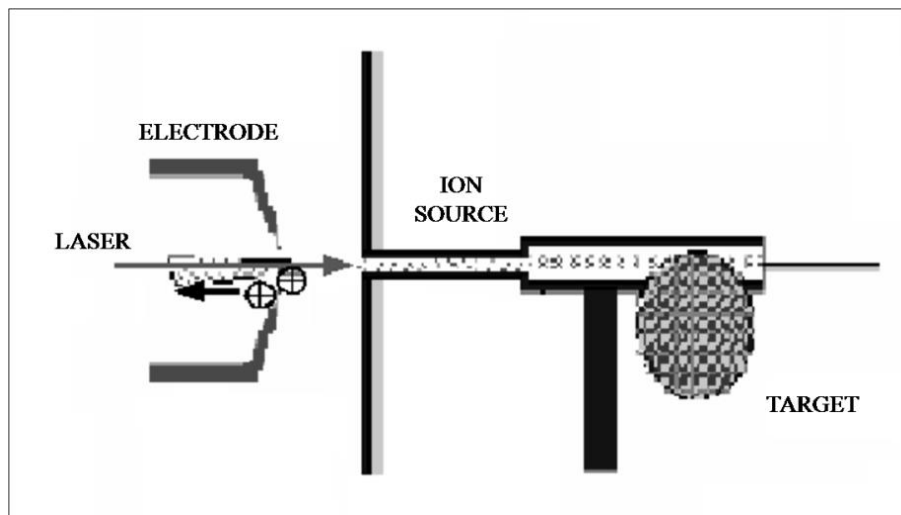


Figura 1-11: Schematizzazione del sistema di ionizzazione RILIS.

Per avere un'efficienza di ionizzazione elevata è di fondamentale importanza limitare e controllare il disallineamento della *hot cavity* causato dall'espansione termica: se questa si disallinea viene infatti a ridursi la zona di azione del laser e di conseguenza anche l'efficienza di ionizzazione (vedi Figura 1-12).

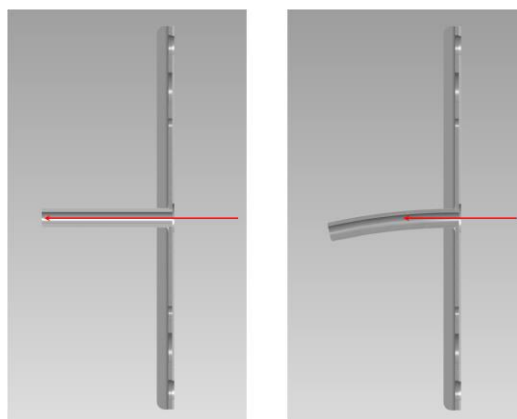


Figura 1-12: Allineamento della hot cavity.

### 1.2.3. Trasporto di fascio, selezione di massa e post accelerazione

Il fascio radioattivo estratto dalla sorgente di ionizzazione viene trasportato e deviato mediante l'utilizzo di elettromagneti. Il fascio viene sottoposto ad una prima fase di purificazione tramite un separatore isobaro MRMS (Medium-Resolution Mass Separator), avente una media risoluzione e che permette di separare gli isotopi, come il  $^{132}\text{Cs}$  e lo  $^{132}\text{Sn}$ , che sono tra loro isobari. Per migliorare la capacità di selezione dei separatori isobari è necessario operare con un'energia in ingresso dell'ordine dei  $200\text{ keV}$ ; questo è possibile se, sia il target che il primo separatore vengono montati in una piattaforma HV a  $250\text{ kV}$ .

A questo punto il fascio radioattivo può essere direttamente convogliato alle sale sperimentali (ed utilizzato in esperimenti che richiedono fasci radioattivi di bassissima energia), oppure essere post accelerato. La post accelerazione viene ottimizzata mediante l'impiego di un *Charge Breeder*; un dispositivo in grado di incrementare la carica degli ioni prima dell'iniezione del fascio esotico attraverso un RFQ, che rappresenta il



primo stadio di post accelerazione prima dell'ingresso nel complesso PIAVE-ALPI (acceleratore LINAC superconduttore).

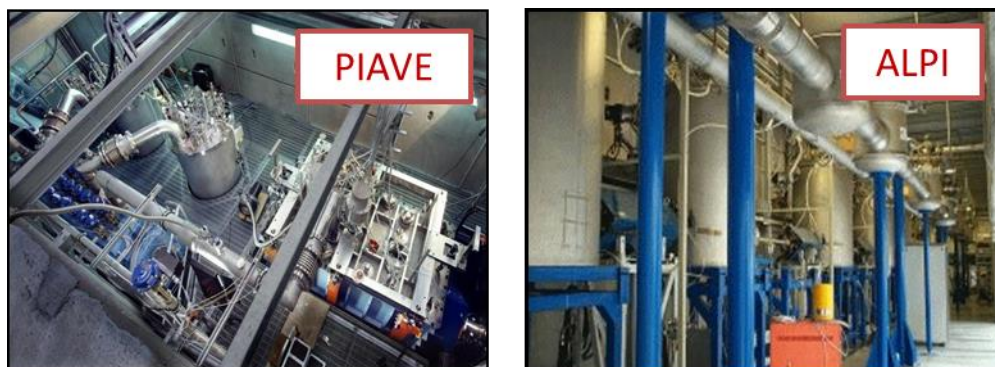


Figura 1-13: Complesso PIAVE-ALPI

Si ricorda che la corrente finale del fascio radioattivo dipende dall'efficienza di molti processi chimico/fisici (vedi Equazione 1.1); complessivamente ci si aspetta, alle sale sperimentali, un fascio avente un rapporto di circa  $10^6 \div 10^9$  isotopi/s (molto inferiore alle  $10^{13}$  fissioni/s date dalla fissione nucleare). Il diagramma di Figura 1-14 mostra l'intensità del fascio radioattivo, calcolata tenendo conto delle efficienze di emissione, di ionizzazione e di accelerazione, per diverse specie di isotopi.

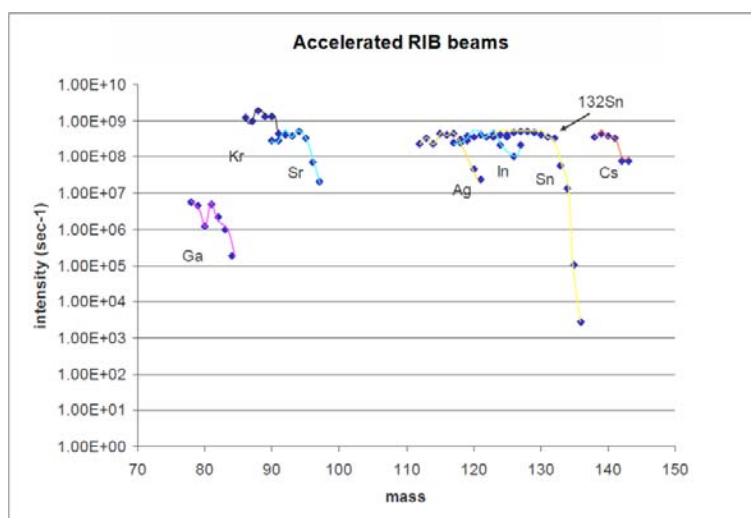


Figura 1-14: Intensità finale del fascio, calcolata tenendo conto delle efficienze di emissione, di ionizzazione e di accelerazione, per diverse specie di isotopi.

### 1.3. Applicazione dei fasci di ioni esotici

I fasci di ioni esotici hanno suscitato, nel corso degli anni, un crescente interesse dovuto alle loro molteplici applicazioni non solo nel campo della fisica nucleare ma anche in astrofisica, medicina e fisica dello stato solido. Nel presente paragrafo vengono brevemente descritte le principali applicazioni dei fasci di ioni radioattivi nelle quattro aree sopra citate.

#### 1.3.1. Applicazioni in fisica nucleare [1]

##### 1.3.1.1. Miglioramento e verifica del Modello Standard

Il modello standard della fisica delle particelle è una teoria che descrive insieme tre delle quattro forze fondamentali, cioè l'interazione nucleare forte, l'elettromagnetismo e l'interazione nucleare debole (queste ultime due unificate nell'interazione elettrodebole), nonché la funzione e le proprietà di tutte le particelle (note ed osservate) che costituiscono la materia. Nonostante il suo successo, tale modello non è del tutto soddisfacente, poiché dipende in modo sostanziale da alcune assunzioni fatte *ad-hoc*. Elaborati esperimenti di



fisica nucleare, suggeriti da convincenti basi teoriche, sono stati ideati allo scopo di chiarire l'origine di queste assunzioni e pervenire così all'unificazione delle interazioni fondamentali. Tali esperimenti prevedono precise misure delle proprietà di decadimento di alcuni nuclei, che possono essere effettuate proprio utilizzando come sorgente pura di ioni, i fasci di ioni radioattivi prodotti dagli impianti.

### 1.3.1.2. Studio della struttura di nuclei complessi

I nucleoni (protoni e neutroni) sono costituiti da sub-particelle chiamate quark, esse esercitano un effetto fisico anche oltre i nucleoni nei quali sono confinati: in particolare le interazioni tra i nucleoni all'interno del nucleo sono diverse da quelle esistenti tra due nucleoni liberi, in quanto esse dipendono anche dalla densità di protoni e neutroni associata al particolare tipo di nucleo. Al momento, non esiste una formula generale che consenta di quantificare l'entità delle interazioni nucleari per tutti i nuclei rappresentati nella Figura 1.1, in quanto i calcoli quantomeccanici sono applicabili unicamente ai nuclei più leggeri; l'obiettivo della fisica nucleare è di ottenere una trattazione unitaria che:

- Permetta di derivare l'effettiva interazione tra le particelle nucleari;
- Elimini le incongruenze dei modelli correnti;
- Sia applicabile anche ai nuclei aventi rapporto protoni/neutroni estremo (nuclei esotici).

A questo proposito i fasci di ioni radioattivi possono fornire un prezioso contributo.

### 1.3.1.3. Misura della dimensione del nucleo: i nuclei "halo"

La dimensione del nucleo è legata al numero totale di nucleoni che lo costituiscono ( $A$ ) dalla semplice relazione  $R = R_0 A^{1/3}$ , dove  $R$  è il raggio nucleare ed  $R_0$  una costante pari a  $1.2 \text{ fermi}$  ( $1 \text{ fermi} = 10^{-13} \text{ m}$ ). Tuttavia, allontanandosi dalla valle di stabilità, si possono incontrare notevoli deviazioni da tale legge, in quanto le energie di legame tra le particelle di uno stesso nucleo possono diventare così piccole da causare la formazione di nuclei particolari, chiamati "ad anello" (nuclei "halo"). I nuclei "halo" sono caratterizzati da una diversa collocazione dei neutroni; tali nuclei possiedono molti più neutroni dei rispettivi isotopi stabili, inoltre uno o due neutroni, essendo debolmente legati al nucleo, orbitano attorno ad esso (neutroni di valenza).

Un esempio di nucleo "halo" è il  $^{11}\text{Li}$ ; esso ha una dimensione media del nucleo paragonabile a quella del  $^{48}\text{Ca}$ , se però si considera l'alone, racchiuso dalle orbite dei due elettroni di valenza presenti, il nucleo assume dimensioni paragonabili a quelle del  $^{208}\text{Pb}$  (vedi Figura 1.16).

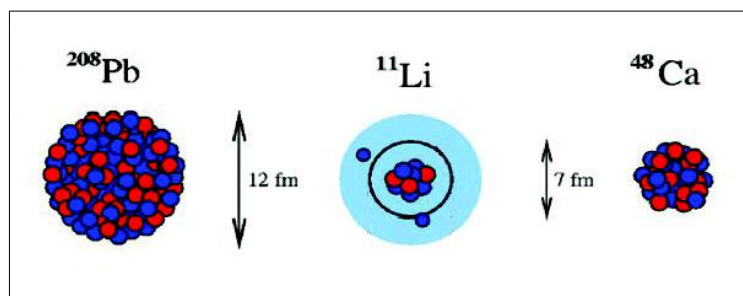


Figura 1-15: Paragone tra la dimensione del nucleo di  $^{11}\text{Li}$  e quella di altri nuclei più massivi.

Il nucleo  $^{11}\text{Li}$  è un sistema a tre corpi (i due neutroni "esterni" ed il core) e rappresenta un esempio naturale di sistema Borromeico (vedi Figura 1.17); in topologia, i tre anelli borromeici sono legati l'un l'altro in modo tale che la rottura di uno permetta la separazione degli altri due.

I nuclei ad anello sono anche chiamati "nuclei Borromeici" proprio perché se uno dei loro costituenti viene a mancare, gli altri divengono immediatamente instabili e si possono a loro volta allontanare facilmente.

Attualmente, per la misura della distribuzione di protoni, sulla base di esperimenti di spettroscopia atomica, si usano fasci radioattivi di bassa energia e luce laser collineata; per la determinazione della distribuzione di tutti i nucleoni, vengono invece impiegati fasci radioattivi ad alta energia.



Figura 1-16: Gli anelli Borromeici.

#### 1.3.1.4. Produzione di elementi superpesanti

Gli elementi naturali sono circa 90: dall'Idrogeno all'Uranio; negli ultimi anni l'utilizzo di reazioni di fusione nucleare ha permesso la sintesi di nuovi elementi di elevato peso atomico, estendendo il numero dei costituenti della Tavola Periodica sino all'elemento avente numero atomico 112 e prospettando un'ulteriore estensione a 116. In particolare questi elementi, chiamati superpesanti (nei quali si ha una fortissima repulsione coulombiana), sembra riescano a formarsi attorno alla cosiddetta "Isola di Stabilità" (una combinazione di 114 protoni e 184 neutroni che sembra garantire la stabilità del nucleo). La recente disponibilità di fasci intensi, costituiti da nuclei instabili ricchi di neutroni (*n-rich*), accoppiati a target stabili, anch'essi ricchi di neutroni, potrebbe aprire la strada ad uno studio e ad una indagine accurata di tale fenomeno.

### 1.3.2. Applicazioni in fisica dello stato solido

La tecnica *Radio Tracer Diffusion*, nata nel 1920, consiste nell'impiantare all'interno di un sistema solido dei nuclei radioattivi e di studiarne il decadimento, rilevando le particelle o la radiazione gamma da essi emessa. Tale tecnica permette di captare segnali anche da pochissimi atomi e rappresenta uno dei metodi più comuni per studiare i processi di diffusione atomica nei solidi [3].

Il sistema ospitante può essere drogato con i radioisotopi "sonda" per diffusione, tramite reazione nucleare, oppure per impianto ionico; la scelta dell'atomo radioattivo da utilizzare per un determinato esperimento viene fatta in base alla natura chimica e alle proprietà nucleari di quest'ultimo.

L'uso della tecnica *Radio Tracer Diffusion* consente di:

- Osservare, tramite i prodotti di decadimento, l'interazione tra l'atomo Sonda e l'intorno reticolare che lo circonda,
- Ottenere informazioni riguardanti il campo elettrico e magnetico all'interno del cristallo,
- Studiare i processi diffusivi e le interazioni tra gli atomi sonda,
- Indagare i tipi di difetti presenti nel cristallo.

#### 1.3.2.1. Drogaggio dei semiconduttori

Lo sviluppo di semiconduttori di piccole dimensioni aventi caratteristiche ottiche ed elettriche ottimali richiede un controllo completo dei difetti che governano tali proprietà, sia intrinseci (come le vacanze interstiziali) che estrinseci (come i droganti e le impurità atomiche): per tale motivo sia la ricerca di base che quella applicata stanno concentrando notevoli sforzi nello studio dei difetti e dell'attivazione elettrica dei droganti in diversi semiconduttori.

Analogamente agli isotopi stabili, gli isotopi radioattivi influenzano le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori in base alla loro natura chimica ed alla loro posizione all'interno del reticolo cristallino: in particolare, poiché le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori dipendono oltre che dal tipo di

semiconduttore anche dalle sue dimensioni, si è dimostrato che in semiconduttori molto piccoli tali proprietà possono essere sensibilmente alterate da un difetto presente con concentrazione minore di  $10^{12}$  atomi/cm<sup>3</sup>; per controllare in maniera affidabile le prestazioni dei semiconduttori sono quindi necessarie tecniche sperimentali che combinino un'alta sensibilità chimica con un'alta sensibilità per la determinazione di basse concentrazioni di difetti.

Per decenni la principale tecnica di rilevazione delle impurezze all'interno di un cristallo è stata il *channeling*: in tale tecnica un fascio di ioni viene guidato lungo le righe atomiche o lungo i piani del cristallo (canali), tuttavia non è possibile determinare concentrazioni di difetti inferiori a  $10^{18}$  atomi/cm<sup>3</sup>. La sensibilità di tale tecnica può essere profondamente aumentata impiantando all'interno del cristallo impurezze radioattive che emettono particelle cariche (*emission channeling*). La misura dell'emissione lungo differenti direzioni cristalline permette la determinazione del sito cristallografico dell'atomo emittente con un'accuratezza di pochi decimi di Å.

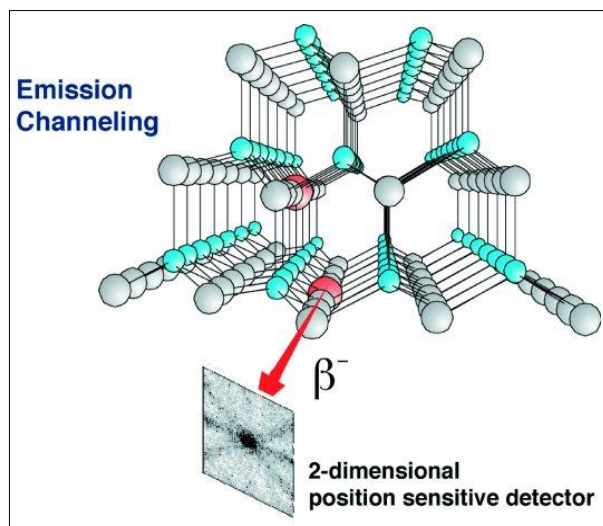


Figura 1-17:emission channeling degli elettroni emessi da atomi radioattivi situati in una riga atomica del reticolo.

### 1.3.3. Applicazioni mediche: la Tomografia ad Emissione Positronica [9]

Prima di procedere è necessario fornire alcune fondamentali definizioni:

- L'antimateria: è la materia composta da antiparticelle, ovvero si tratta di particelle aventi la stessa massa e caratteristiche opposte a quelle che costituiscono la materia ordinaria.
- Il positrone (detto anche antielettrone): è l'equivalente di antimateria dell'elettrone ed ha carica elettrica pari a +1.

Quando un positrone si annichila con un elettrone, la loro massa viene convertita in energia, sotto forma di due fotoni ad altissima energia nella banda dei raggi gamma. Un positrone può essere generato dal decadimento radioattivo con emissione di positroni, o dall'interazione con la materia di fotoni con energia superiore a 1,022 MeV.

Sebbene utilizzata principalmente per studiare le interazioni tra particelle elementari, l'antimateria ha anche un'applicazione tecnologica: la Tomografia ad Emissione Positronica (PET, *Positron Emission Tomography*) una tecnica di medicina nucleare e diagnostica medica che utilizza l'emissione di positroni per realizzare immagini tridimensionali o mappe ad alta risoluzione degli organi interni dei pazienti.

La procedura PET inizia con l'iniezione (generalmente per via endovenosa) nel soggetto da esaminare, di un isotopo tracciante di breve vita media, legato chimicamente ad una molecola attiva a livello metabolico. Dopo un tempo di attesa durante il quale la molecola metabolicamente attiva (spesso uno zucchero), raggiunge una determinata concentrazione all'interno dei tessuti organici da analizzare, il soggetto viene posizionato nello scanner.



Figura 1-18:scanner impiegato nella tecnica di rilevazione PET.

L'isotopo di breve vita media decade, emettendo un positrone. Dopo un percorso che può raggiungere al massimo pochi millimetri, il positrone si annichila con un elettrone, producendo una coppia di fotoni (di energia paragonabile a quella dei raggi gamma) emessi in direzioni opposte fra loro (sfasate di  $180^\circ$  lungo una stessa retta); questi fotoni sono successivamente rilevati dal dispositivo di scansione grazie all'impiego di speciali tubi fotomoltiplicatori. Punto cruciale della tecnica è la rilevazione simultanea di coppie di fotoni: i fotoni che non raggiungono il rilevatore in coppia, cioè entro un intervallo di tempo di pochi nanosecondi, non sono presi in considerazione; dalla misurazione della posizione in cui i fotoni colpiscono il rilevatore (ogni coppia di fotoni individua una retta), si può ricostruire la posizione del corpo da cui sono stati emessi (teoricamente con due coppie di fotoni, e dunque con due rette, è possibile individuare il punto di emissione dei fotoni), permettendo la determinazione dell'attività o dell'utilizzo chimico all'interno delle parti del corpo investigate. Lo scanner utilizza la rilevazione delle coppie di fotoni per mappare la densità dell'isotopo nel corpo; la mappa risultante rappresenta i tessuti in cui la molecola campione si è maggiormente concentrata e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare o in radiologia al fine di determinare una diagnosi ed il conseguente trattamento. Spesso, e sempre più frequentemente, le scansioni della Tomografia a Emissione di Positroni sono raffrontate con le scansioni a Risonanza Magnetica Nucleare, fornendo informazioni sia anatomiche e morfologiche, sia metaboliche (in sostanza, su come il tessuto o l'organo siano conformati e su cosa stiano facendo). La PET è usata estensivamente in oncologia clinica (per avere rappresentazioni dei tumori e per la ricerca di metastasi) e nelle ricerche cardiologiche e neurologiche.

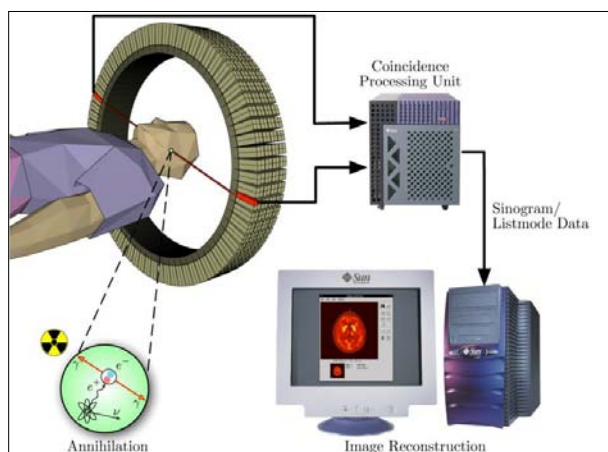


Figura 1-19:schema riassuntivo della tecnica di analisi PET e modalità di acquisizione e presentazione dei dati.

Ad ogni modo, mentre gli altri metodi di scansione, come la TAC e la RMN permettono di identificare alterazioni organiche e anatomiche nel corpo umano, le scansioni PET sono in grado di rilevare alterazioni a livello biologico molecolare che spesso precedono l'alterazione anatomica, attraverso l'uso di marcatori molecolari che presentano un diverso ritmo di assorbimento a seconda del tessuto interessato.

Con una scansione PET è possibile visualizzare e quantificare con discreta precisione il cambio di afflusso sanguigno nelle varie strutture anatomiche (attraverso la misurazione della concentrazione dell'emettitore di

positroni iniettato). I radionuclidi utilizzati nella scansione PET sono generalmente isotopi con breve tempo di dimezzamento, come  $^{11}\text{C}$  (~20 min),  $^{13}\text{N}$  (~10 min),  $^{15}\text{O}$  (~2 min) e  $^{18}\text{F}$  (~110 min). Per via del loro basso tempo di dimezzamento, i radioisotopi devono essere prodotti da un ciclotrone posizionato in prossimità dello scansionatore PET [3].

La PET gioca un ruolo sempre maggiore nella verifica della risposta alla terapia, specialmente in particolari terapie anti-cancro; si prospettano dunque per essa sempre maggiori applicazioni e sviluppi.

### 1.3.4. Applicazioni in astrofisica [1]

L'astrofisica nucleare gioca un ruolo fondamentale nella comprensione della struttura, evoluzione e composizione dell'Universo e dei suoi costituenti.

Le stelle generano energia attraverso reazioni nucleari coinvolgenti sia nuclei stabili che radioattivi. A volte, il consumo del carburante nucleare procede stabilmente e dura bilioni di anni, altre volte è esplosivo e dura pochi minuti o pochi secondi. Nelle differenti fasi della consumazione delle stelle vengono sintetizzati nuovi elementi chimici, sia tramite processi di nucleosintesi che seguono strettamente la valle di stabilità, sia attraverso processi che si svolgono in un territorio sconosciuto.

Per sviluppare un modello che descriva il meccanismo di nucleosintesi, è necessario misurare le rese delle reazioni nucleari relative ai principali cicli astrofisici e le caratteristiche di decadimento di molti nuclei tuttora sconosciuti. Queste essenziali informazioni includono i tempi di vita, le masse ed i principali canali di decadimento di un numero di nuclei chiave lontani dalla stabilità. Le reazioni nucleari coinvolgenti nuclei instabili possono essere misurate unicamente con un fascio radioattivo: per tale motivo si prevede che la nuova generazione di *facilities* per la produzione di fasci radioattivi risulterà di fondamentale importanza per la comprensione della sintesi elementare nell'Universo.

## 1.4. Conclusioni

L'importanza assunta negli anni dai fasci radioattivi, sia per la ricerca teorica che applicata, ha spinto la comunità scientifica internazionale a costruire numerose *facilities* per la loro produzione: il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro rientra nell'ambito della realizzazione di una *facility* europea di tipo ISOL ad alte prestazioni (progetto EURISOL); la realizzazione operativa di tale progetto prevede l'allestimento di una *facility* "intermedia" in grado di ottenere come prestazioni  $10^{13}$  fissioni/s in un target formato da 7 dischi in Carburo di Uranio bombardati da un fascio protonico di 40 MeV a 0,2 mA.

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno del progetto SPES; in particolare si effettuerà uno studio del sistema di estrazione e ionizzazione della Sorgente di Ionizzazione al Plasma (EBPIS). Sono già state illustrate le condizioni estreme di lavoro che tale struttura deve sopportare una volta in funzione; risulta pertanto di cruciale importanza avere una conoscenza dettagliata delle condizioni di lavoro reali dal punto di vista termico e strutturale, oltre alle leggi teoriche che regolano la fisica dei fenomeni. Questo è possibile attraverso l'utilizzo di metodi di indagine agli elementi finiti capaci di simulare il comportamento reale dei vari componenti della *facility*.

## Bibliografia Capitolo 1

- [1]. M. Manzolaro, Analisi termica e strutturale del bersaglio diretto per la produzione di fasci radioattivi per il progetto SPES, Tesi di Laurea Specialistica, Università degli Studi di Padova, 2006/2007.
- [2]. G. Diavola, Fasci di ioni radioattivi ai laboratori nazionali del sud dell'INFN: il progetto EXCYT, Il Saggiatore, 1999.
- [3]. M. Deicher, Radioactive isotopes in solid state physics, Europhysics News, Vol. 33 No 3, 2002.
- [4]. «EURISOL,» Indirizzo: <http://www.ganil.fr/eurisol/EURISOLlinks.html>.
- [5]. G. Meneghetti, M. Manzolaro, A. Andrighetto, Design of the SPES Target Heating System: theoretical analyses and comparison with experimental data, TNC CAE, 2008.
- [6]. A. G. Prete, «SPES Technical Design Report,» 2008. Indirizzo: [http://www.lnl.infn.it/~spes/TDR2008/tech\\_design08\\_index.htm](http://www.lnl.infn.it/~spes/TDR2008/tech_design08_index.htm).
- [7]. M. Lindroos, of ISOL-type radioactive beam facilities, EPAC, 2004.
- [8]. A. Andrighetto et al., The SPES Project At LNL, AIP (American Institute of Physics), 2009.
- [9]. «Wikipedia,» Indirizzo: <http://wikipedia.org>.

# CAPITOLO 2: LA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA

## 2.1. Introduzione

In questo Capitolo verrà descritto in dettaglio il funzionamento della Sorgente di Ionizzazione al Plasma (Plasma Ion Source, PIS), oggetto di studio principale di questa tesi. La comprensione dei fenomeni fisici che hanno luogo all'interno della sorgente hanno una elevata importanza in quanto danno indicazione sui parametri che possono essere variati per incrementare l'efficienza di ionizzazione ed estrazione del fascio di ioni. Nel primo paragrafo verrà descritto il Plasma in generale in quanto la sua descrizione fisica consentirà di effettuare alcune ipotesi per simularne numericamente il comportamento. Si parlerà poi della Sorgente al Plasma, dove fra tutte verrà messa in evidenza quella particolare che è al centro dello studio, ovvero la FEBIAD (acronimo che significa *Forced Electron Beam Induced Arc Discharge*) nella quale la ionizzazione avviene attraverso un fascio di elettroni che viene accelerato formando una corrente elettronica. Viene a formarsi così una nuvola di ioni, elettroni ed atomi neutri all'interno di una camera (detta di anodo) in cui avviene la scarica di elettroni. L'insieme di queste particelle è detto "plasma" e differisce dagli stati classici della materia (solido, liquido, gas). Questa tipologia di sorgente è stata sviluppata presso l'impianto ISOLDE al CERN e rientra nella famiglia delle *sorgenti al plasma ad elevata efficienza*. Il loro sviluppo ha preso piede quando è iniziata la costruzione delle prime *facility* ISOL per la produzione di radioisotopi in quanto queste sorgenti oltre ad essere in grado di ionizzare una grande varietà di elementi, presentano un'efficienza superiore al 50% per molti di essi<sup>[1]</sup>. Nei paragrafi successivi si noterà come l'efficienza per alcuni elementi, l'Argon in particolare, risulta essere molto bassa per via dell'elevata energia necessaria alla loro ionizzazione.

## 2.2. Fisica del Plasma [1] [2] [14]

Il Plasma è un gas ionizzato, composto da atomi, ioni positivi ed elettroni, che resta comunque globalmente neutro. Viene detto anche il quarto stato della materia, per via delle particolari condizioni fisiche in cui si trova e si differenzia quindi da gas, liquido e solido. Mentre è osservabile in grande quantità nello spazio (circa il 99% dell'universo è composto da plasma: l'interno delle stelle, le nebulose gassose, lo spazio interstellare e il vento solare si trovano in questo stato), sulla terra è piuttosto raro; in natura lo si può trovare nei fulmini e nelle aurore boreali, ma può essere riprodotto dall'uomo e può essere utilizzato negli impieghi tecnologici od industriali.

Il motivo di tale rarità lo si intuisce facilmente osservando l'*equazione di Saha* che esprime il grado di ionizzazione che deve presentare un gas in equilibrio:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \cdot 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{-\frac{U_i}{K_B T}} \quad (2.1)$$

dove  $n_i$  e  $n_n$  sono rispettivamente la densità (numero per  $m^3$ ) di atomi ionizzati e neutri,  $T$  è la temperatura del gas in K,  $K_B$  è la costante di Boltzmann e  $U_i$  l'energia di ionizzazione del gas. All'aumentare della temperatura, il grado di ionizzazione rimane basso finché  $U_i$  è vicino al valore di  $K_B T$ . In seguito il rapporto  $n_i/n_n$  cresce velocemente e il gas si trova nello stato di plasma. Un'ulteriore crescita della temperatura fa in modo che  $n_n$  sia minore di  $n_i$  e ciò può rendere il plasma totalmente ionizzato. Sostituendo all'*equazione di Saha* valori numerici tipicamente riscontrabili sulla terra, otteniamo:

$$\frac{n_i}{n_n} = 10^{-122} \quad (2.2)$$

che giustifica l'impossibilità di osservare plasmi sulla terra in condizioni normali.

Per ottenere lo stato di plasma sono necessarie condizioni energetiche tali da permettere il distacco degli elettroni dall'atomo di appartenenza. Per la sua formazione si parte quindi dallo stato di gas il quale viene riscaldato al fine di diminuire le forze interatomiche che tengono gli elettroni strettamente legati all'atomo di appartenenza; quando gli elettroni acquistano energia in qualsiasi forma, aumentano il loro stato energetico e tendono ad allontanarsi dal nucleo. Quindi fornendo una sufficiente quantità di calore gli elettroni potrebbero teoricamente staccarsi da soli. Tali livelli energetici sono però difficili da raggiungere, pertanto si fa ricorso ad alcune tecniche particolari che verranno descritte nel paragrafo 2.3.1. Una di queste consiste nel bombardare,

tramite degli elettroni (detti “*primari*”) provenienti da un elemento metallico (*catodo*) accelerati tramite un campo elettrostatico, il gas riscaldato contenuto in un particolare componente (*anodo*). L’impatto fornisce un’energia sufficiente a rompere il legame degli elettroni più esterni (detti “*secondari*”) portando alla formazione di uno ione positivo.

In questo stato, gli elettroni strappati dai nuclei di appartenenza, sono liberi di partecipare al comportamento del materiale come particelle a se stanti. Quindi, mentre in un gas le singole particelle sono molecole di quella particolare specie od atomi nel caso di gas nobili, nel plasma vi ritroviamo tre differenti tipi:

- Ioni (i nuclei a cui sono stati strappati gli elettroni);
- Elettroni;
- Particelle neutre (atomi).

La presenza di particelle cariche all’interno del plasma rende differente il comportamento rispetto ad un gas, in cui le molecole o gli atomi sono neutri, sia dal punto di vista delle interazioni fra le particelle sia considerando tutto il sistema in rapporto con l’ambiente esterno.

Il comportamento di una singola particella in un plasma è influenzato da più cause:

- **Forze elettrostatiche interne:** in particolare la forza elettrica su uno ione od un elettrone carico sarà la somma dei contributi dati dai campi generati dalle cariche circostanti. Siccome la particella sarà in movimento, si verificherà un’evoluzione temporale della forza che agisce su un certo corpuscolo, che a sua volta provocherà di riflesso una variazione sull’interazione che lo stesso corpuscolo ha con quelli circostanti;
- **Forze elettromagnetiche esterne:** le cariche elettriche libere fanno sì che il plasma sia un buon conduttore di elettricità, e che risponda fortemente ai campi elettromagnetici. Quindi applicando opportunamente dei campi elettrici e/o magnetici è possibile gestirlo. Questa peculiarità risulta essere importantissima poiché è possibile deviare, focalizzare, accelerare e separare le particelle componenti il plasma;
- **Urti:** come nei gas, anche all’interno del plasma avvengono urti tra le particelle che si muovono casualmente nello spazio con una velocità dipendente dalla sua temperatura. Tali collisioni (detto a corto raggio) sono schematizzabili generalmente come *urti binari perfettamente elastici* con sezione d’urto costante e distribuzione angolare uniforme nel centro di massa. Tuttavia le collisioni possono essere anche di tipo *coulombiano* e pertanto di tipo centrale e a lungo raggio, quindi non necessariamente binarie. Questo rende più complicata la descrizione analitica del fenomeno.

Tipicamente la fluidodinamica classica considera il comportamento di un fluido ipotizzando il sistema continuo (trascurando quindi la reale natura discreta della materia) e descrivendone lo stato attraverso dei parametri “*esterni*” come temperatura, pressione, compressibilità, viscosità, ecc. Di fatto si esegue una caratterizzazione di tipo “macroscopico”. Questo tipo di approccio non è sufficientemente dettagliato per modellare la dinamica di un plasma. Per una descrizione d’insieme più accurata del comportamento di un fluido, l’approccio “statistico” risulta maggiormente affidabile e consente di ottenere una caratterizzazione migliore dal punto di vista microscopico. Pertanto il ricorso all’approccio statistico è necessario per sviluppare una teoria cinetica comune a fluidi e plasmi le cui equazioni fondamentali siano applicabili sia a insiemi di particelle neutre sia cariche e che permettano una trattazione più coerente di fenomeni che una trattazione macroscopica non è in grado di descrivere.



Tabella 2-1: Differenze tra gas e plasma

Proprietà	Gas	Plasma
<b>Conducibilità elettrica</b>	Molto bassa	<p>Molto alta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Per molti scopi, il campo elettrico in un plasma può essere considerato come nullo (a parte il campo elettrico ambipolare). Quando una corrente fluisce nel plasma, c'è una caduta di potenziale (anche se piccola); gradienti di densità sono associati a un campo elettrico.</li> <li>La possibilità di condurre corrente elettrica fa sì che il plasma risponda molto bene a campi magnetici, formando una varietà enorme di fenomeni, come filamenti, jets, e strutture coerenti.</li> <li>Fenomeni collettivi sono molto comuni, perché il campo elettromagnetico è un'interazione a lungo raggio.</li> </ul>
<b>Specie indipendenti</b>	Una	<p>Due o più</p> <p>Elettroni, ioni, e atomi neutri possono essere distinti in base alla loro velocità e temperatura. L'interazione fra queste specie porta a fenomeni dissipativi (viscosità, resistività), e all'insorgere di onde e instabilità.</p>
<b>Distribuzione di velocità</b>	Maxwell	<p>Può essere non-Maxwelliana [1]</p> <p>Mentre le collisioni tendono a portare a una distribuzione di equilibrio Maxwelliana, i campi elettrici possono influenzare le velocità delle particelle diversamente, dando origine a fenomeni come gli elettroni runaway.</p>
<b>Interazioni</b>	Binarie Collisioni a due corpi sono la norma.	<p>Collettive</p> <p>Ogni particella interagisce contemporaneamente con molte particelle. Le interazioni collettive sono più importanti di quelle binarie.</p>

Per descrivere lo stato del plasma è possibile definire alcuni parametri che permettono di identificare le proprietà della materia:

- Densità:** per definirla, chiamo  $n_i$  la *densità di ioni*, ovvero il numero di ioni nell'unità di volume ( $m^3$ ). Se le particelle hanno carica  $1+$ , la *densità di elettroni*, che sarà chiamata  $n_e$  sarà uguale a  $n_i$  (il plasma è globalmente neutro). In alcuni casi le particelle possono avere carica maggiore di  $+1$ , oppure anche negativa ( $1-$ ) e possono anche essere presenti atomi o molecole neutre; se queste circostanze sono verificate si ha che  $n_e$  sarà diversa di  $n_i$ . Il termine *densità* viene riferito sia agli ioni che agli elettroni, ma si nota che se non siamo nel caso in cui tutte le particelle abbiano singola carica positiva è più corretto riferirsi agli elettroni e specificare la distribuzione dello stato delle cariche negli ioni. Per la sorgente tipo FEBIAD, valori tipici di densità sono  $n_i \approx n_e = 10^{10} \div 10^{11}$  *particelle/cm<sup>3</sup>* [4]. Dai parametri definiti in precedenza inoltre si può ricavare la percentuale di ionizzazione F.I. (acronimo di *fractional ionization*), dalla formula:

$$F.I. = \frac{n_i}{n_i + n_n} \quad (2.3)$$

dove  $n_n$  rappresenta il numero di particelle neutre per unità di volume. Per le sorgenti di ionizzazione, la densità è nell'ordine di  $1 \cdot 10^{-12}$  *particelle/cm<sup>3</sup>*, che corrisponde ad una pressione nell'ordine di  $1 \cdot 10^{-2}$  *Pa*, e ciò è dovuto alla geometria ed alle dimensioni degli elettrodi in cui si forma il raggio ionizzato. Il plasma può assumere comportamenti nettamente diversi a seconda che si tratti con un plasma ad elevata densità o con un plasma a bassa densità (vedi paragrafo 2.2.2).

- **Temperatura:** Un secondo parametro fondamentale per descrivere il plasma è la *temperatura*, che può essere anche espressa in elettronvolt, secondo la relazione [3]:

$$1eV = 11'600K \quad (2.4)$$

Come per la densità, la temperatura degli ioni  $T_i$  e quella degli elettroni  $T_e$  possono essere diverse; inoltre se è presente un campo magnetico esterno, viene introdotta un'anisotropia e le temperature misurate parallelamente e perpendicolarmente al campo possono essere diverse: si ottengono perciò quattro differenti parametri, cioè  $T_{\perp,i}$ ,  $T_{\parallel,i}$ ,  $T_{\perp,e}$ ,  $T_{\parallel,e}$ ; inoltre per le particelle neutre sarà definibile un'ulteriore valore, ovvero  $T_n$ . Per dare un'idea dei valori che può assumere la temperatura, un plasma freddo può essere a circa 0.2 eV, corrispondenti a circa 2000 K, un valore tipico di temperatura elettronica nelle sorgenti FEBIAD è  $T_e = 10 eV$  [4]. Nei plasmi prodotti con archi elettrici, le temperature degli ioni (che saranno circa attorno a 1 eV) possono essere molto diverse dalle temperature degli elettroni (che raggiungono valori maggiori anche di molti eV rispetto alla precedente). Per caratterizzare ulteriormente il plasma si possono usare funzioni di distribuzione, che descrivono, ad esempio, la distribuzione di velocità o di energia delle particelle. Naturalmente si può fare riferimento anche ai valori medi di queste grandezze, una volta definita la legge che ne regola la distribuzione (vedi paragrafo 2.2.1).

- **Oscillazioni elettroniche:** Il plasma ha un certo numero di modi di vibrare propri, ma quelli fondamentali sono le *oscillazioni elettroniche*, che corrispondono alla risposta quando tutto il materiale si discosta leggermente dallo stato neutro globale. Queste sono oscillazioni della componente elettronica e la frequenza corrispondente è chiamata *frequenza elettronica del plasma*, calcolabile dalla relazione [1]:

$$\omega_{pe}^2 = \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} \quad (2.5)$$

dove  $\epsilon_0$  è la costante dielettrica del vuoto e gli altri termini rappresentano massa, carica e densità degli elettroni. Anche gli ioni possono oscillare con frequenza propria, ad esempio se eccitati da un'onda meccanica. La frequenza naturale del plasma è un fenomeno che influenza la schermatura del plasma da una parete carica o tra il menisco del plasma e il foro di estrazione;

- **Lunghezza di Debye:** La *lunghezza di Debye*,  $\lambda_D$ , è la grandezza che indica entro quale distanza sono neutralizzati gli effetti di un campo elettrico all'interno del plasma; questa proprietà è detta *schermo di Debye*. Se si pensa infatti a un plasma freddo, inteso come un plasma in cui le particelle non abbiamo un moto di agitazione termica, se si introduce in esso un corpo carico si verifica la formazione di uno strato di cariche di segno opposto attorno a tale corpo che neutralizza il campo elettrico. Se ora si considera che però le particelle cariche sono anche in movimento avendo una certa temperatura, si capisce che non potranno più disporsi staticamente attorno al corpo, ma potranno spostarsi di una certa distanza attorno ad esso formando come una nube, al cui esterno non sarà più avvertibile l'effetto del campo elettrico introdotto dal corpo estraneo. La lunghezza di Debye è direttamente proporzionale alla temperatura elettronica ed inversamente proporzionale alla densità elettronica:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2}} \quad [m] \quad (2.6)$$

### 2.2.1. Teoria cinetica del Plasma [1]

La teoria cinetica del plasma è utilizzata principalmente per studiare il trasporto dell'energia e fa uso delle analogie tra il plasma stesso e il moto di particelle neutre, risolvendone le equazioni utilizzando funzioni di distribuzione per ciascuna specie. Un gas in equilibrio termico ha particelle che si muovono in tutte le direzioni con una certa velocità; la più probabile distribuzione della velocità è conosciuta come *distribuzione di Maxwell*. Per semplicità, si considera un gas composto da particelle che possono muoversi solo lungo una dimensione (ciò non è del tutto insensato, poiché la presenza di un forte campo magnetico può far muovere gli elettroni solo lungo le linee di campo).

La distribuzione Maxwelliana in una dimensione è dunque

$$f(u) = A e^{-\left(\frac{1}{2}mu^2\right)} \quad (2.7)$$

dove  $fdu$  è il numero di particelle per  $m^3$  con velocità compresa tra  $u$  e  $u+du$ . La densità, o numero di particelle per  $m^3$  è dato da

$$n = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u)du \quad (2.8)$$

La costante  $A$  è dipendente dalla densità

$$A = n \left( \frac{m}{2\pi K_B T} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

La larghezza della distribuzione (Figura 2-1) dipende dalla costante  $T$  che è la temperatura :

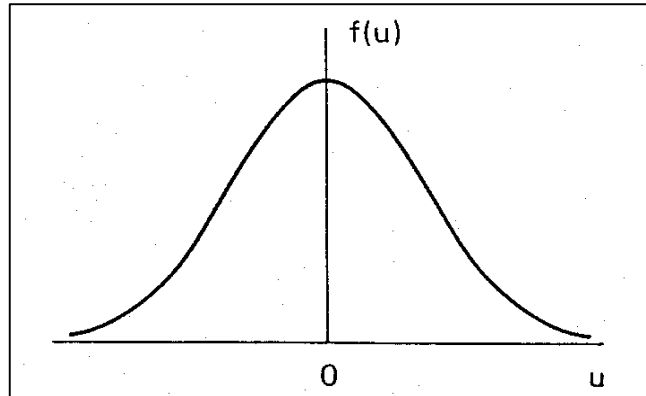


Figura 2-1: Funzione di distribuzione di Maxwell delle velocità [2]

Per capire l'esatto significato di  $T$ , è possibile calcolare l'energia cinetica media delle particelle in questa distribuzione:

$$E_{k,m} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} m v^2 f(u) du}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(u) du} \quad (2.10)$$

Definendo

$$v_{th} = (2K_B T/m)^{1/2} \quad e \quad y = \frac{u}{v_{th}} \quad (2.11)$$

è possibile riscrivere la funzione di distribuzione come

$$f(v) = A \exp(-u^2/v_{th}^2) \quad (2.12)$$

e l'energia cinetica media come

$$E_{k,m} = \frac{\frac{1}{2} m A v_{th}^3 \int_{-\infty}^{+\infty} [\exp(-y^2)] y^2 dy}{A v_{th} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-y^2) dy} \quad (2.13)$$

Integrando il numeratore per parti si ottiene

$$\int_{-\infty}^{+\infty} y \cdot [\exp(-y^2)] y dy = \left\{ -\frac{1}{2} [\exp(-y^2)] y \right\}_{-\infty}^{+\infty} - \int_{-\infty}^{+\infty} -\frac{1}{2} \exp(-y^2) dy = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-y^2) dy \quad (2.14)$$

Togliendo gli integrali, si ottiene l'energia cinetica media:

$$E_{k,m} = \frac{\frac{1}{2} A v_{th}^3 \frac{1}{2}}{A v_{th}} = \frac{1}{4} m v_{th}^2 = \frac{1}{2} K_B T \quad (2.15)$$

Il medesimo procedimento può essere esteso al caso tridimensionale ottenendo così:

$$E_{k,m} = \frac{3}{2} K_B T \quad (2.16)$$

Eguagliandola alla formulazione classica di energia cinetica, si ottiene la velocità media per particella :

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8K_B T}{\pi m}} \quad (2.17)$$

e le velocità medie di elettroni e ioni sono rispettivamente

$$\bar{v}_e = 67\sqrt{T_e} \quad \text{e} \quad \bar{v}_i = 1.57\sqrt{T_i/A} \quad (2.18)$$

dove  $T_e$  e  $T_i$  sono le temperature di elettroni e ioni e  $A$  è il numero di massa atomica. Finché  $T$  e  $E_{k,m}$  sono strettamente correlati, si è soliti in fisica del plasma esprimere la temperatura in energia. Per evitare confusione sulle dimensioni utilizzate (Joule o elettronvolt), si utilizza  $K_B T$  al posto di  $E_{k,m}$ . Per  $K_B T = 1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  si ha

$$T = \frac{1.6 \cdot 10^{-19}}{1.38 \cdot 10^{-23}} = 11600 \text{ K} \quad (2.19)$$

Quindi il fattore di conversione è  $1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$ .

### 2.3. Il processo di ionizzazione

Per capire bene cosa accade all'interno di una sorgente di ionizzazione è necessario conoscere alcuni concetti derivanti dalle trasformazioni chimiche che ivi avvengono. Il plasma, descritto nel capitolo precedente, viene a formarsi all'interno della sorgente a partire da un gas ad elevata temperatura che viene ionizzato.

La ionizzazione è il processo attraverso il quale uno o più elettroni vengono rimossi o aggiunti, per effetto di collisioni tra particelle, da atomi o da molecole creando così particelle cariche. Gli atomi o le molecole che hanno un numero di elettroni minore del numero atomico rimangono carichi positivamente e prendono il nome di cationi, quelli che hanno un numero di elettroni maggiore del numero atomico rimangono carichi negativamente e prendono il nome di anioni. Tali particelle possono successivamente essere convogliate e trasportate grazie all'utilizzo di campi elettromagnetici.

L'energia necessaria per allontanare a distanza infinita dal nucleo l'elettrone ad esso meno fortemente legato, cioè quello più esterno e quindi a più alta energia, trasformando l'atomo dell'elemento considerato  $X$  (allo stato gassoso) in uno ione positivo  $X^+$ , secondo il processo:



dove  $e^-$  rappresenta l'elettrone espulso, viene detta energia di prima ionizzazione; essa corrisponde, in valore assoluto, all'energia di legame di tale elettrone all'atomo dell'elemento considerato.

Le tipologie con cui una particella acquisisce carica positiva ( $1+$ ) possono essere molteplici:

- Ionizzazione superficiale;
- Fotoionizzazione;
- Ionizzazione di campo;
- Ionizzazione per impatto di ioni;
- Ionizzazione per bombardamento elettronico.

Questi metodi producono ioni positivi con carica unitaria ( $1+$ ), ma è possibile anche la produzione di ioni negativi ( $1-$ ) oppure di particelle con cariche multiple, questi processi non saranno considerati.

La tipologia per impatto o bombardamento di elettroni è quella che sarà qui esaminata perché è attraverso l'urto di elettroni che avviene la formazione del plasma all'interno della sorgente di ionizzazione studiata nel corso di questa tesi; mentre per le altre si rimanda a [1].

La **ionizzazione per bombardamento elettronico** avviene in un gas, quando degli elettroni liberi colpiscono le particelle neutre che lo compongono. Questi elettroni liberi devono essere accelerati da un campo elettrico esterno per raggiungere un'energia sufficiente a strappare una carica negativa alla particella inizialmente neutra durante l'impatto; è importante notare come dopo la collisione aumenta il numero degli elettroni liberi (a quelli

iniziali si sommano quelli liberati dagli atomi o dalle molecole del gas) e quindi la scarica prodotta dal campo elettrico aumenta di conseguenza. L'energia di un elettrone ( $E_e$ ) quando colpisce l'atomo neutro deve superare l'energia necessaria a rimuovere l'elettrone nell'orbitale più esterno dell'atomo stesso, ovvero il *potenziale di prima ionizzazione* ( $E_{ion}$ ). La probabilità che ha un elettrone di ionizzare una particella quando la colpisce è tanto maggiore quanto più grande è l'energia dello stesso rispetto ad  $E_{ion}$ , assume valore minimo (di 0) quando  $E_e < E_{ion}$  e raggiunge il massimo per  $E_e = 3 \div 4 E_{ion}$ .

Naturalmente, più gli elettroni sono vicini al nucleo (come nei non metalli) tanto maggiore è la quantità di energia che deve essere somministrata per allontanare gli elettroni dall'atomo.

Per quanto riguarda la dipendenza dell'energia di prima ionizzazione degli elementi dal numero atomico, si osserva che, lungo un periodo, da sinistra verso destra, aumenta l'energia necessaria per strappare l'elettrone più esterno, anche se non regolare. Questo è dovuto all'aumento della carica nucleare efficace (carica di cui realmente risente un elettrone in un atomo poli-elettronico), che provoca un abbassamento dell'energia degli orbitali: gli elettroni esterni risultano di conseguenza più fortemente legati e l'energia di ionizzazione aumenta all'aumentare del numero atomico. Di conseguenza si osservano valori elevati dell'energia di ionizzazione per i gas nobili, mentre valori più bassi si hanno per i metalli alcalini.

Nell'ambito di un gruppo, un aumento del numero atomico comporta una diminuzione dell'energia di ionizzazione. Ciò deriva essenzialmente dal fatto che entro ogni gruppo le dimensioni atomiche aumentano procedendo dall'alto verso il basso e l'elettrone più esterno si muove a distanze sempre più grandi dal nucleo, trovandosi in livelli energetici sempre più elevati. Le variazioni dell'energia di ionizzazione all'interno delle serie di transizione, invece, sono di entità modesta, analogamente a quanto accade per i raggi atomici, e con un andamento alquanto irregolare. La tendenza rivela un aumento di energia di ionizzazione procedendo da sinistra verso destra nella tavola periodica. Ecco quindi che i gas nobili risultano gli elementi con la più alta energia di prima ionizzazione e vengono pertanto utilizzati come riferimento per il calcolo dell'efficienza della sorgente di ionizzazione al plasma. Infatti nelle prove sperimentali che verranno presentate in seguito, si è fatto uso del gas nobile Argon per valutare le prestazioni della sorgente. Si capisce anche il motivo per cui si cerchi di tenere minimo il livello di contaminanti nel fascio.

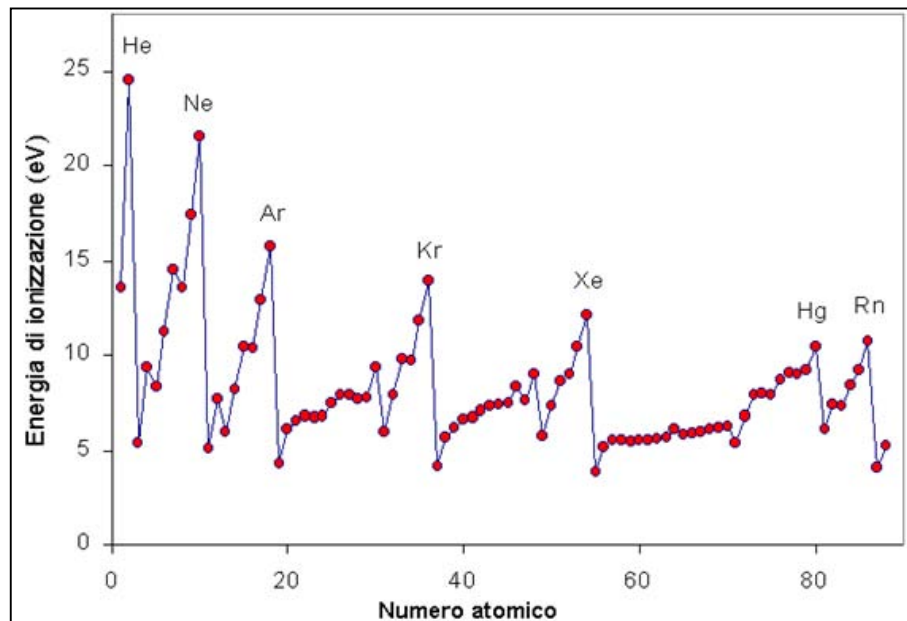


Figura 2-2: Energia di prima ionizzazione in funzione del numero atomico

L'energia di un elettrone può essere definita a partire dalla temperatura elettronica  $T_e$ , ma si osserva che la ionizzazione per impatto elettronico in un plasma è massima quando la temperatura consente un livello energetico molte volte superiore a  $E_{ion}$  (va ricordato che il *potenziale di ionizzazione* dipende dal gas da ionizzare, mentre la temperatura  $T_e$  rappresenta il valore medio della distribuzione di temperatura degli elettroni). Questa condizione è raramente assoluta poiché valori tipici di  $E_{ion}$  per molti gas sono vicini ai 15 eV, mentre, per la sorgente FEBIAD e in generale per le sorgenti a scarica di elettroni si ha  $T_e = 1 \div 10$  eV. Quindi, più elevata è la temperatura degli elettroni e maggiore sarà la quantità di gas ionizzato; tuttavia se si continua ad aumentare la temperatura elettronica, una volta raggiunto il massimo, si ha una decrescita del numero di particelle ionizzate, quindi esiste un valore di ottimo.

Gli elettroni con grande contenuto energetico che causano la ionizzazione sono detti “primari”, mentre quelli più freddi che sono strappati dagli atomi di appartenenza sono detti “secondari”; si nota come deve esserci una fonte di energia che sostiene il processo per garantire di riscaldare nuovamente gli elettroni primari dopo che hanno perso energia a causa dello scontro che ha causato la ionizzazione (con riscaldare si intende riportare  $E_e$  ad un valore superiore a  $E_{ion}$ ).

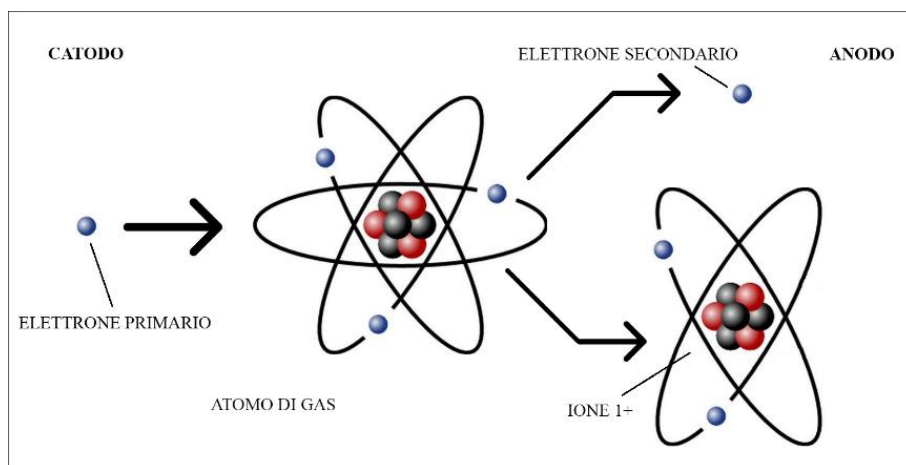


Figura 2-3: Processo di ionizzazione

La ionizzazione di un gas attraverso il bombardamento di elettroni può essere incrementata in vari modi: gli elettroni possono essere riutilizzati più volte venendo riflessi tra due elettrodi polarizzati negativamente anche in presenza di un campo magnetico assiale, la riflessione permette un percorso maggiore e quindi aumenta la probabilità di un singolo elettrone di ionizzare un atomo: questo metodo è detto a *scarica riflessa*; oppure si può anche pensare di confinare sia gli elettroni che le particelle da ionizzare in uno spazio ristretto, attraverso ad esempio un multipolo magnetico, così da incrementare la possibilità degli elettroni primari di colpire un atomo. Un altro metodo per aumentare la probabilità di ionizzazione è quello di imporre un campo magnetico che fa compiere agli elettroni una traiettoria spiraliforme. Per capire bene il comportamento degli atomi e degli ioni all'interno della sorgente è bene introdurre due concetti riguardanti la chimica degli elementi: l'affinità elettronica e l'elettronegatività.

### 2.3.1. Affinità elettronica

Si definisce affinità elettronica di un atomo, l'energia liberata quando ad un atomo neutro e isolato (in fase gassosa) e nel suo stato fondamentale, viene aggiunto un elettrone secondo il seguente processo:



Poiché l'affinità elettronica rappresenta l'energia liberata dal sistema (processo esotermico) ad essa viene attribuito un valore negativo per indicare che la formazione del legame determina una diminuzione dell'energia del sistema e che per rompere il legame occorre fornire energia. Come l'energia di ionizzazione, anche l'affinità elettronica viene misurata in *elettronvolt* [eV] se ci si riferisce ad un solo atomo.

L'affinità elettronica aumenta in valore assoluto, andando da sinistra verso destra lungo un periodo, a causa del corrispondente aumento della carica nucleare efficace; per quanto riguarda i gruppi essa diminuisce in valore assoluto, dall'alto verso il basso, poiché aumentando le dimensioni atomiche, l'elettrone viene addizionato a distanze sempre maggiori dal nucleo, e l'interazione con quest'ultimo diventa sempre minore.

Occorre sottolineare che esistono anche affinità elettroniche di secondo ordine o di ordine superiore, relative all'aggiunta di un secondo o di un terzo elettrone; esse risultano essere sempre positive, corrispondenti quindi a processi endotermici, che avvengono cioè con assorbimento di energia, a causa della forza repulsiva esercitata sull'elettrone aggiunto dallo ione negativo a cui viene addizionato.

### 2.3.2. Elettronegatività

Gli elementi aventi bassa energia di ionizzazione tendono a dare con facilità ioni positivi, per cui si dice che sono fortemente elettropositivi, mentre quelli che hanno valori dell'affinità elettronica negativi e molto grandi in valore assoluto tendono a dare con facilità ioni negativi, cioè sono tipicamente elettronegativi.

L'elettronegatività indica la tendenza di un atomo ad attrarre a sé elettroni quando si lega con altri atomi. Il concetto di elettronegatività è diverso dall'affinità elettronica in quanto la prima è una proprietà che ha significato solo quando si faccia riferimento ad un atomo in relazione ad altri atomi, mentre la seconda è una proprietà intrinseca degli atomi isolati; un atomo, quindi, si definisce più o meno elettronegativo relativamente agli atomi con cui è legato. Considerando gli elementi di uno stesso gruppo, è chiaro che l'elettronegatività risulta maggiore per gli atomi di piccole dimensioni, quindi in un gruppo essa tende a diminuire dall'alto verso il basso. Atomi con dimensioni molto simili saranno tanto più elettronegativi quanto minore è la carica nucleare efficace; si può quindi aspettarsi che l'elettronegatività cresca lungo un periodo procedendo da sinistra a destra. Da ciò si può dedurre che gli elementi più elettronegativi sono gli alogeni e gli calcogeni a basso peso atomico, mentre i meno elettronegativi (o equivalentemente i più elettropositivi) sono i metalli alcalini ed alcalino-terrosi ad alto peso atomico. Pertanto una volta ionizzati, gli elementi elettronegativi tenderanno ad acquisire più facilmente un elettrone durante la fase di ricombinazione, perdendo così la caratteristica di ione.

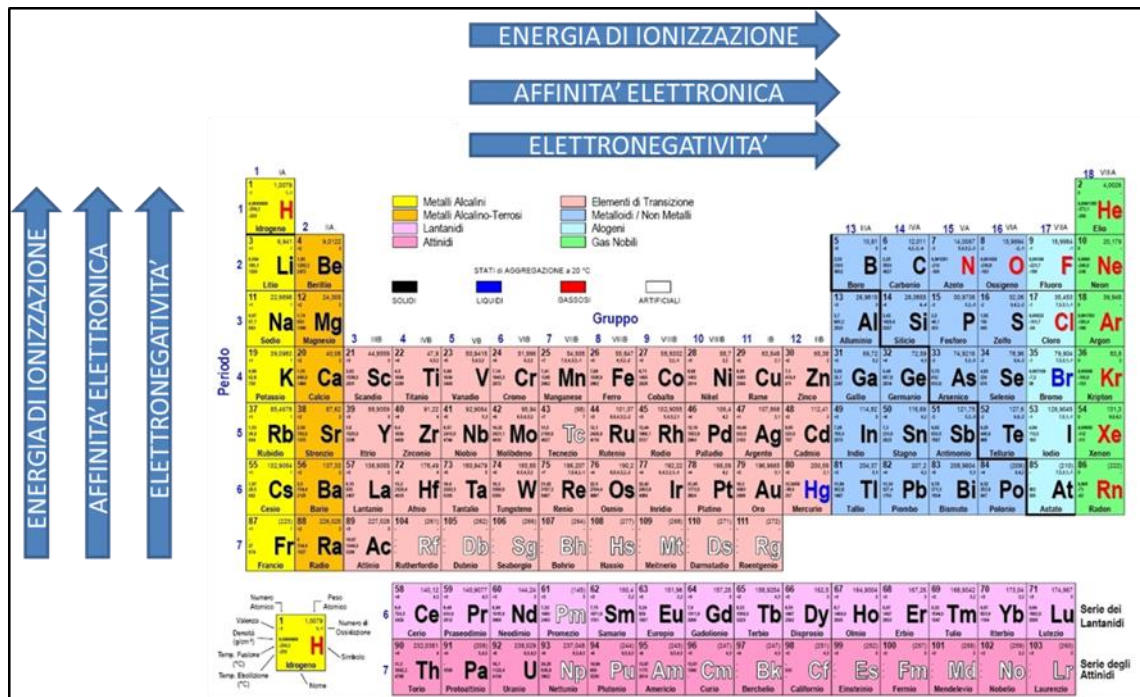


Figura 2-4: Tavola periodica degli elementi

## 2.4. Le sorgenti a bombardamento di elettroni

Esistono vari tipi di sorgenti a bombardamento di elettroni, anche dette a scarica ad arco:

- La **sorgente Nielsen**, in cui il catodo è un filamento di materiale metallico (W o Ta) all'interno di un anodo cilindrico. Gli elettroni emessi sono confinati da un campo magnetico. I componenti della sorgente possono essere realizzati in Acciaio ( $T_{max}=1000^{\circ}C$ ) oppure in Grafite per temperature maggiori. Tale tipologia di sorgente lavora a basse pressioni e presenta elevate efficienze.;
- La **sorgente a catodo cavo**, che ha una particolare configurazione dell'estrazione del catodo, composto da due parti in Ta con interposto un filo di W o Ta; grazie a questa configurazione può operare a temperature molto elevate ( $1700^{\circ}C$ ). Una bobina magnetica viene utilizzata per compensare il campo magnetico generato dal filamento di cui è composto il catodo. Con questa sorgente è possibile generare una quantità di ioni con carica doppia maggiore del 10% rispetto agli ioni a singola carica. La tensione di vapore all'interno della sorgente è di circa 1Pa ma, siccome la carica di gas è piccola, all'esterno si possono raggiungere livelli di vuoto importanti ( $10^{-4}$  Pa);
- La **sorgente Bernas-Nier**, la cui peculiarità è un differente tipo di estrazione per gli ioni, che passano attraverso un'apertura che può essere in direzione ortogonale alla direzione del catodo. Gli elettroni emessi vengono riflessi da un'apposita piastra e contenuti all'interno dell'anodo grazie ad un campo magnetico. Tale disposizione consente di ottenere elevate efficienze di ionizzazione. Queste sorgenti possono essere realizzate in Rame, Tantalio, Molibdeno, Acciaio o Grafite in funzione del tipo di ioni da produrre e dalle temperature che si raggiungono. Il flusso di gas è basso per cui la sorgente riesce ad operare a pressioni inferiori ai  $10^{-4}$  Pa.

- La **sorgente FEBIAD**, che è una configurazione ottimizzata della sorgente Nielsen che verrà descritta in seguito;
- La **sorgente Wilson**, in cui gli elettroni emessi per effetto termoionico da un filamento sono accelerati radialmente mentre un campo magnetico in direzione assiale li fa roteare. Le estremità dell'anodo sono chiuse da due dischi allo stesso potenziale del catodo. Gli ioni vengono estratti assialmente da un'area vicina al catodo. Il materiale a bassa pressione di vapore viene introdotto in un contenitore riscaldato dallo stesso catodo; la sua temperatura è controllata dalla posizione in cui viene inserito. La pressione interna alla sorgente raggiunge i 10 Pa, mentre all'interno della sorgente si arriva a  $10^{-4}$  Pa. I materiali utilizzati per costruire la sorgente possono essere Acciaio, Molibdeno, Tantalio o Grafite in funzione del materiale da ionizzare e della temperatura da raggiungere;
- La **sorgente Wilbur-Wei** in cui il catodo costituito da un filamento produce gli elettroni che vengono accelerati radialmente verso l'anodo. Tale sorgente riesce a ionizzare elementi metallici, i quali vengono inseriti in un'apposita vaschetta che viene riscaldata per farli evaporare. La scarica si forma in un'area compresa tra il catodo, l'anodo e la vaschetta e viene mantenuta insufflando un gas di supporto (Argon) finché l'evaporazione non è sufficiente a formare un plasma autonomamente. I componenti sono inseriti in una camera in Grafite che viene mantenuta ad elevata temperatura per evitare la condensazione del metallo. La semplicità costruttiva la rende poco costosa da produrre e facilmente smontabile per effettuare la manutenzione periodica.

Il principio di funzionamento di questa tipologia di sorgenti si basa sull'*emissione termoionica* di elettroni da parte del catodo. Gli elettroni vengono accelerati da un secondo elemento, detto anodo, se qualcuno di questi "elettroni primari" colpisce degli atomi di gas, con sufficiente energia, avviene una ionizzazione. Gli "elettroni secondari" prodotti da queste collisioni possono a loro volta essere accelerati verso l'anodo con energia che sarà funzione della distribuzione di potenziale e del punto iniziale da cui parte l'elettrone. La distribuzione del potenziale dipende dalla densità di elettroni e dalla pressione del gas.

Se la pressione del gas è bassa, il potenziale elettrostatico ha andamento lineare nello spazio fra catodo ed anodo (senza considerare il flusso elettrico). Se la pressione diventa abbastanza elevata, si verifica la formazione di una scarica provocata dal gran numero di elettroni secondari formati dopo la ionizzazione, portando a un plasma con un potenziale costante che però ha una caduta che può essere o nella zona di anodo o di catodo.

Se si aumenta il potenziale di anodo, gli elettroni, sia primari che secondari, acquisiscono più energia e perciò aumenta il numero degli atomi di gas ionizzati. Ciò che conta valutare perciò è la differenza fra potenziale di ionizzazione del gas e l'energia "di soglia" degli elettroni secondari che permette la ionizzazione, per capire quanti atomi vengono effettivamente ionizzati. Nelle configurazioni a bassa pressione, la differenza fra energia "di soglia" (elettroni secondari) e "di ionizzazione" (atomi del gas) può essere ridotta attraverso l'uso di una "griglia" posta vicino al catodo, che ha la stessa funzione dell'anodo (cioè è posta ad un certo potenziale per poter accelerare gli elettroni), ed uno spazio di deriva prima dell'apertura di estrazione (che prima era l'anodo stesso) che può essere ad un potenziale vicino od uguale a quello della griglia. In questo modo si ottiene un'energia degli elettroni di ionizzazione uniforme, ed una differenza fra energia di "soglia" e potenziale di ionizzazione bassa; questa configurazione è adottata nella sorgente tipo FEBIAD (Figura 2-5). L'applicazione della griglia permette di aumentare la *cross-section*, ovvero la sezione utile per la ionizzazione.[14]

Naturalmente ogni configurazione elencata sopra ha le sue caratteristiche, i suoi pregi e difetti, e ciò è dovuto alle diverse geometrie che permettono o meno l'uso di un certo tipo di materiali e il raggiungimento di una certa temperatura di lavoro. Anche il campo di applicazione di ognuna è diverso, ed è stabilito in base all'esperienza di utilizzo che hanno maturato i vari laboratori in giro per il mondo. Per approfondimenti riguardo le tipologie di sorgenti a scarica si rimanda a [1] o a [5]. In particolare, la sorgente di tipo FEBIAD, è una versione che è già stata analizzata e sviluppata presso l'impianto ISOLDE al CERN [5], che permette la formazione a partire da atomi di vari elementi (come gas nobili, metalli o elementi refrattari) di ioni  $1+$  che possono in seguito essere estratti e trattati in vari modi e con vari obiettivi (come già accennato nel Capitolo 1). FEBIAD è un acronimo che significa "*Forced Electron Beam Induced Arc Discharge*".



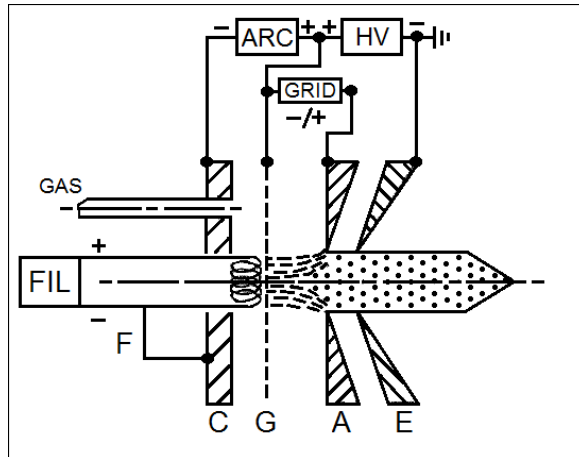


Figura 2-5:schema di una sorgente FEBIAD. Sono messi in evidenza il catodo, (C) che emette elettroni attraverso il filamento riscaldato per effetto Joule dal generatore FIL, La griglia (G) e l'anodo (A) tenuti a potenziale in modo da generare il campo per accelerare gli elettroni e l'elettrodo estrattore (E) [1].

Le sue caratteristiche permettono di avere una buona efficienza tra le sorgenti al plasma e l'essere in grado di ionizzare tutti gli elementi presenti sulla tavola periodica la rende uno strumento versatile: si può comprendere quindi come l'ottimizzazione di questo oggetto sia fondamentale per produrre radioisotopi con buona efficienza, visto che il breve tempo di decadenza di qualcuno di questi costringe ad adottare strumenti le cui prestazioni siano molto elevate.

Come già spiegato nel Capitolo 1, per la produzione di radioisotopi nel progetto SPES sono utilizzate varie sorgenti di ionizzazione. Se si vuole ionizzare gli atomi appartenenti ad una gran parte degli elementi presenti sulla tavola periodica (in particolare i gas nobili) con una buona efficienza, la sorgente FEBIAD rappresenta quindi una buona soluzione. La sorgente usata per SPES è basata sulla configurazione MK5 sviluppata presso l'impianto ISOLDE al CERN (vedi [5] e [6]) ed è pensata per la produzione di ioni  $1+$ . Essa appartiene alla famiglia delle sorgenti tipo MK formata dalle sorgenti al plasma MK3, MK7 e la stessa MK5. Quest'ultima rappresenta la tipologia di sorgente più versatile. Nella Figura 2-6 è mostrata una sezione del modello tridimensionale della sorgente MK5, dalla quale deriva il modello utilizzato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

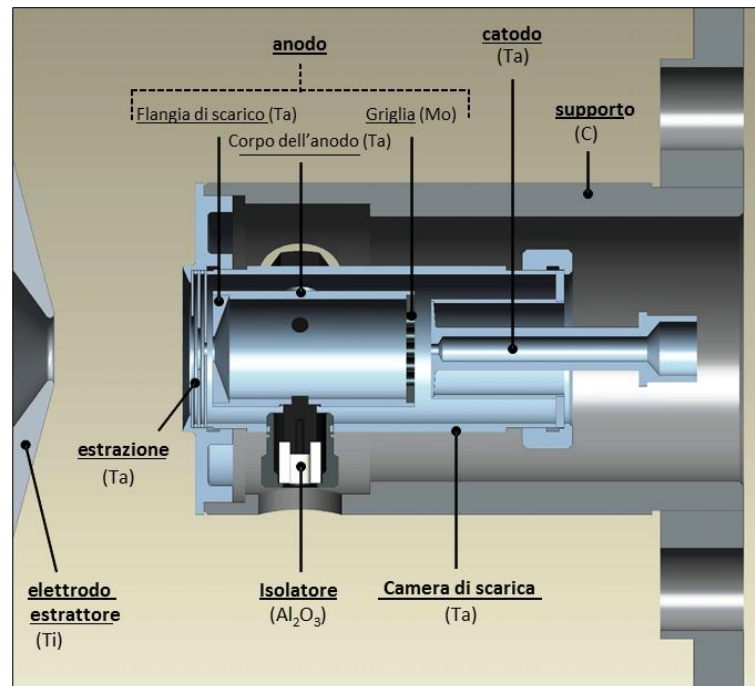
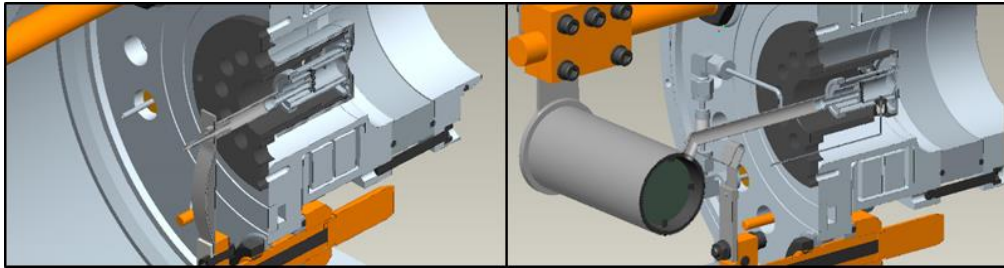


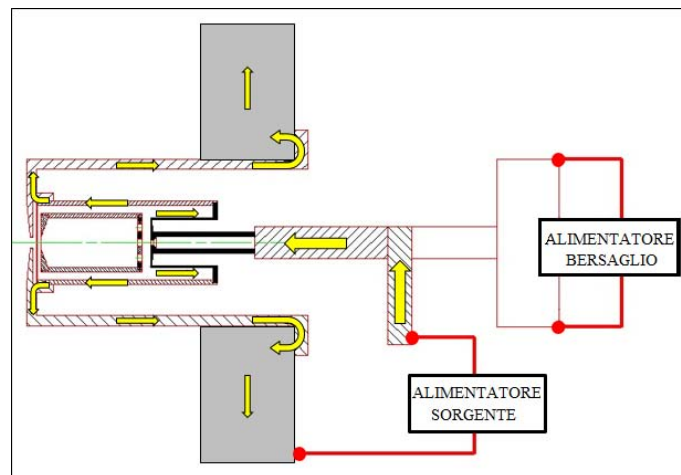
Figura 2-6: Modello 3D in sezione lungo un piano meridiano della Sorgente di ionizzazione al Plasma sviluppata da ISOLDE.

Nel progetto SPES la sorgente sarà accoppiata ad un bersaglio, dove avviene la fissione del Carburo di Uranio e si producono gli isotopi radioattivi; le particelle passano alla sorgente attraverso un tubo sottile di Tantalio detto “linea di trasferimento” (*transfer line*), che si collega al catodo attraverso un accoppiamento di forma. Per eseguire le prove di efficienza il bersaglio non è necessario e quindi non viene montato per i test, in questa configurazione viene usata una linea di trasferimento più corta che si collega ad un supporto che consente il trasporto della corrente riscaldante (Figura 2-7).



**Figura 2-7: modelli 3D delle configurazioni di montaggio della Sorgente al Plasma. A sinistra la soluzione senza bersaglio per le prove di efficienza, a destra quella con bersaglio + sorgente di ionizzazione.**

La corrente riscaldante arriva attraverso un puntone di Rame presente nella camera, a cui viene collegato un morsetto dello stesso materiale che sostiene una serie di fogli in Tantalio che sono posti a contatto con la linea di trasferimento. La corrente quindi fluisce attraverso il tubo, arriva al catodo, attraversa la faccia frontale riscaldandola per effetto Joule a temperature attorno ai  $2200^{\circ}\text{C}$ , passa alla camera di scarica, quindi alla flangia di chiusura e alla camera di supporto; la flangia di supporto è collegata al piatto della camera che viene tenuto a massa (0 V). Lo schema del percorso della corrente di linea è illustrato in Figura 2-8.



**Figura 2-8: percorso della corrente nella sorgente di ionizzazione al plasma. Nello schema è mostrata la configurazione nel caso di un accoppiamento bersaglio – sorgente di ionizzazione.**

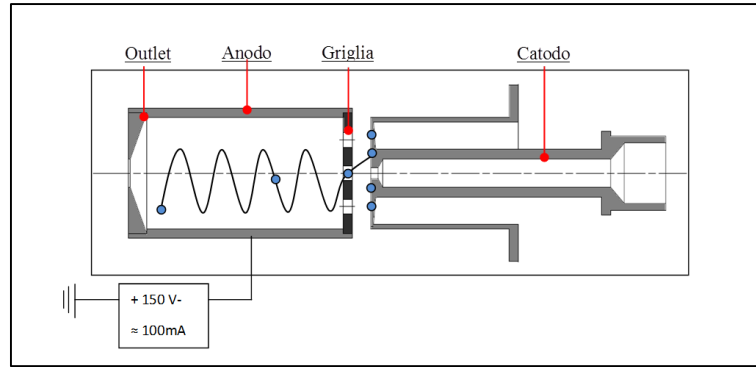


Figura 2-9: schema in sezione di catodo ed anodo affacciati in cui è mostrato il potenziale dell'anodo e la traiettoria elicoidale di un elettrone causata dal campo magnetico [2].

Dal catodo quindi si separano degli elettroni per effetto termoionico i quali, avendo carica negativa, vengono accelerati verso l'anodo che è tenuto a potenziale costante di  $150\text{ V}$ , attraverso un filo conduttore che passa per uno dei fori dei puntalini di sostegno: è importante quindi assicurarsi dell'isolamento elettrico fra anodo e resto del sistema per garantire un corretto funzionamento della sorgente. Gli elettroni possono poi entrare nella camera di anodo attraverso i fori presenti sulla griglia ed impattare quindi sugli atomi di gas da ionizzare.

Il gas che deve essere ionizzato percorre la linea di trasferimento, attraversa il canale ricavato all'interno del catodo ed entra nella camera di anodo dove, una volta ionizzato, diventa plasma. In questa condizione esso può essere manipolato attraverso campi elettromagnetici e pertanto viene estratto da un elettrodo (detto "elettrodo estrattore"), posto ad una differenza di potenziale di  $25000\text{ V}$  rispetto al piatto della camera da vuoto. Il fascio poi può essere gestito grazie a deflettori e triplette che sfruttano l'azione di campi elettrostatici per deviare e focalizzare il fascio.

Nel caso sia presente il bersaglio (*target*), le particelle da ionizzare sono estratte grazie alle alte temperature a cui è sottoposto il sistema, mentre nel caso di prove con configurazione senza bersaglio il gas viene insufflato tramite un tubo di Tantalio che si innesta in una cavità presente su un apposito tappo infilato nella linea di trasferimento. Si capisce che se nel loro transito, le particelle da ionizzare incontrassero delle zone fredde, sarebbero da queste trattenute causando una caduta dell'efficienza in quanto non verrebbero estratte. Un altro parametro da controllare è che il sistema operi ad buon livello di vuoto, infatti se non si opera in un ambiente a bassa pressione i contaminanti presenti nell'atmosfera potrebbero sia disturbare il flusso di elettroni, che essere ionizzati al posto delle particelle che interessano, causando elevati cali dell'efficienza. In quest'ottica la progettazione della camera da vuoto con sistemi di tenuta opportuni per permettere il raggiungimento di livelli di vuoto attorno ai  $10^{-6}\text{ mbar}$  diventa di fondamentale importanza (nella camera di anodo si hanno pressioni nell'ordine di  $10^{-5}\div 10^{-2}\text{ mbar}$ ).

## 2.5. Controllo della corrente elettronica

Il principio di funzionamento delle sorgenti FEBIAD si basa sull'*emissione termoionica* di elettroni da parte del catodo. Fra tutte le tipologie di catodi, un primo sottoinsieme può essere indicato come "catodi termoionici". Ne esistono di varie forme e di diversi materiali. La tipologia di catodi più semplice e comune è quella dei "catodi metallici", in cui un componente di metallo con alta temperatura di fusione, che può essere disposto secondo varie geometrie, viene scaldato per mezzo di una corrente per effetto Joule (Per approfondimenti su altre tipologie di catodi si rimanda a [1]). Essendo il componente che produce gli elettroni primari responsabili della ionizzazione, si capisce che esso gioca un ruolo fondamentale per il buon funzionamento di una sorgente di ionizzazione che ne preveda l'utilizzo poiché incide in modo marcato sull'efficienza di ionizzazione.

Il principio di funzionamento di questi oggetti si basa sull'*effetto termoionico*, che può essere spiegato come l'emissione di una corrente elettronica da una superficie metallica la cui temperatura sia maggiore di un certo potenziale di soglia. La massima densità di corrente che può emettere una superficie ad una certa temperatura è data dalla densità di corrente in saturazione, chiamata  $j_{eS}$ , e definita dalla *legge di Richardson*:

$$j_{eS} = AbT^2 \exp\left(-\frac{e\Phi}{kT}\right) \frac{A}{\text{cm}^2} \quad (2.22)$$

dove  $\Phi$  è la funzione di lavoro in Volt,  $T$  è la temperatura assoluta della superficie in K,  $A$  è una costante universale del valore di  $120.4 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ,  $b$  è un fattore relativo al materiale. Solitamente si usa riportare assieme  $A$  e  $b$  in un'unica costante; i valori dei parametri per i materiali più usati per i catodi sono riportati in Tabella 2-2.

La legge di Richardson è particolarmente utile per lo studio di un catodo di tipo termoionico, poiché permette di ricavare il numero degli elettroni emessi dal catodo ad una certa temperatura, e poiché questi elettroni saranno poi accelerati per diventare elettroni primari per permettere la ionizzazione per impatto; si comprende come  $j_{es}$  sia un parametro fondamentale da monitorare per valutare l'efficienza della sorgente.

Come si può dedurre dalla formulazione appena descritta, la crescita della temperatura ha un grande effetto sull'aumento della corrente di saturazione, in quanto si può verificare che un aumento della prima del 10% porta a una  $j_{es}$  dieci volte maggiore, mentre se l'incremento è del 20%, si ha una corrente 100 volte più grande.

**Tabella 2-2: valori della funzione di lavoro  $\Phi$  e del fattore  $A*b$  da inserire nella legge di Richardson per materiali di uso comune per la realizzazione di catodi termoionici [1].**

MATERIALE	$\Phi$ [V]	$A*b$ [ $\text{A/cm}^2\text{K}^2$ ]
Molibdeno	4.15	55
Nickel	4.61	30
Tantalio	4.12	60
Tungsteno	4.54	60
Bario	2.11	60
Cesio	1.81	160
Iridio	5.40	170
Platino	5.32	32
Renio	4.85	100
Torio	3.38	70
Bario su W	1.56	1.5
Cesio su W	1.36	3.2
Torio su W	2.63	3.0
Ossido di Torio	2.54	3.0
BaO + SrO	0.95	$\sim 10^{-2}$
Ossido di Cesio	0.75	$\sim 10^{-2}$
Carburo di Tantalio	3.14	0.3
LaB <sub>6</sub>	2.70	29

Tuttavia la produzione di corrente elettronica è limitata fisicamente dalla distanza tra anodo e catodo ( $a$ ). Questo limite è definito dalla **legge di Child-Langmuir** che esprime la massima corrente di elettroni che può essere trasmessa fra due elettrodi piani, considerati di estensione infinita, distanti tra loro  $a$ , nel vuoto:

$$J = \chi \frac{V_a^{\frac{3}{2}}}{a^2} \quad (2.23)$$

dove  $\chi$  è una costante che dipende dal tipo di particella che forma la corrente, e per gli elettroni si ha  $\chi = 2.334 * 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$  e  $V_a$  è la differenza di potenziale fra i due elettrodi. Nel nostro caso possiamo assumere come la faccia del catodo frontale e la griglia come i due piani infiniti. La differenza di potenziale fra i due sarà di 150 V. Per quanto riguarda la distanza  $a$ , questa viene regolata durante il montaggio (vedi l'Appendice A per

una spiegazione in dettaglio), e dalle esperienze fra i vari impianti tipo ISOL nel mondo, dev'essere compresa tra  $0.9$  e  $1.4$  mm, anche se i valori ottimi sono fra  $1.0$  e  $1.2$  mm. Perciò in pratica quello che ci dice questa legge è che anche continuando ad alzare la corrente che attraversa il catodo e quindi la temperatura, avrò comunque un limite sul numero di elettroni che potrò inviare all'anodo e che serviranno al processo di ionizzazione. Perciò sarà possibile determinare una temperatura di lavoro in cui si raggiungono le condizioni di saturazione. Inoltre si deve tenere presente che non è possibile aumentare la corrente di elettronica alzando la temperatura fino a che sia prossima al punto di fusione poiché l'evaporazione del materiale causerebbe una riduzione della durata del catodo (si ricorda che si opera in condizioni di alto vuoto, per cui vi sono effetti di sublimazione di materiale a temperature più basse di quelle di fusione). La vita del componente è comunque limitata a causa di altri fenomeni, come ad esempio lo "sputtering" (o polverizzazione catodica) che indica il distacco di atomi dalla superficie a causa di collisioni con delle particelle come gli ioni che si formano prima dell'ingresso nell'anodo (e che vengono quindi accelerati verso il catodo); inoltre i metalli ad alta temperatura sono soggetti alla corrosione da parte di gas contaminanti, primo fra tutti l'ossigeno.

## 2.6. Parametri di lavoro: Efficienza ed Emittanza

Nel corso dei precedenti paragrafi si è parlato più volte delle prestazioni della sorgente di ionizzazione utilizzando il termine efficienza, senza però definirlo in dettaglio.

Chiamiamo **efficienza di ionizzazione** (indicata con  $\eta_i$ ) della sorgente FEBIAD il rapporto tra il numero di ioni di un certo elemento che è possibile estrarre dalla sorgente stessa e il numero di atomi dello stesso elemento immessi nel sistema. In formule:

$$\eta_i = \frac{a.u.}{a.i.} \quad (2.24)$$

dove è stato definito  $a.u.$  il numero di particelle in uscita che si riescono ad estrarre (quindi si parla di ioni e non di atomi) ed  $a.i.$  il numero di particelle in ingresso (ovvero il numero di atomi che entrano nella sorgente attraverso il sistema di connessione del gas). Quindi l'efficienza è una sorta di rendimento, e si capisce che più il suo valore è alto, maggiore è l'efficacia con cui si riescono ad estrarre ioni radioattivi, e maggiore sono le possibilità di poter ionizzare anche elementi critici come isotopi con tempo di decadenza molto breve. Il numero di atomi all'ingresso della sorgente ( $a.i.$ ) è una quantità difficilmente misurabile; per conoscere tale valore si fa ricorso a dei filtri, detti *leak*, che consentono il passaggio di una quantità calibrata di gas.

L'efficienza non è l'unico parametro da considerare se si vuole ottenere una caratterizzazione completa della Sorgente di Ionizzazione: anche l'emittanza è un fattore che incide in modo marcato sulla qualità del fascio prodotto.

Con la parola **emittanza** ci si riferisce ad una proprietà di un fascio di cariche elettriche, come quello estratto dalla sorgente di ionizzazione al plasma. Rappresenta la misura della sua dimensione ed espansione nello spazio delle fasi, con coordinate posizione e quantità di moto [10].

In generale, se l'emittanza ha un valore basso, significa che le particelle avranno una coordinata simile nello spazio (quindi il fascio sarà compresso in un'area piccola se consideriamo la sua dispersione in un piano perpendicolare alla direzione principale) e quantità di moto simile fra loro, perciò procederanno tutte in una direzione comune (angolo di tra velocità longitudinale e trasversale piccolo). Pertanto una piccola emittanza fornisce un fascio migliore da gestire. L'unità di misura dell'emittanza può essere espressa sia in [ $\pi$  mm mrad] che in [mm mrad] purché venga specificato come si sia ottenuto il valore presentato. L'uso dell'emittanza r.m.s. riduce il rischio di creare confusione con le unità di misura poiché la formula analitica è univocamente definita.

Per rappresentare lo sviluppo del fascio di ioni occorre una forma semplice; siccome il fascio ha distribuzione di tipo gaussiano in entrambe le coordinate dello spazio delle fasi, e la rappresentazione di tale distribuzione in un sistema bidimensionale è composta da ellissi, un'ellisse è il modo più ovvio di descrivere l'emittanza. Si costruisce perciò un grafico, come quello in Figura 2-10, dove si riportano in ascissa il valore della posizione della singola particella e in ordinata il suo angolo di inclinazione.

Questo parametro dipende dalla geometria della sorgente, dalla geometria dell'elettrodo estrattore e dalle condizioni del plasma.

Bisogna sempre tener presente che per la scelta dell'oggetto che poi sarà montato in linea per il progetto SPES, il valore di questo parametro diventa cruciale in quanto incide sulla possibilità della gestione e del controllo del fascio di ioni radioattivi.

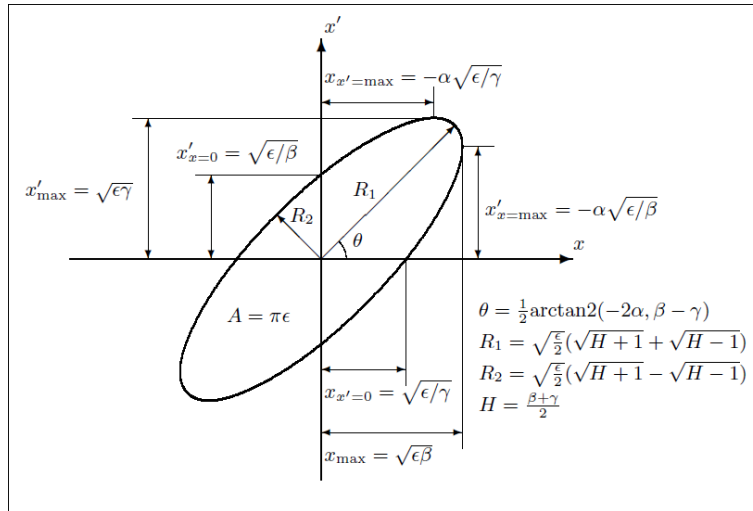


Figura 2-10: rappresentazione dell'ellisse dell'emittanza; i fattori  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono noti come parametri di Twiss e definiscono l'orientamento e la scala,  $\epsilon$  definisce l'area dell'ellisse di visa per pi-greco,  $R_1$  ed  $R_2$  sono i raggi [12].

## 2.7. Moto di particelle cariche

Il moto di particella singola ha come scopo lo studio della traiettoria di particelle singole in campi di forze elettromagnetiche imposte dall'esterno, eventualmente variabili nello spazio e/o nel tempo.

Questa descrizione non è in generale applicabile allo studio della dinamica dei plasmi, perché non tiene conto né delle interazioni tra particelle, né delle modifiche che i campi esterni subiscono a causa della presenza e del moto delle cariche. In situazioni in cui i campi elettromagnetici esterni siano dominanti, questo modello permette lo studio di vari problemi di fisica dei plasmi. In un plasma non sottoposto ad alcun campo di forze, il moto spaziale delle particelle ha tre gradi di libertà con velocità media (come descritto nel paragrafo 2.2.1). Se lo stesso plasma è sottoposto ad un campo magnetico costante ed uniforme (come quello prodotto da un magnete) il moto delle particelle è sottoposto alla *forza di Lorentz* che "confina" il moto ad eliche concatenate ad una linea di forza, esprimibile con la relazione vettoriale:

$$m\vec{a} = \vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.25)$$

Se le orbite hanno un raggio piccolo rispetto alle dimensioni del plasma e le linee di forza del campo si richiudono su se stesse, come in una geometria toroidale, in linea di principio le particelle singole dovrebbero rimanere "intrappolate" dal campo in una porzione limitata dello spazio, realizzando il fenomeno del "confinamento magnetico".

La densità di un plasma influenza pesantemente il suo comportamento fisico. Essa dipende direttamente dalla tecnologia di ionizzazione utilizzata e di conseguenza dalle proprietà degli elettroni primari; particolare incidenza viene data dalla densità di corrente elettronica e dalla sua dinamica. Queste due proprietà sono direttamente collegate all'emissione termoionica del catodo e alle forze elettromagnetiche esterne [5].

A seconda della densità delle particelle cariche, un plasma si comporta come un fluido, quindi con effetti collettivi dominanti, o come insieme di particelle singole. In plasmi densi, le forze elettriche tra particelle le fanno accoppiare tra loro e al campo elettromagnetico, che influenza il loro moto. In plasma rarefatti le particelle cariche non interagiscono tra loro e il loro moto non costituisce una corrente ionica sufficiente ad interagire con il campo elettromagnetico; sotto queste condizioni il moto delle particelle può essere trattato indipendentemente le une dalle altre, risolvendo l'equazione di Lorentz per campo elettrico e magnetico dati, procedura nota come *Metodo di singola particella*. In plasmi magnetizzati sotto l'influenza di un campo magnetico statico (come in questo caso) o lentamente variabile, il metodo di particella singola è applicabile solo se il campo magnetico applicato è superiore a quello prodotto dalla corrente elettrica prodotta dal moto delle particelle. Nelle sorgenti tipo FEBIAD si formano plasmi a bassa densità [5] pertanto in tali condizioni, un metodo di analisi agli elementi finiti utilizzando il metodo a singola particella può rivelarsi utile per determinare la traiettoria del fascio di ioni estratto dalle sorgenti di ionizzazione. Il metodo agli elementi finiti può inoltre risultare efficace per fornire indicazioni per l'ottimizzazione di alcuni componenti come il sistema di estrazione e l'elettrodo estrattore. Nei Laboratori Nazionali di Legnaro si fa ricorso al software Ansys® (vers.16.1) che possiede al suo interno un solutore per le analisi accoppiate elettromagnetiche; inoltre esso

incorpora uno strumento di *post processing* (chiamato *Particle Tracing*®) in grado di tracciare la traiettoria completa di particelle cariche dotate di una certa massa (questo metodo di analisi è detto anche *Ray Tracing*). Nel metodo *Ray Tracing* viene effettuata un'integrazione numerica dell'equazione di Poisson:

$$\nabla^2 V = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.26)$$

dove il termine legato alla carica spaziale, può essere calcolato attraverso l'equazione di Lorentz:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q * (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.27)$$

e la legge di conservazione della carica elettrica:

$$\text{div} \vec{j} = 0 \quad (2.28)$$

In queste equazioni  $V$  è il potenziale elettrico,  $\vec{E}$  è il campo elettrico,  $\vec{B}$  è l'induzione magnetica,  $\vec{v}$  è la velocità delle particelle,  $\rho$  è la densità di carica,  $\varepsilon$  è la permittività nel mezzo,  $\vec{p}$  è la quantità di moto e  $t$  è il tempo. Chiaramente le equazioni sono tra loro accoppiate e devono essere risolte impiegando un procedimento iterativo.

## 2.8. Conclusioni

La descrizione dello stato di Plasma, assieme alla comprensione dei fenomeni che ne regolano il comportamento e dei parametri che ne descrivono lo stato, ci dà uno strumento per poter approcciare allo studio della sorgente di ionizzazione al plasma con la consapevolezza degli effetti che le scelte di progetto che saranno prese avranno sulla sorgente in esame. Inoltre la descrizione dei meccanismi di ionizzazione per impatto di elettroni ci permette di capire in che modo sia possibile un miglioramento del progetto della sorgente al plasma in uso presso i Laboratori di Legnaro. Di particolare importanza risultano le formulazioni per il calcolo di efficienza ed emittanza, attraverso le quali è possibile valutare la bontà delle soluzioni progettuali adottate.

## Bibliografia Capitolo 2

- [1]. Bernhard Wolf, Handbook of Ion Source, 1995, CRC Press.
- [2]. Laura Cavaletto, Studio dei meccanismi di ionizzazione e della formazione del plasma in una sorgente per il progetto SPES dei Laboratori INFN di Legnaro, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2012/2013.
- [3]. Francis F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 1984, KA/PP.
- [4]. L. Pesescu, R. Catherall, J. Lettry, T. Stora, Numerical Simulation of Space Charge Effects and Plasma Dynamics for FEBIAD Ion Source, Elsevier, 2008.
- [5]. L. Pesescu, T. Stora, J. Lettry, G. Catadani, R. Catherall, Arc Discharge Ion Source Development at CERN ISOLDE, U.P.B. Sci. Bull, Series A, 2010.
- [6]. L. Pesescu, R. Catherall, J. Lettry, T. Stora, Development of High efficiency Versatile Arc Discharge Ion Source at CERN ISOLDE, AIP Review of Science Instruments, 2010.
- [7]. M. Manzolaro, A. Andrighetto, G. Meneghetti, A. Monetti, D. Scarpa, M. Rossignoli, J. Vasquez, S. Corradetti, M. Calderolla, G. Prete, Characterization of the FEBIAD Ion Source for the SPES Facility, 2013.
- [8]. A. Monetti, Studio, Simulazione e Test di un Apparato per la Produzione di Fasci Radioattivi, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2011/2012.
- [9]. A. T. Forrester, Large Ion Beam – Fundamentals of Generation and Propagation, Wiley Interscience Publication, 1988.
- [10]. M. Manzolaro, Study, Design and Test of the Target – Ion Source System for the INFN SPES Facility, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [11]. «Wikipedia,» Indirizzo: <http://wikipedia.org>.
- [12]. T. Kalvas, Beam Extraction and Transport, Department of Physics, University of Jyväskylä, 40500 Jyväskylä, Finland, 2014.
- [13]. Ian G. Brown, The Physics and Technology of Ion Sources, Wiley Interscience Publication, 1989.
- [14]. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Ion Sources, Senec, Slovakia, 29 May – 8 June 2012, edited by R. Bailey, CERN-2013-007, (CERN, Geneva, 2013)



# CAPITOLO 3: SVILUPPO MECCANICO DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA PER IL PROGETTO SPES

## 3.1. Introduzione

La sorgente di ionizzazione al plasma utilizzata per il progetto SPES risulta essere una evoluzione della sorgente FEBIAD MK5 sviluppata presso la facility ISOLDE del CERN di Ginevra; saranno perciò descritti in dettaglio tutti gli elementi costitutivi di questa sorgente per comprendere bene il motivo delle proposte che sono state esaminate per il suo sviluppo durante lo svolgimento di questo lavoro.

Verranno in seguito presentate le modifiche effettuate sulla geometria di alcuni componenti della SPES PIS (Plasma Ion Source), in particolare per quanto concerne lo sviluppo meccanico del sistema di supporto e della crociera di centraggio.

Il problema principale nella riprogettazione di una sorgente al plasma risiede nelle dilatazioni termiche causate dalle alte temperature in gioco (2000 – 2200 °C). Durante il funzionamento la faccia frontale del catodo si deforma notevolmente andando a ridurre la distanza (*gap*) che la separa dalla griglia di anodo. Tale distanza influenza il funzionamento della sorgente in quanto una deformazione eccessiva può portare a contatto i due componenti causando un guasto della sorgente.

Un altro problema riscontrato è stato l'allineamento tra i vari componenti della PIS e la linea di trasferimento collegata al catodo. Le modifiche sono state svolte cercando di rispettare il campo di temperatura della sorgente al plasma con l'obiettivo principale di ridurre al minimo i contaminanti. La produzione di fasci ad elevata purezza è infatti di essenziale importanza per il progetto SPES.

E' importante sottolineare che la sorgente funziona ad alta efficienza se la densità è bassa, quindi se ci sono pochi contaminanti nella camera di plasma, quindi se il fascio è puro.

## 3.2. Sorgente al plasma MK5 utilizzata ad ISOLDE al CERN

La sorgente fino ad ora usata per SPES si basava sulla configurazione MK5 sviluppata presso l'impianto ISOLDE al CERN (vedi [3] e [4]) ed è pensata per la produzione di ioni 1+. Essa appartiene alla famiglia delle sorgenti tipo MK formata dalle sorgenti al plasma MK3, MK7 e la stessa MK5. Quest'ultima rappresenta la tipologia di sorgente più versatile. Si descrivono in seguito i componenti costituenti tale tipologia di sorgente.

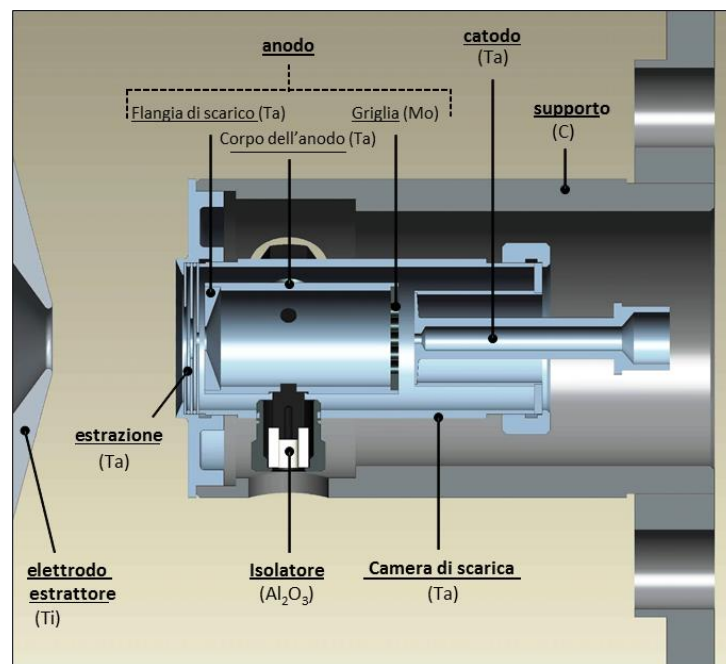


Figura 3-1: Modello 3D in sezione lungo un piano meridiano della Sorgente di ionizzazione al Plasma sviluppata da ISOLDE.

### 3.2.1. Il catodo "ISOLDE"

Il componente principale di questo oggetto è il catodo. Nei Laboratori di Legnaro si fa uso di catodi metallici in Tantalio, e la scelta di questo materiale è dovuta a più motivi: è un materiale con alto punto di fusione (3017°C), perciò ideale per le applicazioni in alta temperatura che abbiamo descritto, inoltre è un buon conduttore elettrico. Queste proprietà lo rendono ideale per l'impiego in un catodo, visto che tale componente deve essere scaldato per effetto Joule, e quindi deve essere attraversato da una corrente, e stare a lungo ad elevate temperature in cui sia possibile il verificarsi dell'effetto termoionico. Inoltre le proprietà meccaniche (è molto duttile) lo rendono lavorabile alle macchine utensili, anche se va ricordato che la grande capacità di plasticizzare rende indispensabile un'attenzione particolare nelle lavorazioni per asportazione di truciolo; è inoltre anche saldabile, anche se bisogna porre attenzione all'ossidazione e alla contaminazione dovuta all'aria durante la saldatura. Da queste caratteristiche si capisce che tale materiale può essere trattato per la realizzazione di diverse geometrie, tra cui il catodo usato per la FEBIAD (vedi Figura 3-3). Il Tantalio, inoltre, garantisce una elevata produzione di elettroni per effetto termoionico (Figura 3-2).

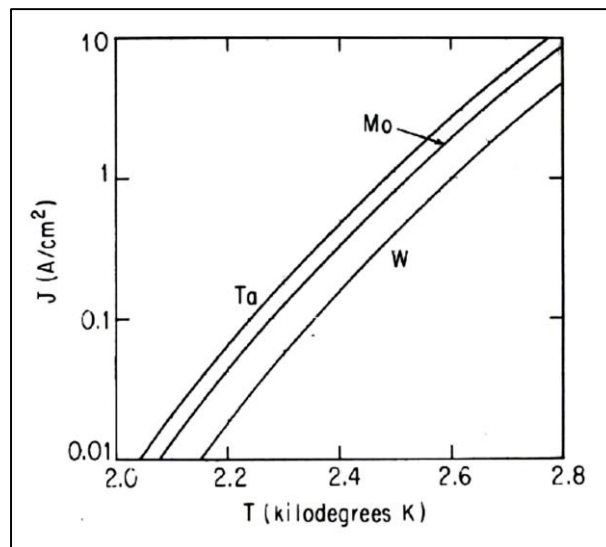


Figura 3-2: Densità di corrente elettronica prodotta da un catodo piano in funzione del materiale [5]

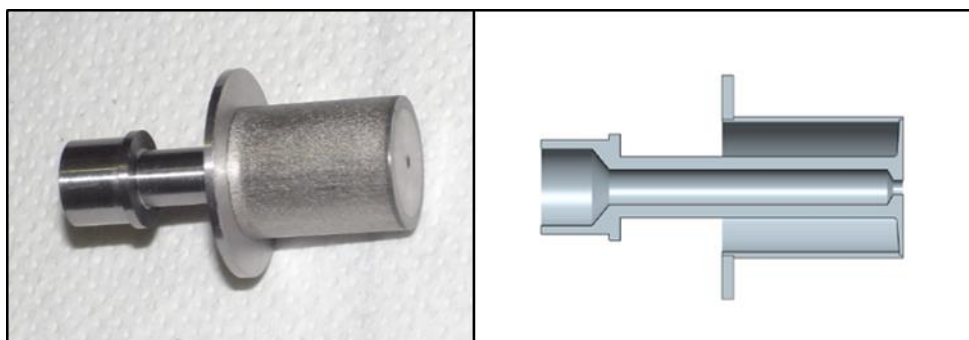


Figura 3-3: nella figura a destra è rappresentata una fotografia del catodo in uso presso i laboratori nazionali di Legnaro. Si nota la faccia piana frontale che è quella da cui vengono emessi gli elettroni. A destra, il modello CAD dello stesso elemento mostra una vista sezionata, in cui si può apprezzare il canale centrale dove passa il fascio da ionizzare.

Nel modello CAD di Figura 3-3, si nota che il catodo è formato da tre parti distinte, cioè una corona che serve per fissare il componente alla camera di scarica (descritta in seguito), un collare cilindrico che si collega alla corona e un corpo centrale formato da un tubicino aperto alle estremità, in cui scorre il fascio, che termina in una faccia frontale che viene posta frontalmente all'anodo. Questi tre sotto-componenti vengono uniti attraverso saldatura, che può essere di tre tipi:

- Saldatura TIG (*Tungsten Inert Gas*). La saldatura TIG garantisce la protezione del cordone di saldatura dall'ossidazione, particolarmente delicata nel caso del Tantalio.

- Saldatura Laser;
- Saldatura Electron Beam.

La scelta del metodo di saldatura comporta una diversa realizzazione del cordone di saldatura, che si può tradurre in geometrie differenti o finiture delle superfici più o meno precise.

### 3.2.2. L'Anodo

La faccia del catodo piana ortogonale all'asse è quella da cui fuoriescono gli elettroni, che vengono accelerati da una griglia (*anode grid*) verso l'anodo. Nella sorgente, l'anodo, la griglia e la flangia di scarico (detta anche *outlet*) sono uniti in un unico corpo, la camera di anodo (*anode body*) (vedi Figura 3-4), all'interno della quale avviene la formazione del plasma per mezzo della scarica elettronica. La griglia frontale viene posta allo scopo di aumentare la *cross section*, aumentando così l'efficienza di ionizzazione.

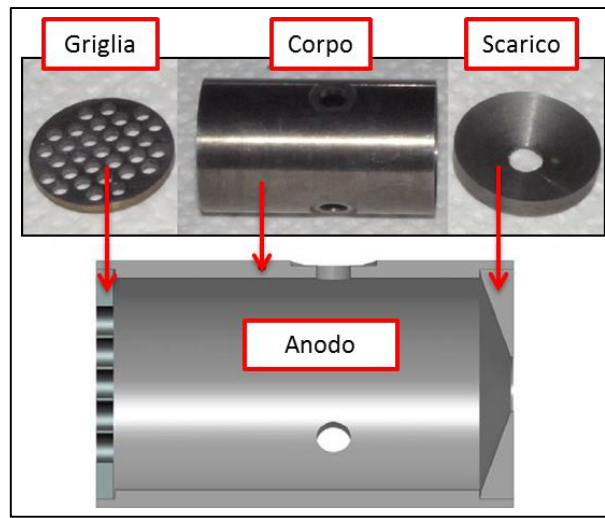


Figura 3-4: Componenti dell'anodo. I vari componenti vengono assemblati e tenuti assieme da accoppiamenti geometrici.

La griglia è stata progettata perché i fori con asse parallelo all'asse del fascio guidino gli elettroni cosicché essi assumano una traiettoria più rettilinea possibile all'interno della camera di anodo. La corrente elettronica va a riempire tutta la camera, ma la maggior parte delle particelle sarà situata nella zona centrale.

Tali componenti possono essere realizzati in vari materiali: Tantalio o Molibdeno per corpo e flangia mentre per la griglia si possono utilizzare Tantalio, Molibdeno, Tungsteno o Grafite. Il Molibdeno può essere considerato come una valida alternativa al Tantalio avendo una temperatura di fusione molto elevata (2623 °C), però è un metallo molto duro e presenta una elevata fragilità che viene peggiorata dai cicli di riscaldamento e raffreddamento. Anche il Tungsteno possiede un elevato punto di fusione (3422 °C) ma la sua lavorabilità alle macchine utensili risulta molto ridotta per via della sua elevata durezza. In ogni caso, sebbene le temperature di fusione siano molto elevate, è necessario verificare di non superare il valore relativo alla pressione di vapore date le bassissime pressioni in gioco, per evitare fenomeni di sublimazione.

### 3.2.3. Sistema di supporto dell'anodo

L'anodo dev'essere isolato elettricamente dal resto del sistema perché è necessario porlo ad un certo valore di potenziale affinché gli elettroni vengano accelerati verso la camera di anodo. Per questo si fa uso di tre isolatori in Allumina ( $Al_2O_3$  *anode support insulator*) che, assieme a tre puntali in materiale alto-fondente (*pin* realizzati in Molibdeno o Tantalio) e tre dadi di supporto (*anode support nut*) servono a sostenere ed allineare l'anodo stesso all'interno della sorgente (vedi Figura 3-5). L'allineamento dell'anodo è molto importante per garantire un corretto funzionamento della sorgente ed un'elevata efficienza di ionizzazione ed estrazione. Tale sistema risulta molto delicato e durante la fase di montaggio bisogna fare attenzione a non stringere eccessivamente i dadi, pena la rottura degli isolatori di allumina.

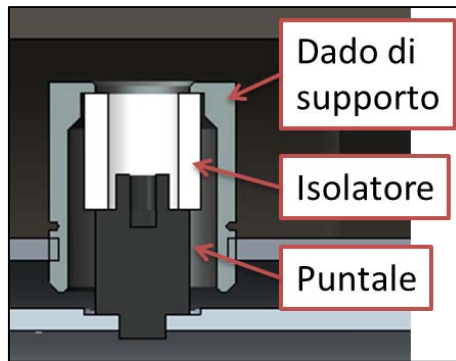


Figura 3-5: raffigurazione dei tre elementi che compongono il sistema di supporto dell'anodo. Come si vede dall'immagine, i tre vanno infilati l'uno dentro l'altro in sequenza per consentire l'isolamento elettrico.

### 3.2.4. La camera di scarica

Questo componente è un oggetto cilindrico, in Molibdeno o Tantalio, che tiene in posizione catodo e anodo. Il catodo viene fissato alla camera di scarica tramite una ghiera di tenuta (*retainer nut*) mentre l'anodo vi è fissato attraverso il sistema di supporto precedentemente descritto. Il principale compito di questo componente è di condurre la corrente che attraversa il catodo; inoltre serve anche a schermare la potenza radiante che andrebbe altrimenti dispersa verso il supporto esterno (vedi Figura 3-6).



Figura 3-6: camera di scarica con anodo montato al suo interno attraverso il sistema di supporto.

### 3.2.5. Sistema di estrazione "ISOLDE"

Il sistema di estrazione della sorgente è composto da una flangia e da una serie di dischi forati. La flangia ha lo scopo di contenere i tre dischi dell'estrazione e di permettere il passaggio di corrente. Inoltre ha anche scopo di sostenere gli elementi interni, infatti ad essa si accoppia la camera di scarica tramite un collegamento filettato. I tre dischi vengono disposti secondo un diametro crescente andando dall'interno della sorgente verso l'esterno.

Attualmente nei laboratori nazionali di Legnaro si stanno studiando altri sistemi di estrazione per garantire una miglior efficienza ed una minor emittanza del fascio.

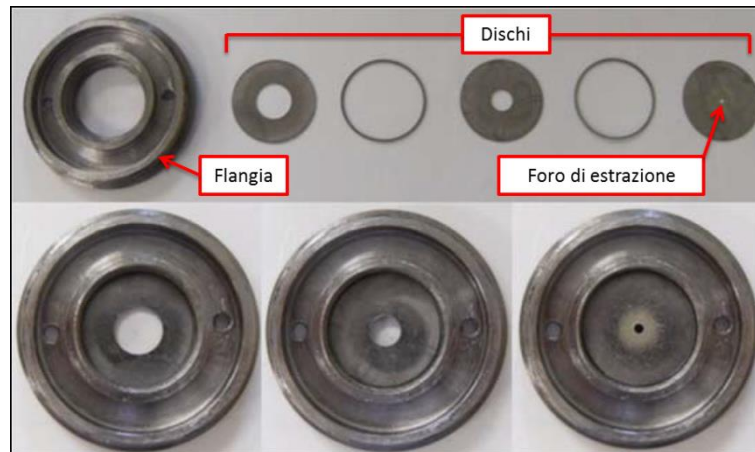


Figura 3-7: Sistema di estrazione ISOLDE

### 3.2.6. Camera e flangia di supporto

Questi due componenti fanno parte di un unico sottoinsieme che serve a collegare la sorgente al piatto della camera da vuoto. I fori sulla flangia servono a permettere la realizzazione del vuoto anche all'interno della sorgente. Questi componenti possono essere realizzati in Grafite o Acciaio Inox.

### 3.2.7. Elettromagnete

All'esterno della sorgente, al livello dell'anodo, sono montate due bobine circolari e coassiali con il fascio, costituite da due nastri di Alluminio avvolti per 232 giri e alimentati con corrente continua di 5 A. Il campo magnetico generato ha la funzione di far percorrere agli elettroni, che altrimenti avanzerebbero in linea retta, un percorso elicoidale all'interno della camera dell'anodo, aumentando quindi la probabilità che impattino su un atomo ionizzandolo.

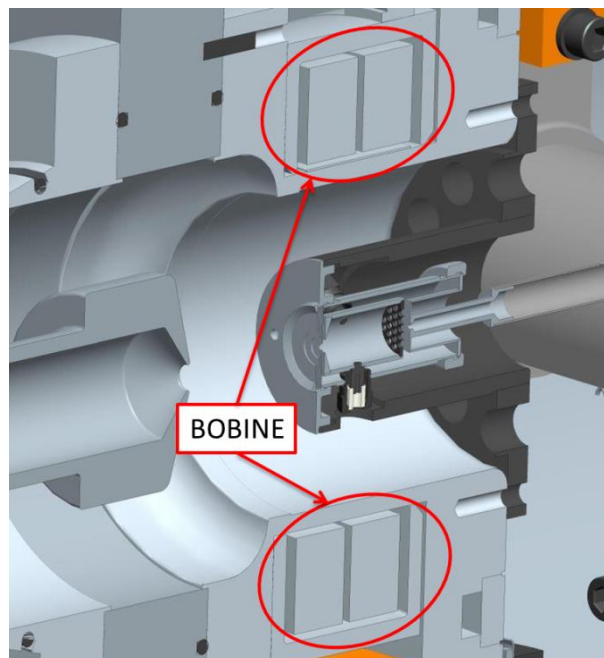


Figura 3-8: elettromagnete montato dietro il piatto della camera da vuoto, all'esterno della Sorgente [2].

Molti componenti metallici interni alla sorgente (come anodo, camera di scarica, pin dell'anodo e flangia di estrazione) possono essere realizzati in metalli ad alto punto di fusione, tipicamente Tantalio o Molibdeno, oppure Grafite che è comunque un buon conduttore elettrico, con l'accortezza che nel caso dei metalli, se è

previsto il disaccoppiamento dopo l'utilizzo, è preferibile mettere a contatto materiali diversi per evitare che i componenti aderiscano e si saldino vicendevolmente.

### 3.3. Sviluppo meccanico della sorgente di ionizzazione al plasma

Vengono qui presentate le modifiche effettuate alla sorgente di ionizzazione al plasma utilizzata nei Laboratori Nazionali di Legnaro. Un gran lavoro è stato fatto per modificare la geometria del supporto e della crociera di allineamento.

La camera di supporto è stata oggetto di discussione in passato in quanto dalle prove di scansione di massa (*mass scan*), effettuate utilizzando una sorgente al plasma con maschera in Grafite, risultavano presenti elevate quantità di contaminante avente un rapporto  $m/q=28$ ; si pensava che questo fosse dovuto al legame del Carbonio contenuto nel supporto e l'Ossigeno presente nell'aria. Si decise così di costruire flangia e camera in Acciaio Inox visto che le temperature calcolate numericamente tramite un modello agli elementi finiti risultavano inferiori al limite consentito per il suo utilizzo (circa 1000 °C). Purtroppo, dopo altri test, risultò evidente che la scelta di cambiare materiale non portò a miglioramenti poiché la massa 28 continuava a rimanere elevata; anzi si aggiunsero altri contaminanti imputabili proprio all'utilizzo dell'Acciaio: il Ferro ( $m/q=56$ ) e il Nichel ( $m/q=58-60$ ) (vedi Figura 3-9). Tale esperienza mise in evidenza che i precedenti *mass scan* non individuavano contaminanti dovuti solo alla Grafite ma soprattutto alla qualità del vuoto che si riusciva a creare all'interno della camera. Quindi, pur operando in vuoto molto spinto, è molto probabile che la contaminazione fosse dovuta all'anidride carbonica ( $\text{CO}^+$ ) e all'azoto ( $\text{N}_2^+$ ) presenti nell'aria rimasta intrappolata nella camera. Tali condizioni di lavoro risultavano essere sfavorevoli per la produzione di fasci ad elevata purezza, in quanto l'energia fornita alla sorgente per la ionizzazione del solo elemento Argon veniva "sprecata" per altri elementi; l'efficienza di ionizzazione risultava pertanto alquanto ridotta (vedi Figura 3-10).

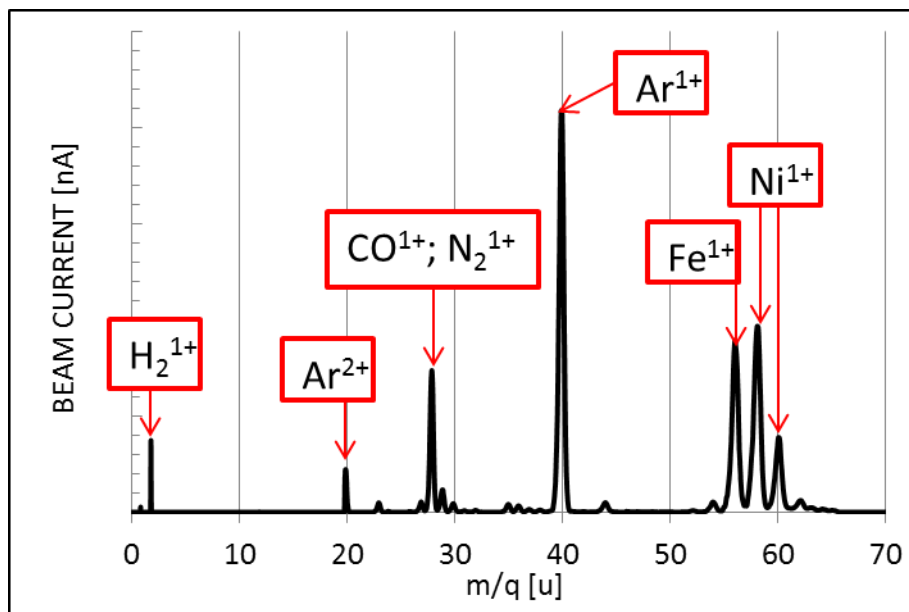


Figura 3-9: *Mass scan* ottenuto utilizzando un supporto in acciaio inox. Dati per una corrente di alimentazione di 390 A

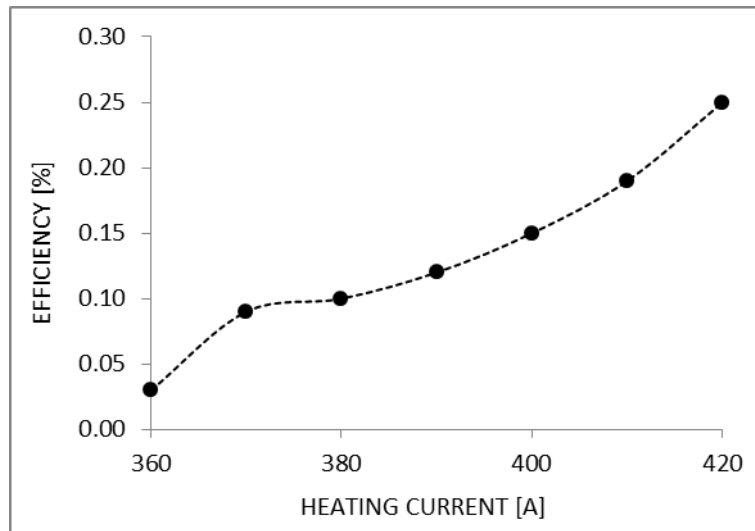


Figura 3-10: Efficienza di ionizzazione della PIS costruita con il supporto in acciaio inossidabile

Con il nuovo design della sorgente ci si propone di ridurre le contaminazioni dovute all'Acciaio inossidabile utilizzato per la costruzione del sistema di supporto della precedente versione della SPIS. Il livello di corrente a cui si fa riferimento è quello che induce, secondo il modello FEM, una temperatura massima sulla faccia del catodo di circa 2200 °C. Per la sorgente con la maschera in acciaio inossidabile tale livello viene raggiunto per una corrente di linea di 390 A. Si ricorda che i test vengono effettuati con uno degli elementi più difficili da ionizzare (Argon) pertanto i valori di efficienza attesi non saranno elevati. Il motivo per cui si utilizzano elementi ad alta energia di ionizzazione: se la sorgente viene migliorata rispetto alle condizioni peggiori che si possono avere, a maggior ragione migliorerà rispetto alle condizioni meno ostiche.

### 3.3.1. Il sistema di supporto

Il sistema di supporto della sorgente di ionizzazione al plasma per il progetto SPES è composta da tre componenti:

- Flangia di supporto (Support flange);
- Camera di supporto (Support tube);
- Ghiera frontale (Front nut);

Questi tre componenti fanno parte di un unico sottoinsieme che serve a sostenere i componenti interni e a collegare la sorgente al piatto della camera da vuoto. I fori sulla flangia servono a permettere la realizzazione del vuoto anche all'interno della sorgente.

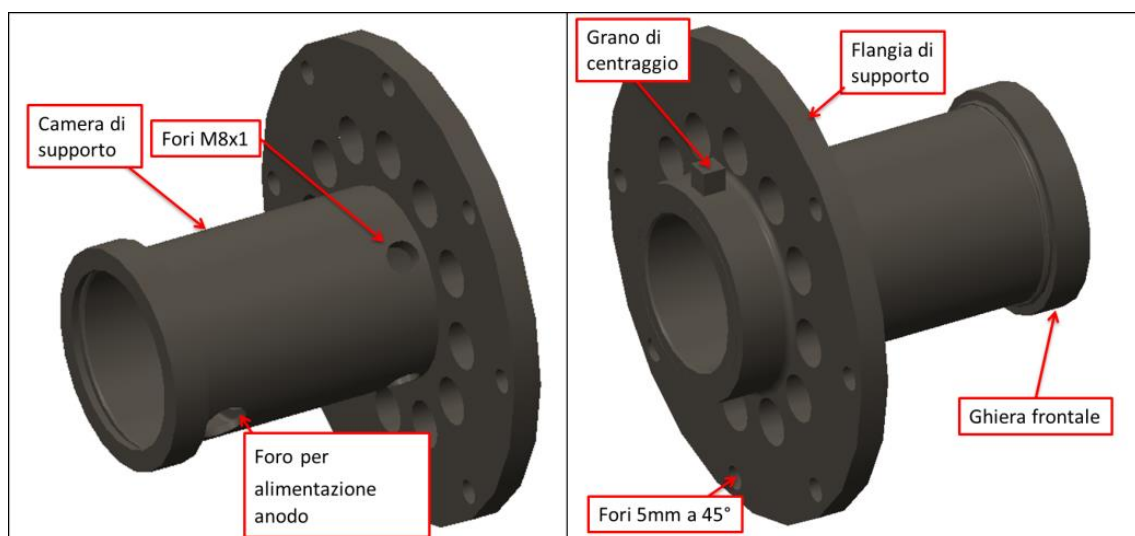
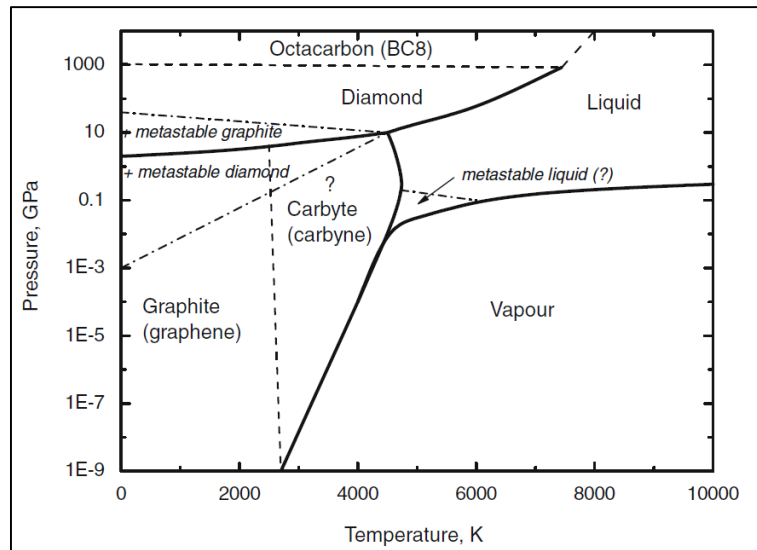


Figura 3-11: Modello CAD 3D del sistema di supporto della sorgente in Grafite



Per la nuova PIS si è deciso di tornare ad utilizzare la Grafite come materiale di costruzione in quanto rappresenta un ottimo compromesso tra prestazione e costi: è un ottimo conduttore elettrico e presenta un punto di fusione molto elevato (circa 3500 °C [2]). Sotto vuoto può resistere tranquillamente a temperature fino a 2000°C senza sublimare; il suo comportamento alle basse pressioni è del tutto simile a quello del Carbonio presentato in Figura 3-12.



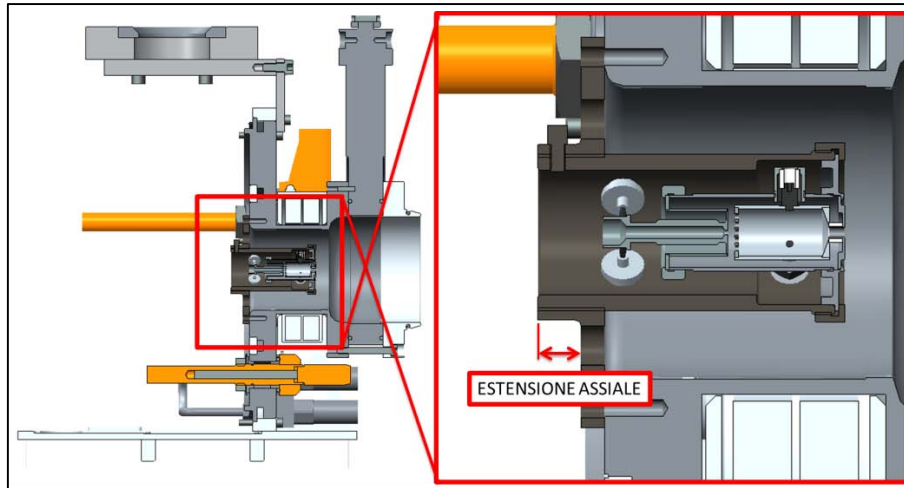
**Figura 3-12: Diagramma di fase del carbonio. Di particolare interesse risulta il comportamento alle basse pressioni: si nota che abbassando la pressione si riduce anche la temperatura alla quale la grafite inizia ad evaporare. La grafite utilizzata ha un comportamento molto simile a quello presentato in figura [2].**

La sua emissività (0,857 a circa 2200°C [2]) risulta almeno il doppio di quella dell'acciaio inossidabile, pertanto, dato che lo scambio termico che ha una incidenza maggiore è quello per irraggiamento, si prevede che le temperature dei componenti all'interno della sorgente saranno minori. Possiede inoltre una discreta resistenza meccanica anche ad elevate temperature; per contro la sua fragilità rende necessario porre una grande attenzione alla lavorazione meccaniche e alle successive manovre di assemblaggio. Dato che il sistema è statico e non deve supportare grossi carichi, non vi sono problemi di tenuta strutturale. Per l'occasione è stata utilizzata una nuova tipologia di Grafite chiamata EDM\_3; tale materiale risulta essere meno poroso e fragile di quello normalmente utilizzato e promette proprietà meccaniche migliori grazie al maggior grado di purezza raggiunto. L'elevata compattezza garantisce inoltre una miglior lavorabilità alle macchine utensili, consentendo quindi di adottare forme geometriche di maggior complessità senza incorrere in danni o rotture causate dalle sollecitazioni dovute alle forze che si sprigionano tra utensile e pezzo.

La scelta di utilizzare la Grafite però porta ad alcune problematiche importanti: innanzitutto la grafite non può essere saldata, l'unico modo per collegare due pezzi assieme è creare un accoppiamento filettato, data l'elevata fragilità, le filettature possono rompersi se sottoposte a sforzi elevati, inoltre la bassa resistenza all'usura porta al consumo dei filetti.

E' evidente che con tale tipologia di accoppiamento si perde la possibilità di fissare le parti in una posizione prestabilita. Una soluzione alternativa sarebbe quella di costruire la flangia e la camera partendo da un blocco unico di grafite, tuttavia si deve tenere in considerazione che lo spreco di materiale è elevato ed il costo che ne deriva è decisamente superiore; oltre a ciò si deve sempre tenere a mente di come si dovrà assemblare il componente dato che gli spazi per operare e le dimensioni di alcuni componenti sono molto ridotte. In definitiva, per riuscire a collegare e ad allineare correttamente i componenti, si è deciso di utilizzare un grano (in Grafite o alternativamente in Tantalio) che una volta fissato tra la flangia e la camera di sostegno consente di avere sempre un riferimento fisso ogni qualvolta si dovrà smontare e rimontare la sorgente.

Oltre al materiale è stata cambiata leggermente anche la geometria del supporto: la parte posteriore della camera è stata allungata per consentire l'alloggiamento del grano di allineamento. Tale modifica risulta necessaria anche per riuscire ad effettuare la lavorazione di maschiatura senza distruggere il pezzo. Estendendosi verso la camera da vuoto, tale sporgenza ha l'effetto benefico di aumentare la schermatura termica dal calore prodotto dalla *transfer line* (che arriva a temperature di circa 2000 °C) verso i componenti più sensibili al calore presenti nella camera da vuoto, come i connettori del gas ed i connettori elettrici (Figura 3-13).



**Figura 3-13: Estensione della sorgente all'interno della camera. La parte posteriore della sorgente è stata allungata e si estende all'interno della camera da vuoto.**

Altra modifica è stata lo spostamento verso la flangia dei 4 fori filettati utilizzati per posizionare la crociera di allineamento, questa risulta necessaria per fare in modo che i puntalini in Tungsteno penetrino sul collo del catodo anziché sul piccolo spallamento di battuta. Ciò fornisce una presa più sicura ed un maggior irrigidimento del vincolo sul catodo che dovrebbe consentire minori deformazioni longitudinali dello stesso. I 4 fori sono inoltre orientati a 45° rispetto all'asse orizzontale e a 90° tra di loro (Figura 3-16). Tale scelta consente di ripartire lo sforzo derivante dalle deformazioni della transfer line, che solitamente avvengono in senso verticale, e la possibilità di ridurre i costi in quanto tale disposizione risulta del tutto analoga a quella adottata per la sorgente superficiale (*SIS Surface Ion Source*); pertanto la transfer line adottata può essere la stessa permettendo così una standardizzazione dei componenti ausiliari e quindi una riduzione dei costi di produzione. Si ricorda che la riduzione dei costi sebbene non risulti un vincolo primario è comunque molto importante poiché a parità di prestazioni è sempre migliore un prodotto che costa meno.

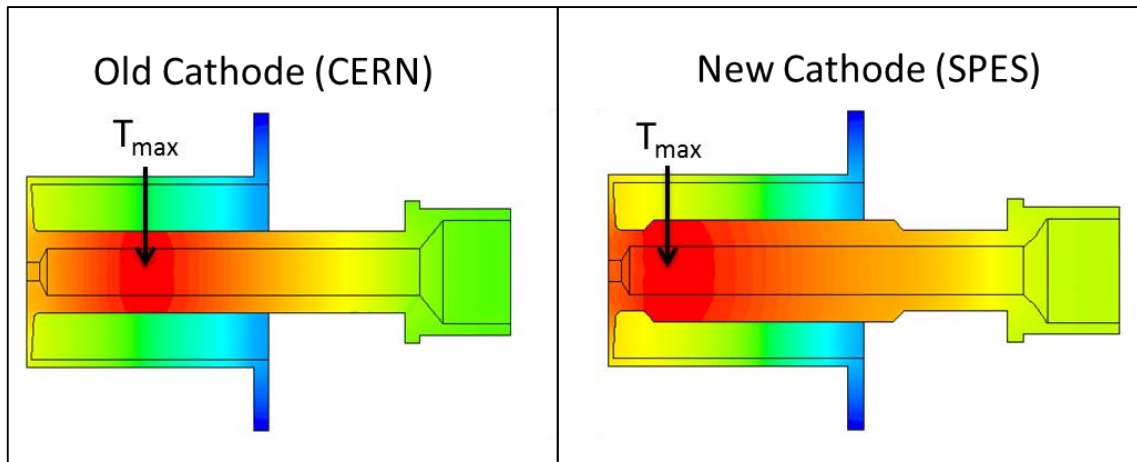
Per fissare la sorgente alla camera da vuoto sono stati eseguiti 8 fori di diametro 5mm inclinati di 45° in grado di ospitare dei bulloni M5x12.

Per quanto riguarda la ghiera frontale si è deciso di mantenere la soluzione proposta da G.Vivian. Il cambio di materiale, unito alla nuova geometria, consente uno smontaggio rapido della sorgente dato che il collegamento filettato non si incolla alle alte temperature come invece succedeva per la sorgente in acciaio. Non si è voluto aumentare lo spessore della ghiera poiché questo avrebbe diminuito ulteriormente la temperatura nella zona di estrazione, portando così ad un raffreddamento dell'anodo. Si ricorda che una diminuzione della temperatura dell'anodo può avere l'effetto di ridurre l'efficienza di ionizzazione.

Dato che la flangia del sistema di estrazione è costruita in Molibdeno, materiale che ha un coefficiente di dilatazione termica basso, non ci si aspettano sollecitazioni elevate in questa zona.

### **3.3.2. Il catodo SPES [1]**

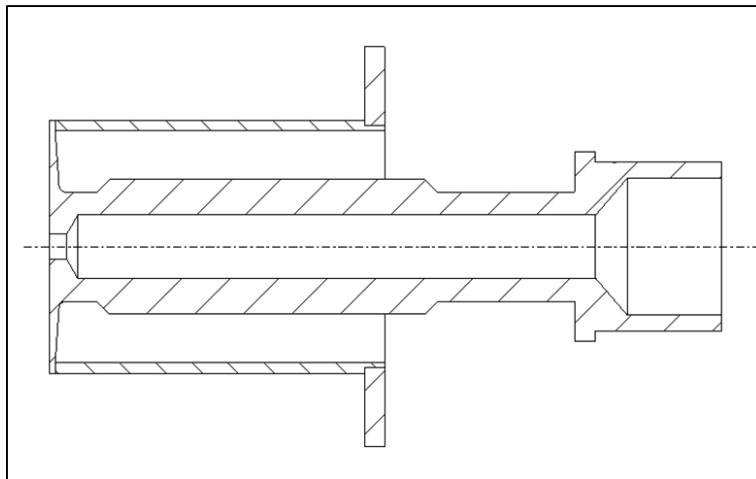
Nella geometria originale sviluppata presso i laboratori del CERN di Ginevra il punto più caldo del catodo non è sulla faccia frontale, bensì si trova sul canale centrale. Grazie al modello FEM siamo in grado di indicare la zona più calda: il campo termico crea una sorta di "punto caldo" (in inglese *hot spot*). Questo fenomeno ha un effetto negativo poiché sposta il massimo di temperatura in una zona lontana dalla faccia frontale dove l'emissione di elettroni non viene sfruttata per la generazione della scarica; inoltre le alte temperature in gioco possono portare a deformazioni termiche che rovinano la struttura centrale dell'oggetto: se il catodo non è ben allineato si corre il rischio di avere anche una perdita di efficienza.



**Figura 3-14:** Campo termico del catodo A)CERN B)SPES. Si nota lo spostamento del punto di temperatura massima verso la faccia frontale dovuto alla nuova geometria adottata.

Lo spostamento della zona più calda dalla faccia frontale verso indietro può essere interpretata come una perdita in termini di prestazioni del catodo: non potrà ricavare tutta la corrente elettronica che avrei se l'oggetto fosse alla temperatura massima. Ciò che porta a questa configurazione del campo termico è la geometria del sistema: il punto più caldo è anche quello che riceve più potenza radiante per effetto degli elementi che lo circondano. In aggiunta si deve tenere in conto che il Tantalio, prima di cominciare a sublimare, può sopportare, alla pressione di circa  $10^{-6}$  mbar, una temperatura limite attorno ai  $2200^{\circ}\text{C}$ . Se anche solo un punto dell'oggetto raggiunge il livello massimo, non si può più aumentare la corrente di alimentazione. Perciò si capisce che se il punto non è vicino alla faccia frontale, si sfrutta in modo non ottimale l'oggetto.

Quindi nei laboratori Nazionali di Legnaro è stato studiato un nuovo catodo (SPES) il cui campo di temperatura è stato modificato aggiungendo del materiale nella zona più calda valutata nel catodo studiato al CERN, per poterne favorire il raffreddamento per via del conseguente abbassamento della resistenza elettrica locale (vedi Figura 3-15). Pertanto la forma del canale centrale è stata modificata aggiungendo un volume solido di rivoluzione con forma della sezione trapezoidale. Tale geometria consente anche di tenere bassi i costi di produzione in quanto facilmente producibile con un tornio.



**Figura 3-15:** Nella figura è rappresentato il disegno in sezione del catodo utilizzato per il progetto SPES in cui si può apprezzare il canale centrale dove passa il fascio da ionizzare e l'ispessimento del condotto per spostare il punto di massima temperatura verso la faccia frontale.

### 3.3.3. La crociera di allineamento

La crociera di allineamento è un sistema innovativo studiato presso gli LNL. Esso è formato da quattro puntalini in Tungsteno che vanno ad incidere sul collo del catodo; la pressione è garantita grazie all'utilizzo di grani in Tantalio M8 che insistono sul corpo in Grafite. Essendo costruiti con un materiale molto duro e possedendo una geometria appuntita, i puntalini, penetrano nel Tantalio.

I grani sono scavati per permettere l'alloggiamento di isolatori in Allumina, necessari per evitare la deviazione di parte della corrente di alimentazione che, altrimenti, non verrebbe utilizzata per riscaldare il catodo. L'isolatore è sensibile al calore (temperature di utilizzo sottovuoto sono di circa 1400°C) e quindi deve essere protetto dall'irraggiamento prodotto dalla linea di trasferimento e dallo stesso catodo; viene quindi coperto da un elemento in Tantalio appositamente studiato. Tale sistema, oltre a garantire il supporto del catodo in senso radiale, risulta essenziale per contenere le deformazioni termiche che si sviluppano in senso assiale del catodo. Questo effetto è molto importante poiché consente di contenere lo spanciamento della faccia frontale del catodo che, altrimenti, ad elevate temperature, rischierebbe di andare a toccare la griglia di anodo rendendo inutilizzabile la sorgente.

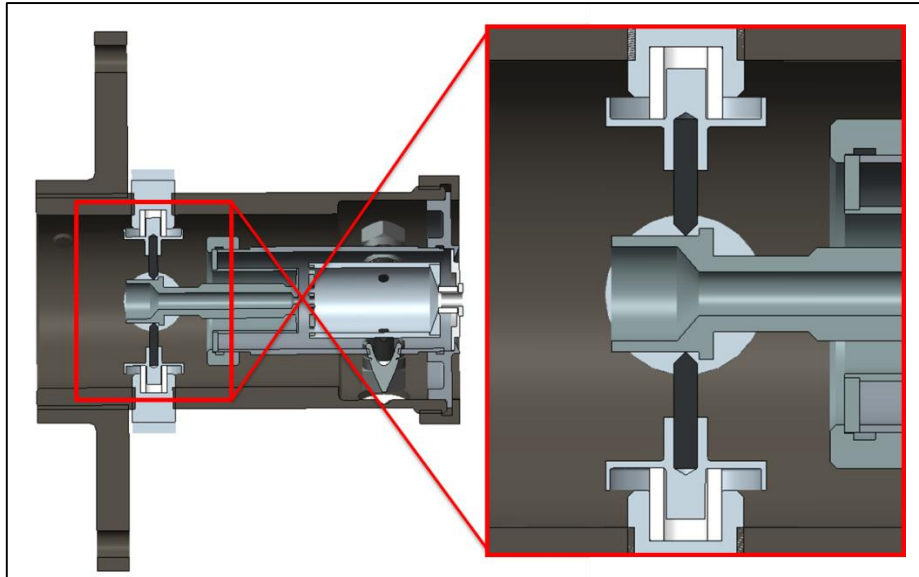


Figura 3-16: Vista in sezione della sorgente con particolare sulla crociera di allineamento. Il vincolo agisce sia radialmente che assialmente trattenendo il catodo che alle alte temperature va a deformarsi.

L'accoppiamento filettato tra grani e camera di supporto permette di comprimere con i puntali in Tungsteno sul canale, in Tantalio.

La lavorazione con una forma affilata dei puntali consente al sistema di penetrare nel catodo, garantendo anche un minimo di rigidità in senso assiale. La scelta del Tungsteno è dovuta al fatto che tale materiale possiede un punto di fusione molto elevato; è, inoltre, molto duro e resistente e possiede un elevato modulo elastico. Queste proprietà fanno sì che sia il componente ideale per questo tipo di applicazioni. Tuttavia è anche difficilmente lavorabile, perciò i puntali sono stati ottenuti da elettrodi da saldatura TIG tagliati a misura a cui è stata affilata un'estremità.

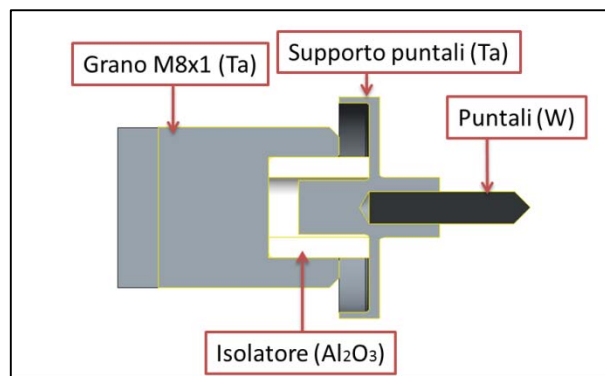


Figura 3-17: Modello CAD della Crociera di allineamento, vista in sezione.

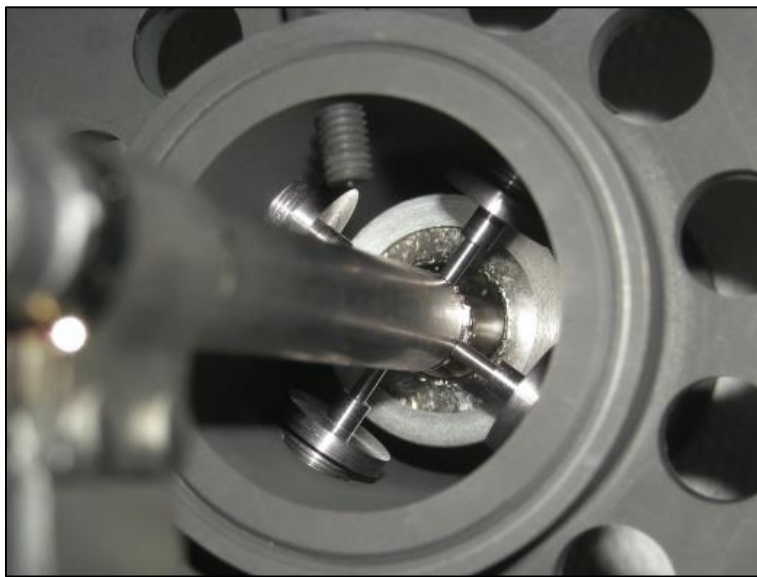
La crociera di allineamento è stata riprogettata per cercare di ridurre il più possibile le dimensioni, quindi l'area soggetta all'irraggiamento, e per allontanare e coprire l'isolatore elettrico in allumina (Figura 3-17). L'Allumina, o  $Al_2O_3$ , è un materiale ceramico, quindi durissimo e con comportamento fragile, ma possiede

buone proprietà di isolamento termico ed elettrico. Essa non è lavorabile con le macchine utensili tradizionali, può solamente essere tagliata e spianata tramite utensili speciali in diamante.

Un altro motivo per cui si deve proteggere l'isolatore elettrico è il seguente: ad elevate temperature e sotto vuoto i componenti metallici tendono a sublimare e le particelle formatesi vanno a depositarsi sulle superfici più fredde, se ciò avviene sulla superficie dell'isolatore si ha di fatto un annullamento delle proprietà isolanti, poiché il deposito è conduttivo.

Come soluzione definitiva si è pensato di utilizzare un grano in Tantalio di dimensioni maggiorate rispetto al modello precedente in modo tale da potervi ricavare una cava in cui alloggiare l'isolatore. Si è pensato poi di creare un supporto, sempre in Tantalio, dotato di un disco in grado di coprire ulteriormente i componenti sensibili. Il Tantalio viene utilizzato poiché è un metallo alto-fondente con buone proprietà meccaniche; tuttavia è necessario porre particolare attenzione per la sua lavorazione l'elevata plasticità può portare a deformazioni permanenti a freddo con l'effetto di rovinare l'assialità del pezzo.

Per la progettazione della geometria di ogni componente si sono dovute tenere a mente: le possibili difficoltà nell'assemblaggio, i vari giochi necessari e le difficoltà di lavorazione. Per tali motivi, anche se il design potrebbe essere, in teoria, estremizzato maggiormente, nella pratica si riscontrano delle difficoltà che non lo permettono. Come si può osservare in Figura 3-18, lo spazio in cui devono essere posti è molto ristretto e per l'assemblaggio si ricorre all'uso di pinzette.



**Figura 3-18: Puntalini di allineamento**

### **3.3.4. Sistema di estrazione SPES**

Il sistema di estrazione della sorgente è composto da una flangia e da un inserto forato che funge da estrazione (Figura 3-19). La flangia ha lo scopo di sostenere i vari elementi componenti la sorgente e di garantire il passaggio della corrente di alimentazione. Essa si accoppia con la camera di scarica tramite un collegamento filettato e va a toccare l'anodo tramite un isolatore in Allumina appositamente posizionato per garantire l'isolamento elettrico. La flangia consente di ospitare sia l'estrazione studiata presso gli impianti ISOLDE, sia quella studiata presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (SPES). Attualmente si stanno studiando altri sistemi di estrazione per garantire una miglior efficienza di ed una minor emittanza del fascio.

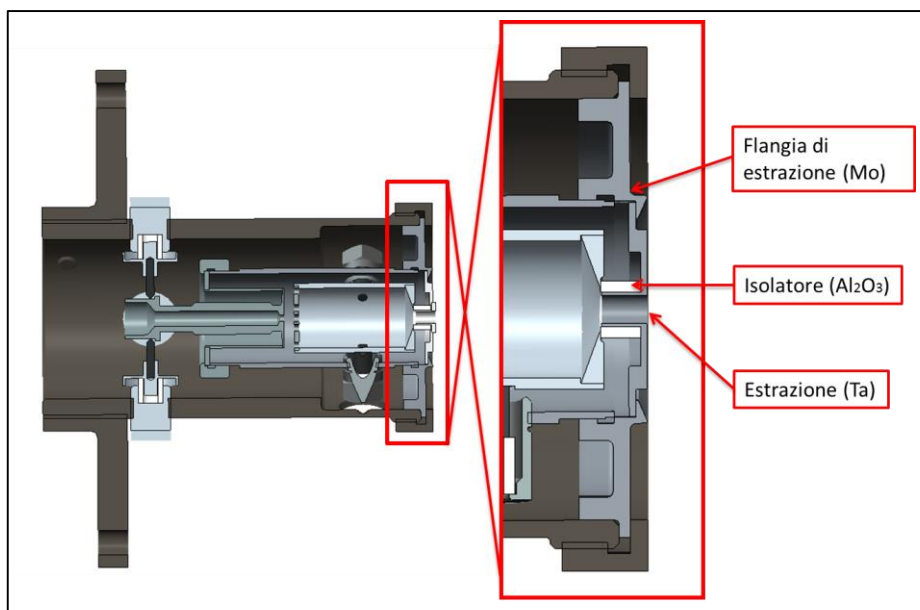


Figura 3-19: Sistema di estrazione SPES

### 3.4. Risultati in termini di efficienza del nuovo design

In Figura 3-20 viene presentata la nuova sorgente montata nella camera da vuoto. Con questa configurazione sono stati eseguiti i primi test che hanno prodotto da subito dei buoni risultati sia in termini di efficienza che di purezza del fascio. E' stata implementata la nuova crociera di allineamento e la maschera in grafite.

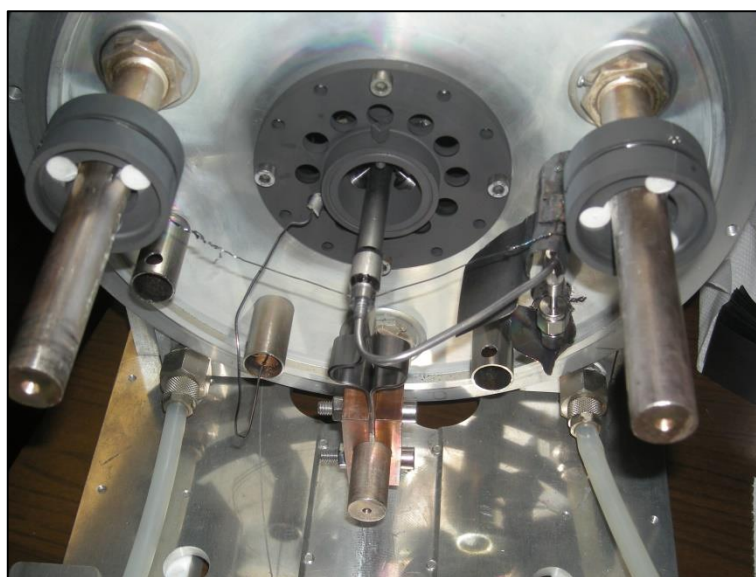


Figura 3-20: Sorgente di ionizzazione al plasma rinnovata

In Figura 3-21 viene presentato un *mass scan* ottenuto per la corrente di riferimento di 400 A. Si nota ovviamente il picco relativo all'Argon che è l'elemento insufflato all'interno della sorgente. In aggiunta si notano i picchi relativi alla qualità di vuoto presente all'interno della camera ed alcuni picchi riconducibili all'acciaio inox (Ferro e Nichel). Per quanto riguarda l'efficienza, si nota un netto miglioramento rispetto ai test eseguiti con la sorgente costruita in Acciaio Inox. Tuttavia si nota un evidente calo delle prestazioni all'aumento della corrente di linea oltre la soglia prevista di 400 A, che garantisce temperature del catodo di circa 2200°C. Questo è dovuto al peggioramento della qualità del fascio prodotto in quanto per tali livelli di corrente si ha un aumento dei contaminanti derivanti da componenti contenenti Ferro e Nichel. Tale contaminazione verrà discussa nel seguente paragrafo in cui verrà presentato il problema riscontrato e le soluzioni adottate.



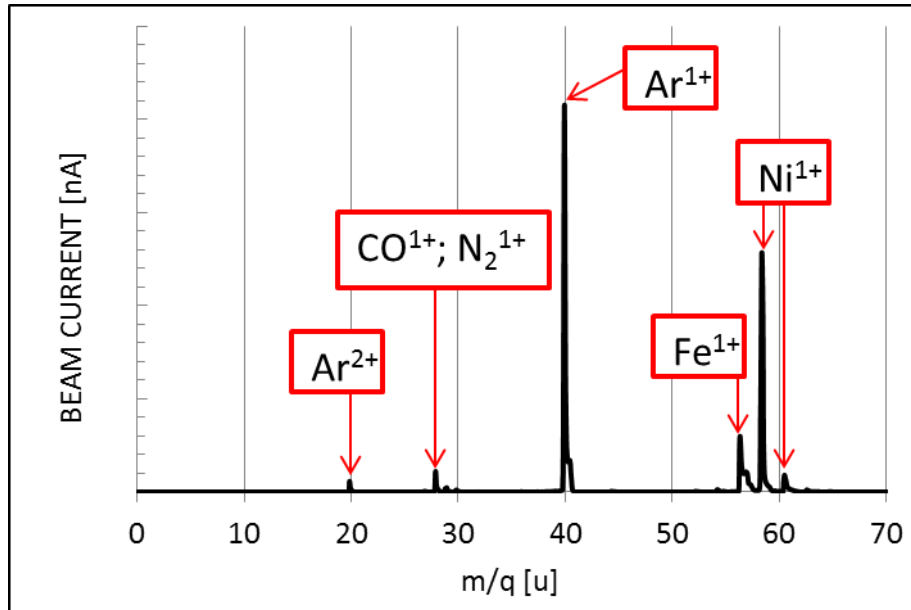


Figura 3-21: Mass scan effettuato per una corrente di linea di 400 A utilizzando la PIS con maschera in Grafite

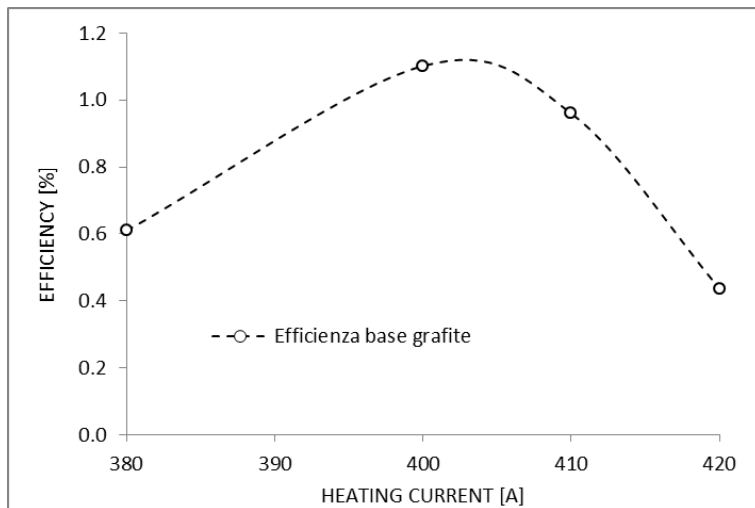


Figura 3-22: Efficienza della sorgente di ionizzazione al plasma con maschera in grafite

Come già accennato in precedenza, particolare attenzione è stata posta verso le dilatazioni termiche della faccia frontale del catodo. In assenza della crociera di allineamento si avevano deformazioni termiche permanenti (quindi di tipo plastico) che, oltre a correre il rischio di far toccare al catodo la griglia di anodo, rendevano inutilizzabile il catodo per successive prove. Quindi la vita utile di un catodo risultava molto breve se si operava con elevati livelli di corrente di alimentazione. Con il sistema di bloccaggio implementato nella sorgente, le deformazioni termiche di tipo plastico risultano completamente assenti (Figura 3-23). Questo comporta un notevole vantaggio poiché consente innanzitutto di raggiungere il limite massimo delle prestazioni, senza pericolo di corto circuiti tra catodo e anodo, e poi anche di poter riutilizzare il catodo per un periodo più elevato. Il prolungamento della vita utile di questo oggetto è importantissimo dato che nel funzionamento on line la sorgente dovrà operare ininterrottamente per circa 15 giorni.





Figura 3-23: A sinistra il catodo utilizzato senza la crociera di allineamento in cui si nota lo spanciamento della faccia frontale. A destra un catodo utilizzato per le prove di efficienza che non ha presentato deformazioni plastiche (circa 40 cicli di riscaldamento e raffreddamento).

### 3.5. Ulteriori migliorie apportate

Dato che anche dopo aver cambiato materiale per la costruzione della maschera risultavano ancora presenti, sebbene in misura molto ridotta, dei contaminanti imputabili all'acciaio inossidabile, è stato eseguito uno studio sui materiali utilizzati per costruire i vari componenti all'interno della camera da vuoto. Per individuare la causa della contaminazione sono state fatte le seguenti ipotesi, sulla base anche dell'esperienza maturata presso i Laboratori:

1. Le viti di fissaggio della sorgente alla camera e leviti che bloccano i morsetti in rame vengono riscaldate massivamente per radiazione. Effettivamente queste viti mostravano evidenti segni di erosione (Figura 3-24);



Figura 3-24: Viti rovinare dal riscaldamento

2. La corrente di alimentazione predilige il passaggio attraverso le viti in acciaio che vengono riscaldate per effetto Joule anziché passare per le lamine in Tantalio appositamente studiate (vedi Figura 3-25);

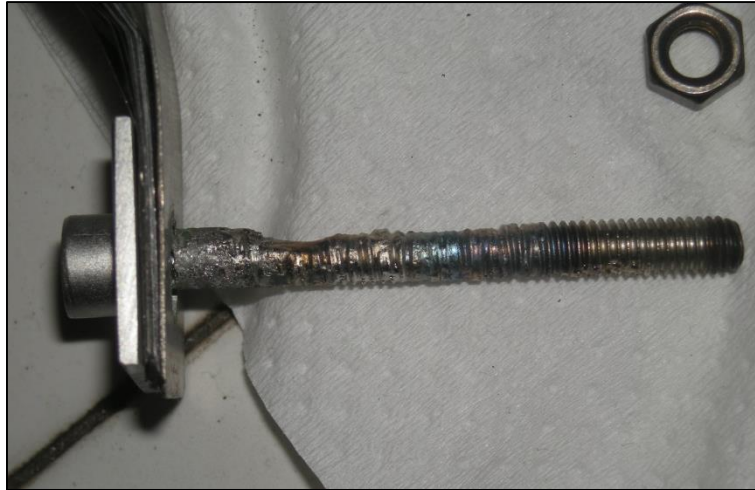


Figura 3-25: Bullone di fissaggio della connessione elettrica liquefatto per effetto Joule

3. Del materiale si è depositato nelle zone fredde dell'anodo durante l'utilizzo con la maschera in acciaio inox.

L'acciaio, sebbene risulti avere una temperatura di fusione di attorno ai 1473 °C, se posto in vuoto molto spinto, dell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar, inizia a sublimare ad una temperatura di quella di fusione poiché viene a trovarsi nel punto in cui la sua tensione di vapore eguaglia la pressione interna della camera; pertanto, sebbene il materiale non manifesti fenomeni di *creep*, e quindi strutturalmente non venga intaccato dalle elevate temperature (dal FEM si vede che la maschera in inox si avvicina ai 900 °C per correnti di linea di 420 A), è necessario tenere in conto della possibile sublimazione in vuoto.

Verranno di seguito riportate le migliorie apportate alla sorgente per cercare di proteggere il più possibile i componenti più sensibili alle elevate temperature che vengono a svilupparsi all'interno della camera ed una possibile soluzione per migliorare la connessione elettrica tra puntali di rame e i fogli in Tantalio utilizzati per il trasporto della corrente di alimentazione.

### 3.5.1. Schermatura della sorgente

Si è pensato di ricoprire quindi le viti che fissano la sorgente al piatto della camera con delle protezioni create a partire da fogli in Tantalio di 1 mm di spessore. Questi fogli sono stati forati e piegati per garantire una sufficiente protezione dal calore prodotto dalla linea di trasferimento (vedi .Figura 3-26). Tale sistema è un prototipo e dovrà essere migliorato in modo tale da ridurne il più possibile le dimensioni, a parità di pulizia del fascio. Come soluzione alternativa si era pensato alla creazione di 4 viti in Tantalio M5x12 che però per motivi di costo non ha riscosso successo.

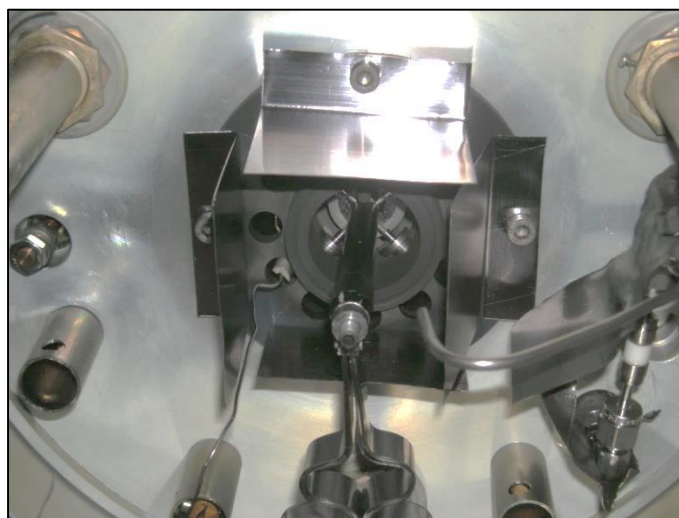


Figura 3-26: Schermi di protezione in Tantalio

Quindi si sono svolti dei test calcolando l'efficienza per tre valori di corrente: 400, 410 e 420 A. Per ogni livello sono stati altresì eseguiti dei *mass scan* per verificare l'andamento del livello di contaminanti. Viene riportato in Figura 3-27 un *mass scan* ottenuto per un livello di corrente di 400 A. Si nota che il livello dei contaminanti è sceso rispetto alla prova effettuata senza apporre gli schermi protettivi. I livelli di contaminante risultano essere dimezzati (vedi Figura 3-21). Anche l'efficienza ha risentito positivamente delle modifiche fatte, infatti dalla Figura 3-28 si osserva come vi sia un brusco aumento delle prestazioni per elevati livelli di corrente. Questo conferma l'ipotesi che la contaminazione sia dovuta a componenti che vengono riscaldati durante il funzionamento.

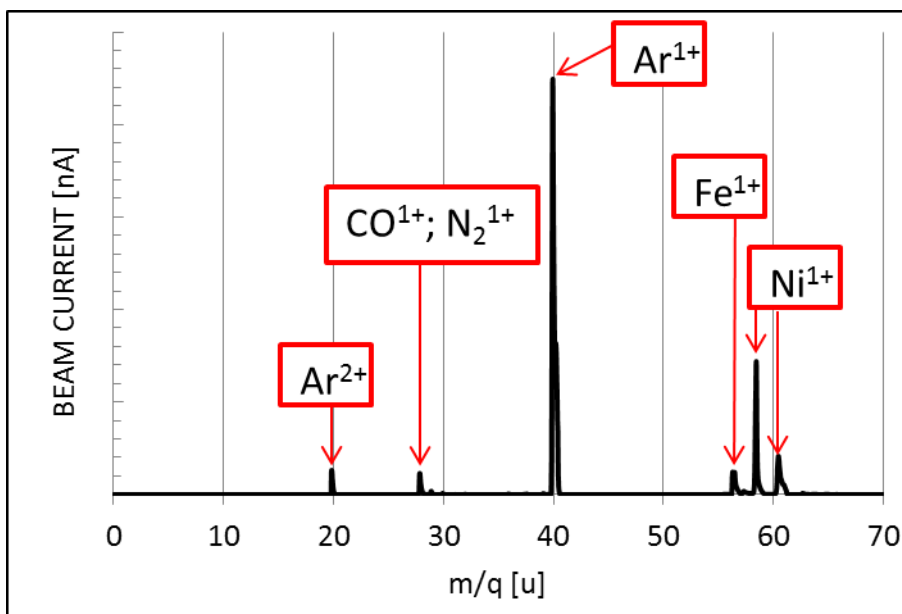


Figura 3-27: *Mass scan* per un livello di corrente di 400 A. Ottenuto dopo la copertura delle viti

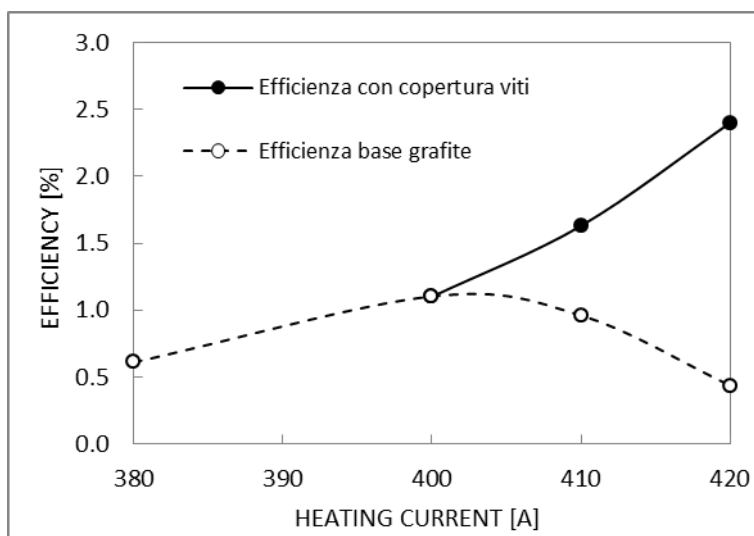
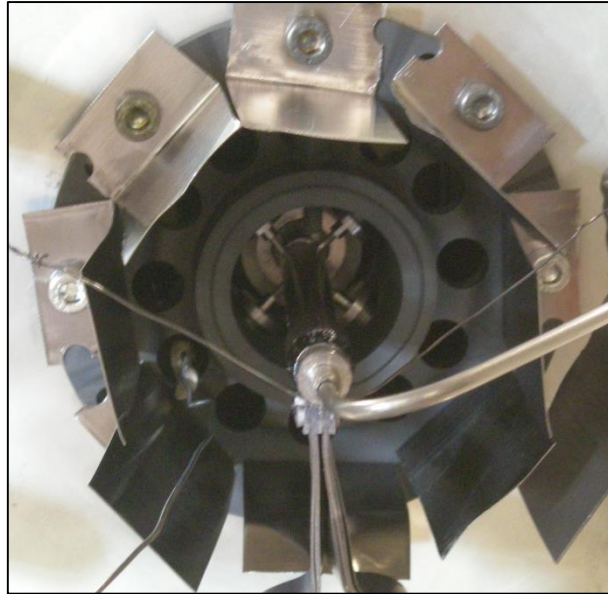


Figura 3-28: Efficienza della PIS in Grafite. Si nota il miglioramento prodotto dalla copertura delle viti in acciaio inossidabile.

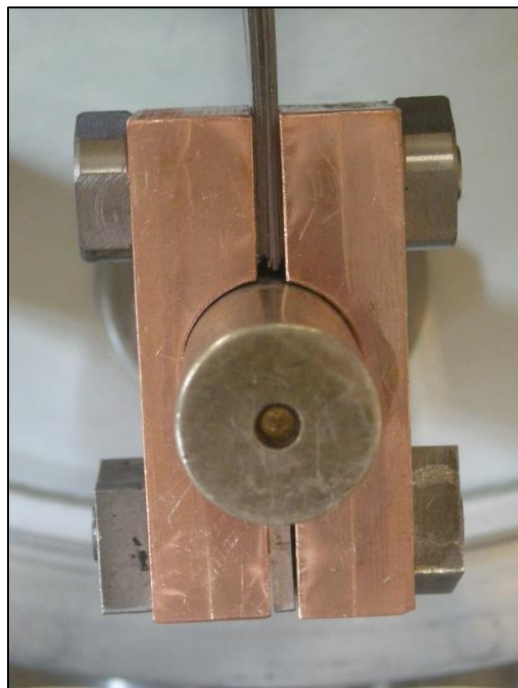
### 3.5.2. Modifica della connessione elettrica

Oltre alla copertura delle viti si è pensato di rivedere la parte di connessione elettrica tra sorgente e camera da vuoto. Per quanto riguarda il collegamento della PIS al piatto della camera si è pensato di aumentare il numero delle viti cosicché la corrente di linea possa ripartirsi su più elementi. Utilizzando 8 viti M5x12 invece di 4, sempre in acciaio inox, si dovrebbe dimezzare la corrente che vi passa attraverso. Si ricorda che il sistema di copertura delle viti è solo un prototipo e dovrà essere rivisto e, se possibile, migliorato.



**Figura 3-29: Aggiunta di 4 viti per la connessione elettrica al piatto della camera**

Anche la connessione elettrica che collega il puntale della camera alla sorgente è stata rivista, in particolare sono state sostituite le viti in acciaio che premevano contro i morsetti in Rame con due viti in Tantalio M6x1 a doppio dado. I dati utilizzati per serrare i morsetti sono costruiti in Molibdeno per evitare che si saldino con le viti e rendano impossibile lo smontaggio. Inoltre è stato aggiunto uno spessore (2,3mm) nella parte inferiore del collegamento per evitare che i morsetti si deformino una volta compressi contro il puntale (vedi Figura 3-30). Questa soluzione permette un miglior contatto tra puntale e morsetto, viene così ridotta la resistenza elettrica superficiale e quindi la potenza dissipata per alimentare la sorgente.



**Figura 3-30: Nuovo morsetto con viti di serraggio in Tantalio e spessore per evitare le possibili deformazioni**

I nuovi test sono stati eseguiti per livelli di corrente elettrica di 380, 390, 400, 410 e 420 A. Per ognuno di questi livelli di corrente sono stati effettuati dei *mass scan* dai quali è stato possibile risalire ai valori di efficienza. Dal *mass scan* preso a riferimento (Figura 3-31) si nota una drastica diminuzione dei contaminanti imputabili all'acciaio inossidabile. Questo miglioramento è molto importante anche perché l'efficienza ne risente in modo significativo (vedi Figura 3-32).

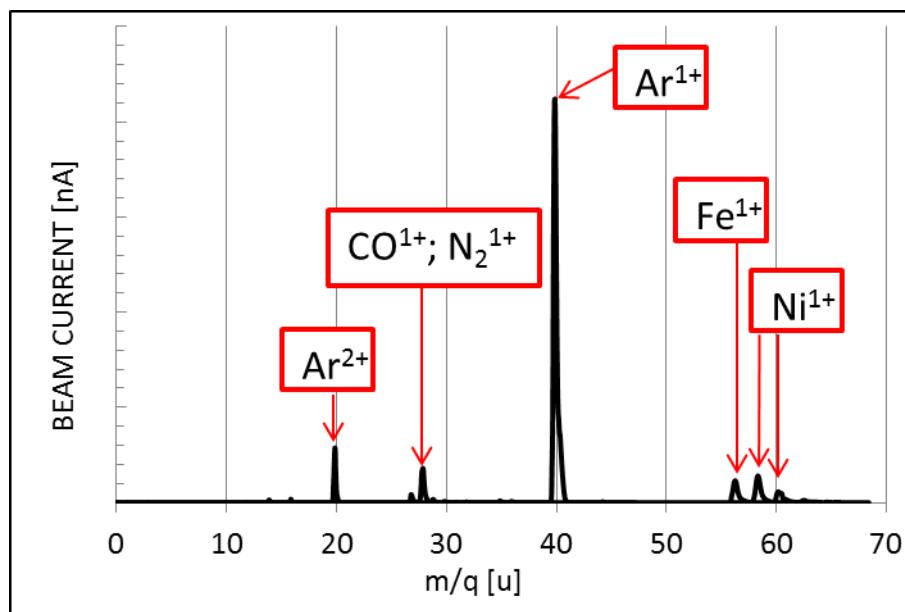


Figura 3-31: Mass scan per un livello di corrente di 400 A. Ottenuto dopo la modifica della connessione elettrica

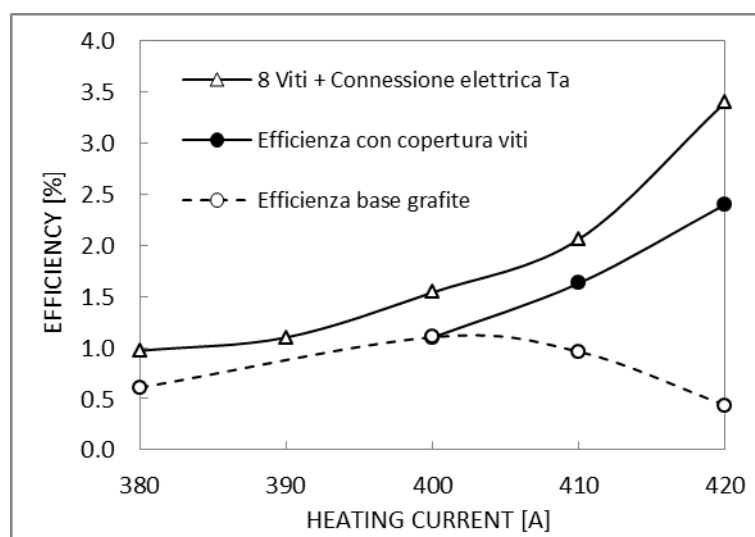


Figura 3-32: Confronto in termini di efficienza tra la sorgente base (solo corpo in grafite) e per gli step successivi

Risulta interessante riportare la Potenza dissipata dalla sorgente (Figura 3-33). Si nota come la potenza richiesta sia aumentata dal passaggio dalla maschera in acciaio inossidabile alla maschera in grafite. Questo è spiegabile innanzitutto per il fatto che la Grafite presenta una resistività più alta rispetto all'acciaio; inoltre l'utilizzo di collegamenti filettati piuttosto di saldature aumenta ulteriormente la resistenza al passaggio della corrente elettrica. Un altro dato importante che si nota dal grafico è che utilizzando un sistema di connessione leggermente modificato che garantisce un miglior fissaggio, si ha un abbassamento della potenza richiesta per raggiungere i medesimi livelli di temperatura.

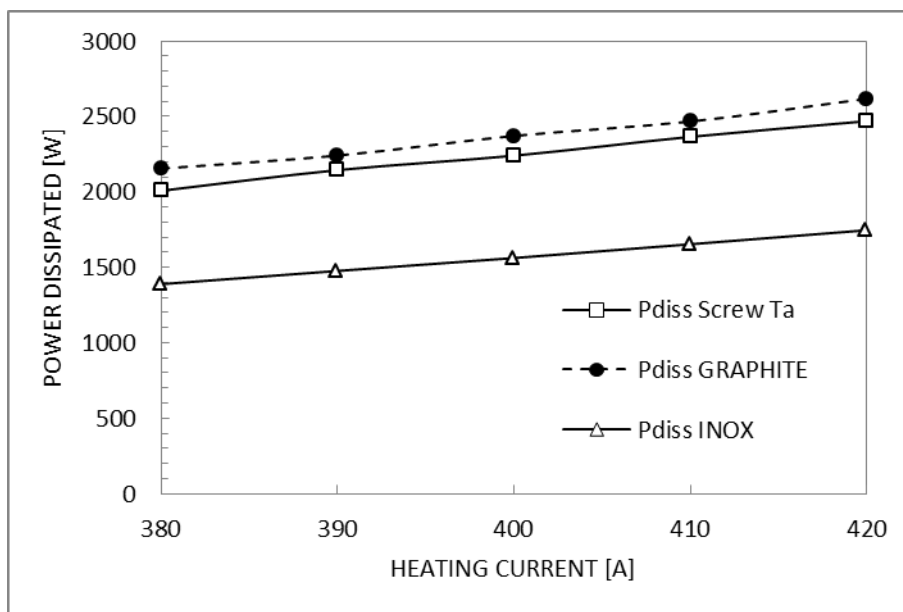


Figura 3-33: Potenza dissipata per alimentare la sorgente

Tutte le lavorazioni sono state eseguite presso l'officina dei laboratori nazionali di Legnaro utilizzando varie macchine a controllo numerico quali torni e trapani. Per le lavorazioni della grafite si sono dovute prendere delle precauzioni in quanto questo materiale risulta facilmente inquinabile e difficilmente pulibile, pertanto per tutte le fasi, l'operatore ha indossato dei guanti in nitrile per maneggiare gli oggetti e gli utensili sono stati ben puliti prima di iniziare le lavorazioni. La pulizia degli oggetti utilizzati per la costruzione della sorgente è obbligatoria per riuscire ad ottenere un fascio di purezza elevata e con elevato rendimento.

Naturalmente ogni nuova modifica è stata pensata al fine di rispettare i parametri di funzionamento della sorgente ed incidere in modo trascurabile sul campo termico del sistema, altrimenti tutto il lavoro svolto fino a questo punto sarebbe stato vano. Nella Figura 3-34 è possibile vedere le differenze sostanziali tra la nuova sorgente sviluppata per il progetto SPES e la vecchia sorgente utilizzata.

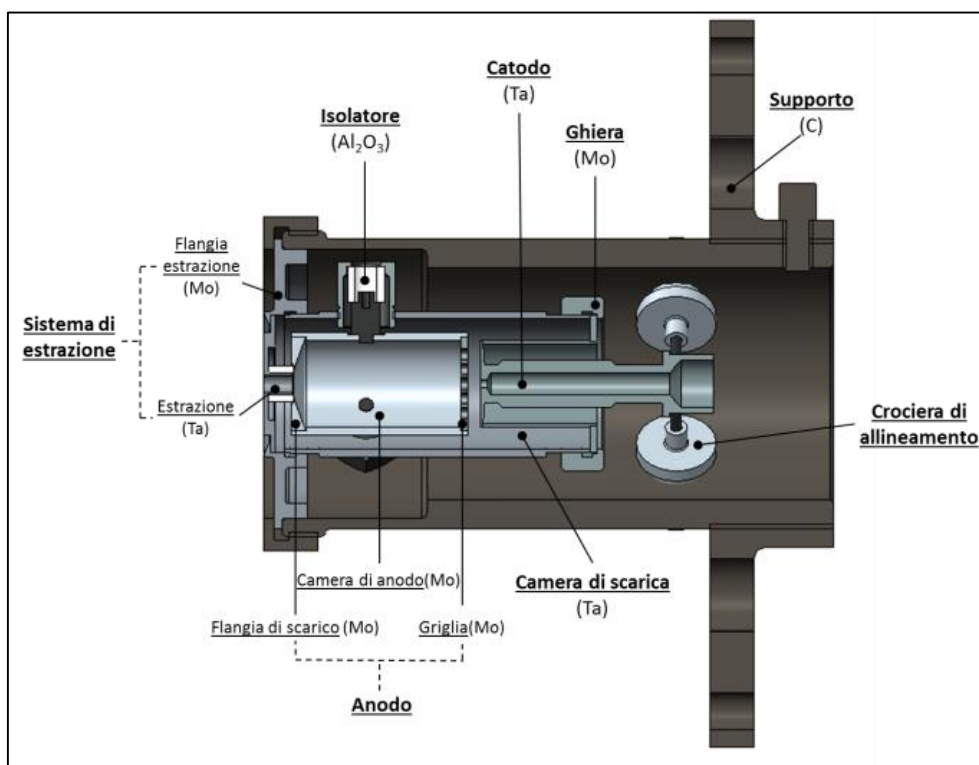


Figura 3-34: Geometria della nuova PIS.



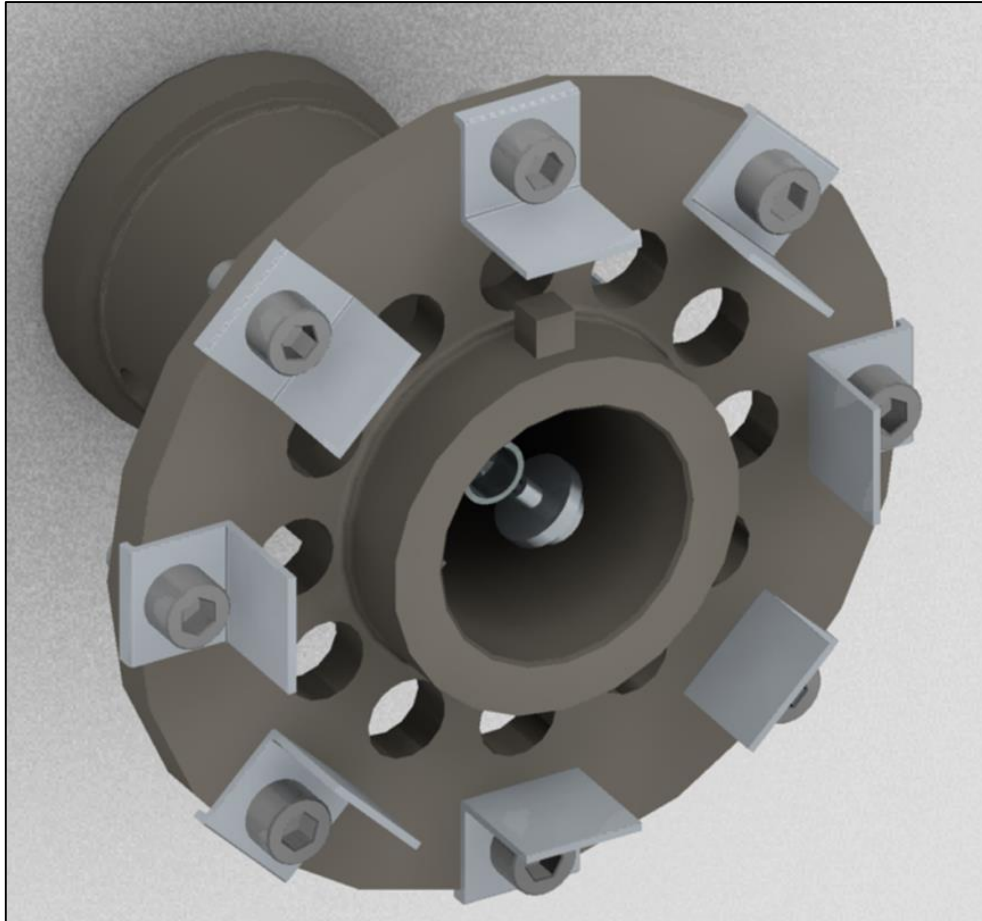


Figura 3-35: Soluzione definitiva del sistema di copertura delle viti in Acciaio

### 3.6. Materiali utilizzati per le sorgenti di ionizzazione al Plasma [6]

Le condizioni critiche a cui sono sottoposti i componenti delle sorgenti di ionizzazione al plasma richiedono l'utilizzo di materiali non convenzionali. Le caratteristiche generali che questi debbono aver sono:

- Elevato punto di fusione (anche sotto vuoto)
- Bassa affinità chimica con gli elementi da ionizzare
- Stabilità meccanica e bassa fragilità
- Buona lavorabilità alle macchine utensili per ridurre i costi di produzione

Inoltre i materiali utilizzati per condurre la corrente di alimentazione devono possedere buona conducibilità elettrica, viceversa per gli isolatori. Per i componenti conduttori si possono utilizzare i seguenti materiali:

- Rame: viene utilizzato per componenti che raggiungono basse temperature (600°C) o che vengono raffreddati. E' facilmente lavorabile alle macchine utensili ma diventa tenero a temperature modeste. Ha una bassa resistenza alla corrosione. Viene utilizzato principalmente come morsetto da applicare ai puntali raffreddati della camera da vuoto o come connessione per gli *oven*;
- Titanio: Possiede una bassa conducibilità termica e può essere utilizzato per limitare perdite di energia termica (es. connessioni elettriche). Ha un punto di fusione relativamente elevato (1610°C) e può essere utilizzato fino agli 800°C prima che reagisca con l'azoto. L'idrogeno lo rende molto fragile ed inizia a reagire con il fluoro e con altri alogeni già a 150°C. E' un materiale facilmente lavorabile (con l'ausilio di fluido lubro-refrigerante) e ha ottime caratteristiche di resistenza meccanica;
- Acciaio Inossidabile: E' un ottimo materiale fino ai 1000°C ma la sua resistenza alla corrosione diminuisce con l'aumentare della temperatura. Sopra i 900°C forma delle leghe basso fondenti con



Tantalio e Molibdeno. La sua conducibilità termica è relativamente bassa, pertanto è possibile avere localmente dei sovra-riscaldamenti;

- Molibdeno: Può essere utilizzato in vuoto fino a 2000°C poiché possiede un elevato punto di fusione (2630°C). La sua resistenza a gas corrosivi è buona. E' il materiale refrattario meno costoso e risulta anche facilmente lavorabile alle macchine utensili. Tuttavia si presenta abbastanza fragile, soprattutto i componenti ottenuti da lamiere piegate. Inoltre diventa molto fragile se esposto ad elevate temperature. Per evitare ciò è possibile utilizzare una lega di Molibdeno, la TZM, composta da piccole percentuali (<1%) di Titanio, Zirconio e Carbonio;
- Tantalio: E' un metallo refrattario facilmente lavorabile alle macchine utensili anche se tende ad impastarsi sugli utensili. Presenta elevata duttilità e possiede una resistenza meccanica relativamente bassa. Può raggiungere temperature prossime ai 2300°C senza sublimare in vuoto, infatti possiede un elevato punto di fusione (3000°C). Il Tantalio diventa fragile alle elevate temperature per effetto della ricristallizzazione e per la reazione con azoto ed idrogeno. La resistenza alla corrosione viene migliorata attraverso la formazione di uno strato di carburo superficiale. E' molto costoso ma il suo utilizzo nelle sorgenti di ionizzazione risulta massivo e quasi obbligato per ottenere elevate prestazioni;
- Tungsteno: E' un metallo molto duro e resistente; è difficilmente lavorabile alle macchine utensili ma può essere formato per rettifica od elettroerosione. Ha un punto di fusione molto elevato (3400°C) e come il Tantalio, può essere utilizzato per la creazione di catodi metallici;
- Renio: E' molto costoso per via della sua rarità. Risulta essere meno fragile del Tungsteno e raggiunge la temperatura massima di 3150°C prima di fondere. E' un buon materiale per la produzione di fili ed è molto resistente ai gas corrosivi e all'ossigeno. Esso presenta una funzione di lavoro molto elevata e pertanto viene utilizzato per la produzione delle *hot cavity* delle sorgenti di ionizzazione superficiale;
- Grafite: Questo materiale è normalmente molto poroso pertanto si cerca di utilizzare solo componenti in Grafite ad elevata densità. E' un materiale dal costo relativamente basso e può essere utilizzato per temperature molto elevate (3500°C). La sua resistenza meccanica è bassa e risulta particolarmente fragile. E' facilmente lavorabile alle macchine utensili e le superfici che ne risultano possiedono una bassissima rugosità. La Grafite presenta un'eccellente resistenza alla corrosione ma tende ad assorbire alcuni elementi. L'*outgassing* risulta molto elevato dopo che è stata esposta all'aria per molto tempo. Inoltre essa può reagire con i materiali ceramici (processo di riduzione) e formare carburi con i metalli refrattari alle elevate temperature;
- Carbonio pirolitico: Possiede una struttura a strati e quindi differenti caratteristiche in due direzioni (specialmente la resistività). Non è poroso come la Grafite quindi non assorbe gas o agenti chimici. E' molto duro ma può essere lavorato.
- Carbonio vetrificato: E' un materiale ceramico per cui risulta duro e difficile da lavorare alle macchine utensili. Reagisce meno ai gas e possiede una elevata resistività chimica anche alle elevate temperature. In vuoto si possono raggiungere i 2500°C. Possiede una resistività bassa (come i materiali grafitici) e può essere utilizzata per componenti riscaldatori.

Tabella 3-1: Proprietà di alcuni materiali refrattari utilizzati per la costruzione delle sorgenti di ionizzazione [6]

	Melting point (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Therm. expansion (10 <sup>-6</sup> /K)	Spec. el. resist. (μΩm)	Therm. conduct. (W/m-K)	Emissivity (ε)	Rad. power dissipation (W/cm <sup>2</sup> )	Vickers hardness (HV 10) <sup>a</sup>
Ti	1690	4.5	8.2	0.5	17	50		160-250
Temp. (°C)		20	20	20	20	1200		
S. st.	1400	7.9	18	0.75	16/24		1.3	190
Temp. (°C)		20	20	20	20/700		727	
Mo	2630	10	5.5	0.05	159/109	35	19	155/270
Temp. (°C)		20	20	20	20/1473	1727	1727	
Ta	3000	16.6	6.5	0.125	54.4/74	42	21	90/200-300
Temp. (°C)		20	20	20	20/1527	1727	1727	
W	3395	17-19	4.4	0.055	130/100	42	64	350/450
Temp. (°C)		20	20	20	20/1527	2200	2200	
Re	3176	21	6.8	0.21	—	40	—	
Temp. (°C)		20	20	20		2000		250/800
H-d. graph.	3600	1.8	2-6	10-50	1-80	70-88		30-80
Pyro-C		2.2	0.1	4.0	300	75		
Pyro-C ⊥		2.2	25	10 <sup>3</sup>	3			
Glassy C		1.55	3.1	47	5.5			~10 <sup>3</sup>
Temp. (°C)		20	20	20	20	1727		

<sup>a</sup> Annealed/unannealed

Per gli isolatori, invece, si deve far ricorso ad altri tipi di materiale, solitamente sono dei composti:

- Quarzo (SiO<sub>2</sub>): Può resistere in vuoto fino a 1000°C. E' disponibile in forma di tubo in varie dimensioni e risulta poco costoso;
- Mica: utilizzata sotto forma di lamierini, resiste fino a 600°C. Può essere tagliata e forata facilmente. Per via della sua struttura a strati, tende fare *outgassing*;
- Allumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): Può essere utilizzata sotto vuoto fino a 1400°C. E' disponibile in varie forme e dimensioni ma risulta difficilmente lavorabile. Può essere tagliata o levigata con utensili in diamante. Non assorbe molti gas e risulta stabile rispetto a vari elementi e composti;
- Magnesia (MgO): E' simile all'Allumina ma è molto più difficile da produrre e costa molto di più. Può essere utilizzata al posto dell'Allumina nel caso in cui vi siano dei materiali che reagiscono con quest'ultima. Può essere utilizzata per temperature superiori ma possiede un valore molto simile di pressione di vapore;
- Zirconia (ZrO<sub>2</sub>): Simile all'Allumina, risulta molto più difficile da produrre e molto più costosa. Può essere utilizzata al posto dell'Allumina nel caso in cui vi siano dei materiali che reagiscono con quest'ultima. Resiste a temperature superiori ma possiede un valore più basso di pressione di vapore. Se riscaldata cambia struttura e colore ma il processo è reversibile in particolari condizioni. La sua resistenza elettrica scende a 100 Ohm per temperature sopra i 1000°C;
- Macor: E' molto fragile ma può essere facilmente lavorato alle macchine utensili. Sotto vuoto resiste fino a 1000°C. Esistono in commercio diverse qualità e composizioni che devono essere accuratamente scelte;
- Nitrato di Boro (BN): E' un materiale eccellente per impieghi a temperature fino a 1200°C. Può essere utilizzato fino a 1500°C ma inizia a decomporsi e a rilasciare enormi quantità di azoto. Tende ad assorbire acqua creando problemi nelle fasi di riscaldamento rapido; inoltre l'*outgassing* risulta molto elevato. Nel mercato ci sono varie qualità suddivise in base alla densità. Per le sorgenti di ionizzazione si usano quelle ad alta densità. Il nitrato di boro risulta facilmente lavorabile alle macchine utensili e pulibile da eventuali depositi metallici. Le sue superfici risultano molto lisce e tale proprietà può essere utilizzata per formare contatti striscianti. Chimicamente risulta stabile verso il Cloro e altri agenti aggressivi però sopra i 1200°C tende a reagire col Tantalio rendendolo estremamente fragile (ciò non accade col Tungsteno);
- Nitrato di Silicio (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>): E' un materiale molto duro e difficile da lavorare ma in compenso risulta poco costoso e realizzabile in diverse forme con elevata accuratezza. Può essere utilizzato fino a 1400°C e risulta chimicamente stabile verso la maggior parte di materiali fusi. Viene utilizzato per isolamenti solo elettrici in quanto presenta una buona conducibilità termica, inoltre resiste bene agli shock termici.

**Tabella 3-2: Proprietà fisiche dei materiali isolanti [6]**

	Max. temp. <sup>a</sup> (°C)	Max. temp. <sup>b</sup> (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Therm. expansion (10 <sup>-6</sup> /K)	Specific el. resistance (Ωcm)			Therm. conduct. (W/mK)	Knoop 100 hardness (N/mm <sup>2</sup> )
					20°C	500°C	1000°C		
SiO <sub>2</sub>	1000	1200	2.2	0.6	10 <sup>17</sup>	<10 <sup>9</sup>	—	1.5	820
Mica	500	900	2.8	~15	10 <sup>16</sup>	10 <sup>8</sup>	—	0.6	135
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1400	1950	3.8	8.5	10 <sup>14</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>7</sup>	30	23000
MgO	2000	2500	3.4	13.5	10 <sup>14</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>7</sup>	35	7500
ZrO <sub>2</sub>	1600	2300	5.5	11	10 <sup>10</sup>	10 <sup>3</sup>	50	2.5	17000
BN	1200	2400	2	1.8	10 <sup>15</sup>	—	10 <sup>9</sup>	35	15
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1400	1500	3.2	3.2	10 <sup>11</sup>	—	10 <sup>7</sup>	40	15500
Temp. (°C)	—	—	20	20	20	500	1000	20	20

<sup>a</sup> In vacuum ≤10<sup>-4</sup>.  
<sup>b</sup> Inert gas atmosphere.

**Tabella 3-3: Temperature massime per il contatto tra i vari materiali [6]**

Material	Max. temp. (°C) in contact with				
	W	Mo	Ta	Graphite	Ni80Cr20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1900	1900	1700	2000	1000
MgO	2000	1800	1800	1800	1000
ZrO <sub>2</sub>	1600	1800	1600	1600	1000
BN	2000	1600	1200	2000	1000
BeO	2000	1900	1600	2300	1000
ThO <sub>2</sub>	2200	1900	1900	2000	1000
Graphite	1400	1200	1000	—	1000

**Tabella 3-4: Temperatura di sublimazione di alcuni materiali usati per la costruzione di sorgenti di ionizzazione. Si ricorda che si opera a pressioni dell'ordine di 10-6mbar corrispondenti a 10-4 Pa. [6]**

Material formula	Temperature, K (°C), corresponding to vapour pressure over materials surface, Pa							Temperature, K (°C), corresponding to surface vaporization rate, kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>					Temperature, K (°C), corresponding to surface vaporization rate, m s <sup>-1</sup>				
	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-3</sup>	0.1	10	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-6</sup>
C (graphite)	1790 (1520)	1950 (1680)	2160 (1890)	2410 (2140)	2740 (2470)	3170 (2900)	3790 (3520)	2000 (1730)	2200 (1930)	2450 (2180)	2800 (2530)	3300 (3030)	1950 (1680)	2130 (1860)	2360 (2090)	2700 (2430)	3100 (2830)
Ir	1750 (1480)	1940 (1670)	2190 (1920)	2510 (2240)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mo	1750 (1480)	1960 (1690)	2210 (1940)	2550 (2280)	3010 (2740)	3770 (3500)	~5100 (~4830)	1750 (1480)	1960 (1690)	2230 (1960)	2560 (2290)	3020 (2750)	1750 (1480)	1960 (1690)	2220 (1950)	2560 (2290)	3030 (2760)
Nb	1930 (1660)	2120 (1850)	2380 (2110)	2720 (2450)	3220 (2950)	3940 (3670)	~4530 (~4260)	1930 (1660)	2130 (1860)	2400 (2130)	2750 (2480)	3250 (2980)	1930 (1660)	2130 (1860)	2390 (2120)	2740 (2470)	3230 (2960)
Os	~1880 (~1610)	~2090 (~1820)	~2370 (~2100)	~2700 (~2430)	~3160 (~2890)	~3850 (~3580)	~4880 (~4610)	~1870 (~1600)	~2080 (~1810)	~2350 (~2080)	~2700 (~2430)	>3150 (>2880)	~1910 (~1640)	~2120 (~1850)	~2410 (~2140)	~2780 (~2510)	~3270 (~3000)
Re	2070 (1800)	2320 (2050)	2630 (2360)	3040 (2770)	3610 (3340)	4460 (4190)	~5920 (~5650)	2060 (1790)	2300 (2030)	2620 (2350)	3040 (2770)	—	2100 (1830)	2350 (2080)	2680 (2410)	3120 (2850)	—
Ta	2110 (1840)	2350 (2080)	2650 (2380)	3050 (2780)	3590 (3320)	4350 (4080)	~5700 (~5430)	2100 (1830)	2340 (2070)	2650 (2380)	3020 (2750)	—	2130 (1860)	2360 (2090)	2670 (2400)	3070 (2800)	—
W	2250 (1980)	2500 (2230)	2820 (2550)	3220 (2950)	3760 (3490)	4520 (4250)	5800 (5530)	2230 (1960)	2480 (2210)	2810 (2540)	3220 (2950)	—	2270 (2000)	2520 (2250)	2860 (2590)	3290 (3020)	—

### 3.7. Conclusioni

In questo capitolo si è voluto descrivere nel modo più dettagliato possibile l'evoluzione della sorgente di ionizzazione al plasma rispetto al modello utilizzato nell'impianto ISOLDE al CERN. Sono state apportate varie modifiche strutturali per cercare di rendere la sorgente più stabile, duratura ed efficiente. Con questo lavoro di tesi sono stati effettuati vari cambiamenti alla sorgente già sviluppata presso i Laboratori Nazionali di Legnaro, pertanto verranno effettuati vari test per caratterizzarne le potenzialità (vedi capitolo 5). I primi risultati sono stati incoraggianti poiché si è riusciti a ridurre i contaminanti imputabili all'acciaio inox e ad ottenere efficienze paragonabili a quelle presenti in letteratura.

Le scelte progettuali adottate hanno riscosso successo in quanto si è riusciti a ridurre la quantità di contaminanti nel fascio e ad aumentare l'efficienza complessiva della sorgente. Per un livello di corrente tale da mantenere una temperatura del catodo inferiore ai 2200°C (limite di sublimazione del Tantalio in vuoto) si è passati dal 35,5% di Argon nel fascio al 76,5% mentre l'efficienza è aumentata dallo 0,12% al 1,54%.

In ogni caso la sorgente può ancora essere migliorata per garantire efficienze di ionizzazione più elevate.

## **Bibliografia Capitolo 3**

- [1]. G. Vivian, Tesi Magistrale, Studio, Progettazione e Test della sorgente di ionizzazione al plasma per il progetto SPES, Università degli studi di Padova, 2014.
- [2]. Igor L. Shabalin, Ultra-High temperature Materials 1, Springer, 2014
- [3]. L. Pesescu, T. Stora, J. Lettry, G. Catadani, R. Catherall, Arc Discharge Ion Source Development at CERN ISOLDE, U.P.B. Sci. Bull, Series A, 2010.
- [4]. L. Pesescu, R. Catherall, J. Lettry, T. Stora, Development of High efficiency Versatile Arc Discharge Ion Source at CERN ISOLDE, AIP Review id Science Instruments, 2010.
- [5]. A. Theodore Forrester, Large Ion Beams, Wiley Interscience, 1988
- [6]. B. Wolf, Handbook of ion sources, CRC press, 1995

# CAPITOLO 4: CARATTERIZZAZIONE TERMICA DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA

## 4.1 Introduzione

L'analisi di sistemi sempre più complessi ha portato nel tempo allo sviluppo di software capaci di elaborare geometrie complesse ricorrendo a metodi numerici in grado di fornire delle soluzioni approssimate delle equazioni differenziali che governano le interazioni fisiche tra i vari componenti del sistema. Tali interazioni possono riguardare diversi campi fisici come il comportamento strutturale, termico, dinamico, fluidodinamico, ecc... L'utilizzo di questi software però deve essere controllato con cautela dato che le soluzioni ricavate non sono "esatte" ma solo un'approssimazione. Il modello numerico implementato dovrà essere verificato e confermato attraverso uno studio sperimentale. Oltre a questo bisognerà tenere in considerazione anche i tempi di calcolo necessari per ottenere una soluzione accettabile, infatti è inutile spendere troppo tempo utilizzando modelli molto precisi se alla fine questi risultano variabili di poco (4-10%) rispetto ad un modello semplificato e con una suddivisione di elementi grossolana ma che garantisce un tempo di risoluzione di molto inferiore.

In questo capitolo quindi verrà presentata la teoria di base della trasmissione del calore e saranno analizzati più in dettaglio i problemi relativi alle analisi in campo elettrico e termico. Verrà descritto poi il modello numerico sviluppato per lo studio della sorgente spiegando e giustificando le varie semplificazioni e le assunzioni adottate per analizzare il comportamento del sistema in esame con il miglior compromesso fra qualità della soluzione e tempo di calcolo.

Inoltre verrà presentata la validazione del modello numerico tramite confronto con misure sperimentali. E' stata utilizzata un'apposita apparecchiatura per misurare le alte temperature (*high temperature*: HT), il cui unico scopo è riscaldare per effetto joule i componenti inseriti nella camera, il tutto sotto vuoto spinto.

Si ricorda che nel caso della sorgente al plasma, l'efficienza di ionizzazione è fortemente influenzata dagli elettroni prodotti dal catodo. In generale si ha un aumento dell'efficienza all'aumentare della corrente elettronica. I due parametri principali di influenza dell'emissione di elettroni sono: la temperatura del catodo ( $T_{cath}$ ) e la distanza di separazione anodo-catodo ( $a$ ). Si ricorda che la temperatura  $T_{cath}$  controlla la massima quantità di elettroni emessi dal catodo secondo la formula di Richardson, mentre il *gap* ( $a$ ) tra anodo e catodo regola la massima corrente che può essere trasmessa tra i due elettrodi, la quale è esprimibile secondo la legge di Child-Langmuir. Il parametro che regola le prestazioni del sistema risulta essere la corrente di alimentazione poiché il riscaldamento per effetto Joule influenza sia il campo termico che il gap tra anodo e catodo il quale risulta dipendente dalle dilatazioni termiche relative. Si capisce pertanto come sia essenziale conoscere il campo termico della sorgente per valutarne le prestazioni.

In seguito verranno presentati i risultati ottenuti nelle varie simulazioni e tali risultati verranno confrontati con dati precedentemente ricavati in altre tesi.[<sup>6</sup>]

## 4.2 Analisi accoppiate Elettro-Termiche [3]

L'analisi della sorgente PIS risulta molto complessa in quanto sono presenti due campi fisici: quello elettrico e quello termico. La soluzione del campo elettrico viene presa come input dal campo termico e la soluzione di output del campo termico entra come input nelle equazioni relative al campo elettrico.

Trattandosi di un problema che coinvolge due campi fisici, le analisi condotte sono di tipo accoppiato: i 2 campi (termico ed elettrico) interagiscono tra loro fino ad arrivare a convergenza. Questo tipo di accoppiamento si dice di tipo *two-way*. Le analisi di questo tipo non necessitano di *mesh* molto fitte, tuttavia i tempi di calcolo delle equazioni che regolano il fenomeno fisico sono elevati.

La sorgente in esame lavora in condizioni di alto vuoto (circa  $10^{-6}$  mbar) e raggiunge, per effetto joule temperature superiori ai 2000 °C; in tali condizioni operative la maggior parte del calore viene scambiato per radiazione, una piccola parte (circa un ordine di grandezza inferiore) viene scambiato per conduzione, mentre lo scambio per convezione risulta praticamente nullo.

In Ansys® viene implementato lo scambio per radiazione attraverso il metodo "*Radiosity Solver*" che permette l'introduzione di valori di emissività dei materiali dipendenti dalla temperatura. E' stata altresì implementata la dipendenza dalla temperatura di tutte le proprietà fondamentali dei materiali, quali curva di sforzo-deformazione, conduttività elettrica e termica, resistività, calore specifico, ecc. A tale scopo sono state create delle macro, sottoprogrammi richiamati dal codice di calcolo, contenenti tabelle con le varie proprietà dei materiali al variare della temperatura (vedi Appendice B).

La Figura 4-1 schematizza il problema della trasmissione del calore con modalità accoppiata conduttiva e radiativa in una regione solida D con all'interno una zona vuota con delle superfici affacciate.

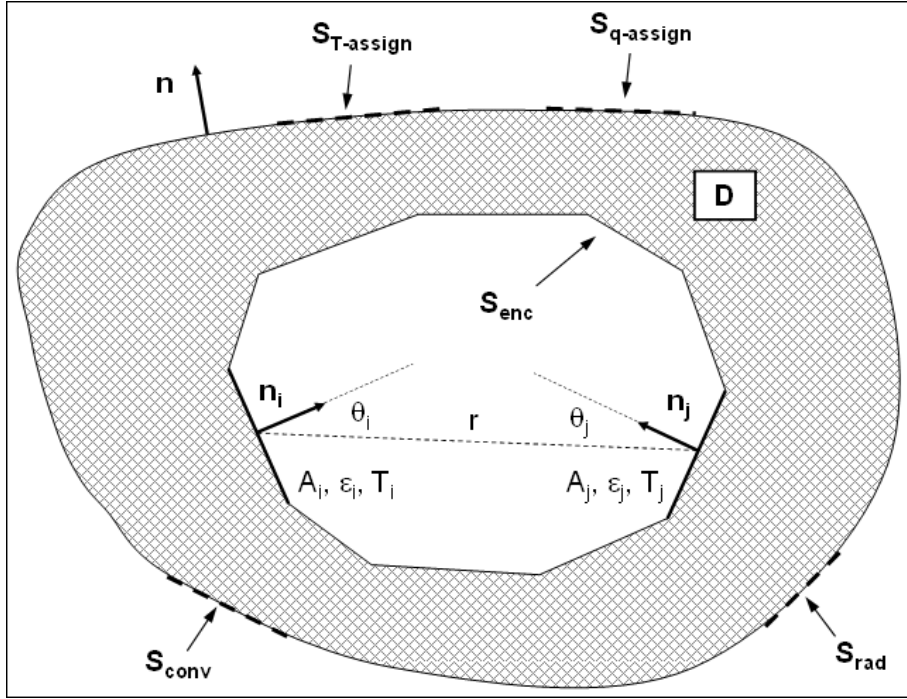


Figura 4-1: schema che spiega il flusso di calore all'interno di una regione solida D (per conduzione) con una superficie interna  $S_{enc}$  formata da delle superfici  $A_i$  che scambiano il calore fra di loro per radiazione [2].

La conduzione è descritta dall'equazione generale della conduzione (in coordinate cartesiane) [3]:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + H \quad (4.1)$$

dove  $c$ ,  $\rho$  e  $\lambda$  sono rispettivamente calore specifico a volume costante, densità e conducibilità termica del materiale,  $t$  è la temperatura in °C,  $H$  è detta *intensità di generazione interna*, cioè l'energia prodotta nel corpo per unità di volume e  $x$ ,  $y$ ,  $z$  sono le coordinate del punto considerato. Le condizioni iniziali vengono fornite assegnando ad ogni punto di  $D$  (individuabile con le coordinate cartesiane) una temperatura iniziale al tempo 0:

$$t(x, y, z, 0) = t_i(x, y, z) \quad \forall (x, y, z) \in D \quad (4.2)$$

mentre le condizioni al contorno possono essere definite assegnando la temperatura sulle superfici esterne del corpo, il flusso di calore incidente su tali superfici e il flusso di calore fra le superfici chiuse (tale flusso termico è radiativo se consideriamo che ci sia il vuoto nel volume):

$$t(x, y, z, \tau) = t_{assign}(x, y, z) \quad \forall (x, y, z) \in D \quad (4.3)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n}(x, y, z) = q_{assign} + q_{conv} + q_{rad} \quad \forall (x, y, z) \in (S_{q-assign} \cup S_{conv} \cup S_{rad}) \quad (4.4)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n}(x, y, z) = q_{enc} \quad \forall (x, y, z) \in S_{enc} \quad (4.5)$$

l'equazione 4.3 rappresenta un vincolo sulle temperature, si può usare nel caso si abbia ad esempio una refrigerazione su una superficie che la mantenga a temperatura costante oppure nel caso si metta in contatto il corpo con un oggetto caldo di cui si conosce il campo termico e di cui la capacità termica sia approssimabile come infinita. Le derivate nelle equazioni 4.4 e 4.5 sono svolte rispetto al versore  $n$  normale alla superficie  $S$ . I termini  $q_{conv}$  e  $q_{rad}$  rappresentano i flussi calore termici e radianti di corpi esterni non considerati nel modello, che agiscono sulle porzioni di bordo  $S_{conv}$  ed  $S_{rad}$  e sono descritti dalle equazioni:



$$q_{conv} = \alpha(t - t_c) \quad (4.6)$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_r^4) \quad (4.7)$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di scambio termico convettivo sulla superficie  $S_{conv}$ ,  $t_c$  è la temperatura del fluido a contatto con tale superficie,  $\varepsilon$  è l'emissività emisferica totale del materiale della superficie  $S_{rad}$  supposta grigia,  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann e  $T_r$  è la temperatura assoluta di riferimento dell'ambiente esterno, inteso come una superficie di estensione molto maggiore di  $S$  che circonda completamente il corpo. È chiaro che nella superficie interna  $S_{enc}$  l'equazione principale è la 4.5, e che in assenza di uno scambio termico convettivo su tale superficie (spazio vuoto all'interno del corpo) il flusso  $q_{enc}$  diventa uguale al flusso termico conduttivo nel materiale.

La soluzione del problema radiativo, cioè la determinazione di  $q_{enc}$ , ipotizzando di avere  $N$  superfici coinvolte, grigie e con proprietà di irraggiamento indipendenti dalla direzione, ognuna caratterizzata da un valore di temperatura e flusso radiativo netto scambiato:

$$\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{j-i} \left( \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \right] q_{enc,i} = \sum_{i=1}^N (\delta_{ij} - F_{j-i}) \sigma T_i^4 \quad (4.8)$$

dove  $\delta_{ij}$  è il simbolo di Kronecker (vale 1 se  $i = j$ , 0 altrimenti),  $\varepsilon_i$  è l'emissività emisferica globale della superficie  $i$ -esima,  $F_{i-j}$  è il fattore di vista fra le superfici  $i$ -esima e  $j$ -esima,  $q_{enc,i}$  è il flusso termico radiativo netto scambiato dalla superficie,  $T_i$  è la sua temperatura assoluta. Il fattore di vista  $F_{i-j}$  si calcola dalla formula:

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_j} \int_0^{A_i} \int_0^{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (4.9)$$

dove le entità geometriche sono riferite alle Figura 4-1e rappresentano la distanza fra le aree, l'estensione delle aree stesse ( $A_i$  e  $A_j$ ) e gli angoli fra la congiungente (direzione di  $r$ ) e il versore normale  $n$  ( $\theta_i$  e  $\theta_j$ ). Il fattore di vista dipende ovviamente dalla qualità della mesh utilizzata; più fine è la mesh e più realistico sarà il fattore di vista. Si rammenta che tale calcolo produce un file con estensione *.vf* che risulta essere molto ingombrante anche con *mesh* grossolane.

Per quanto riguarda il comportamento elettrico di un corpo, è possibile fare riferimento alle leggi di Ohm, scegliendo la formulazione generale nel caso la resistività dei materiali vari con la temperatura:

$$\mathbf{j} = - \frac{1}{\rho(T)} \nabla V \quad (4.10)$$

dove  $\rho(T)$  è la resistività dei materiali in funzione della temperatura assoluta,  $\mathbf{j}(x,y,z)$  è la densità di corrente elettrica e  $\nabla V$  è il gradiente del potenziale elettrico  $V(x,y,z)$ . Se le condizioni del sistema sono stazionarie, vale l'equazione di continuità nella forma:

$$\nabla * \mathbf{j} = 0 \quad (4.11)$$

Cioè la divergenza del vettore  $\mathbf{j}$  è nulla, inoltre, dalla formulazione dell'effetto Joule, la dissipazione di calore di un corpo per unità di volume  $\mathbf{H}(x,y,z)$ , nell'equazione 4.1, può essere calcolata dalla seguente:

$$\mathbf{H} = -\nabla V * \mathbf{j} \quad (4.12)$$

### 4.3 Modello numerico della sorgente con supporto in Grafite

Per costruire il modello numerico della sorgente si è partiti dalla conoscenza della geometria definita durante lo studio del nuovo design. Ansys® presenta al suo interno un modellatore solido che può essere utilizzato per costruire semplici geometrie. Durante questa tesi è stato utilizzato tale ambiente solo per definire le aree in cui assegnare le condizioni al contorno poiché l'elaborazione di geometrie complesse risulta difficoltosa e dispendiosa in termini di tempo. Pertanto per generare le geometrie si è fatto ricorso ad un modellatore solido appositamente studiato allo scopo di creare geometrie tridimensionali complesse (Creo Parametric®) (Figura

4-2) e successivamente sono state importate in Ansys® previa semplificazione e conversione dei file in formato IGES (.iges/.igs).

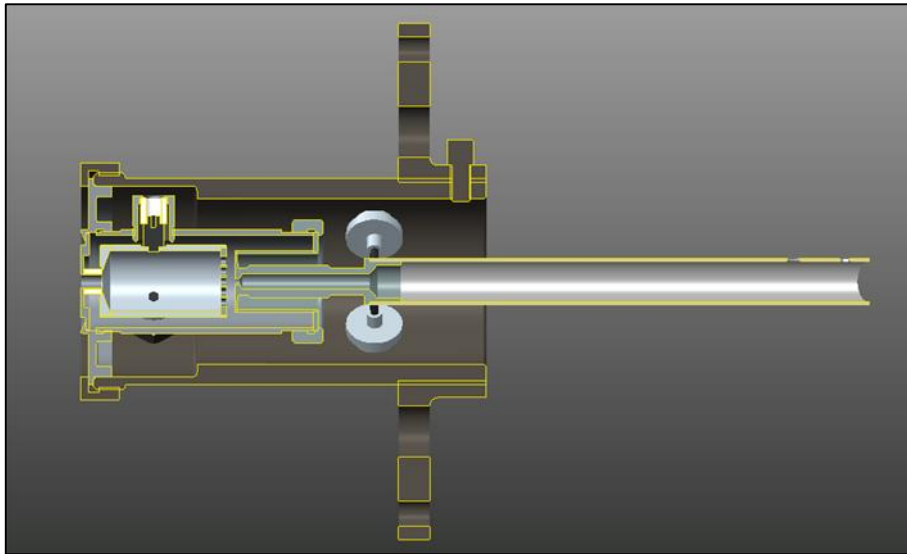


Figura 4-2: Modello geometrico della nuova PIS vista in sezione

I file vengono creati a partire dall'assieme della sorgente, pertanto nei vari file .iges viene tenuta traccia della posizione assoluta dei vari componenti; una volta importati in Ansys® viene ricostruito l'assieme, va ricordato però che i vari pezzi sono visti come volumi a se stanti. Su tali geometrie viene successivamente steso il reticolo di elementi necessari per la discretizzazione del modello. L'operazione di stesura del reticolo prende il nome di "meshatura", mentre l'insieme degli elementi che vengono creati è detto "mesh". (Figura 4-3).

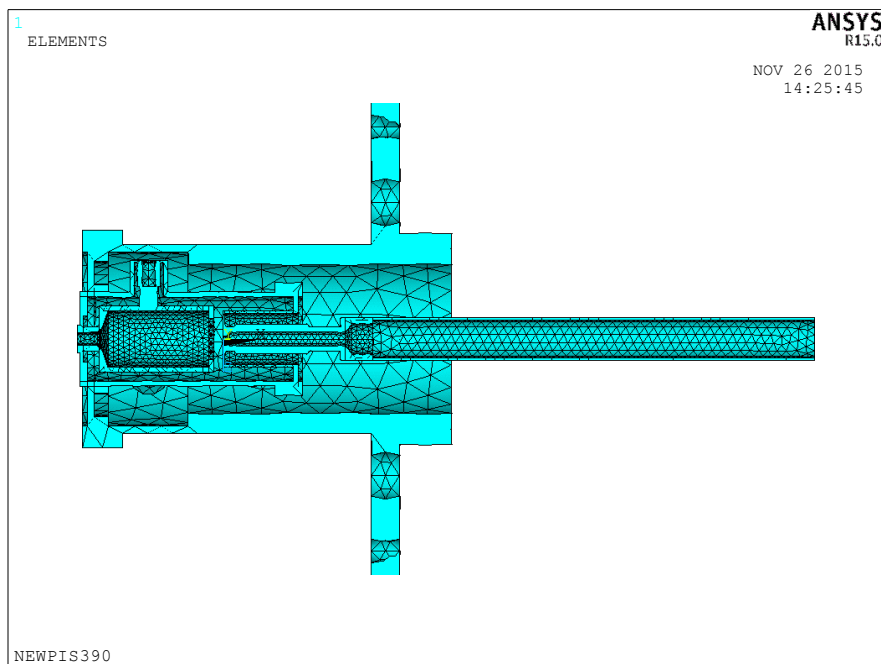


Figura 4-3: Geometria della nuova PIS discretizzata con elementi solid226

Anche se è possibile importare nel software oggetti con forme molto complesse, non è conveniente dal punto di vista computazionale operare in questo modo. Innanzitutto bisogna dire che per analisi elettrotermiche le geometrie possono essere approssimate togliendo tutti gli smussi e i raccordi presenti in quanto creano un infittimento della mesh in tali zone oppure si può verificare la creazione di elementi con forme molto allungate. Quando ciò si verifica il software lo comunica all'utente attraverso un messaggio di "warning". Tuttavia se gli elementi deformati sono pochi è possibile comunque avviare la soluzione ed ottenere risultati accettabili.

Un'altra semplificazione che deve essere fatta è quella di eliminare gli spigoli con angoli molto acuti, pena la deformazione del reticolo della *mesh*; molte volte tale operazione è costretta poiché il software non consente la *meshatura* dei volumi. E' possibile semplificare ulteriormente la geometria eliminando alcuni fori, soprattutto quelli di dimensioni ridotte a maggior ragione se sono posizionati in zone dove si prevede una *mesh* grossolana. Ulteriore semplificazione può essere fatta eliminando tutte le filettature, instaurando così un contatto perfetto tra i giunti filettati. Siccome i vari pezzi geometrici importati sono visti come componenti a se stanti, anche se posizionati correttamente nello spazio, è necessario utilizzare un apposito comando (*VGLUE*) in grado di creare una continuità di contatto tra di essi. In pratica tale comando prende due volumi e li sostituisce con altrettanti identici ma con l'area di contatto in comune. Tale semplificazione porta inevitabilmente a risultati differenti tra modello numerico e realtà poiché si ha una diminuzione della resistenza elettrica di contatto.

Nel modello su cui è stata svolta l'analisi, oltre ad eliminare spigoli, smussi e filettature, si è deciso di descrivere il catodo come componente unico invece che come assemblato di tre parti, anche se questo dettaglio è trascurabile poiché in realtà vengono saldati assieme perciò è realmente ristabilita la continuità del materiale. I supporti dell'anodo sono stati semplificati: i dadi vengono schematizzati come cilindri attaccati alla camera di scarica e i puntali di supporto sono schematizzati come cilindri attaccati alla camera di anodo. Lo stesso anodo è stato semplificato considerando il corpo formato da un cilindro così come per la camera di scarica. Anche se tale semplificazione può sembrare brutale per via dei diversi materiali utilizzati, si vedrà che l'utilizzo di materiali diversi incide di poco sul campo termico relativo al catodo. Il sistema di supporto in Grafite è stato unito in un unico corpo geometrico (flangia, camera di sostegno e ghiera). Ovviamente le unioni delle geometrie può essere fatta solo per corpi con le medesime proprietà fisiche. Anche l'estrazione è stata semplificata molto in quanto la sua complessa geometria portava ad una *mesh* troppo fine, allungando di conseguenza i tempi di calcolo (Figura 4-4).

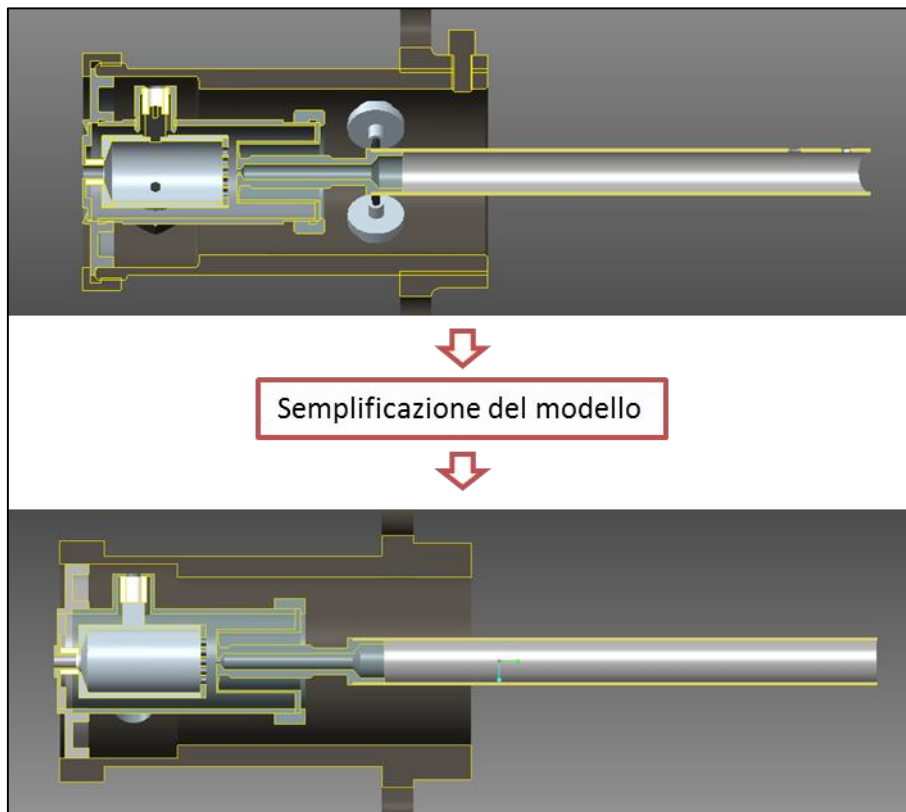


Figura 4-4: Passaggio dal modello geometrico completo ad un modello semplificato per una corretta stesura della mesh

Nel modello FEM non si è tenuto in considerazione della presenza della crociera di allineamento in quanto si pensa che questa non sia incisiva nel calcolo del campo termico sulla faccia del catodo, dato necessario per il calcolo della corrente elettronica e quindi per la stima dell'efficienza della sorgente. Non è stata modellata nemmeno la camera da vuoto, in quanto da analisi effettuate in precedenti lavori di tesi tale semplificazione influenzava i risultati con una differenza inferiore all'1%. Si è preferito eliminare anche la connessione elettrica in quanto anch'essa influenzava poco il campo termico della sorgente rispetto al modello attuale con una transfer line più lunga sulla cui estremità è stato applicato il carico elettrico. Una volta importato il modello così semplificato in Ansys® si è proseguito il lavoro discretizzando la geometria. Per ottenere risultati

confrontabili, sono state usate le stesse dimensioni degli elementi ricavate da un'analisi di convergenza effettuata in un precedente lavoro di tesi [6].

In Ansys® è possibile realizzare analisi in cui il problema termico e quello elettrico sono accoppiati utilizzando elementi tridimensionali del tipo SOLID226, costituiti da 20 nodi ognuno dei quali ha un massimo di 5 gradi di libertà (Figura 4-5). Tali elementi consentono un'ampia varietà di applicazioni considerando diverse tipologie di problemi accoppiati. Utilizzando le opportune impostazioni (KEYOPT,1) tra le proprietà dell'elemento vengono selezionate la tipologia di analisi elettrotermica e i gradi di libertà per ciascun nodo vengono fissati pari a due, ossia la temperatura ed il potenziale elettrico. Le opzioni di questo elemento consentono le creazioni di geometrie di suddivisione di forma tetraedrica o esaedrica.

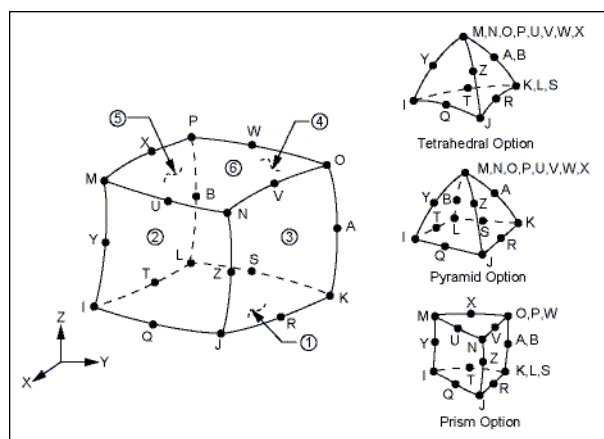


Figura 4-5: Elemento SOLID226

Gli elementi a sei facce sono quelli che permettono di ottenere una soluzione migliore, ma tale tipologia richiede geometrie di forma regolare ed una dimensione della *mesh* ridotta. Se si desidera studiare un elemento molto sottile come ad esempio un tubo, quindi un elemento con grande estensione in una direzione e piccola nell'altra, l'utilizzo di elementi cubici provoca la creazione di numerosi elementi che aumentano notevolmente la durata della soluzione. Nelle analisi elettrotermiche il numero di elementi, e quindi di nodi, influenza pesantemente la durata della soluzione dato che il problema della radiazione termica è regolato dalla quarta potenza della temperatura quindi si dovrà risolvere un sistema non lineare attraverso un metodo iterativo.

Tabella 4-1: Dimensione della *mesh* stabilita dopo un'analisi di convergenza

Nome componente	ESIZE [m]
Anodo	0.0013
Camera di supporto	0.0058
Flangia di supporto	0.0058
Isolatori di supporto dell'anodo	0.0018
Griglia	0.0017
Connessione elettrica	0.0060
Linea di trasferimento	0.0020
Vite di chiusura della linea	0.0020
Catodo	0.0014
Ghiera di sostegno del catodo	0.0020
Camera di scarica	0.0030
Scudi termici	0.0018
Flangia finale	0.0033
Flangia di scarico dell'anodo	0.0016

### 4.3.1 Carichi e condizioni al contorno

Una volta discretizzato il modello geometrico ed aver così ottenuto un modello numerico, è possibile applicare tutti i carichi esterni di origine termica ed elettrica agenti sul sistema. Si ricorda che per avere un confronto diretto con i dati ottenuti nei precedenti lavori di tesi è stato necessario fornire gli stessi carichi termici ed elettrici precedentemente esaminati [6]. Nella situazione reale di lavoro, la sorgente è contenuta nella camera, il cui il piatto viene raffreddato da un liquido, solitamente acqua, che rappresenta un flusso termico per

convenzione forzata, mentre sul coperchio agisce l'effetto convettivo naturale dell'aria nell'ambiente esterno. Per semplificare il problema, evitando di inserire carichi convettivi e conduttivi, si vincola inizialmente la superficie della flangia di supporto in contatto col piatto. Viene pertanto stabilita una temperatura ambientale iniziale valutabile in circa 50°C, temperatura alla quale si porta la camera da vuoto in modalità operativa.

La stessa temperatura è stata assegnata anche come vincolo per la superficie della flangia di supporto della sorgente posta a contatto con la camera per simulare l'azione del circuito di raffreddamento. Per fare ciò, si è dovuto dividere l'area frontale della flangia in due anelli, su quello esterno è stato applicato il carico termico ( $T_{amb}$ ) ed elettrico (0V). All'inizio della linea di trasferimento è stata assegnata una corrente, detta di linea, che rappresenta il carico elettrico che riscalda il catodo per effetto joule; si assegna ad un nodo alla base del cilindro il valore  $I_{LINE}$ , poi gli altri nodi appartenenti alla stessa area assumono in automatico lo stesso valore (Figura 4-6). Tale corrente viene imposta come parametro che potrà essere variato per consentire l'esecuzione di più analisi delle temperature raggiunte sulla faccia del catodo. Il valore nullo di potenziale applicato alla flangia del sistema di sostegno serve per creare il percorso che dovrà seguire la corrente.

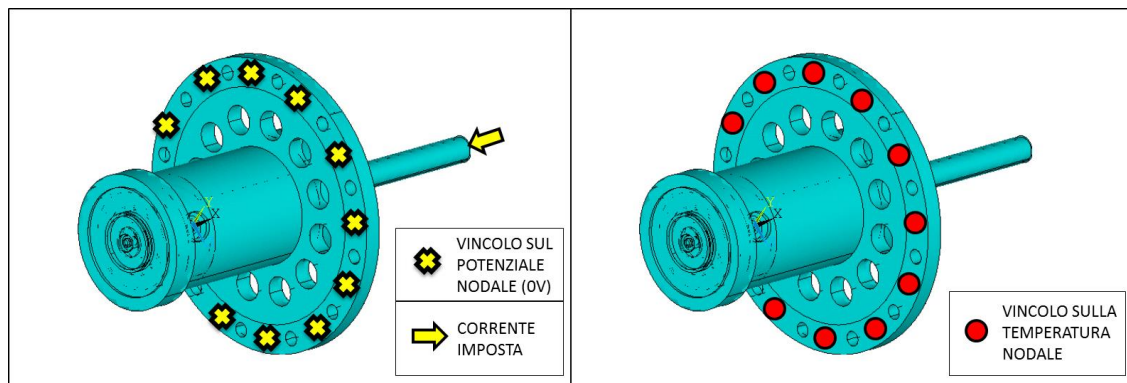


Figura 4-6: Carichi elettrici e termici applicati al modello standard della sorgente di ionizzazione al plasma

Infine è stato definito, sulle superfici di tutti i corpi, il flusso termico radiativo (ovvero vengono impostate le superfici radianti) dopo aver rimosso le aree di intersezione, poiché, essendo interne ai volumi, non sono irradiate da nessun corpo e a loro volta non emettono radiazione: bisogna infatti ricordare l'ipotesi iniziale di considerare tutti i componenti come saldati tra loro.

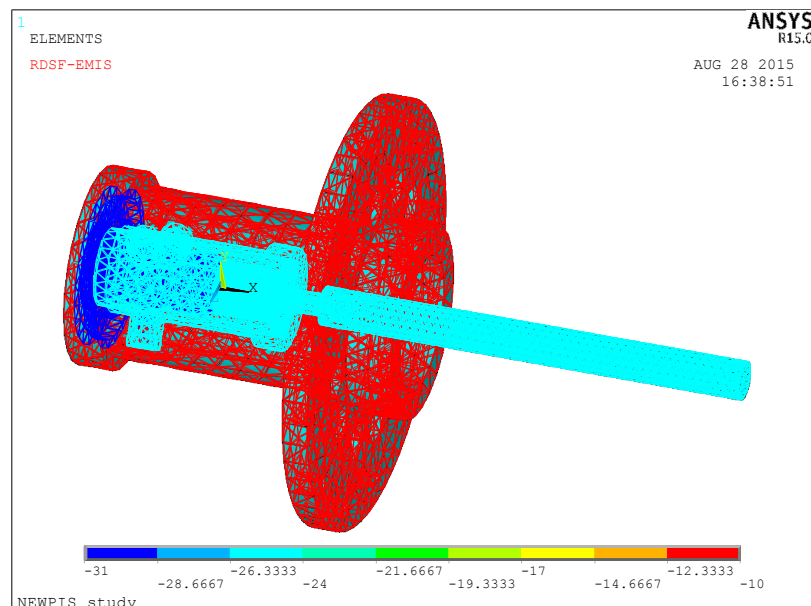


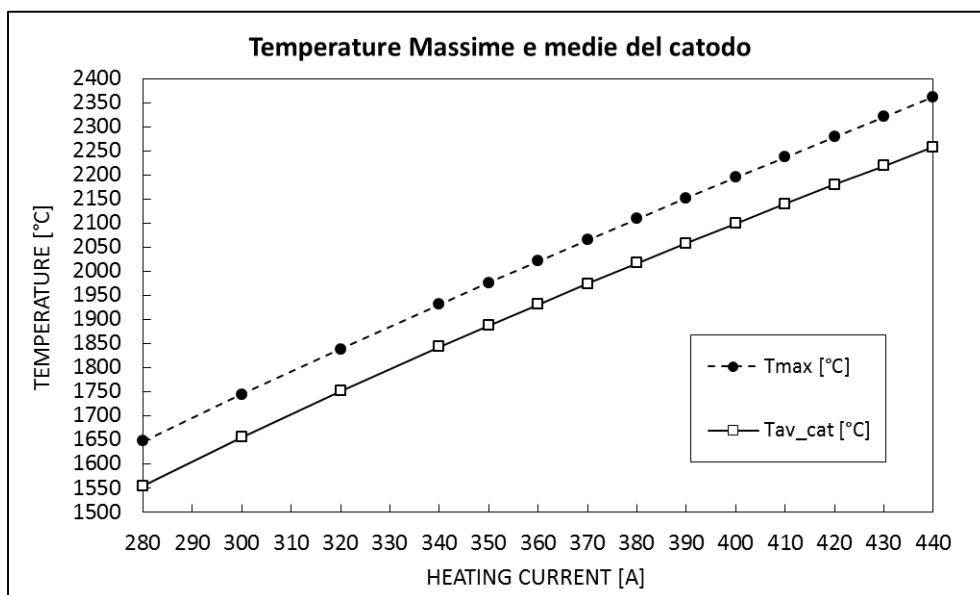
Figura 4-7: Carichi termici radiativi. La legenda colorata indica il diverso materiale utilizzato (Rosso per la Grafite, Azzurro per il Tantalio e Blu per il Molibdeno)

### 4.3.2 Risultati delle analisi sulla sorgente

Con il modello numerico costruito come illustrato nei precedenti paragrafi, sono state svolte delle analisi per studiare il comportamento della sorgente. E' stato valutato il campo termico per vari valori della corrente di linea, da 280 fino a 340 A incrementando la corrente di 20 A, e da 340 a 440 A con incrementi di 10 A per ogni analisi. Nella Figura 4-9 e Figura 4-11 sono rappresentati i dati relativi alle analisi numeriche effettuate per la valutazione del campo di temperatura del catodo ottimizzato (SPES). I valori della temperatura media ( $T_{av}$ ) della temperatura massima ( $T_{max}$ ) sono stati ricavati facendo la media dei valori di temperatura nodali dell'intero corpo del catodo.

**Tabella 4-2: Temperature massime e medie raggiunte dal catodo**

<b>I_LINE [A]</b>	<b>Tmax [°C]</b>	<b>Tmedia [°C]</b>
280	1648	1555
300	1744	1655
320	1839	1751
340	1931	1843
350	1976	1887
360	2021	1931
370	2065	1974
380	2109	2016
390	2152	2058
400	2195	2099
410	2237	2140
420	2279	2179
430	2320	2219
440	2362	2258



**Figura 4-8: Temperature massime e medie del catodo per diversi valori di corrente di alimentazione**

Si è pensato anche di valutare l'andamento radiale della temperatura della faccia frontale del catodo, in quanto da essa dipende la produzione di corrente elettronica quindi la prestazione della sorgente. E' stato quindi creato un PATH sulla faccia frontale (Figura 4-9) con vettore lungo l'asse delle X. La scelta del raggio su cui effettuare il rilievo non influenza il risultato poiché l'assial-simmetria della geometria garantisce un campo simile lungo tutte le direzioni radiali (Figura 4-10).

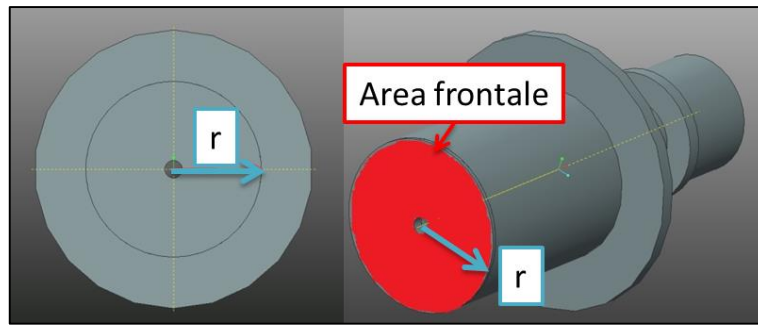


Figura 4-9: Rappresentazione del raggio su cui vengono ricavate le temperatura (sinistra) e area di riferimento per il calcolo della temperatura media e della corrente elettronica (destra)

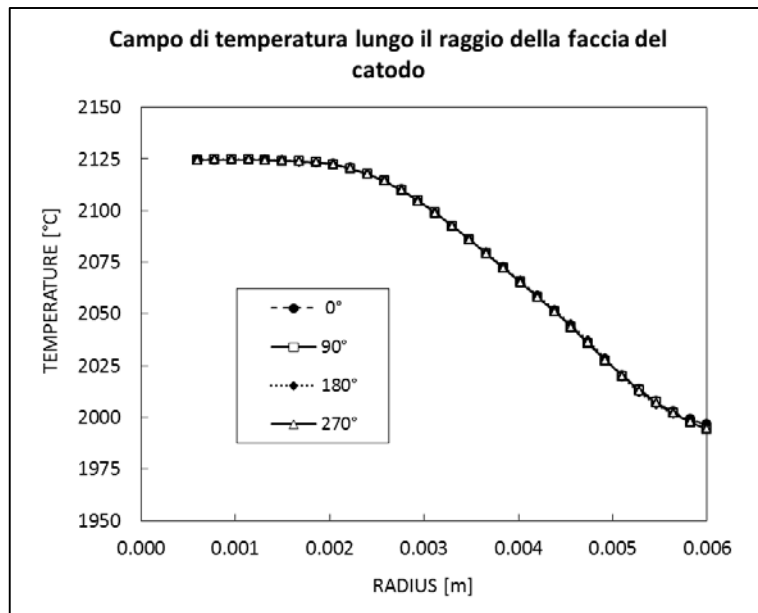


Figura 4-10: Campo di temperatura lungo il raggio della faccia frontale del catodo. Dati ricavati per i raggi ruotati rispetto all'asse X di un angolo pari a: 0°, 90°, 180°, 270°.

Si riportano in Figura 4-11 i campi di temperatura trovati per i diversi valori della corrente di alimentazione analizzati. Queste curve hanno una grande importanza poiché saranno utilizzate in seguito per il calcolo della corrente elettronica e quindi forniscono un'indicazione importante per quanto riguarda le prestazioni della sorgente.



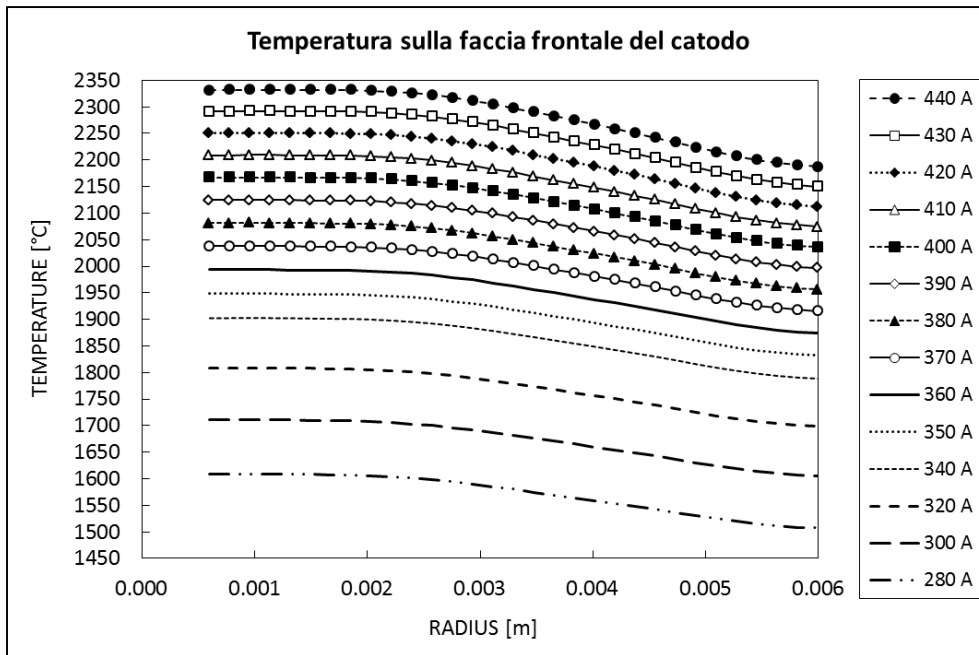


Figura 4-11: Andamento delle temperature lungo il raggio sulla faccia frontale del catodo

Per gli stessi intervalli di corrente di alimentazione, si sono ricavate le temperature massime e medie che si sviluppano internamente all'anodo (Figura 4-12). E' importante conoscere la temperatura di questo componente poiché un valore troppo basso potrebbe influire negativamente sulla ionizzazione. Si nota che la differenza tra la temperatura massima e quella media aumenta incrementando la corrente di alimentazione; questo fatto accade poiché l'anodo viene riscaldato solo per irraggiamento, quindi la griglia che si trova di fronte al catodo, subirà un incremento maggiore di temperatura rispetto al tappo di estrazione.

Tabella 4-3: Temperature massime e medie raggiunte dall'anodo

I_LINE [A]	Tmax [°C]	Tmedia [°C]
280	752	717
300	857	812
320	959	905
340	1058	993
350	1105	1036
360	1152	1077
370	1197	1117
380	1241	1155
390	1283	1192
400	1325	1228
410	1365	1263
420	1405	1297
430	1444	1330
440	1482	1362

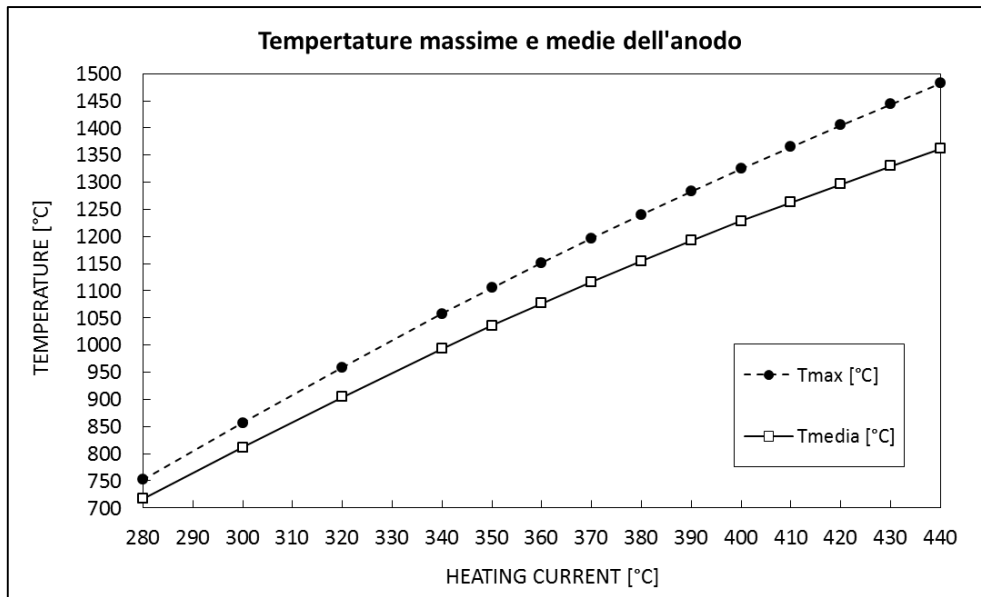


Figura 4-12: Temperature massime e medie dell'anodo per diversi valori di corrente di alimentazione

Nella Figura 4-14 sono riportati gli andamenti della temperatura lungo una generatrice dell'anodo. Si nota una riduzione della temperatura andando dalla zona della griglia verso il foro di estrazione. Il campo termico dell'anodo, pur non influenzando sulla corrente elettronica prodotta dal catodo, incide sull'efficienza in quanto tende a modificare la temperatura degli atomi e degli elettroni e quindi la loro energia complessiva: una minor energia implica anche una minore possibilità di far avvenire il processo di ionizzazione. Un altro aspetto importante da considerare è la possibilità di contaminazione dell'oggetto, in quanto elementi che sono sublimati da zone troppo calde della sorgente tendono ad attaccarsi alle pareti più fredde dell'anodo andando a modificare quindi il suo comportamento termico.

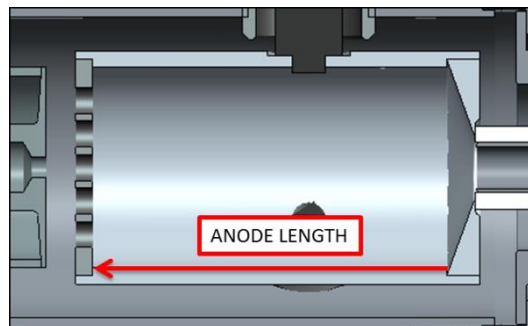


Figura 4-13: PATH lungo la generatrice interna dell'anodo. Vengono evitati i puntalini.

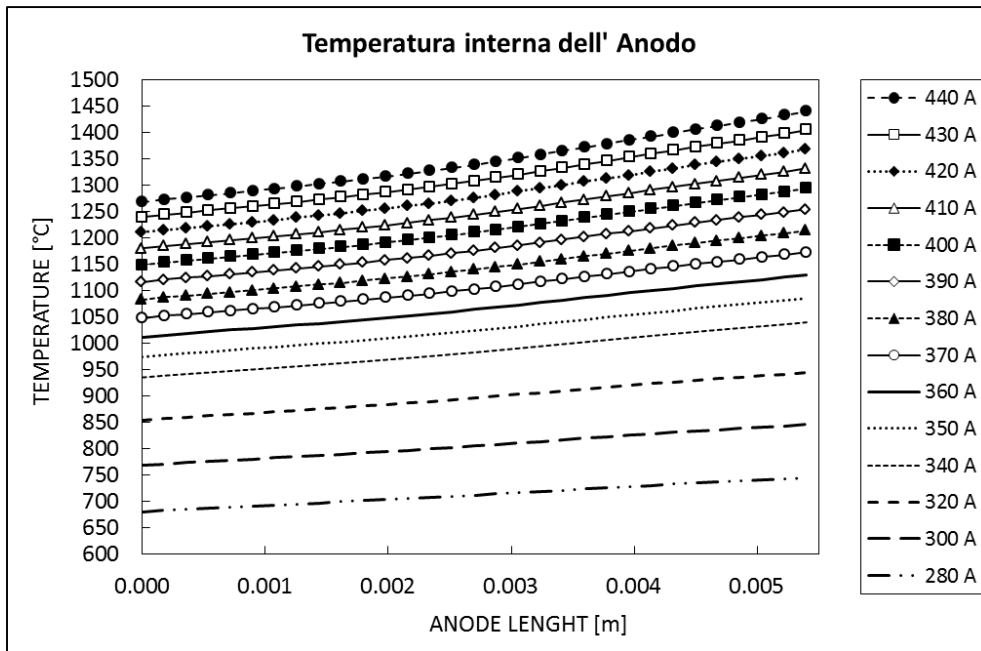


Figura 4-14: Andamento delle temperature lungo la generatrice interna dell'anodo che non interseca i puntalini di supporto

E' stato analizzato anche il campo termico del sistema di supporto in Grafite. Si è ricavato il campo di temperatura dell'oggetto creando un PATH interno al supporto che va dalla parte frontale della sorgente, dove è alloggiata l'estrazione, alla parte posteriore interna alla camera da vuoto (Tabella 4-14).

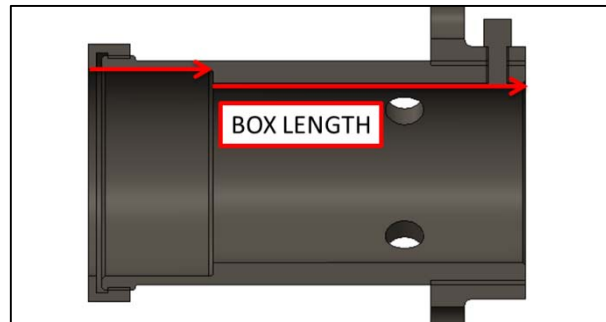


Figura 4-15: PATH lungo la generatrice interna del sistema di supporto.

In Figura 4-16 viene riportato il grafico rappresentativo dei path creati. Si vede come le temperature più elevate siano situate nella parte frontale, vicino alla zona di estrazione. Questo è dovuto essenzialmente alla resistenza elettrica che si forma per via della riduzione della sezione di passaggio della corrente. Un effetto aggiuntivo di resistenza elettrica viene dato, nella realtà sperimentale, dalle resistenze di contatto tra il supporto in Grafite e la flangia di estrazione in Molibdeno; pertanto il valore massimo che si raggiunge nella realtà può essere anche maggiore.

Tabella 4-4: Temperature massime raggiunte dal sistema di supporto

I_LINE [A]	Tmax [°C]
280	418
300	463
320	507
340	552
350	573
360	595
370	616
380	637
390	658

400	678
410	697
420	717
430	735
440	754

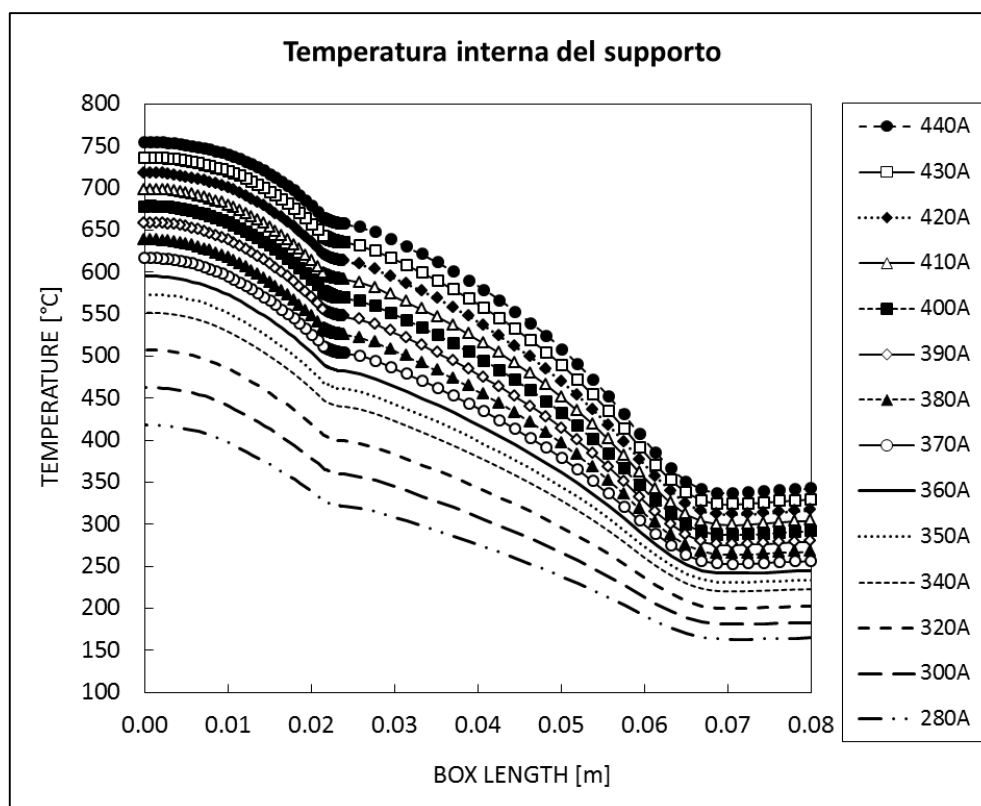


Figura 4-16: Andamento delle temperature lungo la generatrice interna del sistema di supporto.

Oltre ai dati riguardanti la temperatura sono stati rilevati anche i dati relativi alle differenze di potenziale necessarie per alimentare la sorgente. Con questi valori, nota la corrente di alimentazione, è possibile calcolare la potenza elettrica teorica necessaria per alimentare la sorgente. In Tabella 4-5 vengono riportati i valori trovati.

Tabella 4-5: Valori di differenza di potenziale e potenza teorica necessaria per alimentare la sorgente

I <sub>LINE</sub> [A]	$\Delta V_{FEM\_ST}$ [V]	P <sub>FEM\_ST</sub> [W]
280	2.71	759
300	2.97	891
320	3.23	1034
340	3.50	1190
350	3.63	1271
360	3.77	1357
370	3.91	1447
380	4.05	1539
390	4.19	1634
400	4.34	1736
410	4.48	1837
420	4.63	1945
430	4.78	2055
440	4.93	2169

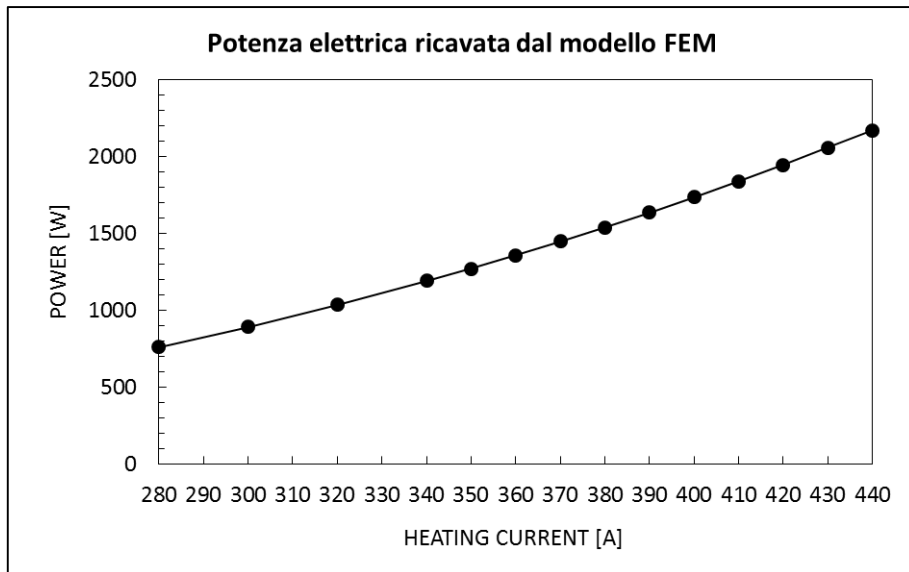


Figura 4-17: Potenza elettrica ricavata dal modello numerico della sorgente con supporto in Grafite

### 4.3.3 Calcolo della corrente elettronica

L'analisi FEM del modello della sorgente, seppur semplificato, consente di ottenere importanti informazioni per quanto riguarda il comportamento fisico del sistema una volta entrato in funzione. Infatti, conoscendo il campo di temperatura della sorgente, è possibile attraverso formule analitiche ricavare la quantità di corrente elettronica che passa dal catodo all'anodo. Questa quantità è strettamente collegata all'efficienza di ionizzazione della sorgente al plasma e quindi risulta un parametro molto utile per riuscire ad ottimizzare la sorgente nel modo corretto.

Per il calcolo analitico si fa riferimento alla legge di Richardson che esprime la densità di corrente  $j_{es}$  che un elettrodo metallico è in grado di emettere da una sua superficie piana scaldata alla temperatura  $T$ . La superficie a cui si fa riferimento nel caso in esame è la faccia frontale del catodo disposta parallelamente alla griglia dell'anodo in quanto da essa si liberano elettroni per effetto termoionico che vengono poi accelerati attraverso una differenza di potenziale all'interno della camera di anodo. Qui colpiscono gli atomi di gas ai quali viene strappato un elettrone per bombardamento elettronico. E' evidente che maggiore sarà il numero di elettroni che si liberano dalla faccia frontale del catodo e maggiore sarà l'efficienza di ionizzazione per bombardamento elettronico.

Per calcolare la corrente elettronica quindi bisognerebbe ricavare in ogni punto della superficie di emissione la densità di corrente attraverso la formula di Richardson e successivamente calcolare l'integrale esteso a tutta l'area di tale formulazione:

$$I_{el-Rich} = \int_0^A j_{eS} dA = \int_{r_i}^{r_e} 2\pi r j_{eS} dr \quad (4.13)$$

dove si è considerato di suddividere l'area in anelli di spessore infinitesimo  $dr$  e di raggio interno  $r$  e  $j_{eS}$  era stata definita nell'equazione 2.4, e viene qui richiamata:

$$j_{eS} = AbT^2 \exp\left(-\frac{e\Phi}{kT}\right) \left[\frac{A}{cm^2}\right] \quad (4.14)$$

La temperatura da inserire nell'equazione è quella locale della zona con raggio  $r$  dall'asse del catodo, le altre costanti sono ricavabili dalle tabelle nel Capitolo 2, in particolare per il Tantalio si avrà  $\Phi = 4.12 V$ ,  $A*b = 60 Acm^{-2}K^{-2}$ ,  $k$  ed  $e$  sono la costante di Boltzmann e la carica di un singolo elettrone che valgono  $k = 1.38*10^{-23} JK^{-1}$ ,  $e = 1.602*10^{-19} C$ .

Tale formulazione è utilizzabile solo se si conoscono esattamente l'andamento della temperatura lungo il raggio  $r$ . Dal codice di calcolo non è possibile ricavare un andamento continuo di temperatura lungo il raggio ma un andamento puntuale attraverso la funzione *PATH* di Ansys®. Tale funzione esporta i risultati scelti, lungo una

direzione rettilinea discretizzando il percorso scelto. Più fitta è la discretizzazione e più precisa risulta la semplificazione dovuta a tale funzione.

Pertanto  $dr$  non sarà più infinitesimo, ma sarà scelto in base al numero di suddivisioni che si decidono di adottare: ad esempio, nel nostro caso, è stato deciso di rilevare la temperatura dal punto del bordo interno della faccia ( $r_{int} = 0.6 \text{ mm}$ ) al punto del bordo esterno ( $r_{est} = 6.0 \text{ mm}$ ), per un totale di 30 punti, perciò si avrà che  $\Delta r = (r_e - r_i)/30 = 0.18 \text{ mm}$  ( $\Delta r$  si differenzia da  $dr$  in quanto è una differenza finita e non un differenziale infinitesimo). Un'altra semplificazione che si fa con tale formulazione è quella di considerare il campo di temperatura simmetrico rispetto all'asse del catodo. Idealmente tale ipotesi risulta vera ma nella realtà per motivi legati alla tecnologia di fabbricazione esistono delle differenze considerando i diversi raggi che però non significative. Perciò la nuova espressione della corrente sarà:

$$I_{el-Rich} = \sum_{i=1}^{n-1} 2\pi r_i \Delta r j_{eS,i} \quad (4.15)$$

dove  $n$  è il numero di suddivisioni impostate,  $r_i$  è il raggio a cui viene rilevata la temperatura,  $j_{eS,i}$  è la densità di corrente alla temperatura rilevata in  $r_i$ . Il motivo per cui la sommatoria si ferma a  $n-1$  è che se considerassi anche  $r_n$ , che corrisponde al raggio esterno, starei considerando un anello fuori dall'area della faccia che sto esaminando, per cui avrei una sovrastima della corrente (Figura 4-18).

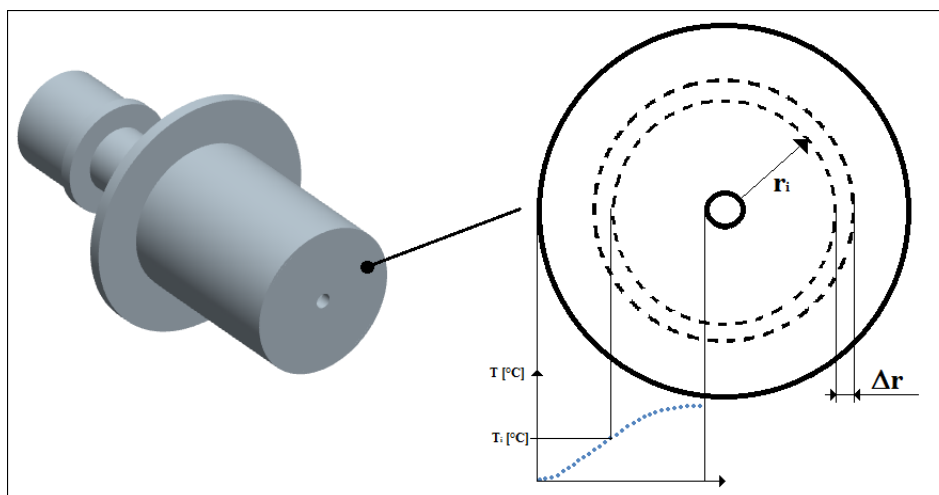


Figura 4-18: Dominio per il calcolo della corrente elettronica

## 4.4 Validazione del modello numerico

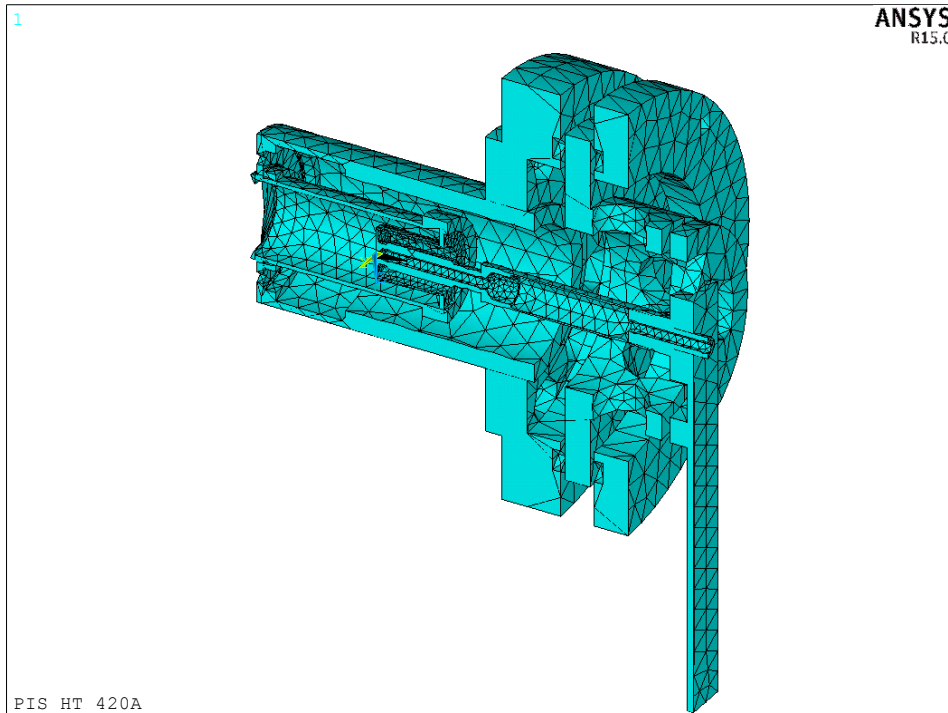
Il metodo agli elementi finiti risulta un ottimo strumento capace di fornire importanti indicazioni per validare o meno le modifiche apportate alla sorgente di ionizzazione. Tuttavia seguire ciecamente i risultati numerici può portare ad errori grossolani nella progettazione di nuovi componenti. Pertanto è necessario verificare e validare il modello numerico che è stato costruito, attraverso il confronto con i dati sperimentali.

### 4.4.1 Modello numerico per misure di temperatura (modello HT)

Il sistema sviluppato per le prove sperimentali, pensato principalmente per la caratterizzazione del catodo, contiene modifiche sostanziali rispetto alla sorgente FEBIAD standard. Pertanto non è possibile confrontare i risultati del modello presentato nel capitolo 4.5 con i dati sperimentali, in quanto le variazioni geometriche adottate non sono trascurabili. In particolare la rimozione di anodo e del sistema di estrazione, necessaria per poter effettuare i rilevamenti termici sul catodo, porta inevitabilmente ad un abbassamento delle temperature a causa del mancato effetto di schermatura che davano questi oggetti, posti in prossimità del corpo su cui si sta misurando, così come gli oggetti che compongono il sistema di bloccaggio della linea di trasferimento asporteranno calore per conduzione. Il sistema di sostegno, realizzato in Acciaio inox, è stato modificato operando dei fori di osservazione su un lato che incidono sensibilmente sul campo termico del catodo. Viene inoltre aggiunto un sistema di bloccaggio della linea di trasferimento per evitare eccessive deformazioni della faccia frontale del catodo. Non sono stati considerati gli isolatori di Allumina perché, oltre a creare problemi nell'incollaggio dei volumi (comando *VGLUE*), richiedevano anche una discretizzazione con elementi molto

piccoli, allo stesso modo si sarebbe stati costretti ad adottare un reticolo fine anche per i volumi a contatto con tali isolatori, cosa che avrebbe richiesto un grande tempo di calcolo per via delle dimensioni delle flange e del componente di supporto. I dadi ed i bulloni del sistema di bloccaggio sono stati omessi poiché, avendo volumi ridotti, si è ritenuto trascurabile il loro contributo.

Per questo motivo è necessario sviluppare un modello numerico che approssimi al meglio il sistema con cui ci si vuole confrontare, per avere una migliore comprensione di quanto il codice FEM garantisca dei risultati attendibili. Per la discretizzazione è stato utilizzato, come in precedenza, l'elemento SOLID226, in grado di risolvere problemi accoppiati elettrotermici (Figura 4-19).



**Figura 4-19: Modello FEM HT ricoperto di elementi SOLID226**

Per quanto riguarda le condizioni al contorno si è deciso di fissare un valore di temperatura costante e pari a 50 °C per l'area di contatto tra flangia e supporto collegato alla camera e per l'attacco della linea di alimentazione, in quanto il piatto della camera ed i puntali di alimentazione sono raffreddati ad acqua. La flangia è stata posta a potenziale nullo, mentre è stata assegnata la corrente di linea attraverso il parametro ILINE ad un nodo alla base della connessione elettrica (Figura 4-20).



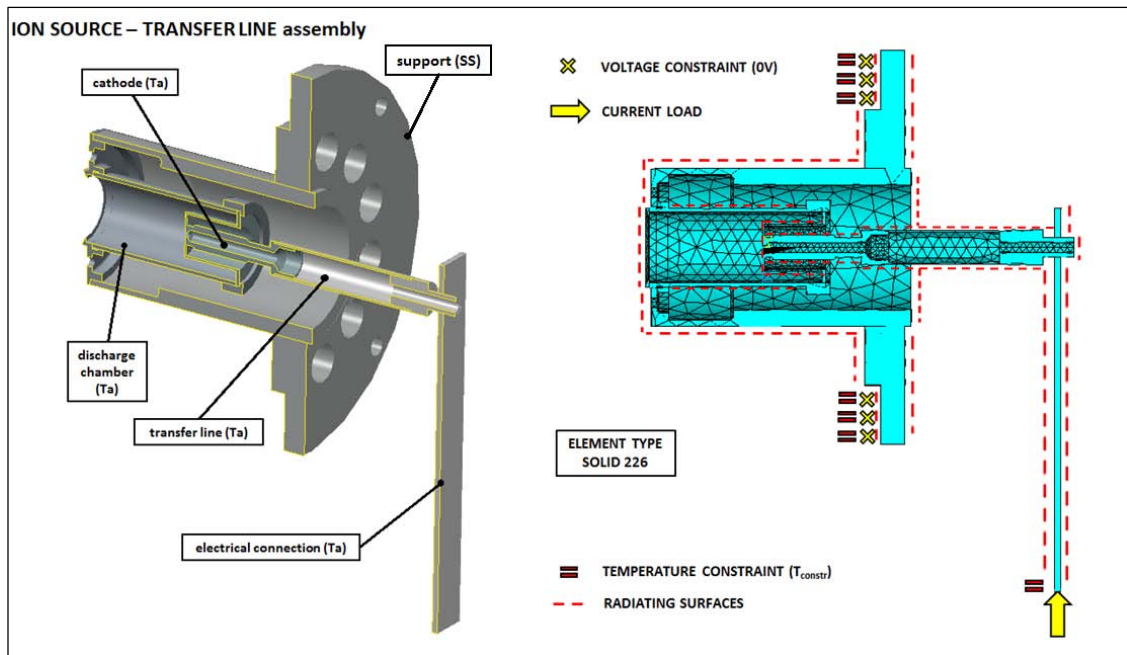


Figura 4-20: Carichi elettrici e termici applicati al modello FEM HT

Nella Figura 4-21 e Figura 4-22 sono riportati i dati relativi al campo di temperatura del catodo ottimizzato montato sul supporto per effettuare i test di temperatura. Si può osservare che rispetto al modello numerico standard della sorgente, l'andamento del campo di temperatura è simile ma presenta temperature inferiori di circa 100°C. Questo è dovuto alla rimozione dell'anodo e alla creazione dei fori di osservazione. Pertanto si vede come si avrebbe compiuto un errore concettuale confrontando i dati di temperatura ricavati sperimentalmente con quelli ricavati dal modello numerico standard. I dati sperimentali verranno discussi nel paragrafo 4.11 dove verranno presentati i risultati dei test sperimentali svolti presso i laboratori nazionali di Legnaro.

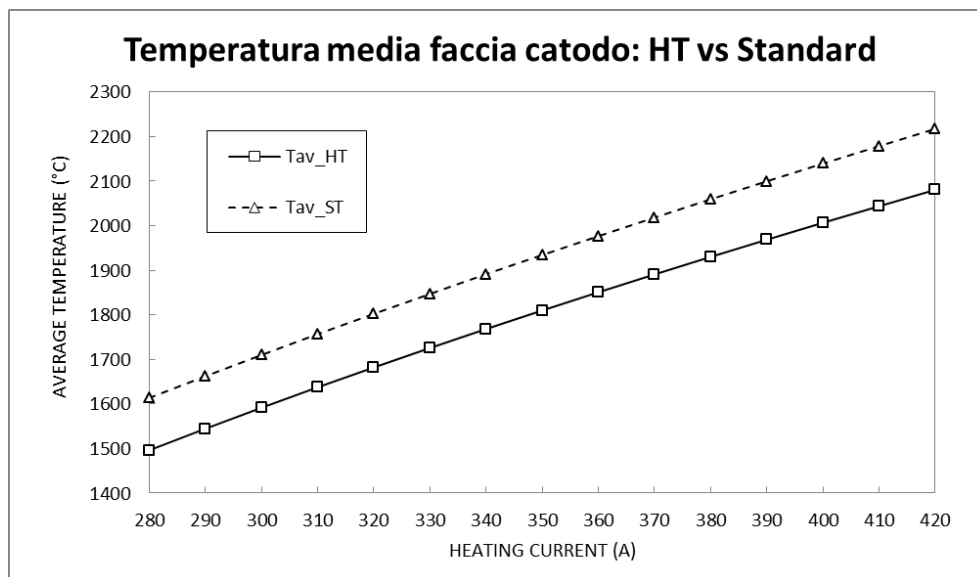


Figura 4-21: Temperature medie raggiunte sulla faccia frontale del catodo nella configurazione standard e nella configurazione HT appositamente modificata per le prove ad alta temperatura

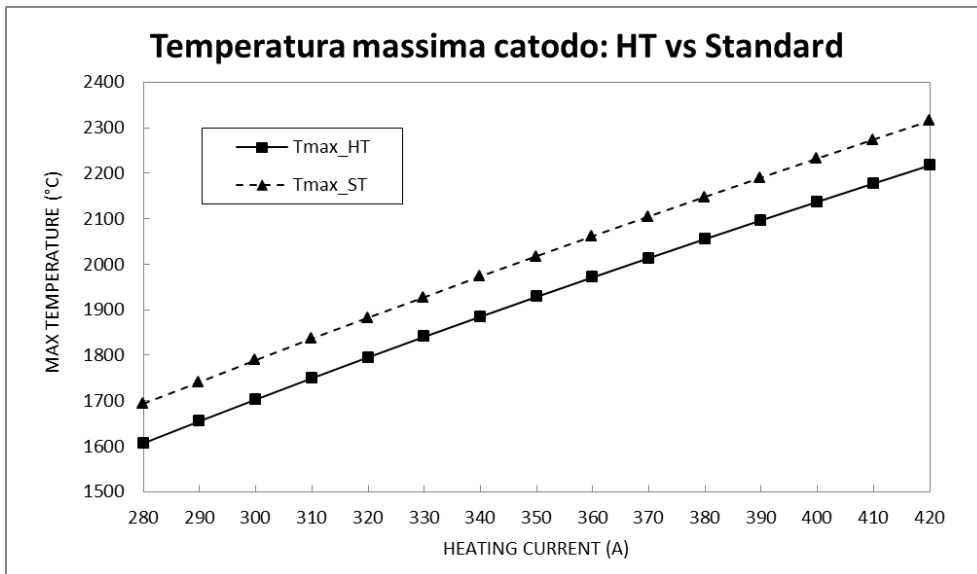


Figura 4-22: Temperature massime raggiunte dal catodo nella configurazione STANDARD e nella configurazione HT appositamente modificata per le prove ad alta temperatura

#### 4.4.2 Descrizione apparato sperimentale HT

L'apparato sperimentale per le misure di temperatura risulta essere composto da componenti molto più semplici rispetto al sistema *front end*. Esso viene detto forno ad alta temperatura (in gergo "muletto") e la sua funzione è quella di riscaldare per effetto Joule l'elemento in esame, mantenendo un elevato livello di vuoto ( $10^{-6} \div 10^{-7}$  mbar) attraverso un canale collegato ad apposite pompe. La camera al suo interno è provvista di tre puntali in Rame argentato che consentono il trasporto della corrente di alimentazione. I due puntali servono per collegare il componente che sostiene il target, mentre quello inferiore viene utilizzato per il collegamento elettrico per le sorgenti di ionizzazione (Figura 4-23).

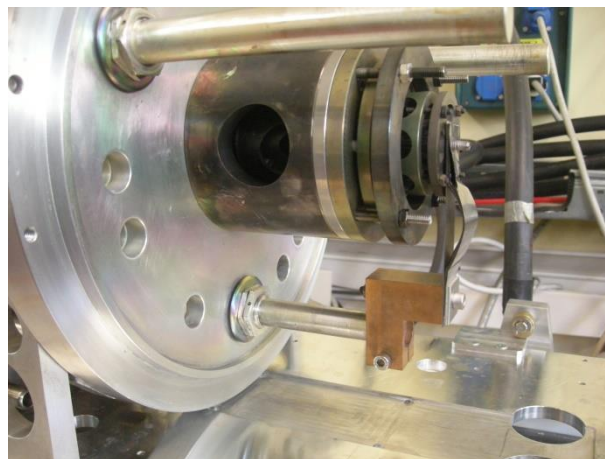
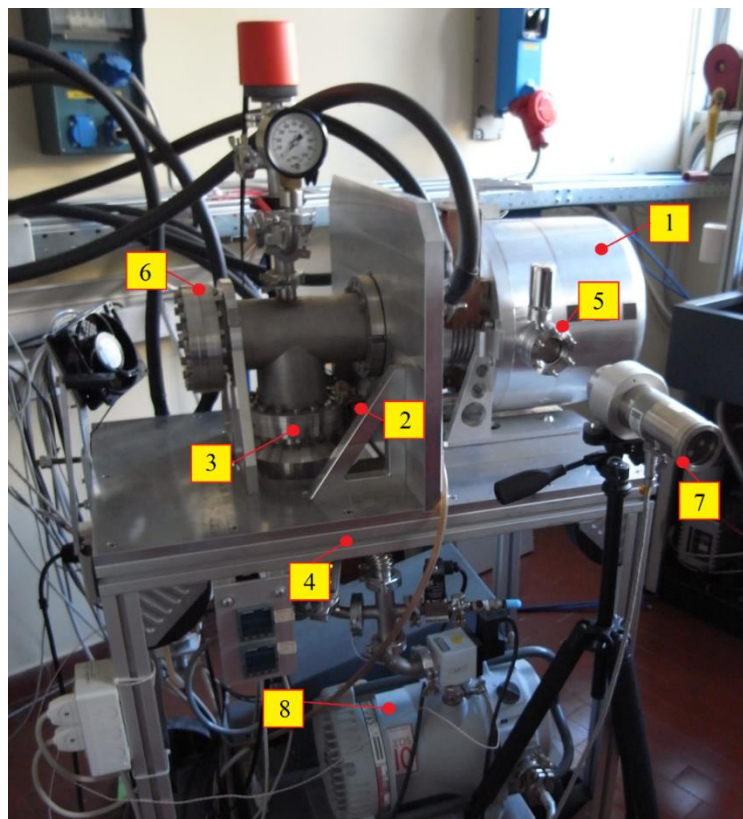


Figura 4-23: Piatto della camera da vuoto

Nella Figura 4-24 è rappresentato il telaio con camera per le prove che costituiscono il forno ad alta temperatura. E' costituito da una struttura di supporto in Alluminio costruito per ospitare una flangia a tre vie e una camera da vuoto, molto simile a quella utilizzata nel *front end*. Il sistema di misura è formato da:

- 1) camera da vuoto con distanziale per l'alloggiamento della finestra di osservazione con all'interno la sorgente per le prove sperimentali;
- 2) puntone elettrico da cui viene fornita la corrente riscaldante alla sorgente;
- 3) canale per il vuoto collegato alle pompe;
- 4) telaio di supporto a cui viene anche collegato il cavo dell'alimentatore per la messa a terra (0 V);

- 5) finestra in Kodial® per l'osservazione laterale degli elementi interni alla camera, è protetta da un otturatore poiché raggiunge temperature elevate (100°C);
- 6) finestra in Kodial® per l'osservazione frontale degli elementi interni alla camera;
- 7) pirometro a infrarossi;
- 8) pompe da vuoto rotativa (la bianca) e turbo-molecolare (la blu).



**Figura 4-24: telaio con camera per le prove che costituiscono il forno ad alta temperatura**

Una volta assemblato il sistema per effettuare le prove (vedi appendice A) è possibile chiudere la camera con un coperchio ed avviare il vuoto dal plc del muletto. Si devono aspettare circa 30 minuti affinché il sistema raggiunga un livello di vuoto dell'ordine di  $10^{-2}$  mbar, quindi è possibile avviare la pompa turbomolecolare che permette di far scendere ancora il livello di vuoto. Queste particolari pompe sono in grado di portare la pressione all'interno della camera a valori dell'ordine di  $10^{-7}$  mbar ma sono anche molto delicate e possono essere messe in funzione solo a basse pressioni, altrimenti si rischia la rottura delle palettature. Sopra al condotto che porta alle pompe è installato un misuratore di pressione analogico utile per verificare la presenza di perdite macroscopiche.

Una volta che il sistema è in vuoto è possibile attivare gli alimentatori (Figura 4-25) per fornire la corrente riscaldante. Le rampe di corrente non devono essere troppo veloci, solitamente si forniscono 10 A in un lasso di tempo di 10 secondi (ovvero 1 A/s). Per il riscaldamento del catodo è possibile utilizzare un solo alimentatore poiché è in grado di raggiungere i 1000 A di corrente; mentre per alimentare il target vengono utilizzati due alimentatori. Essi possono fungere sia da generatori di tensione che di corrente, come nel nostro caso. E' possibile comunque leggere il valore istantaneo di tensione che si sta fornendo per vincere la resistenza data dai componenti installati sui puntali. Tale valore di tensione verrà chiamato in seguito  $\Delta V_{al}$ .



Figura 4-25: Alimentatore

Una volta accesi gli alimentatori è importante monitorare la temperatura nella zona dove si trovano le guarnizioni in gomma; qui la temperatura non deve superare di  $100^{\circ}\text{C}$  altrimenti non viene garantita più la tenuta del vuoto. Per evitare che ciò accada si possono usare getti di aria compressa per aumentare il coefficiente di scambio termico tra i punti di interesse e l'ambiente esterno. Poiché gli oggetti che si scaldano fino ad essere incandescenti, in vuoto, possono sublimare e le particelle emesse vanno ad attaccarsi alle zone più fredde della camera (come le finestre), per evitare che ciò accada, si fa uso di un otturatore ("shutter"). Questo componente è necessario per evitare che la sublimazione dei componenti metallici o l'emissione di eventuali contaminanti dalle superfici degli oggetti ad alta temperatura possano andare a depositarsi il vetro, sporcandolo e falsando le misure di temperatura effettuate con il pirometro. La pulizia delle finestre di osservazione deve essere verificata prima dell'utilizzo: si osserva col pirometro una lampadina ad incandescenza, il cui filamento in Tungsteno raggiunge valori di temperatura di circa  $2200\pm 2300^{\circ}\text{C}$ . Se dopo aver interposto tra pirometro e lampadina la finestra si legge un valore di temperatura inferiore di  $10\pm 20^{\circ}\text{C}$ , il vetro è pulito e si può procedere alla misura. Le finestre sono realizzate con un particolare materiale chiamato Kodial®; questo è un particolare tipo di vetro trasparente alle radiazioni infrarosse e nel campo del visibile; la finestra di osservazione in senso radiale che si collega alla transizione è realizzata con una flangia in Acciaio del tipo CF40 per consentire la tenuta del vuoto, già presente in commercio, mentre la quella per l'osservazione in senso assiale è una CF100, anch'essa normata.



Figura 4-26 Transizione con la finestra di osservazione in Kodial

Per la misura delle temperature è stato utilizzato un pirometro ad infrarossi in grado di misurare temperature superiori ai  $1400^{\circ}\text{C}$  (modello Modline® 5, serie 5R, modello 5R-3015). Il pirometro a nostra disposizione rileva la temperatura comparando i livelli di radiazione nel campo dell'infrarosso per due diversi intervalli di lunghezze d'onda (funzionamento di tipo bi-cromatico); la temperatura letta sarà stimata in base al rapporto fra le due misurazioni. Per questo bisogna impostare correttamente il valore di un parametro detto "E-SLOPE" per definire il tipo di comportamento del materiale che si sta osservando. Per il Tantalio, che è considerato un corpo non grigio, il valore da inserire nello strumento è di  $1.060$ .

Successivamente risulta necessario valutare la distanza alla quale viene posizionato il pirometro poiché da essa dipendono le dimensioni dell'area sulla quale viene mediato il valore della temperatura.

Dal manuale dello strumento di misura [7] si è potuto misurare il diametro del punto in cui viene eseguita la lettura: seguendo lo schema del manuale si può calcolare  $d$  con la formula:

$$d = \frac{D}{F} \quad (4.16)$$

dove  $D$  è la distanza della superficie da misurare e la lente, ed  $F$  è il fattore di risoluzione. La relazione fra i diametri del punto che si sta osservando (punto messo a fuoco) e distanza del sensore dalla superficie calda è spiegata in Figura 4-27.

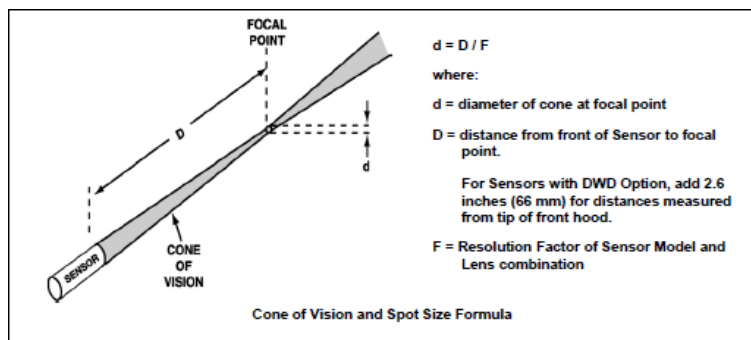


Figura 4-27: spiegazione del fattore di risoluzione  $F$  del pirometro presa dal manuale dello strumento [1].

Tabella 4-6: valori del fattore di risoluzione per l'intervallo di distanza obiettivo-oggetto considerata e per la tipologia di lente montata nel pirometro. Per  $D < 330$  mm si usa il valore minimo calcolato nell'intervallo (cioè con  $D = 330$  mm).

$F$	Tipo di lente	Intervallo di validità (valori in mm)
150	RA	$330 < D < \infty$

Il pirometro, nel nostro caso, viene posto ad una distanza di circa  $40$  cm dall'oggetto se l'osservazione della temperatura avviene sulla faccia laterale del catodo, mentre per la faccia frontale è  $55$  cm. Inserendo questi valori nell'equazione (4.16) si trovano i seguenti valori diametrali dello spot:  $d_{FRONT} = 3.7$  mm e  $d_{LATERAL} = 2.7$  mm. Tali valori verranno utilizzati per la valutazione delle temperature medie ricavate dal modello FEM HT, si creerà un PATH sia lungo la faccia frontale sia lungo quella laterale; quindi verranno mediate le temperature contenute entro i rispettivi intervalli  $d_{FRONT}$  e  $d_{LATERAL}$ .

Un'operazione molto importante da eseguire col pirometro è la messa a fuoco: si effettua ruotando l'apposita ghiera sul pirometro finché, osservando il punto di osservazione, spostando la testa a destra e a sinistra e in alto e in basso, questo non risulti praticamente fermo nella stessa posizione. Si ricorda di tenere bene a mente che ciò che viene osservato all'interno dell'obiettivo non è l'immagine corretta ma invertita.



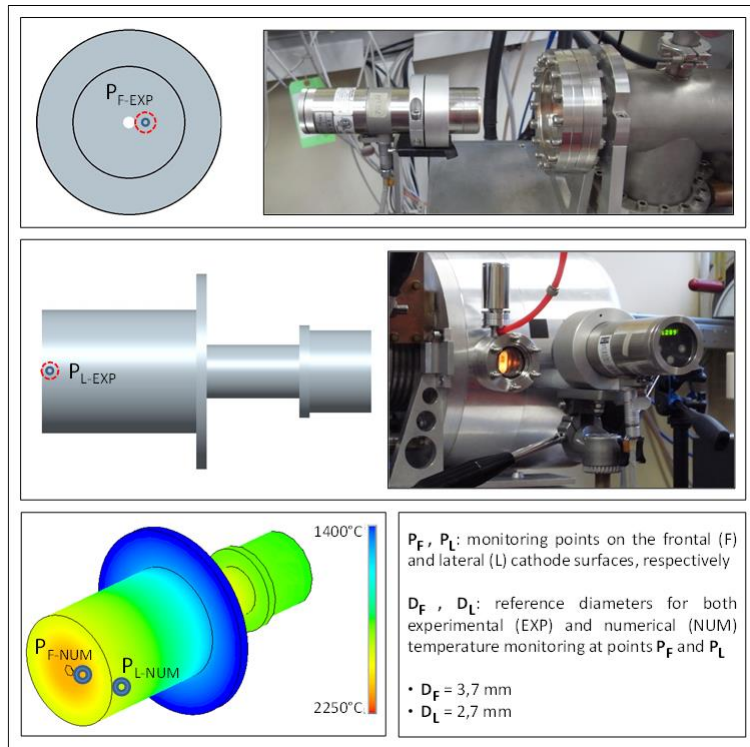


Figura 4-28: Punti in cui è stata effettuata la misura

#### 4.4.3 Risultati delle misure HT

Sono state effettuate quattro serie di misurazioni per cercare di ridurre l'incertezza di misura, rilevando la temperatura per due rampe in salita e due in discesa variando la corrente di alimentazione di 10 A alla volta. Sono state valutate le temperature sulla faccia frontale e sulla faccia laterale del catodo. Nella Tabella 4-7 sono riportate le temperature date dalla media delle quattro serie di misure rilevate sulla faccia frontale del catodo. Come si può vedere dalla Figura 4-29, la corrispondenza tra modello FEM HT e apparato sperimentale è molto buona soprattutto alle temperature che rientrano nel nostro campo di interesse; si ricorda che la sorgente di ionizzazione normalmente lavora a livelli di corrente che portano a temperature del catodo superiori ai 2000°C. La differenza tra modello numerico e sperimentale, infatti, risulta inferiore del 3% per valori di corrente di linea che vanno da 350 a 420 A; rimangono comunque al di sotto del 10% per tutto il campo studiato. Per le misure sperimentali è stata valutata una incertezza di  $\pm 10$  °C, la stima è stata effettuata in seguito ad un'analisi statistica dei dati a disposizione. Tuttavia, per una miglior valutazione di tale valore, sarebbe necessario uno studio approfondito sull'analisi dell'incertezza. Analisi di questo tipo richiedono molto tempo e data l'elevata variabilità dei parametri di influenza sulle misure, con la strumentazione in possesso, può risultare molto complicata.

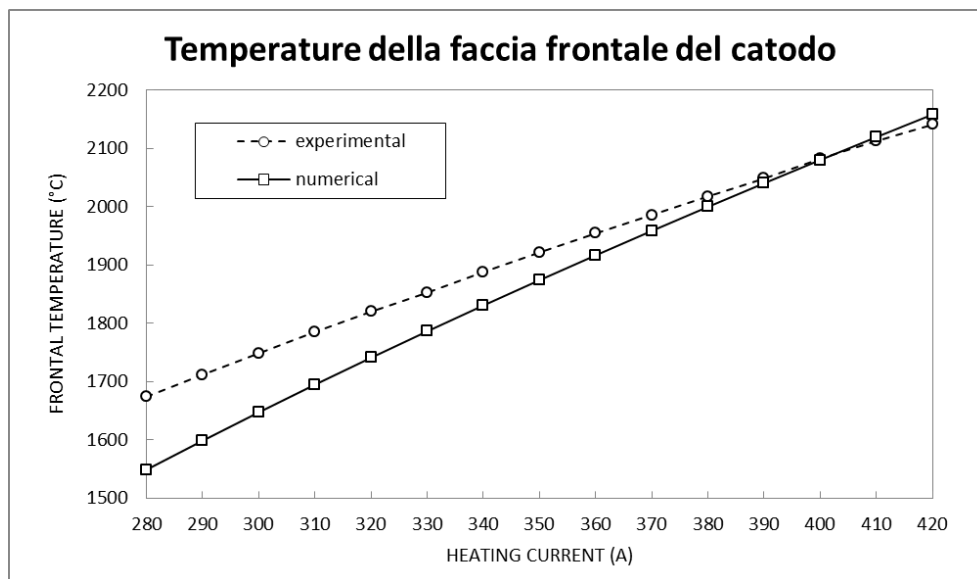
Tabella 4-7: Temperature sulla faccia frontale del catodo

$I_{line}$ [A]	$T_{FRONT\_exp}$ [°C]	$T_{FEM\_HT}$ [°C]
280	1674	1549
290	1712	1599
300	1749	1647
310	1785	1695
320	1820	1741
330	1853	1786
340	1888	1831
350	1922	1874
360	1954	1917
370	1986	1959

380	2018	2000
390	2049	2040
400	2082	2080
410	2113	2120
420	2141	2158

**Tabella 4-8: Variazioni percentuale della Temperatura sulla faccia frontale del catodo**

$I_{line}$ [A]	$\Delta T_{FRONT}$ [°C]	$\Delta T_{FRONT}$ [%]
280	125	7.5%
290	113	6.6%
300	101	5.8%
310	90	5.1%
320	79	4.3%
330	66	3.6%
340	57	3.0%
350	48	2.5%
360	38	1.9%
370	27	1.4%
380	18	0.9%
390	8	0.4%
400	2	0.1%
410	7	0.3%
420	17	0.8%



**Figura 4-29: Confronto tra temperature misurate sperimentalmente e temperature ricavare numericamente dal modello FEM HT**

Anche nel caso della temperatura laterale si ha una buona corrispondenza tra dati sperimentalmente e numerici anche se in questo caso gli errori tra i vari dati risultano maggiori. Comunque per valori elevati viene confermata un'ottima corrispondenza per il campo termico, la cui differenza tra numerico e sperimentalmente rimane al di sotto del 7%. Questa approssimazione risulta accettabile poiché la differenza tra realtà e simulazione, data dalla semplificazione del modello e dalla discretizzazione, risulta essere di circa il 10%.

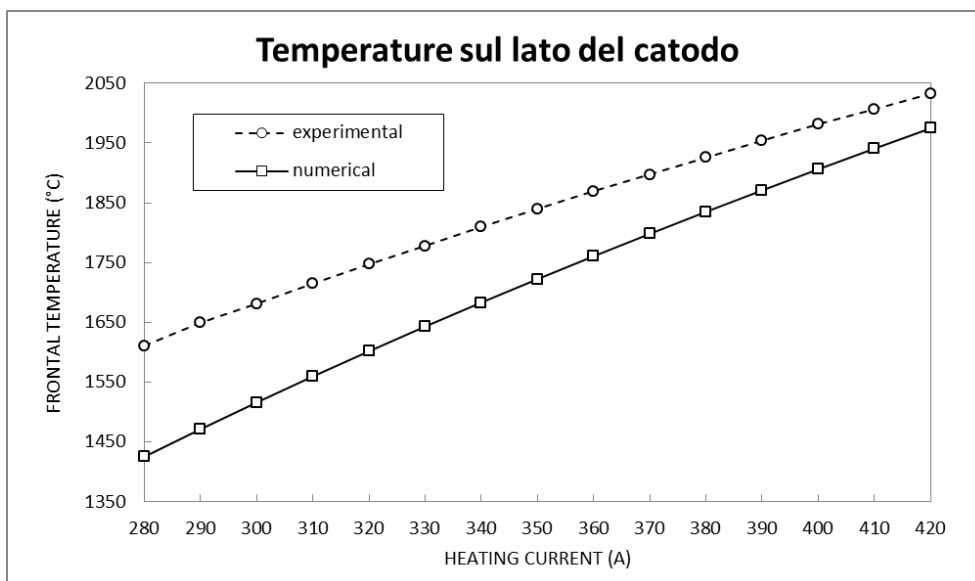
**Tabella 4-9: Temperature medie sulla parete laterale del catodo**



$I_{line}$ [A]	$T_{LAT\_exp}$ [°C]	$T_{FEM\_HT}$ [°C]
280	1611	1425
290	1649	1471
300	1681	1516
310	1715	1560
320	1747	1602
330	1778	1643
340	1810	1683
350	1840	1722
360	1870	1761
370	1898	1798
380	1926	1835
390	1954	1871
400	1982	1906
410	2007	1941
420	2033	1975

**Tabella 4-10: Variazioni percentuale della temperatura sulla parete laterale del catodo**

$I_{line}$ [A]	$\Delta T_{LAT}$ [°C]	$\Delta T_{LAT}$ [%]
280	185	11.5%
290	178	10.8%
300	165	9.8%
310	155	9.1%
320	146	8.3%
330	135	7.6%
340	127	7.0%
350	117	6.4%
360	109	5.8%
370	99	5.2%
380	91	4.7%
390	83	4.3%
400	76	3.8%
410	66	3.3%
420	58	2.9%



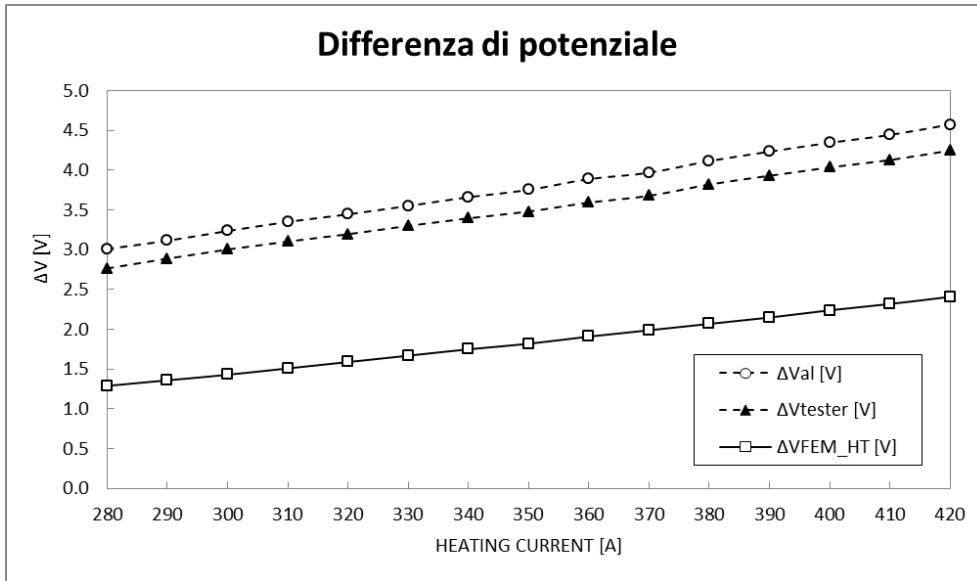
**Figura 4-30: Confronto tra le temperature misurate sperimentalmente e temperature ricavare numericamente dal modello FEM HT**

Oltre alla misura del campo di temperatura del catodo, è stata misurata anche la differenza di potenziale tra i capi del circuito di alimentazione ( $\Delta V_{\text{tester}}$ ) mediante l'utilizzo di un multimetro digitale. Per avere una corrispondenza con i valori numerici si posizionano i connettori il più vicino possibile alla sorgente. Un connettore viene posto a contatto col piatto della camera da vuoto, mentre l'altro viene posto a contatto con il puntale di alimentazione. Per confronto sono stati rilevati anche i valori forniti dall'alimentatore ( $\Delta V_{\text{al}}$ ). L'incertezza di misura sulla differenza di potenziale è stata stimata in  $\pm 0,10V$ .

**Tabella 4-11: Differenza di potenziale ai capi dei morsetti di alimentazione**

$I_{\text{line}}$ [A]	$\Delta V_{\text{al}}$ [V]	$\Delta V_{\text{tester}}$ [V]	$\Delta V_{\text{FEM\_HT}}$ [V]
280	3.12	2.90	1.29
290	3.25	3.02	1.36
300	3.39	3.12	1.43
310	3.55	3.30	1.51
320	3.65	3.39	1.59
330	3.72	3.47	1.67
340	3.83	3.56	1.75
350	3.92	3.64	1.82
360	4.05	3.75	1.91
370	4.11	3.82	1.99
380	4.24	3.94	2.07
390	4.35	4.04	2.15
400	4.44	4.12	2.24
410	4.57	4.25	2.32
420	4.72	4.38	2.41

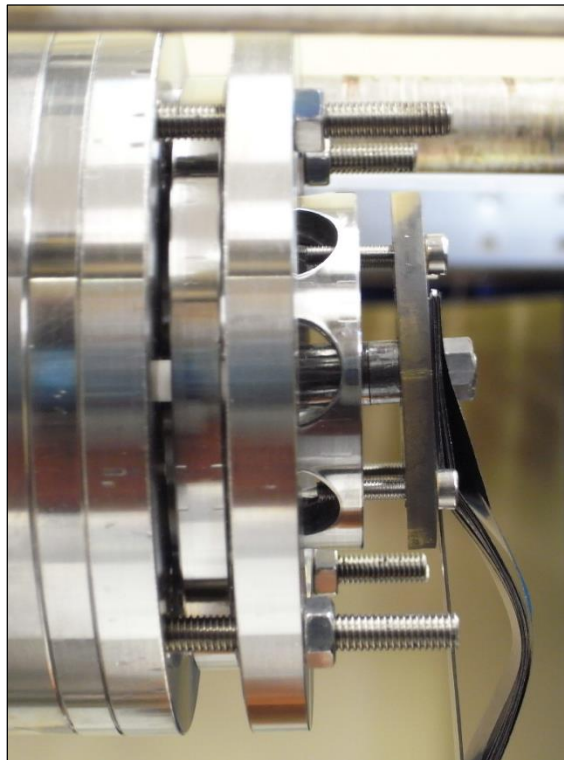
Dal grafico in Figura 4-31, risulta evidente che la differenza di potenziale misurata sperimentalmente risulta quasi il doppio di quella ricavata numericamente dal modello FEM HT. Questa situazione non è spiegabile dal fatto che vi siano delle resistenze di contatto che fanno aumentare la tensione necessaria per vincerle poiché si avrebbe un miglioramento alle elevate temperature. Pertanto il modello FEM non rappresenta la realtà per quanto riguarda il comportamento elettrico; tuttavia in prima approssimazione si possono utilizzare i dati di differenza di potenziale ricavati numericamente moltiplicandoli per un fattore di correzione pari a 2. Tale operazione è possibile per una stima, in prima approssimazione, della tensione di alimentazione dato che la tangente delle curve sperimentale e numerica sono praticamente uguali.



**Figura 4-31: Differenza di potenziale ai capi della sorgente di ionizzazione**

Per simulare la rigidità del vincolo assiale data dal *target*, è stato realizzato un vincolo sulla connessione elettrica (vedi Figura 4-32) che porta il catodo a deformarsi assialmente creando un rigonfiamento sulla propria faccia.

Al termine delle prove, quindi, è stata misurata la deformazione plastica subita dalla faccia frontale del catodo. Sono state eseguite una serie di 10 misure per vari angoli di rotazione dell'oggetto in esame, utilizzando un ingranditore ottico. Le misure sono state poi mediate per ottenere una misura della deformazione pari a  $0,94 \pm 0.05$  mm. Questa misura è molto importante poiché ci consente di affermare l'importanza della crociera di centraggio installata nella sorgente definitiva. Tale sistema, infatti, oltre a mantenere in asse il catodo e la linea di trasferimento, funge da vincolo per le deformazioni assiali che non si manifestano quando il catodo è installato nella sorgente di ionizzazione standard.



**Figura 4-32: Sistema per simulare il vincolo imposto dal target**

Nell'appendice A sono presentate delle immagini che mostrano come si presenta la faccia del catodo dopo un certo numero di cicli di riscaldamento/raffreddamento in condizioni operative. Rispetto alla Figura 4-33 si noterà l'assenza dello spanciamento della faccia frontale del catodo.



Figura 4-33: Catodo utilizzato per le prove HT, si nota la deformazione della faccia frontale

## 4.5 Confronto tra il catodo ISOLDE e il catodo SPES

Per il confronto tra le due diverse soluzioni a disposizione, sono stati utilizzati dei modelli semplificati che consentono di ottenere risultati che differiscono di poco da modelli più complessi ma che richiedono minor tempo di calcolo. In questo modo è stato possibile studiare il comportamento della sorgente per vari valori della corrente di linea, da 280 fino a 440 A con incrementi di 10 A per ogni analisi. Nella Figura 4-35 e Figura 4-36 sono rappresentati i dati relativi alle analisi numeriche effettuate per la valutazione del campo di temperatura del catodo ottimizzato (SPES) rispetto ai dati disponibili in letteratura del catodo standard (ISOLDE). I valori della temperatura media ( $T_{av}$ ) sono stati ricavati facendo la media dei valori di temperatura nodali sulla faccia del catodo, mentre per il valore della temperatura massima ( $T_{max}$ ) è stato preso a riferimento il valore massimo della temperatura nodale dell'intero corpo del catodo (Figura 4-34).

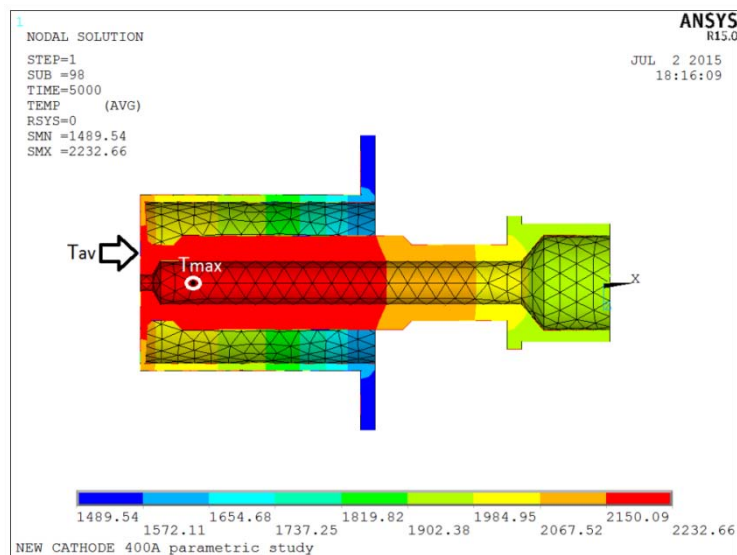


Figura 4-34: Indicazione dei nodi su cui sono state ricavate le temperature; la temperatura media dei nodi sulla faccia del catodo e la temperatura massima di tutto il catodo

Si riportano di seguito i grafici che riportano il confronto diretto tra le due geometrie (vedi Figura 4-35 e Figura 4-36). Appare evidente che con l'utilizzo del catodo SPES si ottengono, a parità di valori di corrente di alimentazione, temperature medie e massime più basse. Si nota però che la differenza tra le temperature massime risulta maggiore della differenza tra le temperature medie. Questo rappresenta un vantaggio poiché è

possibile aumentare la corrente di alimentazione per sopperire alla minor resistenza riscontrata nel catodo SPES.

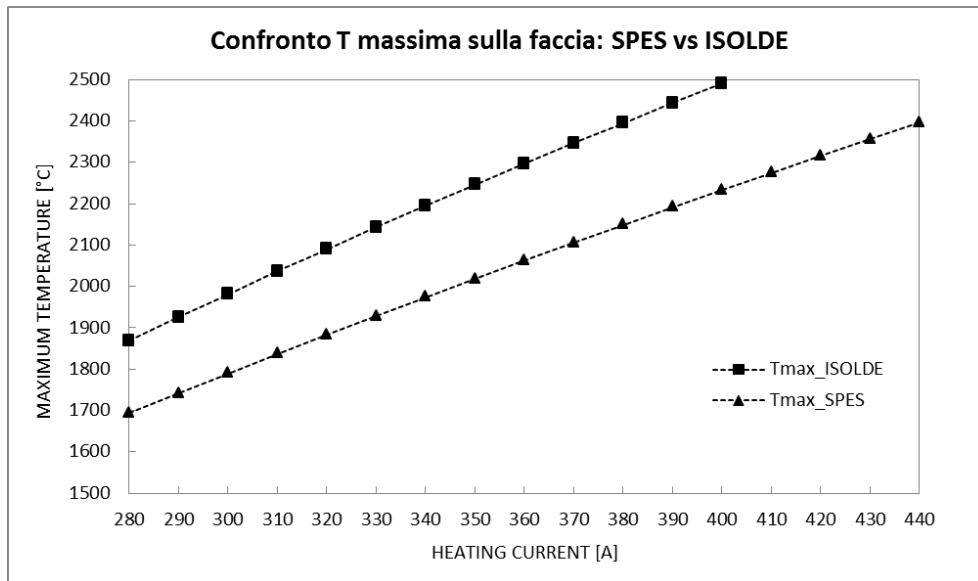


Figura 4-35: Confronto della temperatura massima raggiunta dal catodo per due diverse geometrie: geometria originale ISOLDE (quadrati) e geometria ottimizzata SPES (triangoli)

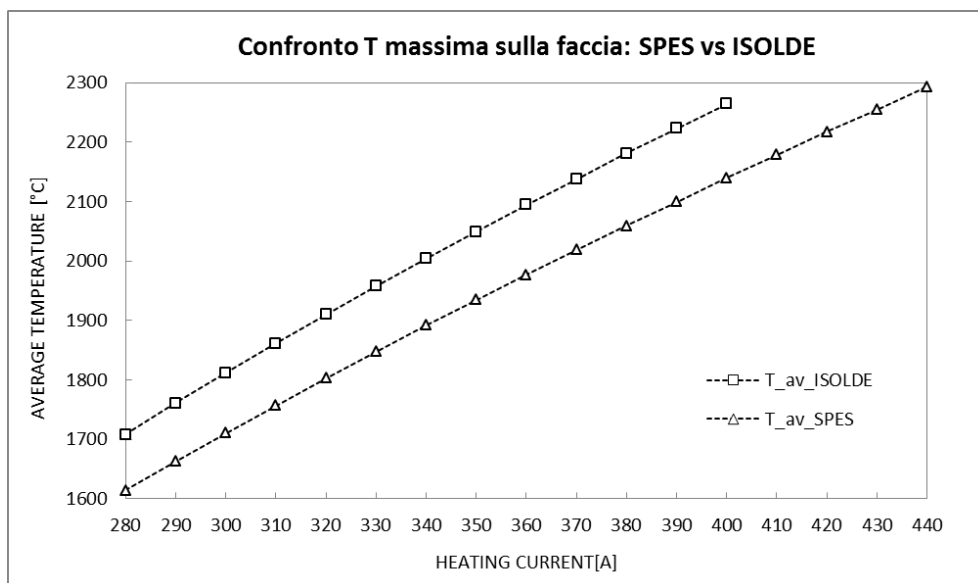


Figura 4-36: confronto della temperatura media raggiunta sulla faccia del catodo per due diverse geometrie: geometria originale ISOLDE (quadrati) e geometria ottimizzata SPES (triangoli)

Per effettuare un confronto tra le due tipologie di catodo si è deciso di unire i due grafici sopra riportati e creare così un unico grafico che permette di effettuare considerazioni molto importanti. Infatti, osservando la Figura 4-37, è possibile constatare che:

- 1) Il nuovo catodo (SPES) presenta una minor differenza tra la sua temperatura massima e la temperatura media raggiunta sulla faccia rispetto al vecchio catodo (ISOLDE).
- 2) Raggiungendo la temperatura limite di sicurezza, oltre la quale il tantalio inizia a sublimare, la temperatura media del nuovo catodo (SPES) è maggiore che nel caso del vecchio catodo (ISOLDE). Ciò significa avere anche una maggior produzione di corrente elettronica e quindi di efficienza.
- 3) Per raggiungere la stessa temperatura media, il nuovo catodo necessita di circa 30 A in più rispetto al vecchio catodo. Ciò implica un maggior consumo di energia, il quale però non risulta un parametro fondamentale per l'ottimizzazione.

Dai dati ricavati dal modello FEM, si nota che il design del nuovo catodo garantisce dei benefici in termini di sicurezza di utilizzo. Anche se la riduzione della Temperatura massima consente di operare con correnti di linea più alte, lo spostamento del punto caldo verso la faccia del catodo consente l'aumento delle Temperature medie e quindi, secondo la legge di Richardson, un aumento di densità di corrente elettronica, quindi un aumento del rendimento relativo alla ionizzazione per bombardamento di elettroni. Tale beneficio ha però un costo in termini di potenza elettrica dissipata per alimentare la linea. E' pur vero che portando il vecchio catodo a 390 A si avrebbe una densità di corrente elettronica più elevata ma il limite tecnologico di temperatura non permette l'impiego di un tale livello di amperaggio, senza tener conto che il catodo ISOLDE mostra spanciamenti della superficie frontale che limitano ancor di più il suo utilizzo. Pertanto è possibile affermare che, dal punto di vista numerico, il nuovo catodo (SPES) risulta migliore rispetto al vecchio catodo (ISOLDE) sia in termini di prestazioni che di stabilità meccanica.

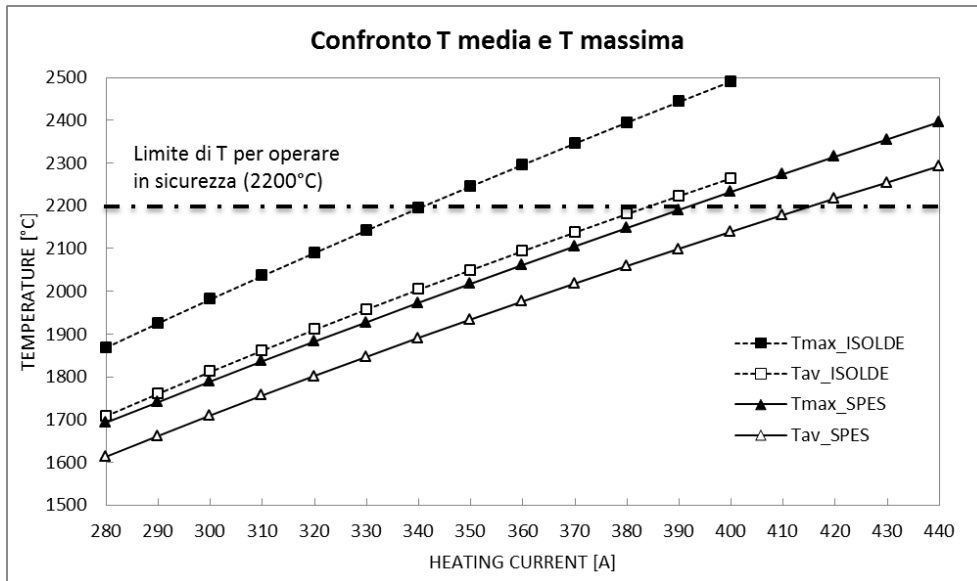


Figura 4-37: Confronto prestazionale tra i due catodi analizzati; viene evidenziato con linea tratto-punto il limite oltre al quale le parti in Tantalio iniziano a sublimare

I risultati di densità di corrente elettronica ottenuti tramite l'analisi numerica della sorgente con il catodo ottimizzato (SPES) ed il vecchio catodo (modello ISOLDE) sono rappresentati in Figura 4-38. E' possibile confrontare la sola densità di corrente poiché l'area su cui si basa il calcolo della corrente elettronica è la stessa. La differenza sostanziale tra i due modelli di catodo risiede nella diversa distribuzione della temperatura sulla faccia frontale. Il modello ISOLDE presenta temperature medie più elevate per un dato livello di corrente ma contemporaneamente anche un limite dato dalla temperatura massima che non permette di aumentare oltre i 340 A la corrente di alimentazione. Con il nuovo catodo invece è possibile salire con la corrente di linea fino a 390 A. Risulta evidente dalla Figura 4-38 che con la nuova geometria realizzata presso i laboratori nazionali di Legnaro, è possibile ottenere una temperatura media più elevata, quindi una densità di corrente elettronica più elevata e quindi una maggior efficienza di ionizzazione per bombardamento di elettroni.

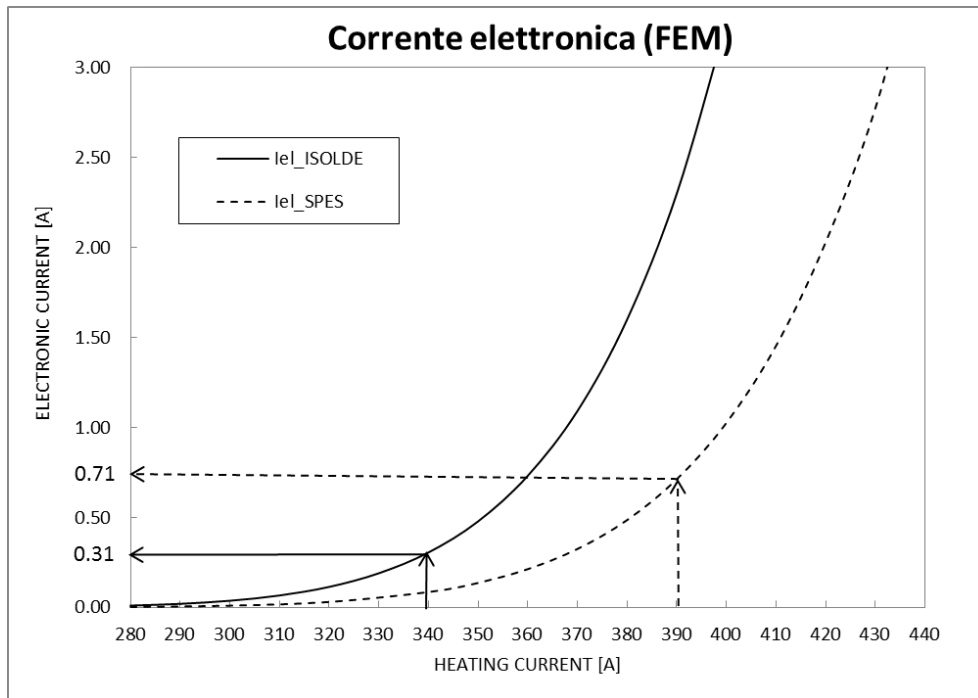


Figura 4-38: Rappresentazione della corrente elettronica ricavabile dai due catodi presi in esame. Calcolate con le funzioni di forma:  $\phi = 60 [V]$ ;  $Ab = 4.12 [A/cm^2K^2]$ . Da notare che, raggiunto il livello di soglia, il catodo SPES presenta una corrente elettronica più che raddoppiata rispetto al catodo ISOLDE.

## 4.6 Confronto tra supporto in Grafite e supporto in Acciaio Inossidabile

Viene di seguito effettuato il confronto numerico tra la vecchia sorgente con supporto in Acciaio inossidabile e la nuova sorgente con geometria modificata e supporto in Grafite. Per il confronto sono stati tenuti costanti i materiali dei vari componenti e la dimensione della *mesh*. Sono state cambiate la geometria del sistema di estrazione e la geometria ed il materiale della camera di supporto.

Effettuando il paragone per la corrente di linea che consentiva un utilizzo in sicurezza della vecchia PIS, Figura 4-39, si nota che l'andamento delle Temperature sulla faccia frontale del catodo risulta molto simile. Ciò che risalta è la differenza di temperatura tra i due casi, stimabile in circa  $50^\circ\text{C}$  sulla temperatura massima. Tale variazione è dovuta principalmente alla variazione del materiale del sistema di supporto, come verrà mostrato in seguito.



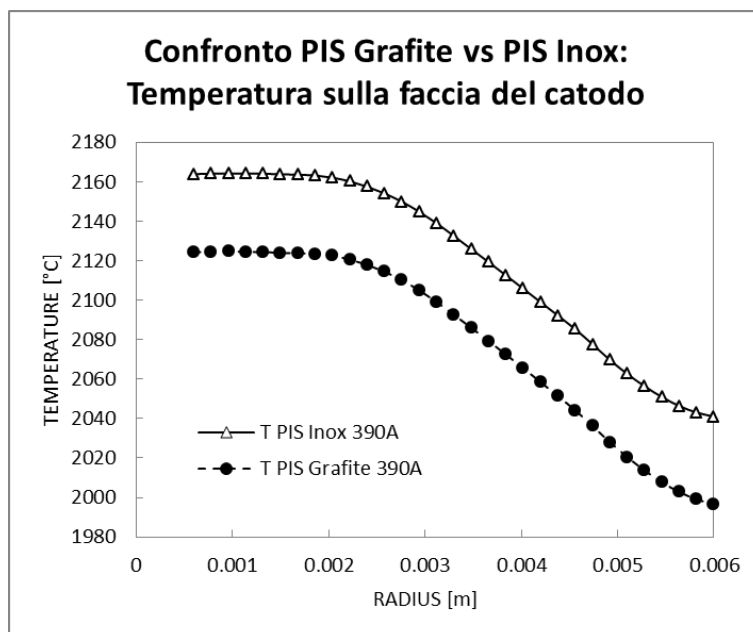


Figura 4-39: Confronto dell'andamento della temperatura lungo un raggio sulla faccia del catodo SPES montato sul supporto in Inox e su quello in Grafite per lo stesso livello di corrente di alimentazione (390 A)

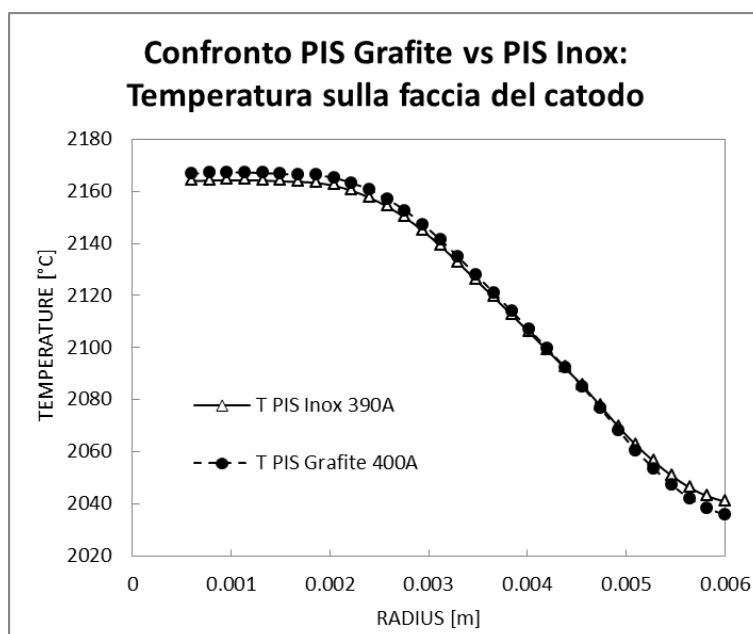


Figura 4-40: confronto dell'andamento della temperatura lungo un raggio sulla faccia del catodo SPES montato sul supporto in inox e su quello in grafite; caso limite.

Pertanto per avere la stessa prestazione della vecchia sorgente, quella nuova dovrà essere alimentata con una corrente di linea più alta. Ciò significa che verrà consumata più energia elettrica per portare il catodo alla medesima temperatura. Paragonando i vari dati relativi alle sorgenti si è visto che per ottenere le stesse temperature medie è necessaria una ILINE di 400 A cioè di 10 A superiore del sistema precedente (vedi Figura 4-40). Tale valore è sufficiente a garantire le stesse prestazioni di produzione di corrente elettronica da parte del catodo (Figura 4-43). Questa differenza è causata principalmente dalla variazione del materiale di supporto, in quanto la Grafite possiede una emissività più elevata (circa il doppio) rispetto all' Acciaio inox. Infatti, come si può vedere dalla Figura 4-41 la temperatura del sistema di supporto in Grafite risulta inferiore a quella del sistema realizzato in Acciaio inox; tale abbassamento di temperatura può portare al raffreddamento dei componenti della sorgente riscaldati per radiazione come l'anodo. Al fine di evitare che ciò accada è possibile porre degli schermi in tantalio che garantiscono di ottenere temperature più elevate. In ogni caso si deve prima

valutare l'andamento dell'efficienza poiché se questa risulta comunque elevata, si preferisce non complicare ulteriormente la geometria del sistema. La temperatura del sistema di supporto è stata valutata lungo un percorso rettilineo che va dall'estremità dove si trova il sistema di estrazione fino all'estremità in cui entra la transfer line.

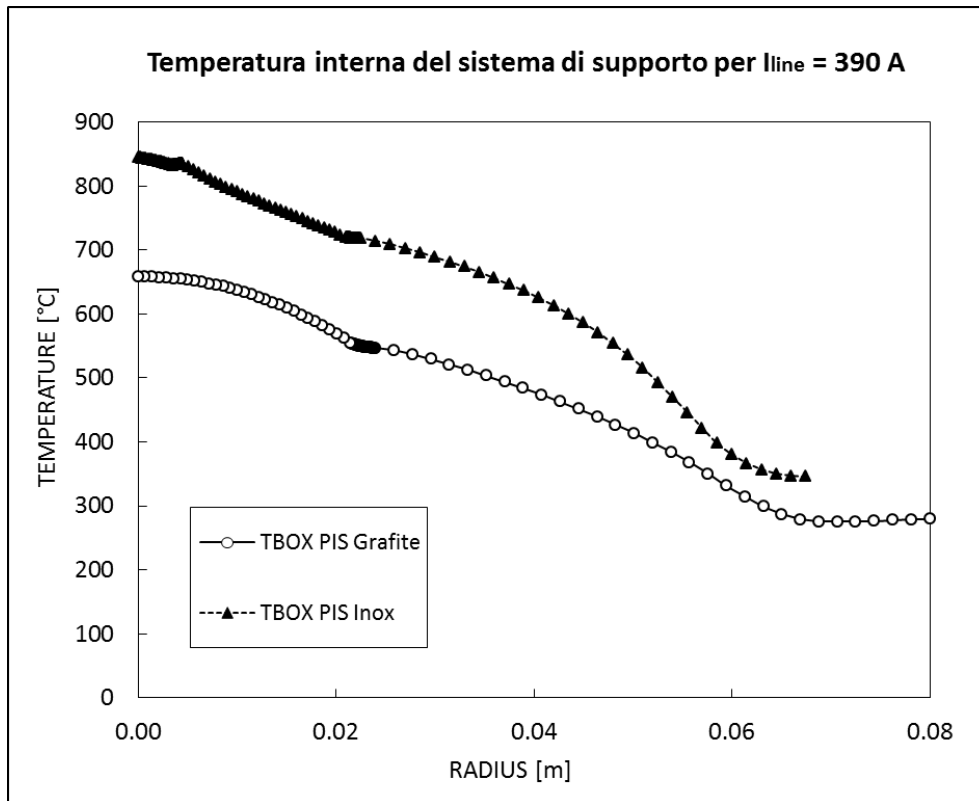


Figura 4-41: Temperatura interna della camera di supporto valutata per una corrente di alimentazione di 390 A

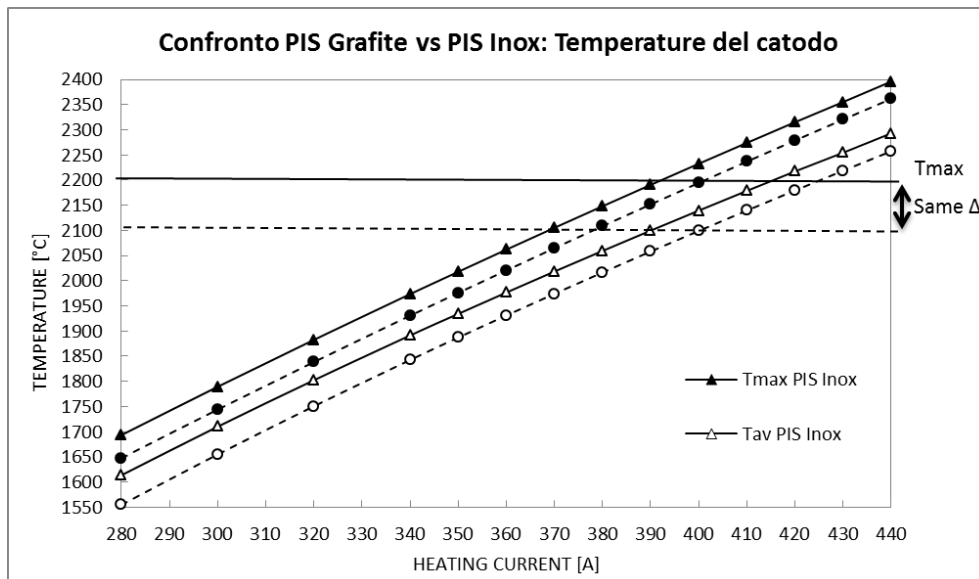


Figura 4-42: rappresentazione delle temperature medie e massime raggiunte dal catodo SPES montato sui due diversi sistemi di supporto.

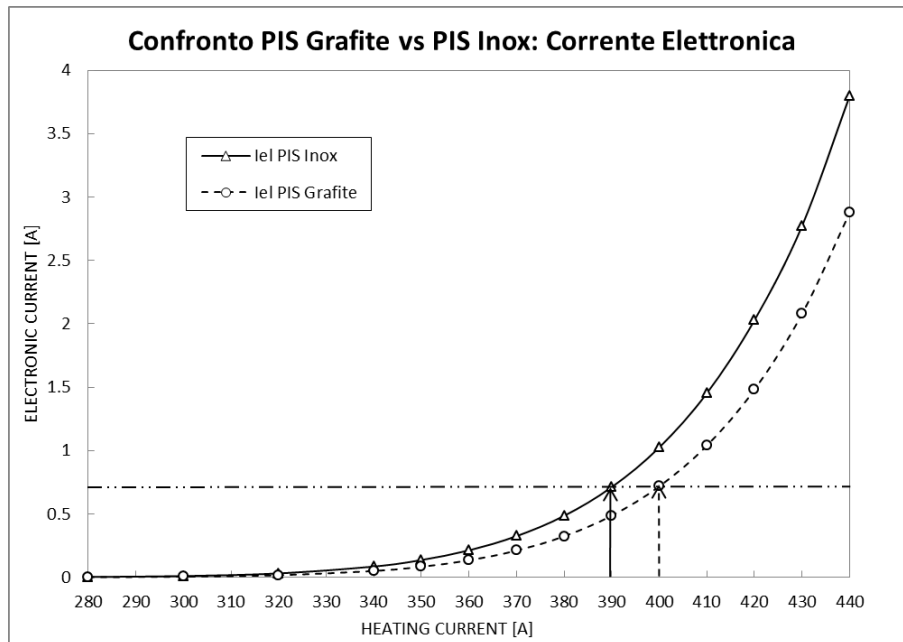


Figura 4-43: Produzione di corrente elettronica da parte del catodo SPES montato sui due diversi supporti. Curve calcolate con le funzioni di forma:  $\phi = 60 [V]$ ;  $Ab = 4.12 [A/cm^2K^2]$ . Da notare che il livello di soglia viene raggiunto per una corrente di linea maggiore nel caso del supporto in Grafite.

## 4.7 Analisi dei parametri di influenza del campo di temperatura

Per analizzare l'influenza della variazione di alcuni parametri significativi sul campo di temperatura di catodo e anodo sono state eseguite delle analisi numeriche fissando la corrente di linea a 390 A e facendo variare un parametro alla volta. I parametri di influenza analizzati sono: la geometria, il materiale del sistema di supporto e il materiale dell'anodo. La *mesh* utilizzata è uguale per tutti i componenti coincidenti nei vari modelli.

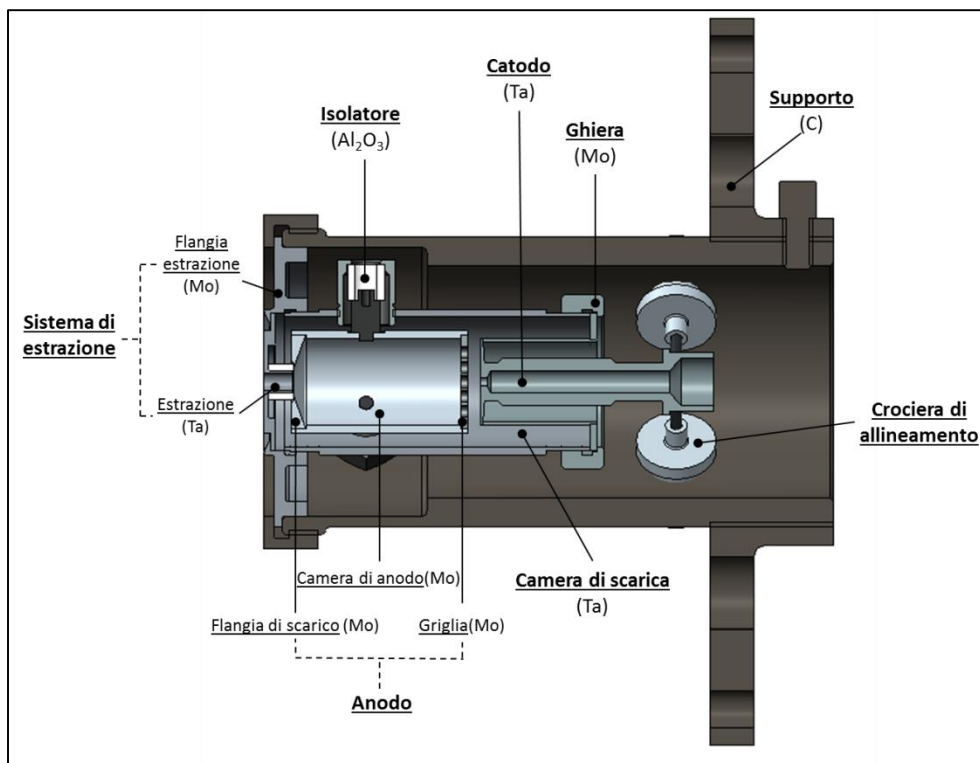
Per la valutazione dei fattori di influenza tra il modello della vecchia PIS (in Acciaio) ed il nuovo modello della PIS (in Grafite), sono state eseguite quattro diverse simulazioni variando tra una e l'altra un solo macro fattore. Prima si fa variare la geometria, poi il materiale del supporto e infine il materiale dei vari componenti. In questo modo è possibile valutare quanto siano influenti le variazioni di geometria apportate e soprattutto del materiale del sostegno. Le variazioni di geometria riguardano la nuova estrazione e il nuovo sistema di supporto. Le analisi sono state eseguite per una corrente di linea di 390 A dato che questa risulta la massima corrente che consente di rimanere al di sotto della soglia di sicurezza fissata ( $T_{max} < 2200^{\circ}C$ ) per la PIS in Acciaio. Vengono di seguito elencate le caratteristiche fondamentali assegnate per ogni analisi effettuata:

- 1) Analisi con il modello standard (G.Vivian) [6]: supporto in Acciaio inox, corpo dell'anodo in Tantalio, griglia dell'anodo in Molibdeno, estrazione tipo ISOLDE in Tantalio;
- 2) Analisi cambiando solo la geometria: quindi nuovo sistema di supporto e nuova estrazione (A.Monetti); vengono mantenuti i materiali utilizzati in precedenza (come Analisi 1);
- 3) Analisi con geometria modificata (come Analisi 2) ma cambiando materiale del supporto: si passa da Acciaio inox a Grafite;
- 4) Analisi ottenuta con la nuova geometria (come Analisi 3), cambiando materiale dei componenti quali anodo, catodo ed estrazione. Si è cercato di fare in modo che non ci siano collegamenti filettati con lo stesso materiale per evitare l'incollaggio dei pezzi. Questa situazione rappresenta verosimilmente la sorgente utilizzata per effettuare i test dato che deve essere periodicamente smontata. La scelta dei materiali definitivi per i test sono riportati in Tabella 4-12.

Tabella 4-12: Materiali consigliati per effettuare i test

Componente	Materiale
------------	-----------

Corpo anodo	Molibdeno
Griglia anodo	Molibdeno
Flangia di scarico	Molibdeno
Ghiera catodo	Molibdeno
Camera di scarica	Tantalio
Catodo	Tantalio
Flangia estrazione	Molibdeno
Estrazione	Tantalio
Supporto	Grafite EDM3



**Figura 4-44: Materiali consigliati per l'esecuzione dei test**

Dal grafico relativo all'andamento delle temperature del catodo (Figura 4-45) si evince che la variazione di geometria e del materiale dei componenti di anodo ed estrazione, non incidono sulla variazione del campo termico. I due effetti si compensano e comunque sono molto ridotti.

Invece la variazione del materiale del sistema di supporto ha un effetto molto importante; le temperature del catodo si riducono, come già mostrato nel capitolo precedente. La riduzione di temperatura è dovuta alla maggior emissività termica che presenta la Grafite rispetto all'Acciaio inox.

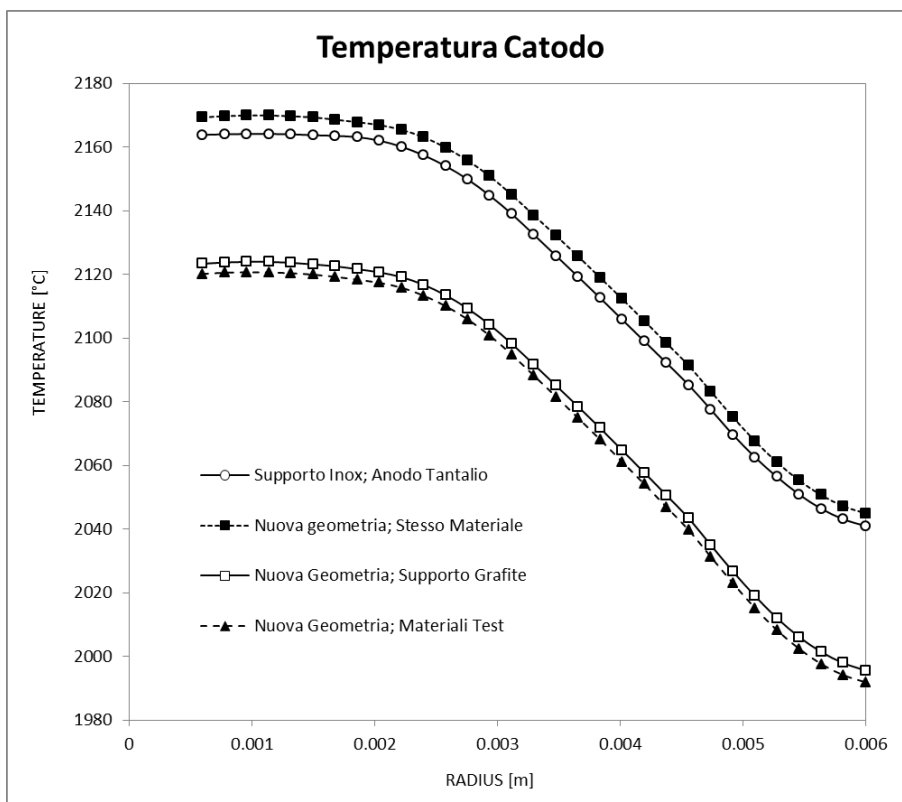


Figura 4-45: Andamento della temperatura del catodo lungo il raggio per le diverse configurazioni prese in esame. Dati per  $I_{line} = 390 \text{ A}$ .

Se l'influenza di materiale di anodo ed estrazione e della nuova geometria è modesta sul profilo di temperatura del catodo, ciò non è altrettanto vero per l'anodo. Per valutare la temperatura di quest'ultimo si è creato un *path* lungo la sua superficie interna (Figura 4-46).

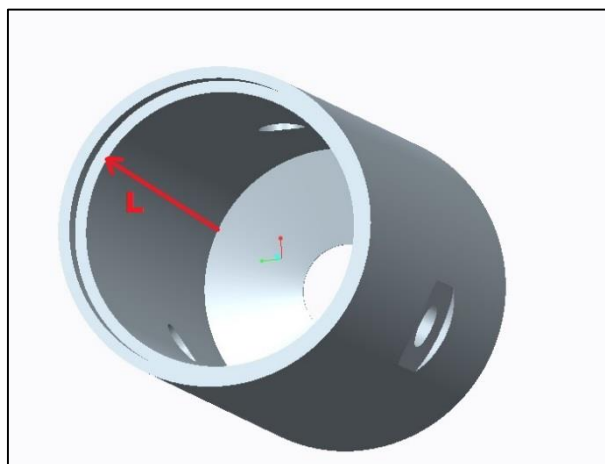


Figura 4-46: Path lungo cui è stata valutata la temperatura dell'anodo; si è cercato di evitare i fori dove viene posto il sistema di supporto dell'anodo.

Osservando il grafico relativo al campo termico dell'anodo si nota che l'effetto preponderante è dato dal materiale della camera di sostegno. Comunque risultano trascurabili gli effetti dovuti alla geometria e ai diversi materiali utilizzati.

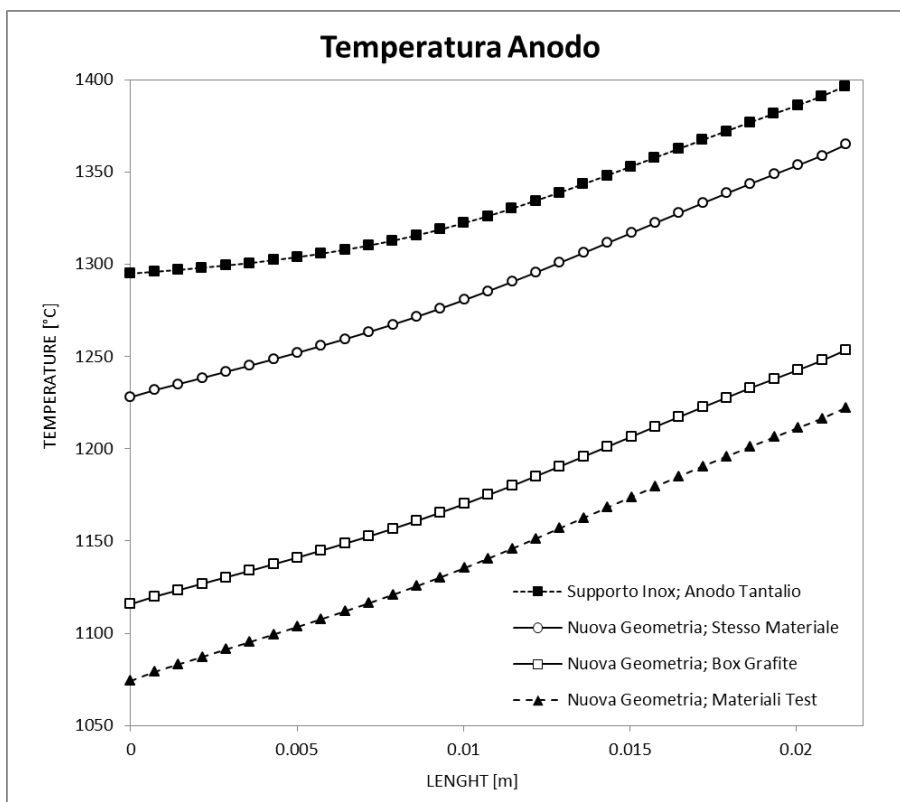


Figura 4-47: Andamento della temperatura dell'anodo lungo il path definito in Figura 4-46. Dati per Iline = 390 A.

Per la scelta definitiva dei componenti si è dovuto trovare un compromesso tra aumentare il più possibile le prestazioni della sorgente e garantire lo smontaggio della stessa per una manutenzione periodica. Ci si è chiesto se il materiale adottato per l'anodo incidesse in modo consistente sulla temperatura di quest'ultimo. Si è effettuata pertanto due analisi elettrotermiche tra le quali l'unica variazione apportata è stata quella relativa al materiale dell'anodo. Quindi Corpo dell'anodo, griglia ed estrattore sono stati ricoperti con elementi aventi proprietà diverse tra le due analisi lanciate. Dai dati riportati nella Tabella 4-13 e Tabella 4-14, si nota che la variazione del materiale dell'anodo non influisce molto sul campo termico del catodo, mentre per l'anodo si nota una differenza maggiore. Dai dati in possesso si evince chiaramente che il tantalio ha migliori proprietà termiche pertanto si cercherà di utilizzarlo per la costruzione dei componenti della sorgente per l'utilizzo *on line*. Ovviamente qui non si ragiona in termini di costi ma di prestazioni, in quanto il Tantalio ha un costo superiore al Molibdeno.

In ogni caso, per lo smontaggio, è necessario avere a contatto materiali diversi per limitare l'incollaggio tra i vari componenti.

Tabella 4-13 Temperature dell'anodo per Iline = 390 A

Box C+ Anodo Mo+ Estrazione Mo	Box C+ Anodo Ta+ Estrazione Mo
T MAX	T MAX
1212.8	1269.2
T MEDIA	T MEDIA
1137.0	1156.0

$\Delta T_{max}$	56.4
$\Delta T_{av}$	19.0

Tabella 4-14 Temperature del catodo per Iline = 390 A

Box C+ Anodo Mo+ Estrazione Mo	Box C+ Anodo Ta+ Estrazione Mo
T MAX	T MAX
2146.6	2147.4
T MEDIA	T MEDIA
2048.3	2049.4

$\Delta T_{max}$	0.8
$\Delta T_{av}$	1.1

## 4.8 Conclusioni

In questo capitolo si sono confrontate le diverse soluzioni costruttive che si possono adottare per costruire la sorgente di ionizzazione al plasma. I confronti effettuati sono necessari al fine di stabilire quale sia la migliore soluzione dato che si deve stabilire una soluzione definitiva per geometria e materiali da utilizzare. Dai risultati numerici si possono trarre delle conclusioni molto utili; innanzitutto si è visto come il Tantalo presenta migliori proprietà termiche rispetto al molibdeno e, sebbene il suo costo sia decisamente superiore, se ne consiglia l'utilizzo per la realizzazione dei componenti per il sistema definitivo. Inoltre si è visto come le nuove geometrie adottate e soprattutto l'utilizzo della grafite per il sistema di supporto comportino un abbassamento delle temperature globali della sorgente. Tale problema risulta parzialmente risolvibile con l'aumento della corrente di alimentazione; alternativamente si prevede l'utilizzo di schermi in tantalio per schermare internamente il supporto in Grafite al fine di migliorare la situazione globale di scambio termico.



## Bibliografia Capitolo 4

- [1]. Ansys® 16.1 Online Help, 2015.
- [2]. M. Manzolaro, Study, Design and Test of the Target – Ion Source System for the INFN SPES Facility, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [3]. C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, Trasmissione del Calore, Cleup Editore, 1992.
- [4]. G. Meneghetti, M. Manzolaro, M. Quaresimin, Introduzione all'Analisi Strutturale Statica con il Codice di Calcolo Ansys®, Edizioni Libreria Progetto Padova, 2012.
- [5]. G. Meneghetti, M. Manzolaro, Introduzione all'Analisi Termica con il Codice di Calcolo Ansys®, Edizioni Libreria Progetto Padova, 2012.
- [6]. G. Vivian, Tesi Magistrale, Studio, Progettazione e Test della sorgente di ionizzazione al plasma per il progetto SPES, Università degli studi di Padova, 2014.
- [7]. Modline® 5 Infrared Thermometer, *Installation and Operation Manual*, Ircon Inc.©, 2007
- [8]. Giulio Fanti, Sistemi di visione per misure dimensionali, Libreria Progetto, 2007.
- [9]. Giulio Fanti, Misure meccaniche e termiche, Libreria Progetto, 2014.

# CAPITOLO 5:

## CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA IN PRESENZA DI FASCIO

### 5.1. Introduzione

Nel seguente capitolo si vuole studiare la bontà dello studio effettuato sulla sorgente di ionizzazione al plasma attraverso una valutazione di tipo sperimentale. Verranno quindi presentate le misure effettuate presso i laboratori nazionali di Legnaro e le apparecchiature utilizzate per la caratterizzazione della sorgente PIS in termini di efficienza di ionizzazione e di emittanza. La misura di questi due parametri viene effettuata utilizzando una strumentazione all'avanguardia che incorpora al suo interno non solo nozioni di ingegneria meccanica ma anche di elettronica ed idraulica.

Tutte le strumentazioni sono implementate in un unico sistema, detto *front end* (FE), che è stato appositamente studiato per consentire l'esecuzione di test *off-line* su diverse tipologie di sorgenti. Con esso è possibile controllare il fascio prodotto dalla sorgente e valutarne alcune caratteristiche fisiche, necessarie per fornire valori di efficienza della sorgente e di emittanza del fascio. Tali parametri sono essenziali per poter valutare la qualità della soluzione progettuale adottata.

### 5.2. Descrizione apparato sperimentale FE

Il *front end* (FE) è un sistema composto da vari componenti studiati presso i laboratori nazionali di Legnaro ed è stato appositamente progettato per consentire la caratterizzazione delle sorgenti di ionizzazione di SPES in presenza di fascio, in termini di efficienza e di emittanza. Con esso è possibile controllare il fascio prodotto e valutarne alcune caratteristiche fisiche, necessarie per fornire valori attendibili di efficienza ed emittanza del fascio. Con l'ausilio di tali parametri è possibile dare un giudizio oggettivo sulla qualità della sorgente utilizzata. L'apparato sperimentale è divisibile in quattro macro settori:

- Camera da vuoto
- Sistema di estrazione e focalizzazione del fascio
- Stazioni di diagnostica
- Separatore di masse

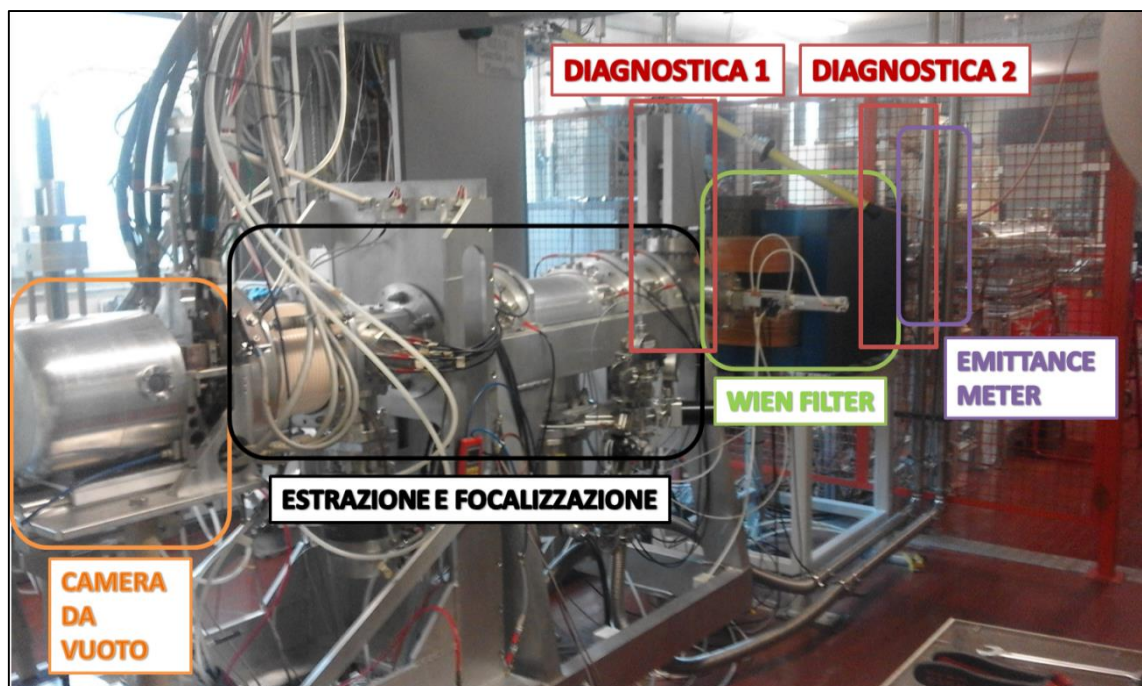


Figura 5-1: Front-end del progetto SPES

### 5.2.1. Camera da vuoto

La camera da vuoto è una struttura costruita in alluminio che ha la funzione di supportare ed alimentare i componenti *Target* e *Ion Source*. E' costituita principalmente da un piatto forato centralmente da cui fuoriescono tre puntali in rame argentato e da un coperchio a forma di pentola, i quali vengono tenuti assieme grazie al vuoto che viene a crearsi all'interno. Quest'ultimo è mantenuto grazie ad una guarnizione in gomma interposta tra piatto e coperchio. Nella Figura 5-2 si può vedere la camera utilizzata per montare la sola sorgente di ionizzazione (PIS o SIS), mentre in Figura 5-3 si vede la camera da vuoto utilizzata per eseguire i test *off line* sul *Target*, il cui coperchio deve essere raffreddato per via delle elevate temperature che altrimenti raggiungerebbe, data la disposizione ravvicinata ai componenti riscaldati.



Figura 5-2: Camera da vuoto utilizzata per la sorgente PIS. Il coperchio non è raffreddato ad acqua, si utilizzano dei getti d'aria compressa per evitare che le zone vicine agli O-ring rimangano a temperature superiori ai 100 °C.



Figura 5-3: Camera da vuoto utilizzata per il *Target*. Si notano i canali di raffreddamento saldati sul coperchio.

Rispetto al sistema per prove ad alta temperatura vi sono molte più complicazioni. La struttura che supporta la camera deve essere isolata elettricamente dal resto del sistema in quanto viene applicata una differenza di potenziale di 25 kV tra piatto ed elettrodo estrattore necessari per l'estrazione del fascio dalla sorgente di ionizzazione; per questo nella zona posteriore della camera è presente un grosso isolatore in Allumina (vedi Figura 5-4).

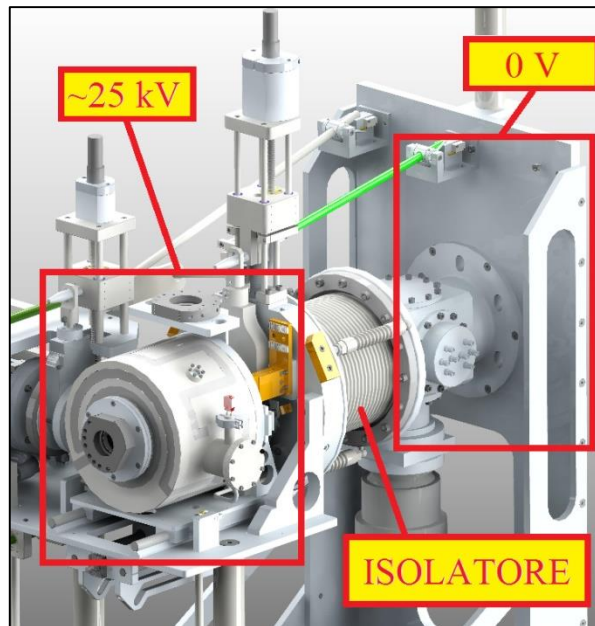


Figura 5-4: Modello CAD della camera attaccata al *front-end*

Tra la camera e il resto del sistema sono presenti due valvole VAT® per isolare il sistema una volta disconnessa la camera da vuoto; tale meccanismo consente di proteggere dalla polvere l'interno della camera e del *front-end*.

Dietro al piatto sono presenti vari connettori:

- connettori idraulici: che servono per alimentare con acqua de-ionizzata, proveniente da un *chiller*, il circuito di raffreddamento della camera;
- connettori elettrici: per alimentare i puntali di rame connessi al target e/o alla sorgente di ionizzazione, per alimentare gli *oven* (particolari fornetti, connessi tramite un tubicino alla linea di trasferimento, utilizzati per far evaporare alcune sostanze) e per alimentare l'anodo;
- connettore del gas: utilizzato per insufflare direttamente nella linea di trasferimento elementi gassosi contenuti in apposite bombole;



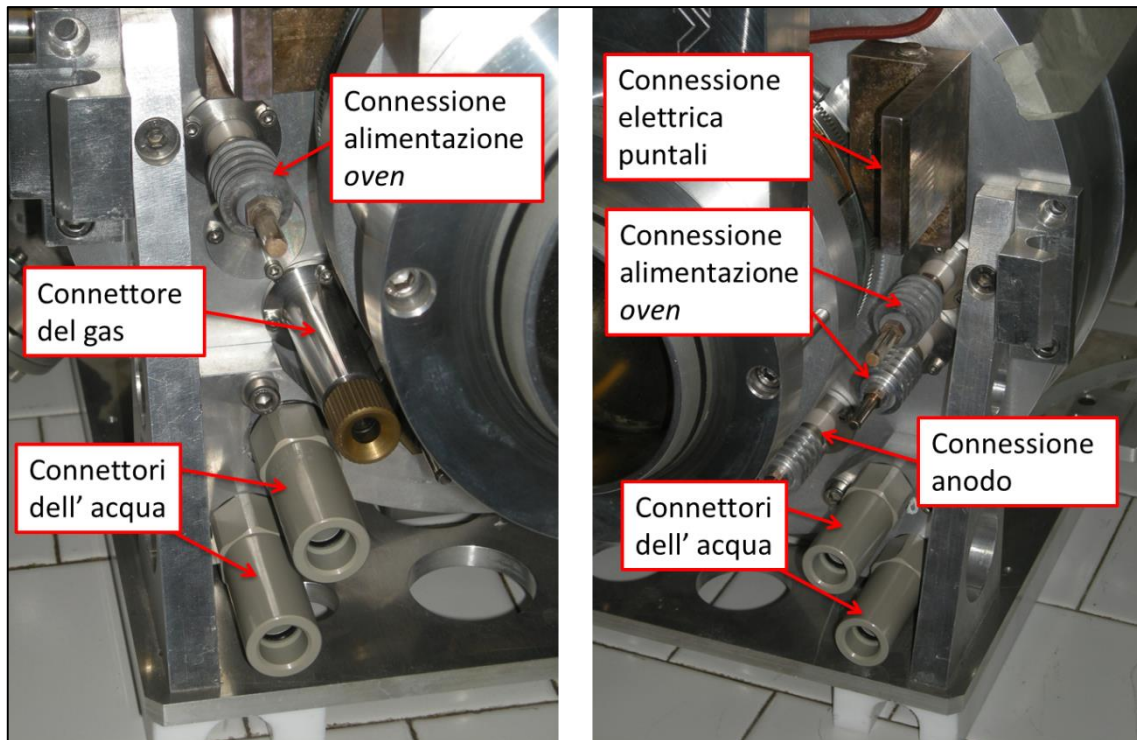


Figura 5-5: Parte posteriore della camera, i connettori si accoppiano perfettamente con il sistema *front-end*

Gli *oven* sono necessari nel caso si voglia produrre un fascio con una ben precisa quantità di atomi. Nel nostro caso invece la linea di trasferimento viene collegata direttamente ad un circuito dove scorre il gas che si intende ionizzare. Il fluido parte da una bombola e viene inviato, attraverso una valvola di laminazione, ad un dispositivo di filtraggio (“*leak*”) che è collegato alla camera. Quest’ultimo permette, nota la pressione di mandata, il passaggio di una portata calibrata, quindi di un numero noto di atomi di gas (per dettagli sul *leak* si veda l’appendice A).

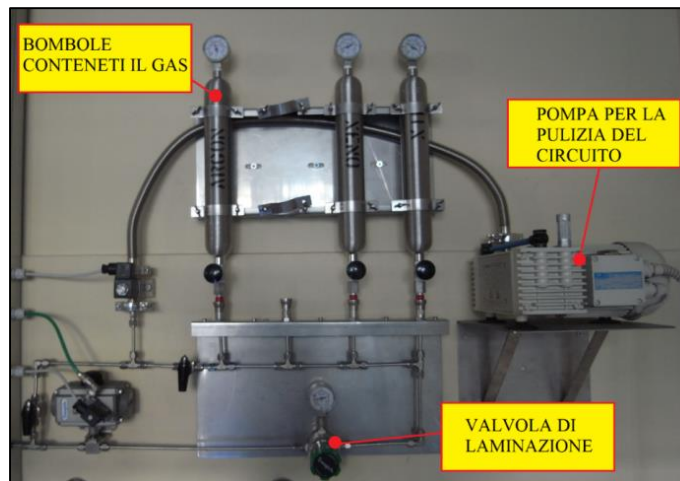


Figura 5-6: Circuito di alimentazione del gas

### 5.2.2. Sistema di estrazione e focalizzazione del fascio

Una volta avvenuta la ionizzazione, gli elementi carichi positivamente vengono estratti dalla sorgente di ionizzazione grazie ad una differenza di potenziale applicata di 25 kV applicata alla camera da vuoto. Gli ioni passano attraverso il foro di estrazione della sorgente ed accelerano verso un elettrodo estrattore (*Puller*) posto ad una certa distanza ( $d$  [%]) e collegato a massa (0 V). Un foro presente sull’elettrodo permette di far passare il fascio al quale è stata una energia sufficiente a raggiungere velocità dell’ordine dei 350’000 m/s. Eguagliando

infatti l'energia potenziale fornita ad una particella, con carica  $q_i$  di massa  $m_i$ , all'energia cinetica da questa acquistata, abbiamo:

$$q_i \Delta V = \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (5.1)$$

Considerando uno ione di Argon ( $Ar^{1+}$ ) con  $q_i=1,602 \times 10^{-19}$  [C] e  $m_i=6.6 \times 10^{-26}$  [Kg], applicando una differenza di potenziale di  $\Delta V=25'150$  V (valida per la PIS), otteniamo una velocità massima pari a:

$$v_i = \sqrt{\frac{2q_i \Delta V}{m_i}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,602 \times 10^{-19} \times 25150}{6,6 \times 10^{-26}}} = 349416,4 \frac{m}{s} \quad (5.2)$$

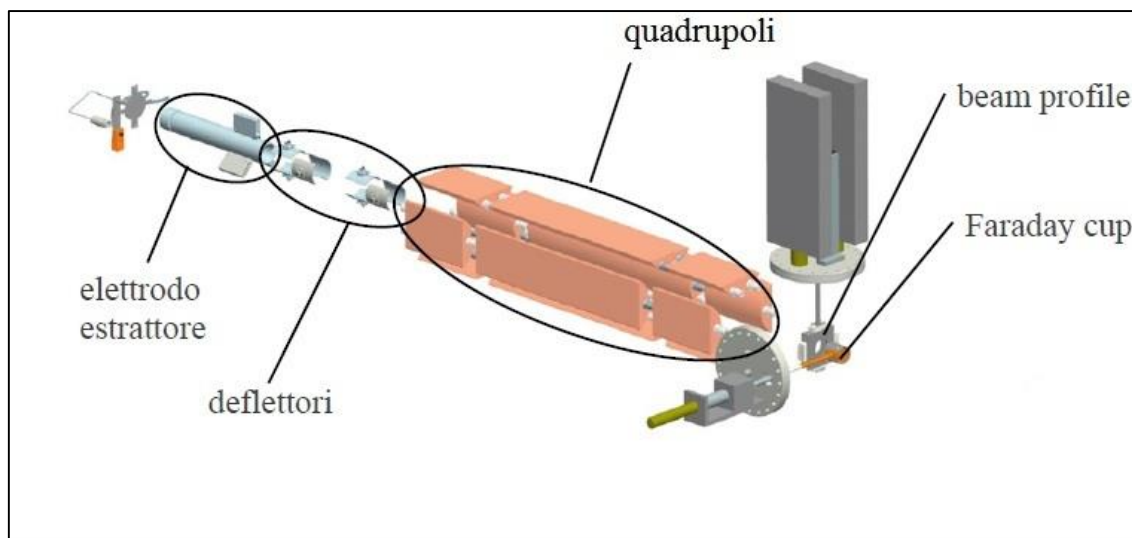


Figura 5-7: Sistema di estrazione e focalizzazione del fascio

Una volta attraversato l'elettrodo estrattore, il fascio entra in una zona dove sono posizionati quattro deflettori (in inglese: *steerers*): due verticali e due orizzontali disposti alternativamente. Hanno la funzione di deviare il fascio nelle due direzioni (x e y) ortogonali alla direzione di avanzamento del fascio (z) per renderlo centrato nella zona di diagnostica di interesse. Un deflettore è composto da due piastre che si caricano con segno opposto; il fascio, carico positivamente, viene pertanto attratto dalla piastra caricata negativamente e respinto da quella caricata positivamente. I valori di carica da fornire vengono scelti osservando il fascio con un profilatore (*Beam Profiler*) che fornisce un'immagine bidimensionale delle particelle che colpiscono l'apposito rilevatore. Le impostazioni variano a seconda della sorgente che si utilizza e dall'intensità del fascio estratto. In uscita dai deflettori si trova il Tripletto costituito da tre serie di quadrupoli. Un quadrupolo è formato da 4 piastre curve, posizionate a  $90^\circ$ , che vengono caricate con segno alterno; pertanto uno solo di questi oggetti focalizza lungo una direzione. La curvatura delle piastre consente di avere solo effetti lineari per date impostazioni di tensione. Unendo più quadrupoli in serie ruotati di  $90^\circ$  l'uno rispetto all'altro viene a crearsi uno strumento in grado di focalizzare il fascio nelle direzioni x e y. Anche in questo caso, i valori di tensione da fornire ai quadrupoli devono essere trovati sperimentalmente osservando il profilo del fascio. Prima di ogni misura è necessario verificare che i collegamenti elettrici non siano stati cambiati. E' possibile che una miglior focalizzazione lungo l'asse X, i collegamenti dei quadrupoli siano stati invertiti, pertanto il loro effetto risulta opposto a quanto indicato in Figura 5-8.

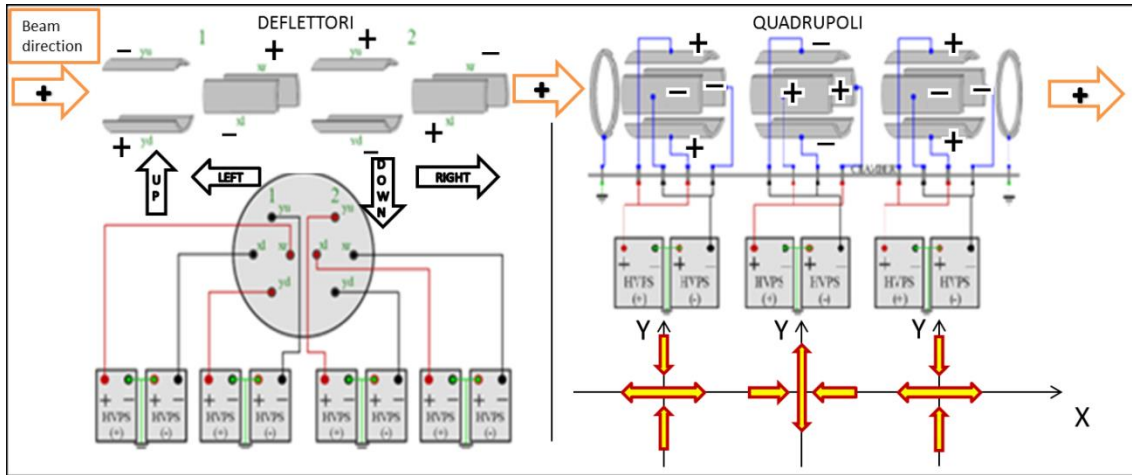


Figura 5-8: Collegamenti per Deflettori e Quadrupoli. **ATTENZIONE:** prima delle misure accertarsi che i fili di alimentazione siano collegati nel modo giusto. Se si vuole una migliore focalizzazione lungo l'asse X, i collegamenti dei quadrupoli risultano invertiti rispetto a quanto rappresentato in questa figura.

### 5.2.2.1. Distanza Puller - Sorgente

L distanza dell'elettrodo estrattore viene definita in termini percentuali. Tale distanza però non ha alcuna valenza pratica, pertanto è necessario stabilire quale sia la distanza effettiva misurata in unità di lunghezza. E' stata, pertanto, misurata la distanza del Puller dal piatto della camera da vuoto per dare un'informazione fisica valutabile quantitativamente. Per la misura è stato utilizzato un calibro di profondità di portata 200mm e sensibilità pari a 0,01mm. Sono state effettuate delle serie di misure movimentando in avanti ed indietro l'elettrodo estrattore; con i dati a disposizione è stato possibile effettuare un'analisi statistica per individuare l'incertezza di misura, valutata in  $\pm 0,8$ mm. L'incertezza della misura è data da vari fattori come: difficoltà di posizionamento del calibro ed imprecisione delle connessioni meccaniche. Viene riportato in seguito un grafico utile per una valutazione rapida della distanza del Puller dal foro di estrazione della sorgente. Si ricorda che l'estrazione ISOLDE risulta essere in posizione arretrata rispetto a quella SPES, pertanto i valori andranno aumentati di 1,6mm.

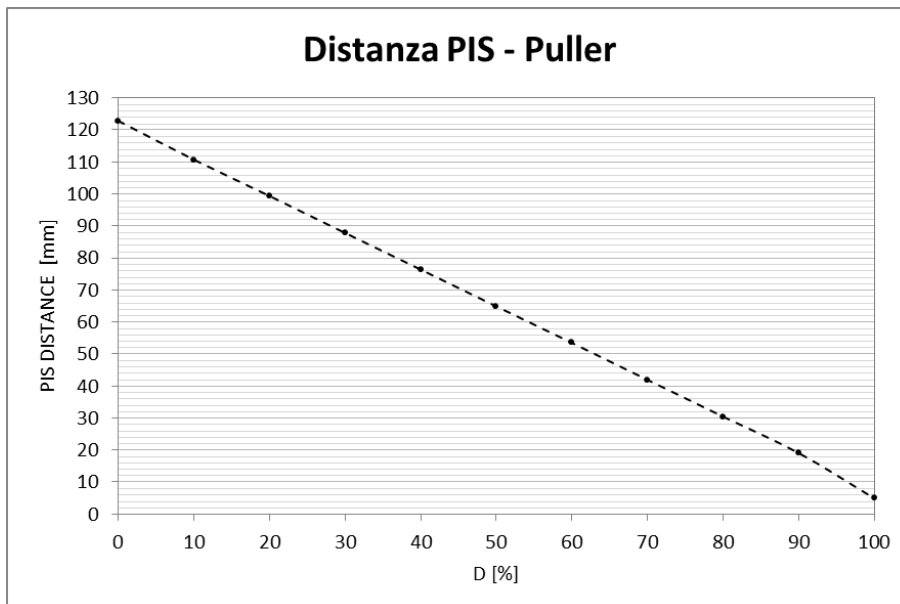


Figura 5-9: Distanza PIS-Puller. Estrazione tipo SPES. Se si monta l'estrazione ISOLDE, le distanze vanno aumentate di 1,6mm.



### 5.2.3. Stazioni di diagnostica

Nel *front end* sono presenti tre stazioni di diagnostica, una posizionata subito a monte e due a valle del separatore di masse (*wien filter*). Le prime due stazioni comprendono al loro interno una *faraday cup* e un *beam profiler*, che servono per valutare le proprietà del fascio (quali corrente totale di fascio, centraggio, focalizzazione), siccome la seconda è necessaria anche per effettuare le scansioni di massa (*mass scan*) in aggiunta ha al suo interno delle slitte che riducono il passaggio del fascio lungo l'asse orizzontale (asse x). Nella terza stazione di diagnostica è posizionato un misuratore di emittanza (*emittance meter*).

#### 5.2.3.1. La Faraday Cup [5]

Nella sua forma più semplice la *Faraday Cup* consiste in una camera metallica conduttrice elettricamente isolata (la cosiddetta coppa), che intercetta trasversalmente le particelle del fascio, catturandone gli ioni; un cavo elettrico ad essa collegato conduce la corrente che si stabilisce nella coppa verso l'esterno, dove il segnale rilevato viene opportunamente elaborato da strumenti di misura. La rilevazione può avvenire in modo semplice con l'impiego di un amperometro posto tra il cavo conduttore e la terra, oppure mediante un voltmetro od un oscilloscopio che visualizza l'andamento della differenza di potenziale misurata ai capi di un resistore calibrato posto tra il cavo conduttore e la terra.

La tazza metallica è la parte sensibile del dispositivo ed ha come funzione quella di intercettare e raccogliere gli ioni del fascio che si intende analizzare. Si tratta di atomi che vengono ionizzati ed accelerati in una certa direzione all'interno di una conduttura ad alto vuoto ed hanno, nel nostro caso, carica positiva. Il fascio entra attraverso l'apertura della tazza e quando gli ioni vengono a contatto con la sua superficie metallica, prelevano l'elettrone di cui necessitano per bilanciare la propria carica. Nel caso di fascio ionico, continuo e stabile, il flusso di elettroni prelevati va a formare una corrente che può essere misurata. La misura dell'intensità di corrente è direttamente proporzionale al numero di atomi al secondo che colpiscono il rivelatore ciò rende la *Faraday Cup* uno degli strumenti di diagnostica del fascio più semplice ed economico perciò il più utilizzato.

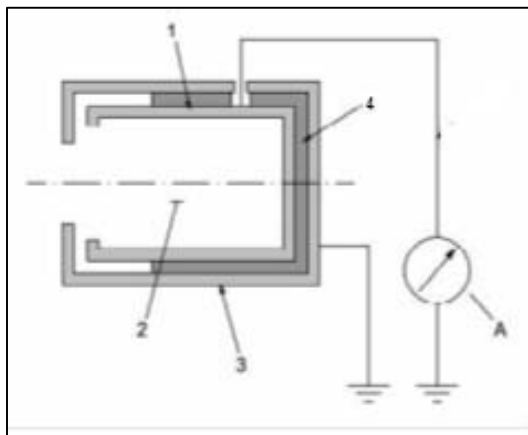


Figura 5-10: Schematizzazione di una *Faraday Cup*. I componenti principali sono: 1)Corpo conduttore , 2)Camera, 3)Soppressore, 4)Isolante.

La seguente relazione è valida per un fascio ionico continuo e stabile in cui ogni ione ha una carica singola:

$$\frac{N}{t} \left[ \frac{\text{ioni}}{s} \right] = \frac{I}{e} \left[ \frac{\text{elettroni}}{s} \right] \quad (5.3)$$

Per cui dalla misura della corrente  $I$  è possibile conoscere il numero di ioni  $N$  che entrano nella sezione di misura nel tempo  $t$ , essendo “ $e$ ” la carica elementare dell'elettrone pari a  $1,602 \times 10^{-19}$  C.

Siccome normalmente è necessario leggere variazioni del nano Ampere, il segnale in uscita dalla *faraday cup* dovrà essere opportunamente amplificato, poiché una corrente di 1 nA corrisponde ad un flusso di  $6,25 \times 10^9$  elettroni al secondo e si capisce che il segnale in uscita. Caratteristica peculiare di questo strumento è la possibilità di misurare correnti molto piccole senza eccessive alterazioni da parte del rumore. La misurazione di correnti così piccole è particolarmente utile nel caso dei fasci radioattivi.

Il lato negativo è che la *Faraday Cup* rappresenta un elemento di diagnostica distruttivo in quanto al momento della misura, l'intero fascio è bloccato e non più utilizzabile a valle.

Per evitare letture errate di corrente da parte dello strumento (solitamente più elevate) si ricorre all'uso di soppressori che vengono caricati negativamente per respingere eventuali elettroni che si staccano dal fondo della coppa quando viene colpita dal fascio di ioni.

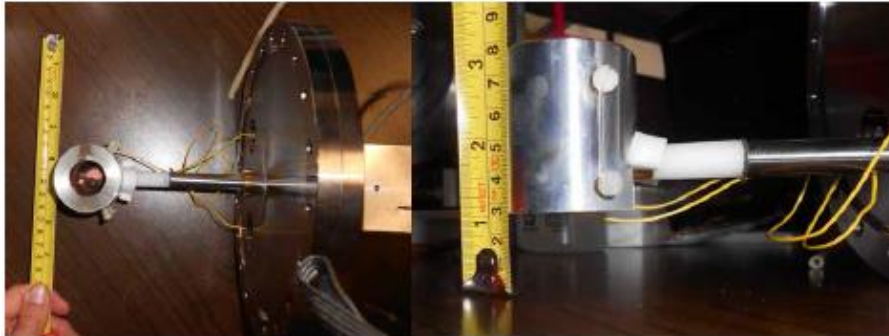


Figura 5-11: *Faraday cup* posizionata nella diagnostica 1 attualmente utilizzata presso i Laboratori Nazionali di Legnaro

### 5.2.3.2. Il Beam profiler

Il *Beam profiler* è uno strumento di diagnostica che consente di verificare il corretto posizionamento del fascio. Il principio di funzionamento è molto simile a quello della *Faraday cup*. Il fascio prodotto dalla sorgente va ad impattare una griglia formata da fili in tungsteno rivestiti collegati a massa, vengono pertanto richiamati degli elettroni che percorreranno i fili.

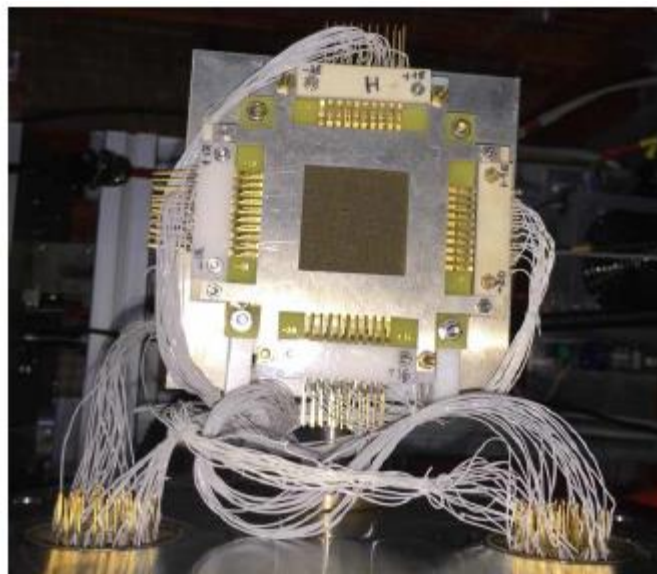


Figura 5-12: Griglia del *Beam Profiler*

Maggiore sarà l'intensità del fascio che colpisce un filo e maggiore sarà la corrente che vi passa. Questa viene quindi misurata e nota la posizione dei fili viene plottata su un grafico che presenta in ascissa la posizione del fascio ed in ordinata la sua intensità. La misura viene effettuata su entrambi gli assi orizzontale (X) e verticale (Y). Viene mostrato in Figura 5-13 una misura, si nota il fascio, visualizzato con il colore bianco e rosso, a seconda che sia più o meno intenso; in nero è visualizzata la zona in cui non c'è fascio. Il perimetro tratteggiato indica il profilo della *Faraday Cup*, quest'ultima verrà investita completamente se il fascio rimane dentro a tale perimetro e quindi si misurerà la massima corrente totale di fascio. Pertanto si capisce che per avere un buon centraggio bisognerà fare in modo (attraverso l'uso dei deflettori) che il massimo valore di corrente del fascio (zona bianca) sia posizionato al centro della croce tratteggiata, mentre per avere una buona focalizzazione è necessario che tutto il fascio (zona bianca più zona rosa) sia contenuto nei cerchi tratteggiati (utilizzando i quadrupoli).

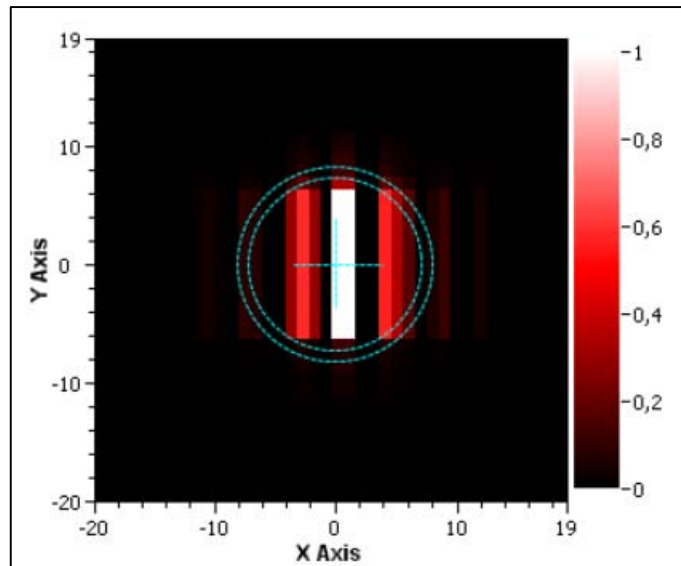


Figura 5-13: Profilo del fascio riportato come output dal sistema di diagnostica

### 5.2.3.3. L'Emittance meter

L'*emittance meter* è uno strumento appositamente studiato per misurare l'emittanza di un fascio nei piani orizzontale (x) e verticale (y). Per ogni asse la strumentazione è composta da un collimatore a fessura e una griglia di filamenti in tungsteno dorato.

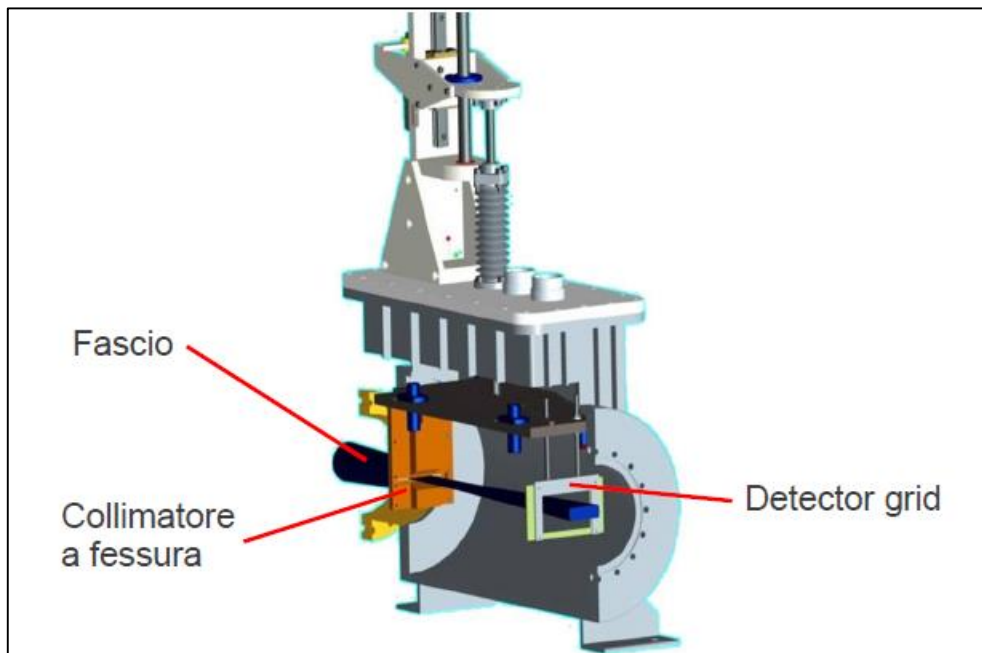


Figura 5-14: Vista in sezione dell'*emittance meter* attualmente utilizzato nel front-end SPES

La griglia misura la corrente, rappresentativa dell'intensità del fascio, mentre la posizione è determinata dallo spostamento della fessura del collimatore. Pertanto per ogni posizione è possibile ricavare anche l'angolo di inclinazione della porzione di fascio che passa per il collimatore (vedi Figura 5-15). Ovviamente le misure che vengono effettuate forniscono dati discreti che devono essere opportunamente elaborati tramite un apposito codice di calcolo (Matlab®).

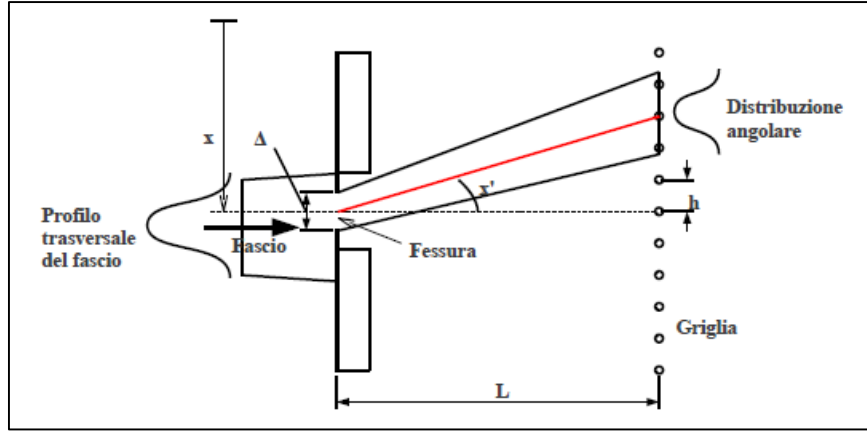


Figura 5-15: Schema di funzionamento dell'emittance meter

Per effettuare le misure è necessario focalizzare il fascio, tramite i quadrupoli, sull'emittance meter. Questa operazione non modifica i valori di emittanza poiché la focalizzazione fa variare sia la dimensione trasversale che l'angolo di inclinazione con cui viaggiano le particelle cariche. Tale affermazione è dedotta dal **teorema di Liouville** il quale afferma che: "Il moto di un gruppo di particelle sotto l'azione di forze conservative è tale per cui, la densità locale delle stesse nello spazio delle fasi rimane ovunque costante". Il che significa, in sostanza, che l'emittanza si conserva se sul fascio vengono applicate delle forze conservative esterne (come accade nel caso si focalizzi il fascio tramite i quadrupoli).

Dato che l'emittance meter fornisce il valore della corrente che passa per i fili della griglia, per calcolare l'emittanza è necessario tradurre tale segnale in un valore di posizione ed angolo.

Chiamiamo con  $\bar{x}$  la coordinata della posizione del centro del fascio, mentre con  $\bar{x}'$  indichiamo la sua coordinata angolare, abbiamo:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i (x_i \sum_j I_{ij})}{\sum_i \sum_j I_{ij}} \quad \bar{x}' = \frac{\sum_j (x'_j \sum_i I_{ij})}{\sum_i \sum_j I_{ij}} \quad (5.4)$$

Quindi, similmente a quanto presentato nel capitolo 2, è necessario portarsi nella condizione di ellisse centrato nello spazio delle fasi:  $(x'^2 - \bar{x}'^2)$

$$\langle (x - \bar{x})^2 \rangle = \frac{\sum_j (\sum_i (x_i - \bar{x})^2 I_{ij})}{\sum_i \sum_j I_{ij}} \quad \langle (x' - \bar{x}')^2 \rangle = \frac{\sum_j ((x'_j - \bar{x}')^2 \sum_i I_{ij})}{\sum_i \sum_j I_{ij}} \quad (5.5)$$

$$\langle (x - \bar{x})(x' - \bar{x}') \rangle = \frac{\sum_j \sum_i (x - \bar{x})(x' - \bar{x}') I_{ij}}{\sum_i \sum_j I_{ij}} \quad (5.6)$$

Con questi valori è possibile calcolare l'emittanza r.m.s. come:

$$\varepsilon_{r.m.s.,x} = \left( \langle (x - \bar{x})^2 \rangle \langle (x' - \bar{x}')^2 \rangle - \langle (x - \bar{x})(x' - \bar{x}') \rangle^2 \right)^{1/2} \quad (5.7)$$

E quindi i parametri di Twiss:

$$\gamma_x = \frac{\langle (x' - \bar{x}')^2 \rangle}{\varepsilon_{r.m.s.,x}} \quad \alpha_x = \frac{\langle (x - \bar{x})(x' - \bar{x}') \rangle}{\varepsilon_{r.m.s.,x}} \quad \beta_x = \frac{\langle (x - \bar{x})^2 \rangle}{\varepsilon_{r.m.s.,x}} \quad (5.8)$$

L'ellisse relativo all'emittanza r.m.s. è rappresentabile attraverso la seguente equazione:

$$\gamma(x - \bar{x})^2 + 2\alpha(x - \bar{x})(x' - \bar{x}') + \beta(x' - \bar{x}')^2 = \varepsilon_{r.m.s.,x} \quad (5.9)$$

Le formule sovraesposte sono state implementate in un programma Matlab® in grado di leggere i file di output derivanti dalla misura di emittanza, composti da matrici  $n \times m$  (posizione  $x$  angolo) contenenti i valori di corrente misurati, e di riportare in un file di testo i relativi valori di emittanza r.m.s. e dei parametri di Twiss.

## 5.2.4. Separatore di massa

Il separatore di masse è uno strumento molto importante poiché permette di separare dal fascio tutti quegli elementi non desiderati e considerati quindi delle impurezze. Come dice il suo nome, esso è in grado di separare solamente le masse pertanto elementi con ugual massa di isotopi di altri elementi non sono separabili con questo metodo; come ad esempio gli isotopi  $^{132}\text{Cs}$  e lo  $^{132}\text{Sn}$  che sono tra loro isobari. Il suo funzionamento non è complicato e sfrutta la possibilità di utilizzare campi elettromagnetici per deviare le particelle cariche. Gli ioni dotati di velocità  $\vec{v}$  lungo l'asse  $z$  vengono fatto entrare, attraverso una fenditura, in un condotto in cui agiscono: un campo elettrico  $\vec{E}$  uniforme tra due elettrodi paralleli piani diretto lungo l'asse orizzontale ( $x$ ) e un campo magnetico uniforme  $\vec{B}$ , diretto lungo l'asse verticale ( $y$ ). I due campi  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  sono quindi ortogonali tra loro come pure alla velocità dello ione entrante. La forza esercitata sullo ione sarà la forza di Lorentz esprimibile come:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_E + \vec{F}_B = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (5.10)$$

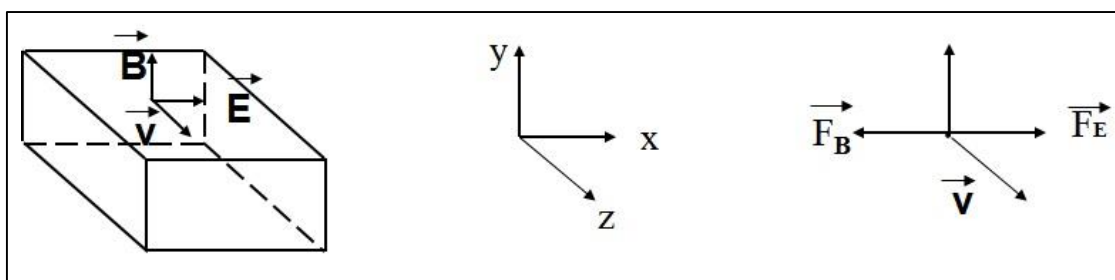


Figura 5-16: Immagine dei vettori velocità, campo elettrico e magnetico all'interno del Wien Filter.

Notiamo che per uno ione, ad esempio positivo:

- 1) la forza elettrica  $\vec{F}_E = q\vec{E}$  è diretta lungo  $x$ , nello stesso verso del campo elettrostatico  $\vec{E}$ ;
- 2) la forza magnetica  $\vec{F}_B$ , ortogonale alla velocità  $\vec{v}$  (parallela a  $z$ ) e al campo magnetico  $\vec{B}$  (parallelo a  $y$ ), sarà diretta lungo l'asse  $x$  ma con verso opposto a quello di  $\vec{F}_E$ .

La particella prosegue indisturbata sul suo cammino rettilineo uniforme se è verificata almeno una delle due condizioni:

- se  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  sono entrambi nulli
- se  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  sono tali che le due forze elettrica e magnetica siano uguali in modulo e opposte in verso, cioè se:

$$\vec{F}_L = 0 \Rightarrow \vec{F}_E = -\vec{F}_B \Rightarrow q|\vec{E}| = q|\vec{v} \times \vec{B}| = |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \sin\theta = vB \quad (5.11)$$

Ponendo all'uscita dal filtro una fenditura in corrispondenza della traiettoria inflessa dello ione, potranno uscire dal filtro solo quegli ioni la cui velocità soddisfa l'ultima relazione, cioè se ha velocità  $v$ :

$$v = \frac{E}{B} \quad (5.12)$$

Da qui il nome di *filtro di velocità*, detto anche *Filtro di Wien*.

Nel sistema *front-end* gli ioni vengono accelerati per effetto della differenza di potenziale tra camera da vuoto ed elettrodo. Durante questa fase l'energia fornita dal campo elettrostatico, data dal prodotto della carica  $q$  degli ioni per il potenziale elettrico  $V$ , si trasforma in energia cinetica

$$qV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.13)$$

Pertanto si capisce che a masse diverse corrispondono velocità diverse. Gli ioni accelerati passano quindi nell'analizzatore, costituito da un tubo posto in un magnete, e alla fine del tubo si trovano le slitte ed il rivelatore che nel nostro caso è la seconda *Faraday Cup*. Il campo magnetico  $B$  esercita sugli ioni una forza centripeta  $Bvq$  che li costringe ad una traiettoria circolare di raggio  $r$ . La forza centripeta è uguale alla forza centrifuga:

$$Bqv = \frac{mv^2}{r} \quad (5.14)$$

Dalle due equazioni si ha:

$$\frac{m}{q} = \frac{B^2 r^2}{2V} \quad (5.15)$$

Questa relazione fra il rapporto massa/carica e il campo magnetico indica che ioni con carica uguale e massa differente percorrono la traiettoria verso il rivelatore a valori differenti di campo magnetico. Aumentando progressivamente il campo magnetico si portano al rivelatore ioni sempre più pesanti: in pratica la scansione di campo magnetico permette di ottenere lo spettro di massa dei diversi ioni. Il rivelatore, costituito dalla seconda *Faraday Cup*, è separata dal *Wien Filter* da due slitte che si aprono in senso orizzontale e vengono regolate per avere una fenditura che consente di ottenere la migliore risoluzione. L'apertura varia in funzione della corrente totale di fascio che arriva nella seconda diagnostica e del suo allineamento; più elevata risulta l'intensità del fascio e minore dovrà essere l'apertura delle slitte per avere dei buoni *mass scan*. Viceversa se il fascio non è ben centrato.

#### 5.2.4.1. Scansioni di massa (*mass scan*)

I *mass scan* sono delle scansioni di massa. Tramite questa operazione è possibile suddividere con precisione le varie masse presenti nel fascio generato dalla sorgente di ionizzazione. Le operazioni principali da fare per eseguire una scansione sono:

- Verifica del centraggio del fascio con il *Beam Profiler 1*
- Focalizzazione e lettura del valore della corrente di fascio totale in *Faraday Cup 1*
- Verifica della focalizzazione del fascio con il *Beam Profiler 1*
- Verifica del centraggio del fascio con il *Beam Profiler 2*
- Focalizzazione e lettura del valore della corrente di fascio totale in *Faraday Cup 2*
- Verifica della focalizzazione del fascio con il *Beam Profiler 2*
- Impostazione apertura slitte (solitamente 2 o 4 mm in funzione dell'intensità del fascio)
- Verifica della stabilità della corrente in *Faraday Cup 2*
- Impostazione del *Wien Filter* con i seguenti parametri:

Campo elettrico [kV/m]	120
Massa iniziale [A]	0
Massa finale [A]	200
Step di massa [A]	0.05
Tempo di esposizione [s]	0.3

- Accensione delle piastre del *Wien filter* ed impostazione del voltaggio da applicare alle piastre (3000V). Questo è necessario per verificare che le due piastre si carichino correttamente;
- Impostazione di nome e numero del *mass scan* ed inserimento delle note da riportare nel file di output;
- Avviamento la scansione tramite il tasto "Start".

I valori trovati tramite le scansioni vengono poi riportati in un grafico dove in ascissa vengono posti i valori delle masse degli elementi in rapporto alla propria carica, mentre in ordinata viene segnata la corrente massima prodotta dagli ioni di tali elementi.

Il valore del campo elettrico è impostato per avere la massima separazione tra le varie masse. Lo step di massa è l'incremento tra una corrente di magnete e quella successiva ed è un parametro che consente di avere uno spettro con una buona definizione dei picchi. Il tempo di esposizione serve, invece, per impostare la quantità di secondi in cui si analizza una determinata corrente di magnete.

L'esecuzione dei *mass scan* è di fondamentale importanza per il calcolo dell'efficienza della sorgente di ionizzazione al plasma in quanto consente di definire precisamente quali e quanti sono gli atomi degli elementi che sono stati ionizzati. E' possibile quindi risalire agli ioni che sono prodotti al secondo e quindi è possibile ricavare l'efficienza della sorgente.

### 5.2.4.2. Contaminazione del fascio

I contaminanti sono elementi non inseriti volontariamente nella sorgente e quindi non desiderati nella composizione finale del fascio; tramite i *mass scan* è possibile valutare quali sono questi elementi e in che quantità sono presenti. La contaminazione è dovuta principalmente alla qualità del vuoto che si riesce a creare all'interno della camera; tuttavia, in particolari condizioni, vi possono essere delle contaminazioni causate dalla sublimazione di componenti costituenti la camera (Alluminio, Rame, Acciaio) e la sorgente stessa (Tantalio). Il fatto negativo è che gli elementi che appartengono a questa categoria hanno potenziale di ionizzazione inferiore a quello dell'Argon (elemento insufflato nella linea di trasferimento), e sono quindi responsabili di valori bassi di efficienza; pertanto è necessario fare in modo di limitare la loro presenza all'interno del fascio. In Tabella 5-1 vengono elencati alcuni degli elementi che si possono trovare in un fascio prodotto attraverso la sorgente di ionizzazione al plasma.

Tabella 5-1: Alcuni degli elementi che vengono ionizzati durante le prove con la sorgente al plasma

<b>ELEMENTO</b>	<b>m/q [u]</b>	<b>Carica</b>
Idrogeno (H)	1	1+
Idrogeno (H <sub>2</sub> )	2	1+
Carbonio (C)	12	1+
Azoto (N)	14	1+
Azoto (N <sub>2</sub> )	14	2+
Ossigeno (O)	16	1+
Acqua (H <sub>2</sub> O)	18	1+
Argon (Ar)	20	2+
Sodio(Na)	23	1+
Azoto (N <sub>2</sub> )	28	1+
Monossido di Carbonio (CO)	28	1+
Ossigeno (O <sub>2</sub> )	32	1+
Potassio(K)	39	1+
Argon (Ar)	40	1+
Anidride Carbonica (CO <sub>2</sub> )	44	1+
Cromo (Cr)	52	1+
Ferro (Fe)	56	1+
Nichel (Ni)	58	1+
Rame (Cu)	63/65	1+
Tantalio (Ta)	90.5	2+
Tantalio (Ta)	181	1+
Ossido di Tantalio (TaO)	197	1+

In seguito sono riportati dei *mass scan* di *background*, ovvero effettuati non insufflando alcun gas attraverso l'apposito condotto e nessun elemento attraverso l'*oven*. Questo consente di determinare quali elementi sono già presenti all'interno della sorgente e che influenzeranno quindi la ionizzazione dell'elemento di interesse.

Le scansioni di massa non sono sempre di facile interpretazione poiché alcuni elementi ionizzati due volte possono avere un rapporto m/q simile o uguale ad elementi ionizzati una volta. Pertanto per essere sicuri si tratti di un elemento invece che un altro è necessario verificare innanzitutto che vi siano gli elementi base, successivamente si guarda se ci sono gli isotopi di quell'elemento e se sono in proporzione tra loro, poi si cercano possibili molecole, infine si valuta la presenza di elementi ionizzati due volte. E' logico non aspettarsi una doppia ionizzazione se non è avvenuta la prima.

Come si vede dalla Figura 5-17, vi sono vari picchi rappresentativi vari elementi. Analizzando i primi due picchi si nota che hanno masse 1 e 2: sono i gas più leggeri della tavola periodica e devono essere isotopi stabili. Perciò il primo è senza dubbio Idrogeno. Sappiamo che H ha un isotopo stabile con massa 2, cioè il Deuterio, tuttavia il rapporto delle correnti fa escludere che ci sia poiché H con numero di massa unitario ha un'abbondanza superiore al 99,8% dell'Idrogeno totale. Ricordando però che l'Idrogeno ha anche una forma bi-atmica (la molecola del gas è H<sub>2</sub>) si capisce il perché sono presenti due picchi. Si potrebbe osservare che dal momento che stiamo studiando il rapporto m/q, nel caso siano presenti ioni con carica doppia, si potrebbe avere Elio, che ha massa atomica 4 ionizzato due volte, tuttavia questo non è il caso poiché il picco dello stesso elemento ionizzato 1+ non è presente. Si nota che i picchi più elevati sono dati dalle masse 12u, 14u e 16u e sono rappresentative rispettivamente di Carbonio, Azoto e Ossigeno. Sembra chiaro che tali elementi siano dovuti principalmente alla qualità del vuoto all'interno della camera in quanto l'aria è composta prevalentemente da Azoto, Ossigeno, Argon e altri gas tra cui l'anidride carbonica e l'Idrogeno. Inoltre

l'umidità porta alla possibile presenza di acqua. E' possibile che alcuni picchi siano dovuti anche ad elementi ionizzati due volte, come ad esempio la massa  $14u$  che potrebbe derivare da una doppia ionizzazione della massa  $28u$ .

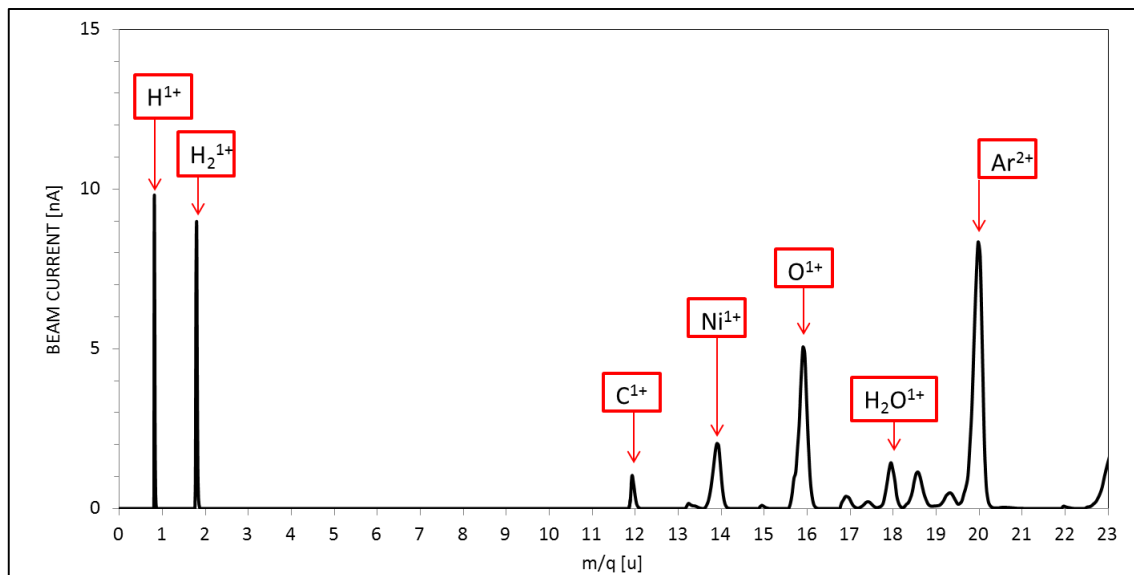


Figura 5-17: Scansione di massa da 0 a 23 [u].

Aumentando il rapporto  $m/q$ , come si può vedere dalla Figura 5-18, vi sono vari picchi tra i quali spicca il maggiore, composto da elementi quali monossido di Carbonio ( $CO^+$ ), Azoto ( $N_2^+$ ) e Alluminio ( $Al^+$ ) (quest'ultimo è presente in quantità esigua rispetto alle altre due), che è dovuto in parte al degassaggio della maschera in grafite che riveste la sorgente e in parte dalla qualità del vuoto che si riesce a creare all'interno della camera. Un altro elemento che non è riportato nei *mass scan* ma che potrebbe apparire è il sodio (Na), massa  $23u$ , dovuto al contatto degli oggetti con il sudore o con la pelle. È per questo che è necessario indossare i guanti durante il montaggio. Tuttavia questo elemento, così come il Potassio, ha una bassa energia di prima ionizzazione e viene estratto molto in fretta dalla sorgente: la pulizia è rapida e non rallenta il proseguo delle prove. Per quanto riguarda il Potassio, bisogna fare anche un'ulteriore osservazione: il numero di massa di questo elemento è  $39u$ , quindi molto vicino a quello dell'Argon ( $40u$ ) che è l'elemento che più spesso viene utilizzato per le prove di efficienza. La differenza piccola fra il peso delle due particelle fa sì che utilizzando un filtro di *Wien* con bassa risoluzione non si è in grado di separare in modo preciso le due masse ed il picco relativo al Potassio "scompare" perché assimilato a quello dell'Argon.

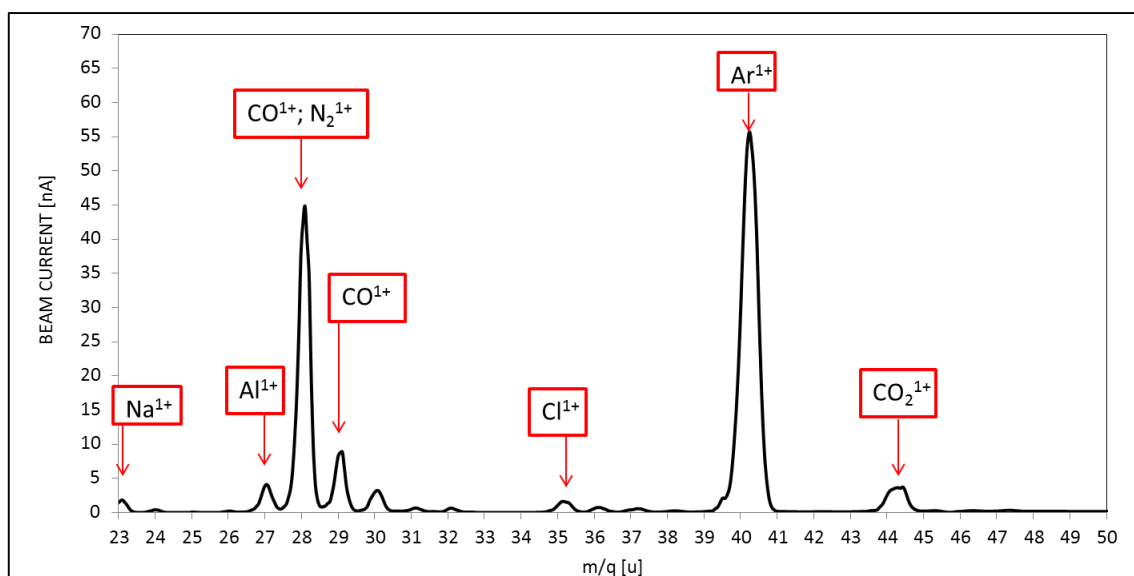


Figura 5-18: Scansione di massa da 23 a 50 [u]



Andando a vedere gli elementi più pesanti, si nota una massiccia quantità di Ferro ( $56u$ ) che è presente poiché una buona parte dei componenti del sistema di supporto sono in Acciaio che va ad alte temperature. I picchi intorno a quello principale dovrebbero essere dovuti, oltre agli isotopi del Ferro meno abbondanti, anche ai leganti che compongono l'Acciaio, cioè Cromo ( $52u$ ) e Nichel ( $58u$  e  $60u$ ). Il Carbonio è già stato preso in considerazione. Oltre a questi vi sono anche il Tantalio ionizzato due volte ( $91u$ ) e Molibdeno ( $98u$ ) che compongono le parti che raggiungono le temperature più elevate della sorgente. Inoltre vi è la presenza di Rame ( $64u$  e  $65u$ ) derivante dalle connessioni elettriche.

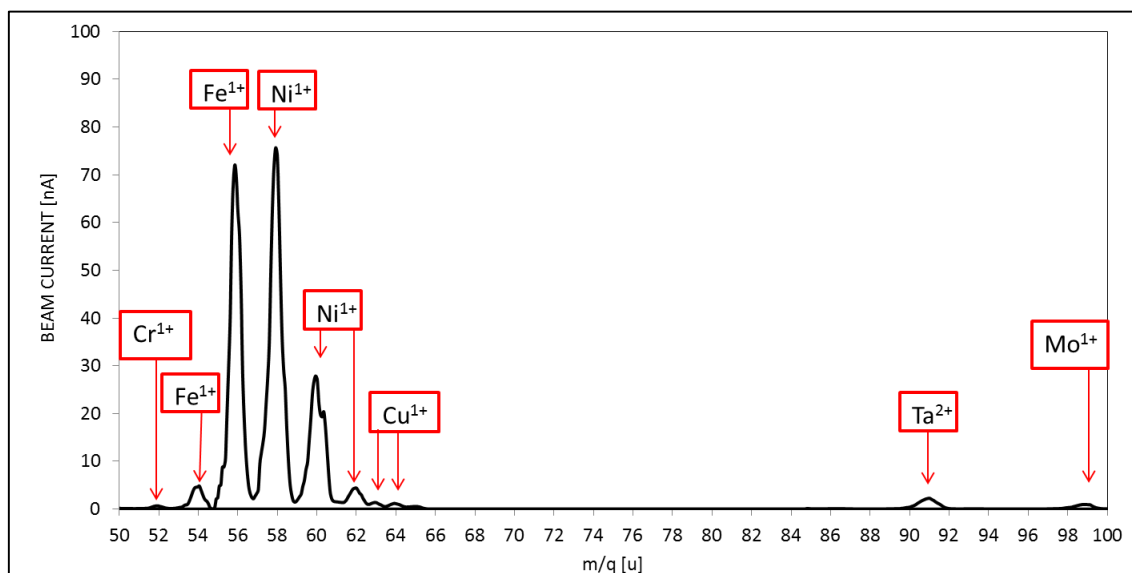


Figura 5-19: Scansione di massa da 50 a 100 [u].

Con masse più elevate sono presenti altri elementi dovuti al degassaggio dei componenti più caldi della sorgente (catodo e linea di trasferimento), in particolare il Tantalio ( $181u$ ) ed alcuni suoi ossidi ( $197u$  e  $213u$ ) (vedi Figura 5-20).

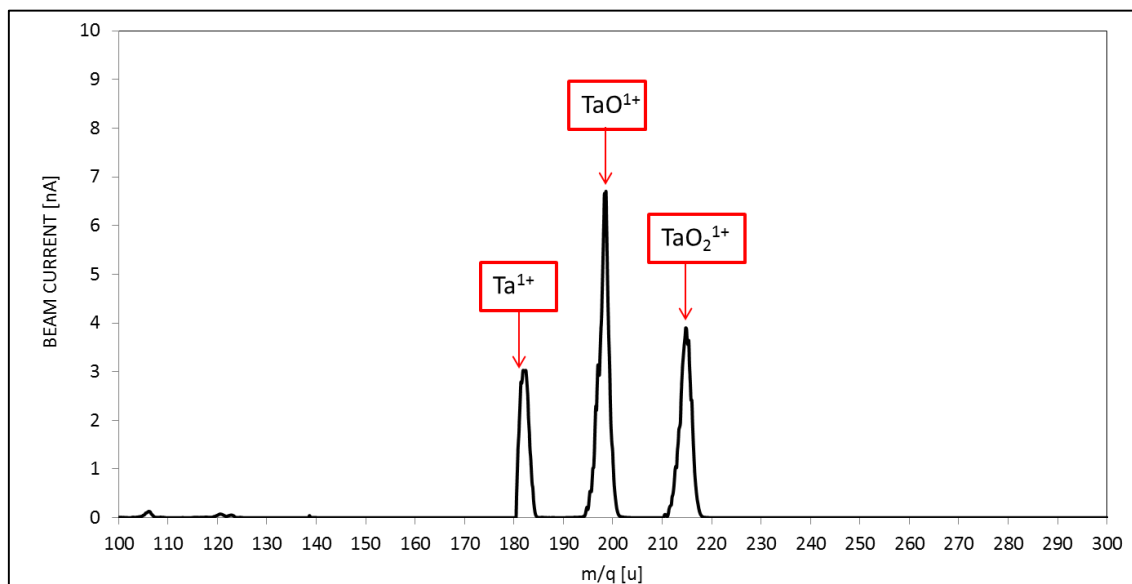


Figura 5-20: Scansione di massa da 100 a 300 [u].

### 5.3. Schemi e modelli di calcolo per la stima sperimentale dei valori di efficienza ed emittanza

Chiamiamo efficienza di ionizzazione (indicata con  $\eta_i$ ) della sorgente FEBIAD il rapporto tra il numero di ioni di un certo elemento che è possibile estrarre dalla sorgente stessa e il numero di atomi dello stesso elemento immessi nel sistema. In formule:

$$\eta_i = \frac{a.u.}{a.i.} \quad (5.16)$$

dove è stato definito *a.u.* il numero di particelle in uscita che si riescono ad estrarre (quindi si parla di ioni e non di atomi) ed *a.i.* il numero di particelle in ingresso (ovvero il numero di atomi che entrano nella sorgente attraverso il sistema di connessione del gas). Quindi l'efficienza è una sorta di rendimento, e si capisce che più il suo valore è alto, maggiore è l'efficacia con cui si riescono ad estrarre ioni radioattivi, e maggiore sono le possibilità di poter ionizzare anche elementi critici come isotopi con tempo di decadenza molto breve. Il numero di atomi all'ingresso della sorgente (*a.i.*) è una quantità difficilmente misurabile; per conoscere tale valore si fa ricorso a dei filtri, detti *leak*, che consentono il passaggio di una quantità calibrata di gas.

Esso viene testato dal produttore, il quale ne fornisce la portata espressa in  $mbar \cdot l \cdot s^{-1}$ . Da questa, applicando l'equazione di stato di un gas ideale alla pressione di 1 bar, è possibile risalire al numero di atomi che ne attraversano la sezione. Per effettuare la conversione si considera l'equazione di stato di un gas ideale:

$$pV = nRT \quad (5.17)$$

dove  $p$  e  $V$  sono pressione e volume del gas,  $n$  è il numero di moli,  $R$  è la costante universale dei gas e  $T$  è la temperatura assoluta. Se si esprimono le grandezze con le unità di misura citate sopra, invertendo la (2.7) si ricava che:

$$\frac{mol}{sec} = \frac{mbar \cdot l}{s} * \frac{10^{-1}}{8.314 * 273.15} = 4.4 * 10^{-5} \frac{mbar \cdot l}{s} \quad (5.18)$$

dove  $R = 8.314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ,  $T = 273.15 K$  e il fattore  $10^{-1}$  è dovuto alla conversione di  $mbar \cdot l$  nelle unità del sistema internazionale. Quindi moltiplicando il fattore di conversione trovato per il numero di Avogadro ( $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ atomi} \cdot mol^{-1}$ ) si possono calcolare il numero di particelle al secondo che vengono inviate alla sorgente partendo dal valore di portata fornito dalla casa produttrice ( $Q_{cal}$ ):

$$a.i. \left[ \frac{atomi}{sec} \right] = 6.022 * 10^{23} \left[ \frac{atomi}{mol} \right] * 4.4 * 10^{-5} * Q_{cal} \left[ \frac{mbar \cdot l}{s} \right] \quad (5.19)$$

Invece per calcolare il numero di ioni in uscita (*a.u.*) si utilizza un sistema più complesso. Il metodo di calcolo si basa sulla misura della corrente totale di fascio ottenibile attraverso la ionizzazione, misurabile con la *faraday cup 1* nell'apparato di misura *front end*. Si parla erroneamente di corrente poiché, in questo caso vengono considerate le cariche trasportate dagli ioni positivi ( $1+$ ). E' necessario tenere in considerazione che la corrente totale di fascio ricavata dalla lettura in *faraday cup* è data anche da ioni contaminanti. Pertanto per un fascio composto da  $n$  elementi vale:

$$I_{tot_{FC1}} [nA] = \sum_{i=1}^n I_i [nA] \quad (5.20)$$

Effettuando dei *mass scan*, è possibile individuare l'elemento di interesse e ricavarne la percentuale di corrente di fascio relativa. La corrente misurata è inferiore alla totale di fascio poiché per eseguire il *mass scan* è necessario focalizzare sulla *faraday cup 2* e adottare una chiusura delle slitte che va da 2 a 4 mm. Attraverso un codice di calcolo Matlab® vengono poi riconosciuti i picchi di corrente ( $I_{i_{picco}}$ ) e se ne ricava la percentuale attribuibile ad un certo elemento ( $p_i$ ) rispetto alla corrente totale analizzata ( $I_{tot_{FC2}}$ ):

$$p_i [\%] = \left( \frac{I_{i_{picco}}}{I_{tot_{FC2}}} \right) * 100 \quad (5.21)$$

Quindi si individua la quantità di corrente di fascio dovuta ai soli ioni dell'elemento preso in esame:

$$I_i [nA] = \frac{p_i [\%]}{100} * I_{tot_{FC1}} \quad (5.22)$$

Tramite una semplice trasformazioni è poi possibile calcolare il numero di ioni necessari per produrre una tale intensità di corrente. Essendo  $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$  [C] la carica di uno ioni  $1+$  e  $10^{-9}$  il fattore di conversione da nano Ampere ad Ampere, si ottiene:

$$a. u. \left[ \frac{\text{ioni}}{s} \right] = \frac{\frac{p_i [\%]}{100} * I_{tot_{FC1}} [nA] * 10^{-9}}{q} \quad (5.23)$$

Nelle prove sperimentali si è soliti utilizzare gas nobili (come Argon, Krypton e Xenon) poiché presentano un elevato livello di energia di ionizzazione; infatti essi tendono a mantenere la configurazione completa e quindi non ionizzano facilmente. In questo modo è possibile valutare la minima efficienza ottenibile con la sorgente PIS. L'efficienza di ionizzazione di una sorgente al plasma dipende da molti fattori; per la sorgente FEBIAD MK5 è stata formulata una relazione teorica che indica i parametri principali che la influenzano:

$$\eta = 5.42 * 10^{-2} * f * V_{source} * \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2} * l * \frac{\ln\left(\frac{U}{\phi}\right)}{U} * \frac{\sqrt{M}}{S_{out} T^{\frac{3}{2}}} \quad (5.24)$$

Con:

- M: massa dell'isotopo considerato
- $S_{out}$ : area del foro di estrazione
- T: temperatura media della faccia del catodo
- U: potenziale di anodo
- $\phi$ : potenziale di ionizzazione dell'isotopo considerato
- $V_{source}$ : volume dell'anodo
- d: distanza tra anodo e catodo
- f: fattore di ionizzazione

Il *fattore di ionizzazione*  $f$  è un parametro difficilmente valutabile in quanto varia al variare della temperatura della sorgente [9] e rappresenta quanto siano ottimizzate le interazioni tra elettroni e ioni e l'estrazione di quest'ultimi; è pertanto direttamente influenzato: dalla geometria della griglia di anodo, dalla pressione interna all'anodo, dalla geometria del foro di estrazione, dalla penetrazione del campo elettrostatico (generato dall'elettrodo estrattore) all'interno dell'anodo e dalla deviazione delle particelle data dal campo magnetico applicato.

L'efficienza non è l'unico parametro da considerare se si vuole ottenere una caratterizzazione completa della Sorgente di Ionizzazione: anche l'emittanza è un fattore che incide in modo marcato sulla qualità del fascio prodotto.

Con la parola ***emittanza*** ci si riferisce ad una proprietà di un fascio di cariche elettriche, come quello estratto dalla sorgente di ionizzazione al plasma. Rappresenta la misura della sua dimensione ed espansione nello spazio delle fasi, con coordinate posizione e quantità di moto [11].

Si consideri la velocità del fascio in un piano ortogonale alla direzione del fascio stesso  $z$ . Invece del profilo di velocità, si fa riferimento all'angolo di inclinazione della particella in funzione della coordinata  $x$  (*orbital angle*) definito come  $x' = vx/vz$  [mrad]; analogamente per la direzione ortogonale si avrà  $y' = vy/vz$  in funzione di  $y$  (vedi Figura 2-10).

Esistono diverse definizioni di emittanza:

- *Emittanza fisica*: è la definizione classica di emittanza. E' definita come l'area dell'ellisse che racchiude una specificata frazione del fascio (che deve essere indicata come pedice) nello spazio delle fasi. La formulazione analitica è la seguente:

$$\epsilon_x = \pi * \frac{\iint dx_i * dp_i}{\pi} \quad \epsilon_y = \pi * \frac{\iint dy_i * dp_i}{\pi} \quad (5.25)$$

dove  $x_i$  rappresenta la posizione della particella  $i$ -esima e  $p_i = m_i v_i$  la sua quantità di moto. Se la velocità lungo  $z$  è costante, per il teorema di *Liouville* l'emittanza si conserva [10].

- *Emittanza geometrica*: è essere espressa come l'area minima che permette di contenere il fascio nel sub-spazio  $(x, x')$ , ovvero  $(y, y')$ , divisa per  $\pi$ :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\pi} \iint dx * dx' \quad \varepsilon_y = \frac{1}{\pi} \iint dy * dy' \quad (5.26)$$

si osserva come, in presenza di forze conservative, tale quantità sia costante. L'unità di misura viene indicata con [ $\pi$  mm mrad], dove il  $\pi$  indica che l'emittanza è ottenuta dal prodotto dei semiassi dell'ellisse e non dalla sua area. In alcuni testi l'unità di misura adottata è invece [mm mrad]; tali diciture risultano equivalenti poiché si riferiscono sempre alla stessa equazione (5.26). E' utile pertanto indicare più che l'unità di misura, il metodo di calcolo utilizzato per produrre i risultati presentati.

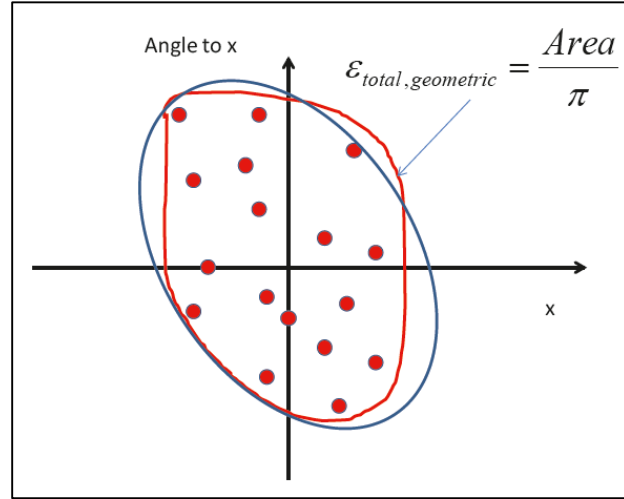


Figura 5-21: particelle del fascio plottate nello spazio delle fasi x-x'

- *Emittanza r.m.s.* : molte volte si preferisce utilizzare l'espressione di emittanza r.m.s. (root mean square), di tipo statistico, dato che non sempre il fascio prodotto dalle sorgenti di ionizzazione, riportato nello spazio delle fasi, risulta un'ellisse. Questa è definita come [8]:

$$\varepsilon_{r.m.s.,x} = \frac{1}{N} \left( \sum x^2 \sum x'^2 - \left( \sum xx'^2 \right) \right)^{1/2} \quad (5.27)$$

Valida quando la media dei punti lungo  $x$  e  $x'$  è nulla, ciò significa che l'ellisse è centrata. In questo caso è possibile calcolare i parametri di Twiss:

$$\gamma_x = \frac{\langle x'^2 \rangle}{\varepsilon_{r.m.s.,x}} \quad \alpha_x = \frac{\langle xx' \rangle}{\varepsilon_{r.m.s.,x}} \quad \beta_x = \frac{\langle x^2 \rangle}{\varepsilon_{r.m.s.,x}} \quad (5.28)$$

Dove le parentesi  $\langle \rangle$  indicano la media dei punti dell'ellisse centrato. I parametri di Twiss consentono di descrivere analiticamente l'equazione dell'ellisse centrato nell'origine:

$$\gamma x^2 + 2\alpha xx' + \beta x'^2 = \varepsilon_{r.m.s.,x} \quad (5.29)$$

Tale equazione deve rispettare la seguente condizione di normalizzazione:

$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1 \quad (5.30)$$

In letteratura si trovano anche altre formulazioni del tutto analoghe come la seguente, che raggruppa il 90% dei dati:

$$\varepsilon_{4 r.m.s.,x} = 4 * \frac{1}{N} \left( \sum x^2 \sum x'^2 - \left( \sum xx'^2 \right) \right)^{1/2} = 4 * \varepsilon_{r.m.s.} \quad (5.31)$$

Se l'ellisse non è centrata, ci si riconduce alle relazioni precedenti trovando il centro dell'ellisse nello spazio delle fasi ed effettuando una trasformazione di coordinate:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x \quad \bar{x}' = \frac{1}{N} \sum x' \quad (5.32)$$

Con  $(\bar{x}, \bar{x}')$  centro dell'ellisse. Pertanto l'emittanza vale:

$$\varepsilon_{r.m.s.,x} = \frac{1}{N} \left( \sum (x^2 - \bar{x}^2) \sum (x'^2 - \bar{x}'^2) - \left( \sum ((x^2 - \bar{x}^2)(x'^2 - \bar{x}'^2)) \right)^2 \right)^{1/2} \quad (5.33)$$

- *Emittanza normalizzata*: gli altri valori di emittanza presentati risultano ridotti quando il fascio viene accelerato. Pertanto viene definita un'emittanza invariante rispetto all'energia delle particelle:

$$\varepsilon_n = \beta' \gamma' \varepsilon \quad \text{con} \quad \beta' = \frac{v}{c} \quad \text{e} \quad \gamma' = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta'^2}} \quad (5.34)$$

Con  $v$  velocità degli ioni e  $c$  velocità della luce. Anche questa viene espressa in [mm mrad].

In generale, se l'emittanza ha un valore basso, significa che le particelle avranno una coordinata simile nello spazio (quindi il fascio sarà compresso in un'area piccola se consideriamo la sua dispersione in un piano perpendicolare alla direzione principale) e quantità di moto simile fra loro, perciò procederanno tutte in una direzione comune (angolo di tra velocità longitudinale e trasversale piccolo). Pertanto una piccola emittanza fornisce un fascio migliore da gestire. In ogni caso l'unità di misura dell'emittanza può essere espressa sia in [ $\pi$  mm mrad] che in [mm mrad] purché venga specificato come si sia ottenuto il valore presentato. L'uso dell'emittanza r.m.s. riduce il rischio di creare confusione con le unità di misura poiché la formula analitica è univocamente definita.

Per rappresentare lo sviluppo del fascio di ioni occorre una forma semplice; siccome il fascio ha distribuzione di tipo gaussiano in entrambe le coordinate dello spazio delle fasi, e la rappresentazione di tale distribuzione in un sistema bidimensionale è composta da ellissi, un'ellisse è il modo più ovvio di descrivere l'emittanza. Si costruisce perciò un grafico, come quello in Figura 2-10, dove si riportano in ascisse il valore della posizione della singola particella e in ordinata il suo angolo di inclinazione.

Questo parametro dipende dalla geometria della sorgente, dell'elettrodo estrattore e dalle condizioni del plasma.

Per confrontare l'emittanza con altre reperibili in letteratura è bene saper che per fasci accelerati da diverse differenze di potenziale (quindi per fasci di diversa energia) si deve scalare il valore misurato. Se ho misurato una emittanza " $\varepsilon$ " accelerata da una differenza di potenziale (d.d.p.) " $k$ " e voglio confrontarla con quella ottenuta con una d.d.p. pari a " $k_{scaled}$ " dovrò utilizzare la seguente formula:

$$\varepsilon_{scaled} = \varepsilon \sqrt{\frac{k}{k_{scaled}}} \quad (5.35)$$

Bisogna sempre tener presente che per la scelta dell'oggetto che poi sarà montato in linea per il progetto SPES, il valore di questo parametro diventa cruciale in quanto incide sulla possibilità della gestione e del controllo del fascio di ioni radioattivi.

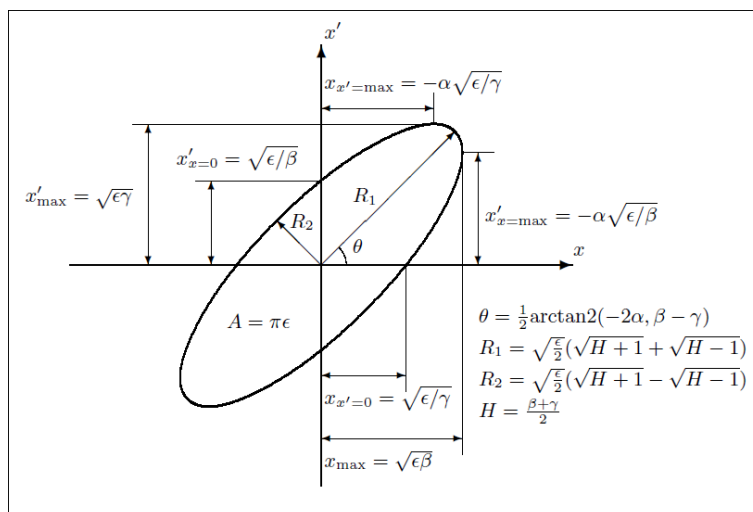


Figura 5-22: rappresentazione dell'ellisse dell'emittanza; i fattori  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono noti come parametri di Twiss e definiscono l'orientamento e la scala,  $\epsilon$  definisce l'area dell'ellisse di visa per pi-greco,  $R_1$  ed  $R_2$  sono i raggi [12].

## 5.4. Caratterizzazione della sorgente al plasma con estrazione SPES

Quando si parla di caratterizzazione della sorgente si intende fornire una serie di dati sperimentali che danno prova delle prestazioni che essa è in grado di fornire in diverse condizioni operative. Le prove sono state condotte a diversi valori di:

- Corrente di linea (HEATING CURRENT [A]): 380, 390, 400, 410, 420
- Voltaggio di anodo (ANODE VOLTAGE [V]): 50, 100, 150, 200, 250, 300
- Distanza dell'elettrodo estrattore (PULLER DISTANCE [%]): 40, 50, 60, 70, 80

Ogni valore è stato valutato come la media di tre misure per fare in modo di avere una riduzione dell'incertezza di ripetibilità. Al magnete è stata fornita una corrente di 5 A per tutte le prove. L'esecuzione delle prove è stata effettuata nel seguente modo:

1. Una volta raggiunto il livello di vuoto dell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar è possibile portare in temperatura la sorgente, possibilmente con rampe molto blande (0.1 A/s). Si raggiunge una corrente di alimentazione di 420 A e si attendono 5/10 minuti affinché la sorgente si riscaldi e la corrente di fascio risulti stabile;
2. Si inserisce la *Faraday Cup 1* per misurare il livello di corrente totale di fascio, controllando che il soppressore sia acceso. E' necessario impostare i seguenti valori di quadrupoli:

Tabella 5-2: parametri di quadrupoli per la focalizzazione in FC1

Focalizzazione	Q1 [V]	Q2 [V]	Q3 [V]
Faraday Cup 1	2250	1040	2250

Si consiglia, prima di iniziare le misure, di verificare sempre che i collegamenti di quadrupoli e deflettori siano corretti e che il filtro di *Wien* non abbia i cavi invertiti. E' possibile eseguire una rapida verifica per vedere se il fascio è allineato: utilizzando il *Beam Profiler* si fanno variare i valori di tensione dei quadrupoli e si osserva la forma della curva che appare a video; se vi è allineamento allora il massimo valore di corrente non si sposta, viceversa se non vi è allineamento il massimo si sposta.;

3. E' possibile in questo momento effettuare la misura della corrente totale di fascio ( $I_{\text{totFC1}}$  [nA]) al variare della posizione dell'elettrodo estrattore. Per comodità si imposta il controllo remoto della posizione del *puller* in modo tale da poterlo controllare dalla consolle;
4. Per lo stesso livello di corrente di alimentazione, si imposta una distanza del *puller* di 50% e si fa variare la tensione dell'anodo da 50 a 300 V con *step* di 50 V, misurando la corrente totale di fascio in *Faraday Cup 1* ( $I_{\text{totFC1}}$  [nA]) e la corrente di anodo ( $I_{\text{an}}$  [mA]);

5. Una volta effettuate queste misurazioni è possibile eseguire il *mass scan* per il livello di corrente fissato. E' necessario disinserire la *Faraday cup 1* ed i *Beam profile 1* e *2*. Quindi rimane inserita la sola *Faraday Cup 2*.
6. Si impostano i valori di quadrupoli per l'esecuzione delle scansioni di massa:

**Tabella 5-3: parametri di quadrupoli per la focalizzazione in FC2 per l'esecuzione dei mass scan**

Focalizzazione	Q1 [V]	Q2 [V]	Q3 [V]
Pre Wien Filter (Ar)	1893	893	2215

7. Successivamente si accendono le piastre del *Wien filter* a 3000 V e si chiudono le slitte per ottenere una buona risoluzione di *mass scan*; solitamente si utilizzano valori pari a 2 o 4 mm a seconda dell'intensità del fascio. In queste condizioni si deve verificare che la corrente letta in *FC2* sia stabile e sufficientemente elevata (almeno 50 nA);
8. Si impostano i parametri per la scansione:

**Tabella 5-4: Parametri del mass separator**

Campo elettrico [kV/m]	120
Massa iniziale [A]	0
Massa finale [A]	200
Step di massa [A]	0.05
Tempo di esposizione [s]	0.3

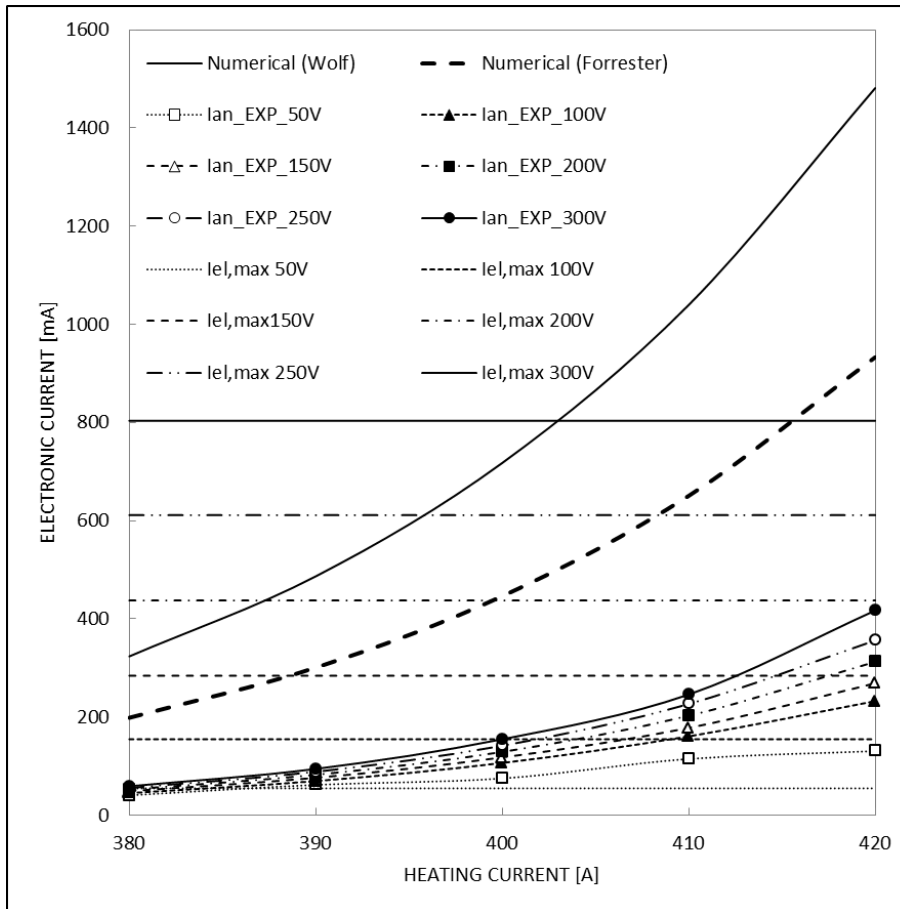
9. A questo punto è possibile avviare la scansione; verificare sempre che le piastre siano cariche e che la corrente applicata alle bobine del WF non si spenga. Se ciò accade è necessario fermare il *mass scan* e ripeterlo. Vengono forniti in output dei file, che vengono salvati in *epics®*, che devono essere tradotti in formato ASCII per essere letti con *Excel®*. Essi contengono i valori di corrente di fascio al variare della corrente applicata alle bobine (quindi del campo magnetico), i quali, riportati nell'apposito file *Excel*, formano un diagramma ( $I_{fascio} - m/q$ ). Da questi è possibile valutare l'efficienza della sorgente poiché, rapportando il picco relativo all'Argon alla somma di tutti i picchi presenti e moltiplicando tale valore per la corrente totale letta in *FC1*, è possibile risalire al numero di ioni dell'elemento considerato contenuti nel fascio. Essendo noto il numero di atomi all'ingresso della sorgente, tramite un semplice rapporto ( $N_{in}/N_{out}$ ) ci si ricava l'efficienza.
10. E' possibile quindi variare il valore della corrente di alimentazione e ripetere le fasi da 1) a 9). Vengono eseguite 3 rampe totali che forniscono 3 valori per ogni parametro di interesse che dovranno poi essere mediati.

Si riportano in seguito i risultati ottenuti dalle misurazioni effettuate sulla sorgente di ionizzazione al plasma descritta nel capitolo 3. Nella Figura 5-23 vengono riportati i valori di corrente elettronica prodotta dal catodo SPES in funzione della corrente di alimentazione, al variare della tensione di anodo. I valori sperimentali, indicati con *Ian\_EXP\_xxxV* (al posto di xxx viene posto il valore di tensione considerato), rappresentano la media di tre misurazioni della corrente che passa dal catodo verso l'anodo. Queste correnti sono limitate dalla disposizione geometrica dei componenti poiché vale la legge di *Child-Langmuir*. Si nota che i dati sperimentali risultano superare questa soglia, ciò avviene poiché vi sono deformazioni termiche della faccia del catodo che tendono a ridurre la distanza con l'anodo, aumentando così il limite dato dall'equazione. Si ricorda che la corrente elettronica è direttamente collegata all'efficienza della sorgente di ionizzazione per cui risulta particolarmente interessante riuscire a capire quanta ne venga prodotta in un certo istante.

Nel grafico viene inoltre riportata la corrente elettronica che dovrebbe essere prodotta per effetto termoionico, calcolata basandosi sulle temperature ricavate dal modello numerico ed inserite nell'equazione di Richardson. Si nota che i risultati sperimentali non seguono bene l'andamento della curva ottenuta numericamente. Questo può essere dovuto principalmente a tre fattori:

- La temperatura raggiunta dal catodo: è possibile che la temperatura raggiunta dal catodo sia inferiore di quella ricavata dal modello FEM per via di paralleli tra la sorgente ed altri elementi;
- Il comportamento del materiale: può essere che il materiale non si comporti come previsto teoricamente, infatti in diversi testi sono stati trovati valori differenti per la funzione di lavoro del materiale di cui è composto il catodo (Tantalio);

- Scarica di elettroni: è possibile che parte degli elettroni vengano assorbiti dall'anodo e quindi riducano la corrente letta;



**Figura 5-23: Caratterizzazione del catodo SPES. Viene rappresentata la corrente di anodo in funzione della corrente di alimentazione al variare della tensione di anodo. La curva numerica viene calcolata con la legge di Richardson dai campi di temperatura trovati col modello FEM: la linea continua è stata calcolata con le funzioni lavoro trovate in [10] ( $\phi = 60 [V]$ ;  $A_b = 4.12 [A/cm^2K^2]$ ) mentre per quella tratteggiata sono stati utilizzati i seguenti valori  $\phi = 55 [V]$ ;  $A_b = 4.2 [A/cm^2K^2]$  trovati in [13]. Le linee orizzontali rappresentano la soglia di corrente trasmissibile tra due elettrodi piani, secondo la legge di Child Langmuir (gap=1.3mm).**

Nella Figura 5-24 e nella Figura 5-25 sono rappresentati i valori della corrente totale di fascio al variare della corrente di linea e della tensione di anodo. Si nota un comportamento anomalo della sorgente per valori di corrente di 410 e 420 A e per tensioni basse (50 e 100V); la corrente totale di fascio cala bruscamente per poi risalire per valori di tensione di anodo maggiori di 100V. Questo comportamento può essere causato da oscillazioni del plasma che viene a formarsi all'interno della sorgente e che quindi peggiorano l'estrazione degli ioni dalla camera di anodo. Per una tensione di anodo di 250 e 300 V, invece, si ha un enorme incremento della corrente di fascio, la quale però risulta molto instabile.



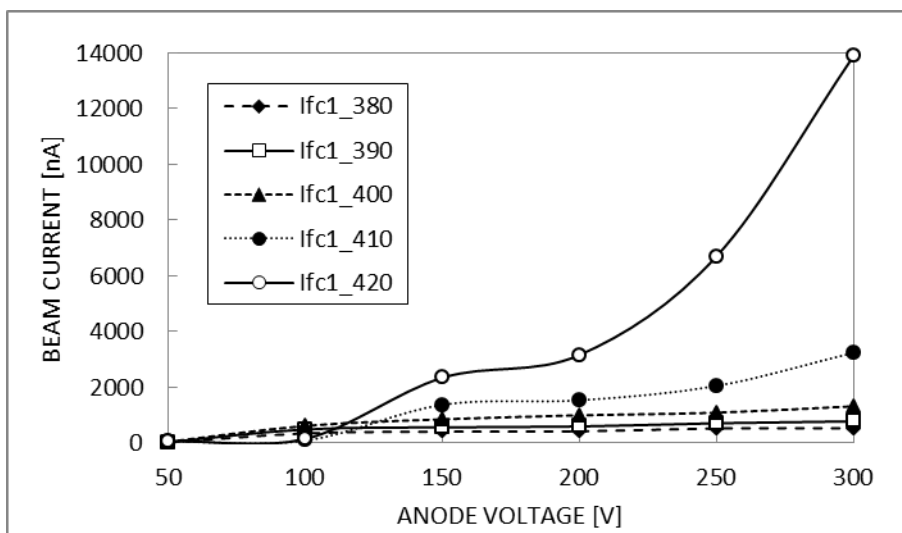


Figura 5-24: Corrente totale di fascio in funzione del voltaggio dell'anodo, al variare della corrente di alimentazione. Di rilievo si segnala un comportamento anomalo per elevati valori di corrente di alimentazione e bassi valori di tensione di anodo probabilmente dovuti ad oscillazioni del plasma.

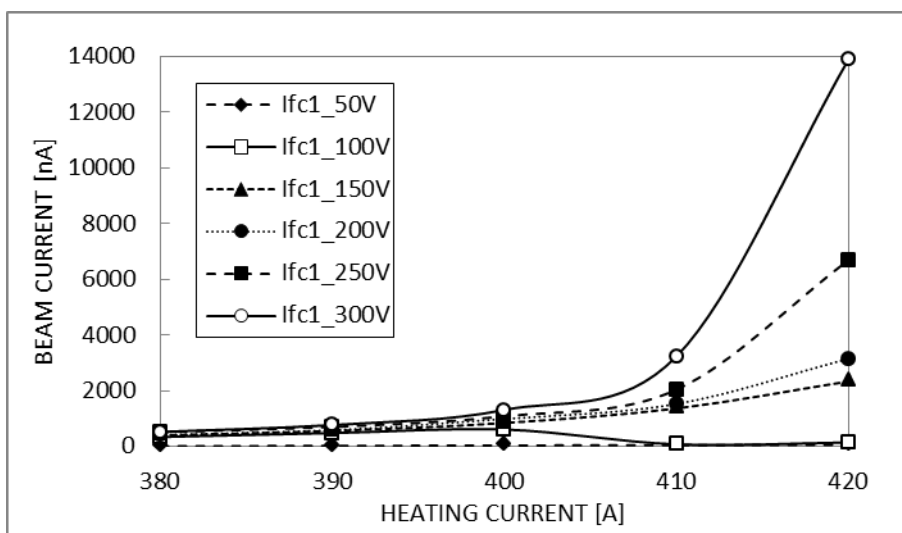


Figura 5-25: Corrente totale di fascio in funzione della corrente di alimentazione, al variare del voltaggio dell'anodo. Di rilievo si segnala un comportamento anomalo per elevati valori di corrente di alimentazione e bassi valori di tensione di anodo probabilmente dovuti ad oscillazioni del plasma.

La corrente totale di fascio varia anche con la distanza dal *Puller*; essa presenta un massimo per una posizione dell'elettrodo che va tra il 50% e il 60%. Allontanando l'elettrodo estrattore dalla sorgente non si manifestano brusche variazioni della corrente totale, essa scende linearmente fino a circa 2000 nA per una distanza del 30%. Anche se non si è tenuto conto della focalizzazione del fascio, i valori di corrente totale non variano per ogni distanza considerata poiché la *Faraday Cup* viene comunque investita completamente dal fascio. Il grafico in Figura 5-26 è molto importante poiché si è in grado di determinare la posizione dell'elettrodo estrattore per cui si ha la massima corrente totale di fascio e quindi la massima efficienza del sistema. Si vedrà in seguito che la posizione del *Puller* è importante anche per migliorare l'emittanza del fascio poiché per posizioni molto vicine alla sorgente subentrano degli effetti non lineari che portano all'aumento del valore di emittanza lungo l'asse y. In ogni caso un valore di distanza di 50 o 60% risulta indifferente in termini di efficienza poiché si ha una variazione sulla corrente totale di fascio di appena 84 nA (circa il 3.5%).

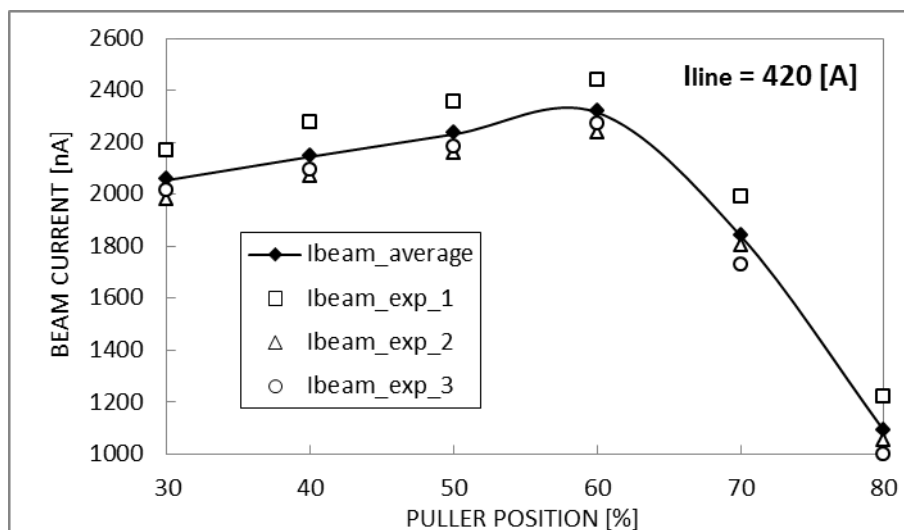


Figura 5-26: Corrente totale di fascio in funzione della posizione del *Puller* per una corrente di linea di 420 A. Il valore massimo si ha per una distanza del 60%. Per basse distanze si perde l'effetto focalizzante dell'elettrodo estrattore e parte del fascio viene perso.

#### 5.4.1. Misure di efficienza con estrazione SPES

Le prove di efficienza sono state eseguite per una distanza dell'elettrodo estrattore del 50% poiché sono consolidati i valori di quadrupoli da utilizzare con tale impostazione. Questo non dovrebbe influire molto sul calcolo dell'efficienza poiché si ha una differenza minima (circa 80nA) tra la corrente massima di fascio letta per  $d=50\%$  e quella letta per  $d=60\%$ . L'elettrodo estrattore, a cui è stato aumentato il diametro a 7,5 mm, garantisce una migliore estrazione del fascio. Sono state effettuate 3 misurazioni per diversi valori di corrente di alimentazione: 380, 390, 400, 410 e 420 A; i valori poi sono stati mediati per ottenere una efficienza media. I valori sono stati calcolati manualmente sulla base di quanto detto nel capitolo 2. Per conoscere la portata di gas Argon insufflata nella sorgente si utilizza un filtro (*leak*) che consente il passaggio di una portata calibrata di  $1,1 \times 10^{-5} \text{ mbar l s}^{-1}$ . E' possibile utilizzare un codice Matlab® per ricavare i picchi di corrente dai diagrammi derivanti dalle scansioni di massa, ma si è visto che tale codice commette degli errori grossolani, in quanto individua più picchi appartenenti alla medesima massa e li considera come masse a se stanti. Questo errore porta ad una sottostima dell'efficienza di oltre 2 punti percentuali.

Nella Figura 5-27 sono rappresentati i valori di efficienza calcolati per tre diverse serie di misurazioni, la media delle tre viene presentata da una linea continua. L'efficienza massima, ricavata per una corrente di linea di 420 A, risulta essere di circa il 3%. Questo dato, seppur molto basso, risulta essere verosimile poiché anche nell'impianto ISOLDE al CERN, i valori di efficienza si attestavano attorno al 4-5% (vedi Figura 5-28). Si noti come nel nostro caso non si arrivi a saturazione, ovvero l'efficienza non ha un picco di massimo. E' probabile quindi che per qualche motivo la sorgente non arrivi alla sua massima potenzialità. D'altronde non è possibile aumentare la corrente di alimentazione poiché dai risultati numerici si era visto che la temperatura massima del catodo, per evitare la sublimazione del Tantalio di cui è composto, corrispondeva ai 420 A.

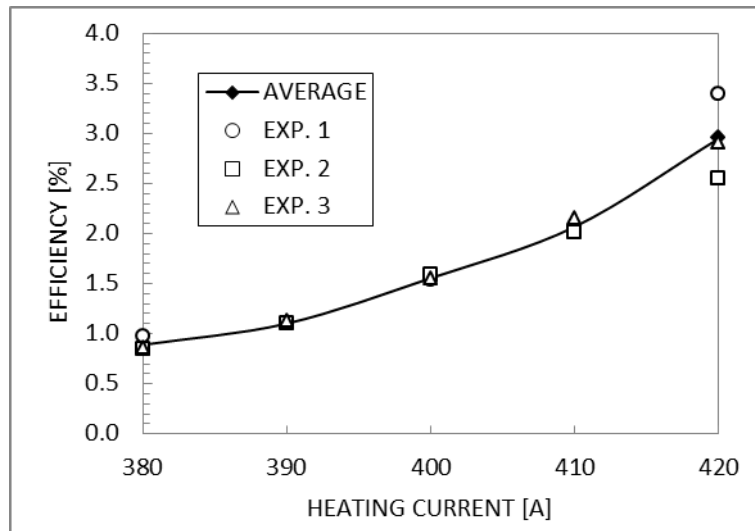


Figura 5-27: Efficienza della PIS con estrazione SPES, al variare della corrente di alimentazione. L'efficienza tende ad aumentare con l'innalzamento della corrente di alimentazione ma non raggiunge un picco massimo come accade, invece, per la versione MK5 utilizzata al CERN. Si pensa che la corrente possa essere ulteriormente aumentata compatibilmente con la formazione di contaminante.

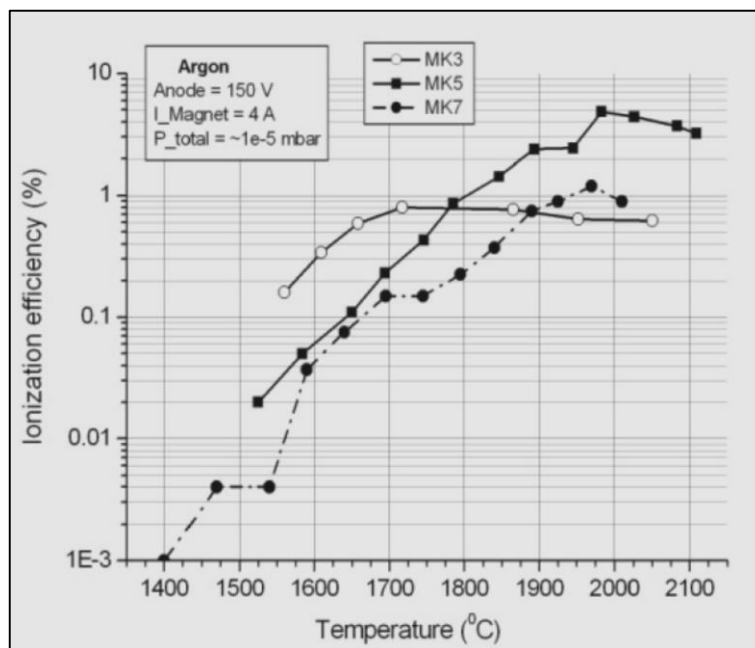


Figura 5-28: Efficienza delle sorgenti utilizzate nell'impianto ISOLDE al CERN [7]. Di particolare interesse risulta la curva relativa al modello MK5, base per lo sviluppo dell'attuale versione SPES. L'efficienza massima raggiunta risulta essere di circa il 5%.

Oltre alla variazione della corrente di catodo, si è deciso di valutare l'efficienza per un valore della corrente di alimentazione di riferimento costante (400 A), variando però la tensione di anodo. I risultati sono rappresentati in Figura 5-29 e Figura 5-30. Nella prima figura viene riportata la quantità percentuale di Argon (1+) che si riesce ad estrarre dalla sorgente di ionizzazione; il rimanente viene considerato contaminante del fascio. Tra i contaminanti viene inglobato anche l'Argon (2+) ionizzato due volte poiché tale processo non è desiderato. Risalta subito all'occhio che vi è un valore di ottimo della tensione di anodo (150 V) che permette di ottenere la massima produzione di Argon (80%). Questo valore di tensione infatti viene utilizzato se si vuole ottenere un fascio ad elevata purezza.

Il secondo grafico, invece, mostra il valore di efficienza al variare della tensione di anodo. Si nota l'andamento irregolare della curva che sembra attestarsi per valori di tensione da 150 a 250V per poi salire bruscamente a 300V. Questo aumento improvviso è dato dalla elevata corrente totale di fascio che esce dalla sorgente. Tuttavia

la contaminazione del fascio per questo valore di tensione risulta essere maggiore di quella ottenuta a 150V. E' molto probabile che l'estrazione SPES abbia bisogno di tensioni di anodo elevate per riuscire a lavorare bene ed estrarre così una maggiore quantità di ioni.

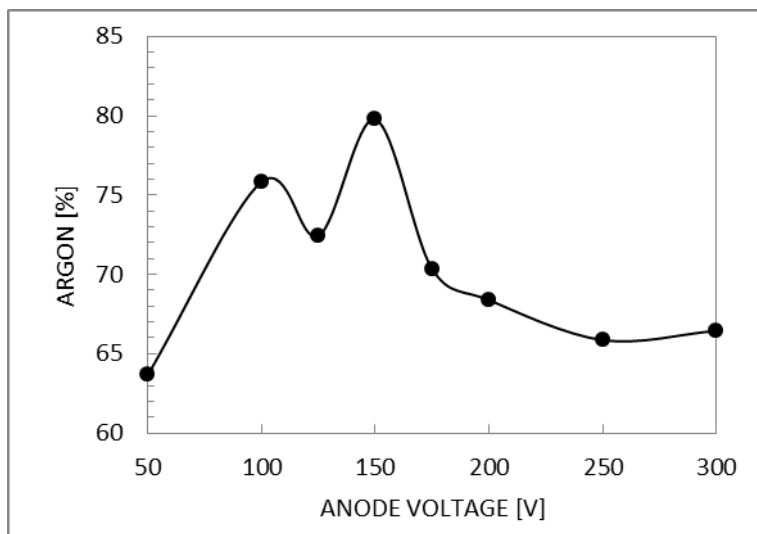


Figura 5-29: Quantità percentuale di Argon presente nel fascio al variare del voltaggio dell'anodo. Si nota che la maggior produzione di ioni si ottiene per 150 V, pertanto per ottenere un fascio con pochi contaminanti si consiglia di utilizzare tale impostazione. Risultati ottenuti per  $I_{line} = 400$  A.

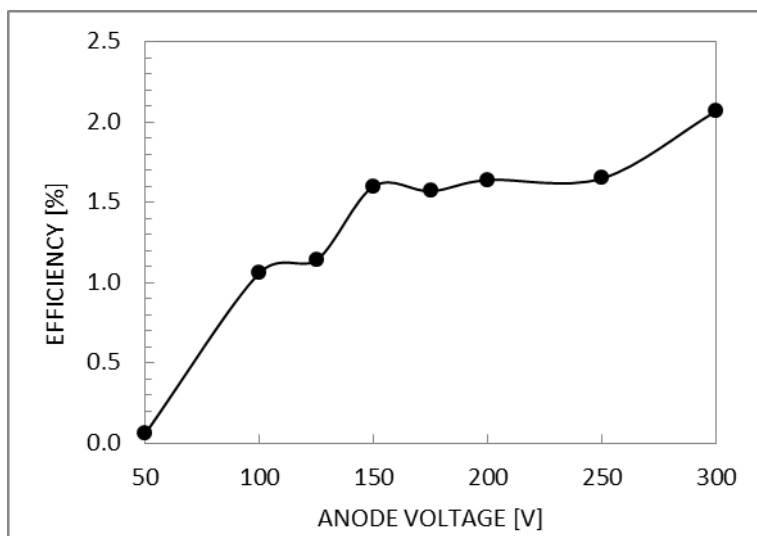


Figura 5-30: Efficienza al variare del voltaggio dell'anodo. Si nota che la maggior efficienza si ottiene per 300 V, poiché la corrente totale di fascio aumenta sensibilmente. Risultati ottenuti per  $I_{line} = 400$  A.

#### 5.4.2. Misure di emittanza con estrazione SPES

Per effettuare le misure di emittanza si è dovuto innanzitutto annullare il campo magnetico residuo all'interno del *Wien filter* per evitare disallineamenti del fascio. Questo viene effettuato invertendo i cavi di alimentazione delle bobine magnetiche; fornendo una piccola corrente alle bobine è così possibile annullare il campo magnetico residuo. Una volta portata in temperatura la sorgente è possibile eseguire le prove cercando di imporre una corrente di linea che permette di avere una corrente totale di fascio di 500nA; tale corrente è quella limite che porta a saturazione l'*Emittance Meter* (ovvero non si ha sensibilità per correnti più elevate; legge sempre il valore massimo di corrente). Per la lettura della corrente di fascio è necessario focalizzare in *Faraday Cup 1* ed accendere il relativo soppressore.

I parametri da impostare per i valori di quadrupoli utilizzati per la lettura della corrente totale in *Faraday Cup 1* e per la misura di emittanza sono:

Tabella 5-5: Valori di tensione da applicare ai quadrupoli

Focalizzazione	Q1 [V]	Q2 [V]	Q3 [V]
Faraday Cup 1	2250	1040	2250
Emittance meter	1160	660	1160

I deflettori non vengono utilizzati poiché il fascio risulta ben centrato. Una volta verificato che la corrente totale risulta inferiore al limite consentito, è necessario disinserire le coppe di Faraday (1 e 2), e spegnere i relativi soppressori in quanto possono influire sull'allineamento del fascio. Una volta effettuati questi controlli si imposta la focalizzazione per le misure di emittanza ed i parametri del lettore:

Tabella 5-6: Impostazione dell'emittance meter

Precision	0,5
Start read	30
End read	-15

Quindi premendo il pulsante "Save X" dal controllo è possibile effettuare la misura lungo l'asse X. Successivamente è possibile ripetere l'operazione per l'asse Y. I dati sono letti direttamente dal computer della consolle, pertanto se questo presenta rallentamenti si può avere la perdita di alcuni dati; è utile verificare che la dimensione dei file di output sia sempre la stessa, solitamente, per i valori del lettore impostati in tabella, si ottengono file di testo da 12/13 kbyte. I file devono essere elaborati con un apposito codice Matlab® per ottenere i valori di emittanza.

Durante la prima serie di misure si è impostato una tensione di anodo costante (150 V) mentre si è fatto variare la posizione dell'elettrodo estrattore (da 40% a 80% con *step* di 10%). Sono state eseguite 3 misure per ogni *step*. Nella Figura 5-31 si può osservare cosa accade al variare della posizione del *puller*. Si nota che al diminuire della distanza dell'elettrodo estrattore dalla sorgente, l'emittanza, calcolata rispetto ai due assi (x,y) ortogonali alla direzione del fascio (z), risulta influenzata dagli effetti non lineari dei quadrupoli. Si nota che una distanza del *Puller* del 50-60% garantisce sia una elevata efficienza che bassi valori di emittanza; ciò ci consente di adottare tali valori per la sorgente al plasma con estrazione SPES ottenendo delle ottime prestazioni.

Tabella 5-7: Valori di emittanza ottenuti variando la distanza dell'elettrodo estrattore, mantenendo una tensione di anodo costante di 150V.

D extractor [%]	$\epsilon_{x1}$	$\epsilon_{x2}$	$\epsilon_{x3}$	$\epsilon_{x\_average}$	$\epsilon_{y1}$	$\epsilon_{y2}$	$\epsilon_{y3}$	$\epsilon_{y\_average}$
40	3.43	3.45	3.50	<b>3.46</b>	4.24	4.27	4.36	<b>4.29</b>
50	3.74	3.66	3.79	<b>3.73</b>	4.77	4.82	4.74	<b>4.78</b>
60	3.97	3.87	4.10	<b>3.98</b>	5.97	6.07	6.03	<b>6.03</b>
70	4.06	3.71	3.87	<b>3.88</b>	11.03	12.49	11.79	<b>11.77</b>
80	3.73	3.37	3.96	<b>3.69</b>	15.83	15.54	16.15	<b>15.84</b>

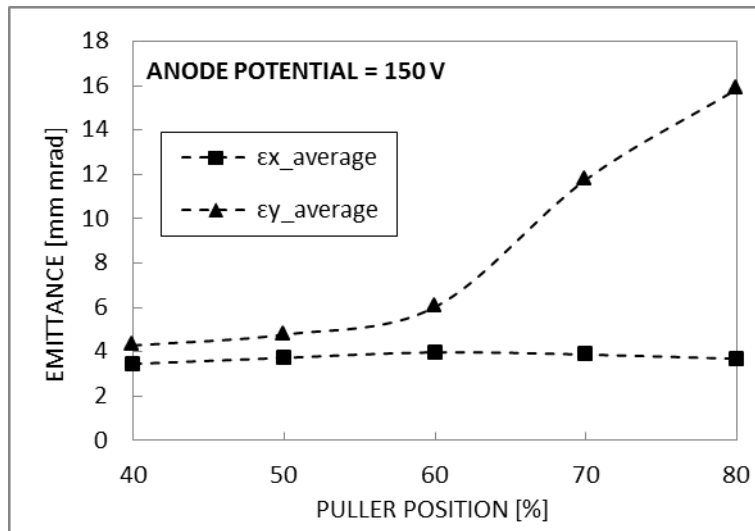


Figura 5-31: Valori di emittanza ottenuti variando la distanza dell'elettrodo estrattore, mantenendo una tensione di anodo costante di 150V. Si nota l'effetto non lineare dovuto ai quadrupoli per posizioni ravvicinate dell'elettrodo estrattore.

Durante la seconda serie di misure si è impostato una distanza dell'elettrodo estrattore costante (50%) mentre si è fatto variare la tensione di anodo; da 150 a 300 V con *step* di 50 V. Valori inferiori di tensione non sono possibili in quanto la corrente totale di fascio non risulta sufficiente per effettuare la misura (vedi Figura 5-24). Dalla Figura 5-32 si vede che l'emittanza lungo l'asse y cresce linearmente all'aumentare della tensione di anodo; l'emittanza lungo l'asse x invece ha un comportamento anomalo poiché aumenta per un valore di tensione di anodo di 200 V per poi assestarsi ad un valore quasi costante. Ciò può essere stato dovuto ad oscillazioni del plasma che hanno portato alla formazione di un fascio non ottimale. In ogni caso effettuando la media tra gli assi si vede che l'emittanza in ogni caso tende ad aumentare se si aumenta il potenziale di anodo. Il valore di 150 V utilizzato garantisce quindi una bassa emittanza ed anche una bassa contaminazione del fascio.

Tabella 5-8: Valori di emittanza ottenuti variando la tensione di anodo, mantenendo una distanza dell'elettrodo estrattore pari al 50%.

Vanode [V]	$\epsilon_{x1}$	$\epsilon_{x2}$	$\epsilon_{x3}$	$\epsilon_{x\_average}$	$\epsilon_{y1}$	$\epsilon_{y2}$	$\epsilon_{y3}$	$\epsilon_{y\_average}$
150	3.82	3.90	3.83	3.85	4.83	4.45	4.51	4.60
200	3.88	4.61	4.59	4.36	4.97	4.78	5.00	4.91
250	4.18	4.04	4.12	4.11	5.34	5.12	5.12	5.20
300	4.27	4.02	3.84	4.04	5.25	5.46	5.56	5.42

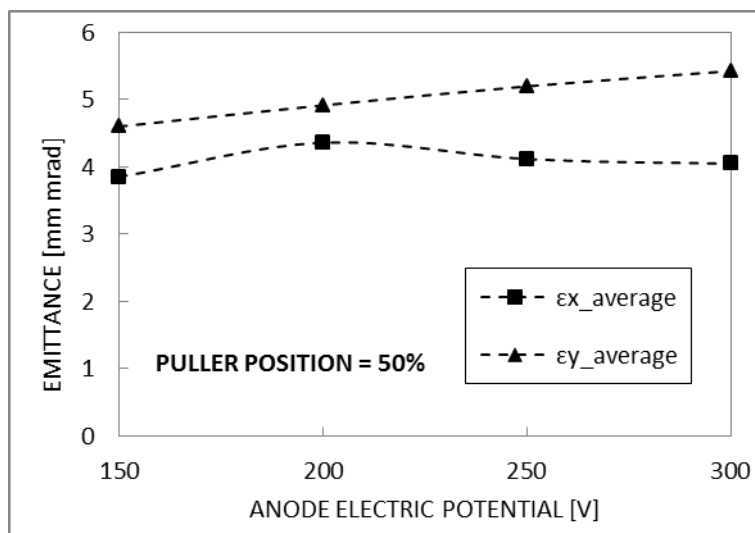


Figura 5-32: Valori di emittanza ottenuti variando la tensione di anodo, mantenendo una distanza dell'elettrodo estrattore pari al 50%.

## 5.5. Caratterizzazione della sorgente al plasma con estrazione ISOLDE

Come per l'estrazione SPES, per l'estrazione ISOLDE le prove sono state condotte a diversi valori di:

- Corrente di linea (HEATING CURRENT [A]): 380, 390, 400, 410, 420
- Voltaggio di anodo (ANODE VOLTAGE [V]): 50, 100, 150, 200, 250, 300
- Distanza dell'elettrodo estrattore (PULLER DISTANCE [%]): 40, 50, 60, 70, 80

Ogni valore è stato valutato come la media di tre misure per fare in modo di avere una riduzione dell'incertezza di ripetibilità. L'esecuzione delle prove è stata effettuata nel seguente modo:

1. Una volta raggiunto il livello di vuoto dell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar è possibile portare in temperatura la sorgente, possibilmente con rampe molto blande (0.1 A/s). Si raggiunge una corrente di alimentazione di 420 A e si attendono 5/10 minuti affinché la sorgente si riscaldi e la corrente di fascio risulti stabile;
2. Si inserisce la *Faraday Cup 1* per misurare il livello di corrente totale di fascio, controllando che il soppressore sia acceso. E' necessario impostare i seguenti valori di quadrupoli:

Tabella 5-9: parametri di quadrupoli per la focalizzazione in FC1

Focalizzazione	Q1 [V]	Q2 [V]	Q3 [V]
Faraday Cup 1	2280	1040	2280

Si consiglia, prima di iniziare le misure, di verificare sempre che i collegamenti di quadrupoli e deflettori siano corretti e che il filtro di *Wien* non abbia i cavi invertiti. E' possibile eseguire una rapida verifica per vedere se il fascio è allineato: utilizzando il *Beam Profiler* si fanno variare i valori di tensione dei quadrupoli e si osserva la forma della curva che appare a video; se vi è allineamento allora il massimo valore di corrente non si sposta, viceversa se non vi è allineamento il massimo si sposta;

3. E' possibile in questo momento effettuare la misura della corrente totale di fascio ( $I_{totFC1}$  [nA]) al variare della posizione dell'elettrodo estrattore. Per comodità si imposta il controllo remoto della posizione del *puller* in modo tale da poterlo controllare dalla consolle;
4. Per lo stesso livello di corrente di alimentazione, si imposta una distanza del *puller* di 60% e si fa variare la tensione dell'anodo da 50 a 300 V con *step* di 50 V, misurando la corrente totale di fascio in *Faraday Cup 1* ( $I_{totFC1}$  [nA]) e la corrente di anodo ( $I_{an}$  [mA]);

5. Una volta effettuate queste misurazioni è possibile eseguire il *mass scan* per il livello di corrente fissato. E' necessario disinserire la *Faraday cup 1* ed i *Beam profiler 1* e *2*. Quindi rimane inserita la sola *Faraday Cup 2*.
6. Si impostano i valori di quadrupoli per l'esecuzione delle scansioni di massa:

**Tabella 5-10: parametri di quadrupoli per la focalizzazione in FC2 per l'esecuzione dei mass scan**

Focalizzazione	Q1 [V]	Q2 [V]	Q3 [V]
Pre Wien Filter (Ar)	1900	893	1900

7. Successivamente si accendono le piastre del *Wien filter* a 3000 V e si chiudono le slitte per ottenere una buona risoluzione di *mass scan*; solitamente si utilizzano valori pari a 2 o 4 mm a seconda dell'intensità del fascio. Nel nostro caso le slitte sono state aperte di 6 mm per via dell'oscillazione della corrente di fascio letta in FC2. In queste condizioni si deve verificare che la corrente letta in FC2 sia stabile e sufficientemente elevata (almeno 50 nA);
8. Si impostano i parametri per la scansione. L'intasamento dell'impianto di raffreddamento del Wien filter non consente attualmente di raggiungere valori elevati di corrente, pertanto la misura sarà limitata a 160 A; in ogni caso si era già verificato in passato che elementi con masse maggiori non influiscono per più del:

**Tabella 5-11: Parametri del mass separator**

Campo elettrico [kV/m]	120
Massa iniziale [A]	0
Massa finale [A]	160
Step di massa [A]	0.05
Tempo di esposizione [s]	0.3

9. A questo punto è possibile avviare la scansione; verificare sempre che le piastre siano cariche e che la corrente applicata alle bobine del WF non si spenga. Se ciò accade è necessario fermare il *mass scan* e ripeterlo. Vengono forniti in output dei file, che vengono salvati in *epics@*, che devono essere tradotti in formato ASCII per essere letti con Excel®. Essi contengono i valori di corrente di fascio al variare della corrente applicata alle bobine (quindi del campo magnetico), i quali, riportati nell'apposito file Excel, formano un diagramma ( $I_{fascio} - m/q$ ). Da questi è possibile valutare l'efficienza della sorgente poiché, rapportando il picco relativo all'Argon alla somma di tutti i picchi presenti e moltiplicando tale valore per la corrente totale letta in FC1, è possibile risalire al numero di ioni dell'elemento considerato contenuti nel fascio. Essendo noto il numero di atomi all'ingresso della sorgente, tramite un semplice rapporto (N<sub>in</sub>/N<sub>out</sub>) ci si ricava l'efficienza (vedi capitolo 2).
10. E' possibile quindi variare il valore della corrente di alimentazione e ripetere le fasi da 1) a 9). Vengono eseguite 3 rampe totali che forniscono 3 valori per ogni parametro di interesse che dovranno poi essere mediati.

Non viene riportato l'andamento della corrente elettronica poiché già illustrato nel paragrafo riguardante la sorgente SPES, in quanto questa non è influenzata dalla tipologia di estrazione adottata.

Nella Figura 5-33 e nella Figura 5-34 sono rappresentati i valori della corrente totale di fascio al variare della corrente di linea e della tensione di anodo. Si nota un comportamento anomalo della sorgente per un valore di corrente di 420 A e per tensioni basse (50 e 100V); la corrente totale di fascio cala bruscamente per poi risalire per valori di tensione di anodo maggiori di 100V. Questo comportamento può essere causato, come già detto in precedenza, dalle oscillazioni del plasma che viene a formarsi all'interno della sorgente e che quindi peggiora l'estrazione degli ioni dalla camera di anodo. Per una tensione di anodo di 200, 250 e 300 V, invece, si ha un enorme incremento della corrente di fascio che a differenza di quella misurata per l'estrazione SPES risulta inferiore ma molto più stabile. In ogni caso mediamente si hanno correnti totali di fascio più elevate con l'estrazione ISOLDE rispetto a quella SPES, anche per valori bassi di corrente di linea, portando pertanto a pensare che l'efficienza di estrazione risulti migliore. Si nota anche un comportamento anomalo per tensioni di 250 e 300V e per valori di corrente di 380, 390 e 400 A; in queste condizioni la corrente totale di fascio risulta inferiore a quella ottenuta per voltaggio di anodo inferiori. Molto probabilmente questi valori di potenziale peggiorano la capacità dell'estrazione ISOLDE di far uscire grandi quantità di ioni. Si pensa che ciò sia dovuto alle dimensioni del foro di estrazione, più piccolo di quello SPES.



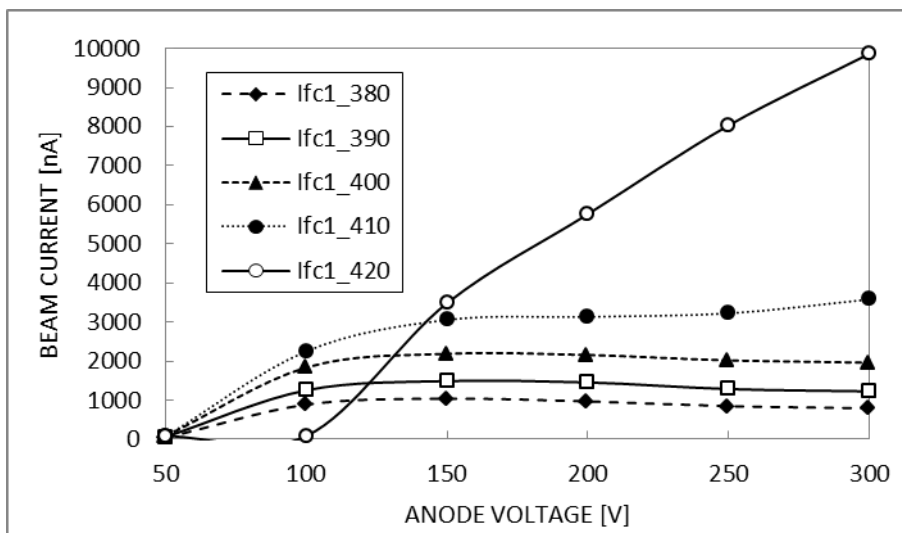


Figura 5-33: Corrente totale di fascio in funzione del voltaggio dell'anodo e al variare della corrente di alimentazione. Di rilievo si segnala un comportamento anomalo per un valore di corrente di alimentazione di 420 A e bassi valori di tensione di anodo; probabilmente questi effetti sono dovuti ad oscillazioni del plasma. Si nota anche che non è conveniente aumentare la tensione di anodo poiché si ha un abbassamento della produzione di corrente di fascio per valori di correnti di alimentazione inferiori ai 410 A.

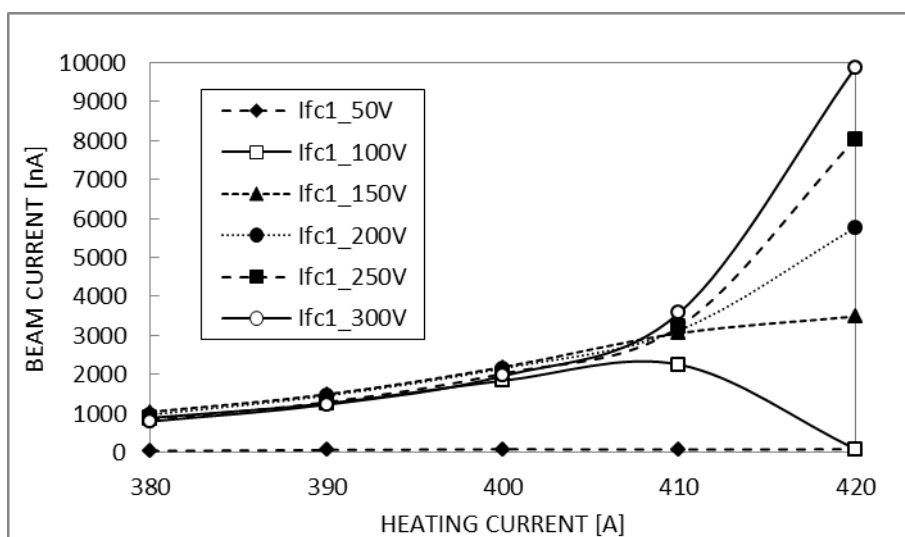


Figura 5-34: Corrente totale di fascio in funzione della corrente di alimentazione, al variare del voltaggio dell'anodo. Di rilievo si segnala un comportamento anomalo per elevati valori di corrente di alimentazione e bassi valori di tensione di anodo probabilmente dovuti ad oscillazioni del plasma. Si nota anche che non è conveniente aumentare troppo la tensione di anodo poiché si ha un abbassamento della produzione di corrente di fascio per valori di correnti di alimentazione inferiori ai 410 A.

La corrente totale di fascio varia anche con la distanza dal *Puller*; essa presenta un massimo per una posizione dell'elettrodo del 60%. Anche se non si è tenuto conto della focalizzazione del fascio, i valori presentati non ne risentono poiché, il fascio, colpisce la *Faraday Cup* per ogni distanza considerata.

Allontanando l'elettrodo estrattore dalla sorgente si manifestano variazioni importanti della corrente totale, essa scende fino a circa 2000 nA per una distanza del 30%. Il grafico in Figura 5-35 è molto importante poiché si è in grado di determinare la posizione dell'elettrodo estrattore per cui si ha la massima corrente totale di fascio e quindi la massima efficienza del sistema. Si vedrà in seguito che la posizione del *Puller* è importante anche per migliorare l'emittanza del fascio poiché per posizioni molto vicine alla sorgente subentrano degli effetti non lineari che portano all'aumento del valore di emittanza lungo l'asse y.

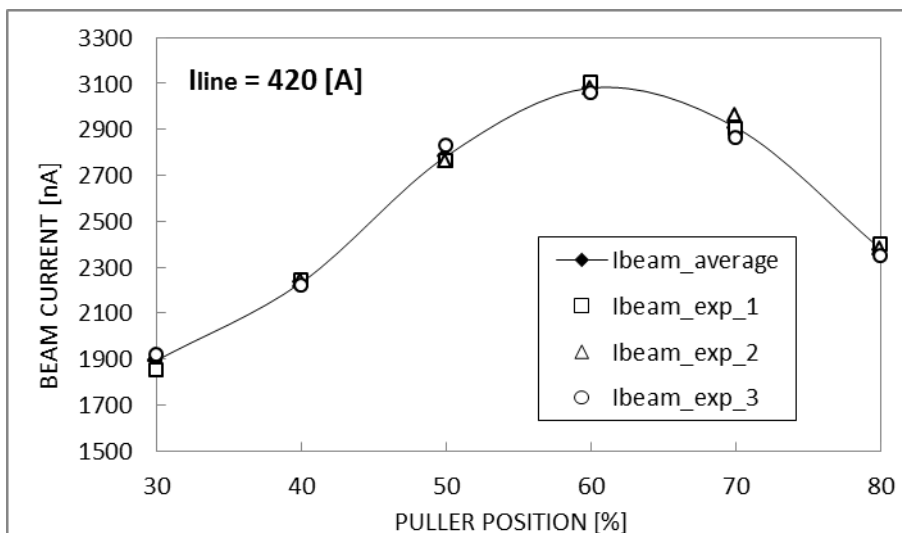


Figura 5-35: Corrente totale di fascio in funzione della posizione del *puller* per una corrente di linea di 420 A. Il valore massimo si ha per una distanza del 60%. La distanza dell'elettrodo estrattore dalla sorgente ha un effetto maggiore che nel caso dell'estrazione SPES.

### 5.5.1. Misure di efficienza con estrazione ISOLDE

Le prove di efficienza sono state eseguite per una distanza dell'elettrodo estrattore del 60%. Sono state effettuate 3 misurazioni per diversi valori di corrente di alimentazione: 380, 390, 400, 410 e 420 A; i valori poi sono stati mediati per ottenere una efficienza media. I valori sono stati calcolati manualmente sulla base di quanto detto nel capitolo 2. Per conoscere la portata di gas Argon insufflata nella sorgente si utilizza un filtro (*leak*) che consente il passaggio di una portata calibrata di  $1,1 \times 10^{-5} \text{ mbar l s}^{-1}$ .

Nella Figura 5-36 sono rappresentati i valori di efficienza calcolati per tre diverse serie di misurazioni, la media delle tre viene presentata da una linea continua. L'efficienza massima, ricavata per una corrente di linea di 420 A, risulta essere di circa il 6%. Questo dato, seppur molto basso, risulta essere buono poiché anche nell'impianto ISOLDE al CERN, i valori di efficienza si attestavano attorno al 4-5% per la sorgente MK5 (vedi Figura 5-28). Risulta evidente quindi che l'estrazione SPES riduce di molto l'efficienza della sorgente. Questo può essere dovuto alla geometria adottata che presenta un foro di estrazione molto lungo, pertanto le particelle cariche sbattono contro le pareti annullando la propria carica.

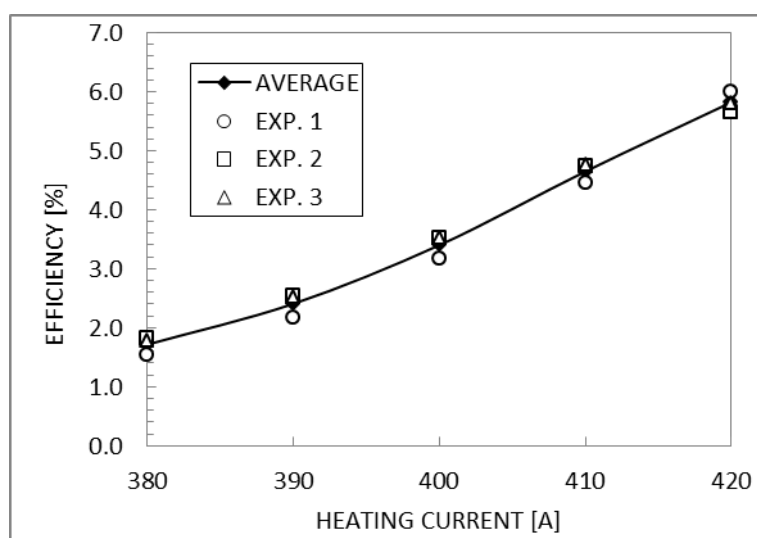


Figura 5-36: Efficienza della PIS con estrazione ISOLDE, al variare della corrente di alimentazione. L'efficienza tende ad aumentare con l'innalzamento della corrente di alimentazione ma non raggiunge un picco massimo come accade, invece, per la versione MK5 utilizzata al CERN. Si pensa che la corrente possa essere ulteriormente aumentata compatibilmente con la formazione di contaminante.

Nella Figura 5-37 viene riportato l'andamento della percentuale di Argon rispetto alla corrente totale di fascio ricavata per i medesimi livelli di tensione di anodo, mantenendo costante la corrente di alimentazione a 400 A. Si evince che la quantità di ioni che si riesce a ricavare risulta molto elevata per una tensione di anodo di 50 V, mentre per gli altri valori si attesta attorno al 70%. Per quanto riguarda l'efficienza, invece, si nota che vi è un massimo in corrispondenza di una tensione di anodo di 175 V; ciò corrisponde anche alla più elevata corrente di fascio ricavata.

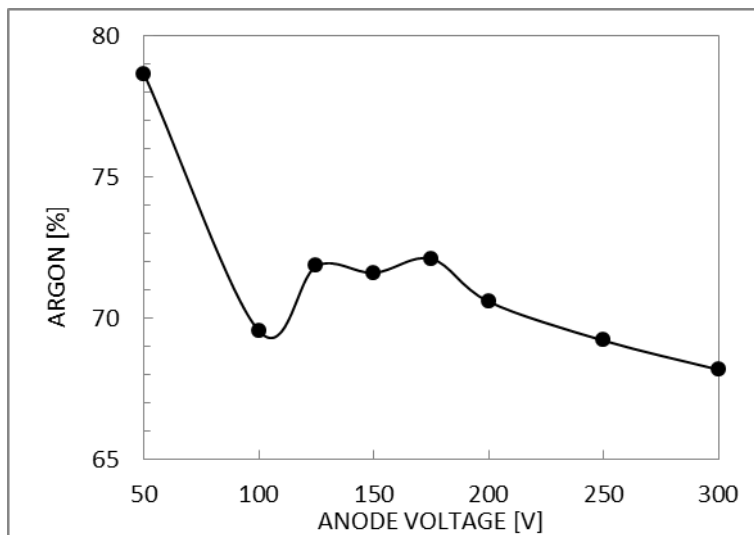


Figura 5-37: Quantità percentuale di Argon presente nel fascio al variare del voltaggio dell'anodo. Si nota che la maggior produzione di ioni si ottiene per 50 V, pertanto per ottenere un fascio con pochi contaminanti si dovrebbe di utilizzare tale impostazione, ma l'efficienza con tal valore risulta troppo bassa. Risultati ottenuti per  $I_{line} = 400$  A.

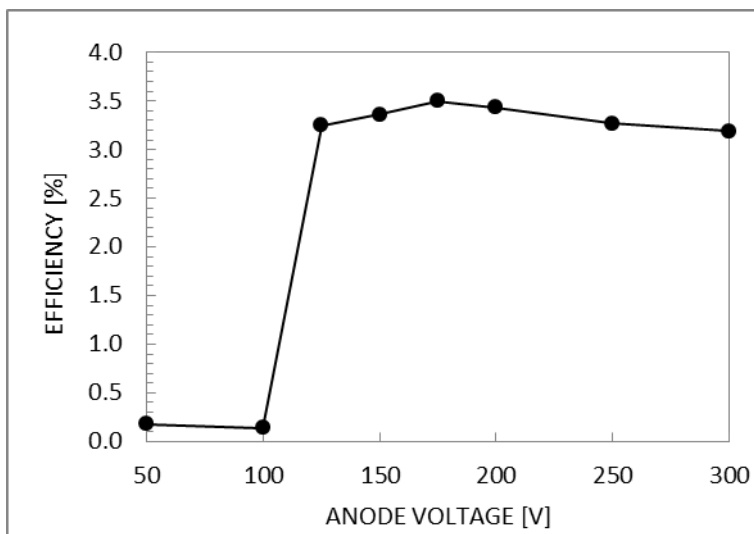


Figura 5-38: Efficienza al variare del voltaggio dell'anodo. Si nota che la maggior efficienza si ottiene per 175 V ma rimane comunque circa costante per differenze di potenziale che vanno da 125 a 300 V. Risultati ottenuti per  $I_{line} = 400$  A.

### 5.5.2. Misure di emittanza con estrazione ISOLDE

Come nel caso dell'estrazione SPES, anche per l'estrazione ISOLDE sono state effettuate delle misure di emittanza con le stesse impostazioni in modo da poter effettuare un confronto diretto tra le due soluzioni. Quindi come prima cosa si è dovuto annullare il campo magnetico residuo all'interno del *Wien filter* per evitare disallineamenti del fascio. Dopo aver effettuato l'inversione dei cavi del WF ed aver portato in temperatura la sorgente è possibile eseguire le prove cercando di imporre una corrente di linea che permette di avere una corrente totale di fascio di 500nA. Per la lettura della corrente di fascio è necessario focalizzare in *Faraday Cup 1* ed accendere il relativo soppressore.

I parametri da impostare per i valori di quadrupoli utilizzati per la lettura della corrente totale in *Faraday Cup 1* sono leggermente diversi mentre per la misura di emittanza rimangono gli stessi. I deflettori non vengono utilizzati:

**Tabella 5-12: Valori di tensione da applicare ai quadrupoli**

<b>Focalizzazione</b>	<b>Q1 [V]</b>	<b>Q2 [V]</b>	<b>Q3 [V]</b>
<b>Faraday Cup 1</b>	2280	1040	2280
<b>Emittance meter</b>	1160	660	1160

Una volta verificato che la corrente totale risulta inferiore al limite consentito, è necessario disinserire le coppe di Faraday (1 e 2), e spegnere i relativi soppressori in quanto possono influire sull'allineamento del fascio. Una volta effettuati questi controlli si imposta la focalizzazione per le misure di emittanza ed i parametri del lettore; si è deciso di impostare l'inizio della lettura a 20 mm anziché a 30 poiché vi era del rumore di fondo che creava problemi con l'elaborazione attraverso il programma Matlab®. Ovviamente è necessario prima verificare che non vengano tagliate parti dell'ellisse ma solo rumore.

**Tabella 5-13: Impostazione dell'emittance meter**

<b>Precision</b>	0,5
<b>Start read</b>	20
<b>End read</b>	-15

Durante la prima serie di misure si è impostato una tensione di anodo costante (150 V) mentre si è fatto variare la posizione dell'elettrodo estrattore (da 40% a 80% con *step* di 10%). Sono state eseguite 3 misure per ogni *step*. Nella Figura 5-31 si può osservare cosa accade al variare della posizione del *puller*. Si nota che al diminuire della distanza dell'elettrodo estrattore dalla sorgente, l'emittanza, calcolata rispetto ai due assi (x,y) ortogonali alla direzione del fascio (z), risulta influenzata dagli effetti non lineari dei quadrupoli. Si nota che una distanza del *Puller* del 60% garantisce una elevata efficienza ma valori di emittanza superiori a 5 [mm mrad]; portando la distanza dell'elettrodo estrattore al 50% si avrebbe una riduzione dell'emittanza del fascio lungo l'asse y ed anche, però, una riduzione dell'efficienza che risulta più marcata in questo caso.

**Tabella 5-14: Valori di emittanza ottenuti variando la distanza dell'elettrodo estrattore, mantenendo una tensione di anodo costante di 150V.**

<b>D extractor [%]</b>	<b><math>\epsilon_{x1}</math></b>	<b><math>\epsilon_{x2}</math></b>	<b><math>\epsilon_{x3}</math></b>	<b><math>\epsilon_{x\_average}</math></b>	<b><math>\epsilon_{y1}</math></b>	<b><math>\epsilon_{y2}</math></b>	<b><math>\epsilon_{y3}</math></b>	<b><math>\epsilon_{y\_average}</math></b>
<b>40</b>	3.33	3.48	3.50	<b>3.44</b>	4.53	4.48	4.38	<b>4.46</b>
<b>50</b>	4.36	4.46	4.36	<b>4.40</b>	4.47	4.57	4.76	<b>4.60</b>
<b>60</b>	4.67	4.58	4.92	<b>4.72</b>	6.40	6.20	6.21	<b>6.27</b>
<b>70</b>	4.17	4.42	4.18	<b>4.26</b>	8.48	10.17	10.28	<b>9.64</b>
<b>80</b>	3.95	4.17	4.26	<b>4.13</b>	15.85	12.28	14.16	<b>14.10</b>

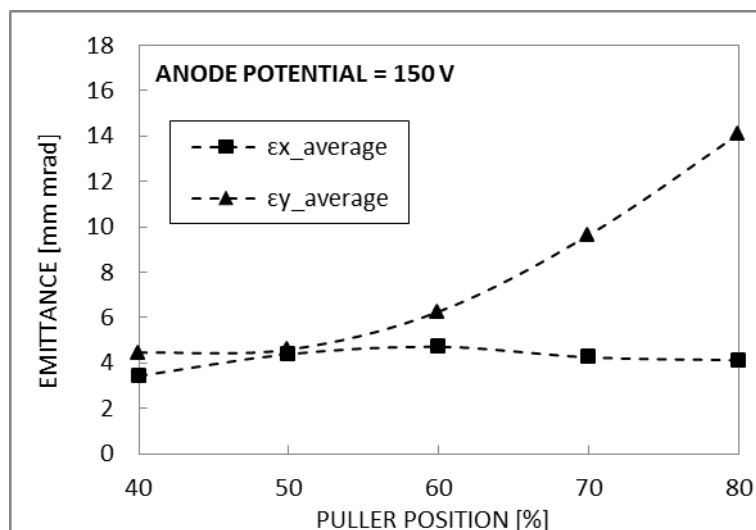


Figura 5-39: Valori di emittanza ottenuti variando la distanza dell'elettrodo estrattore, mantenendo una tensione di anodo costante di 150V. Si nota l'effetto non lineare dovuto ai quadrupoli per posizioni ravvicinate dell'elettrodo estrattore.

Durante la seconda serie di misure si è impostato una distanza dell'elettrodo estrattore costante (50%) mentre si è fatto variare la tensione di anodo; da 150 a 300 V con *step* di 50 V.

Dalla Figura 5-32 si vede che le emittanze presentano un andamento oscillante in opposizione di fase, ovvero quando aumenta l'emittanza lungo y tende a diminuire quella lungo x e viceversa. Ciò può essere stato dovuto ad oscillazioni del plasma che portano alla formazione di un fascio non ottimale.

Tabella 5-15: Valori di emittanza ottenuti variando la tensione di anodo, mantenendo una distanza dell'elettrodo estrattore pari al 50%.

Vanode [V]	$\epsilon_{x1}$	$\epsilon_{x2}$	$\epsilon_{x3}$	$\epsilon_{x\_average}$	$\epsilon_{y1}$	$\epsilon_{y2}$	$\epsilon_{y3}$	$\epsilon_{y\_average}$
150	4.23	4.30	4.30	<b>4.28</b>	4.97	4.39	4.34	<b>4.57</b>
200	4.07	4.19	4.12	<b>4.13</b>	4.19	4.50	4.33	<b>4.34</b>
250	3.87	3.75	3.76	<b>3.79</b>	4.41	4.73	4.62	<b>4.58</b>
300	3.98	4.12	4.11	<b>4.07</b>	4.60	4.32	4.57	<b>4.50</b>

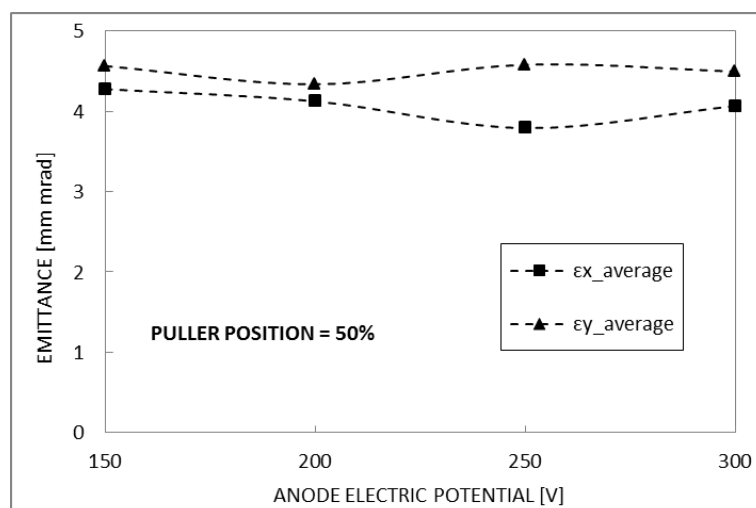


Figura 5-40: Valori di emittanza ottenuti variando la tensione di anodo, mantenendo una distanza dell'elettrodo estrattore pari al 50%.

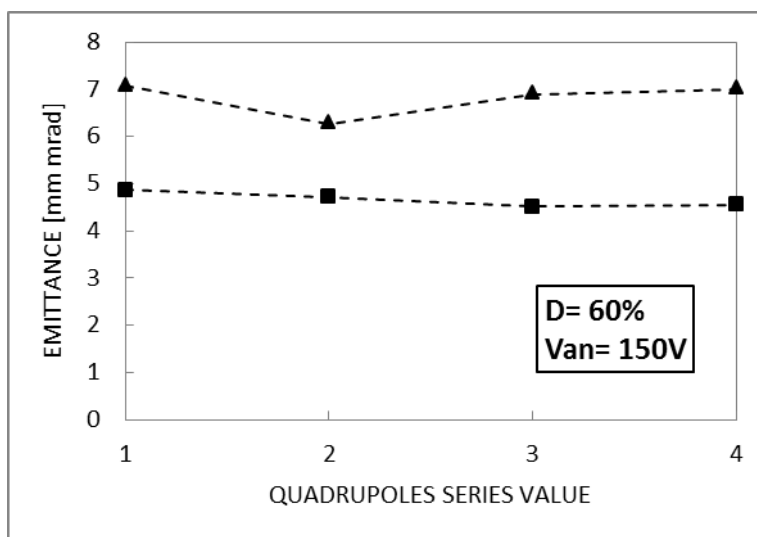
Oltre a queste misure utili per un confronto diretto tra estrazione SPES ed estrazione ISOLDE, sono state effettuate altre misure di emittanza al variare della tensione applicata ai quadrupoli. Si ricorda che, in teoria, l'utilizzo di forze conservative per variare le dimensioni trasversali del fascio, non dovrebbe alterare il valore di emittanza. Infatti focalizzando il fascio in un punto si avrà una diminuzione della sezione di passaggio nel

punto di fuoco, ma d'altro canto si avrà anche un aumento dell'angolo di incidenza delle particelle pertanto, essendo proporzionale al prodotto della distanza della particella dal centro e del suo angolo, l'emittanza tenderà a conservarsi (*Teorema di Liouville*).

Sono state effettuate, per ogni impostazione di quadrupoli, tre misure per asse (x e y). Sono state prese a riferimento due distanze dell'elettrodo estrattore (50 e 60%) ed una tensione di anodo di 150V. Nella Figura 5-41 e Figura 5-42 sono riportati i risultati delle misurazioni. Per d=60% vi è l'influenza di effetti non lineari dei quadrupoli che fanno aumentare il valore dell'emittanza lungo l'asse y. In ogni caso per tutte le serie di misure effettuate non si hanno sconvolgimenti dei valori di emittanza; tendendo in considerazione che ogni singola misura può presentare variazioni di 0,5 [mm mrad] per le stesse impostazioni, è possibile affermare che l'emittanza tende a conservarsi al variare della tensione applicata ai quadrupoli. E' comunque naturale che vi siano delle differenze tra i valori medi di emittanza poiché la realtà sperimentale mostra effetti che non vengono tenuti in conto con la teoria.

**Tabella 5-16: Valori di emittanza ottenuti variando le impostazioni dei quadrupoli e mantenendo costante la distanza dell'elettrodo estrattore (60%) e la tensione di anodo (150V).**

d=60% Van=150V	QUADS	ex1	ex2	ex3	ex_average	ey1	ey2	ey3	ey_average
SERIE 1	1160_650_1110	4.802	4.811	4.995	<b>4.87</b>	6.931	6.942	7.359	<b>7.08</b>
SERIE 2	1160_660_1160	4.67	4.58	4.92	<b>4.72</b>	6.40	6.20	6.21	<b>6.27</b>
SERIE 3	1160_670_1210	4.60	4.44	4.48	<b>4.51</b>	6.70	6.72	7.25	<b>6.89</b>
SERIE 4	1160_680_1260	4.52	4.65	4.49	<b>4.55</b>	6.74	7.16	7.09	<b>7.00</b>



**Figura 5-41: Valori di emittanza ottenuti variando le impostazioni dei quadrupoli e mantenendo costante la distanza dell'elettrodo estrattore (60%) e la tensione di anodo (150V).**

**Tabella 5-17: Valori di emittanza ottenuti variando le impostazioni dei quadrupoli e mantenendo costante la distanza dell'elettrodo estrattore (50%) e la tensione di anodo (150V).**

d=50% Van=150V	QUADS	ex1	ex2	ex3	ex_average	ey1	ey2	ey3	ey_average
SERIE 1	1160_650_1110	4.01	4.32	4.05	<b>4.12</b>	5.09	5.07	4.90	<b>5.02</b>
SERIE 2	1160_660_1160	3.89	3.98	4.05	<b>3.97</b>	4.91	4.77	4.76	<b>4.81</b>
SERIE 3	1160_670_1210	4.12	3.88	3.74	<b>3.91</b>	4.77	4.48	4.66	<b>4.64</b>
SERIE 4	1160_680_1260	3.73	3.54	3.64	<b>3.64</b>	4.54	4.59	4.75	<b>4.63</b>

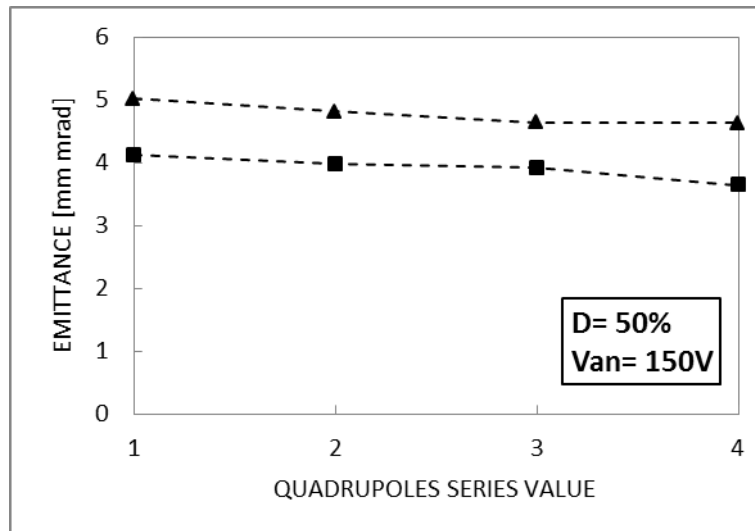


Figura 5-42: Valori di emittanza ottenuti variando le impostazioni dei quadrupoli e mantenendo costante la distanza dell'elettrodo estrattore (50%) e la tensione di anodo (150V).

## 5.6. Conclusioni

Nel seguente capitolo sono state riportate le misure effettuate per caratterizzare la sorgente di ionizzazione al plasma. Tali misure sono utili per effettuare un confronto diretto tra le due diverse tipologie di estrazione al momento in discussione. Abbiamo l'estrazione ISOLDE da un lato che presenta una miglior efficienza di estrazione degli ioni a scapito però di una emittanza leggermente superiore che nel caso dell'estrazione SPES. Dalle misure, pertanto, si deduce che l'estrazione ISOLDE presenta un'alternativa migliore in quanto la riduzione di emittanza (-16%) ottenuta con l'estrazione SPES, non è tale da sopperire alle minori efficienze da questa mostrate (-50%). Nel capitolo 6 si cercherà di sviluppare un modello numerico con il codice di calcolo Ansys®, in grado di fornire importanti indicazioni progettuali per lo sviluppo del sistema di estrazione della sorgente.

## Bibliografia Capitolo 5

- [1]. M. Marin, Analisi Elettro-Termo-Strutturale, Sviluppo e Test di una Sorgente di Ionizzazione Superficiale per il Progetto SPES, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2012/2013.
- [2]. A. Monetti, Studio, Simulazione e Test di un Apparato per la Produzione di Fasci Radioattivi, Tesi di Laurea Magistrale, università degli Studi di Padova, 2011/2012
- [3]. L. Cavaletto, Studio dei meccanismi di ionizzazione e della formazione del plasma in una sorgente per il progetto SPES dei Laboratori INFN di Legnaro, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2012/2013.
- [4]. M. Manzolaro et al., Ongoing Characterization of Forced Electron Beam Induced Arc Discharge Ion Source for the Selective Production of Exotic Species Facility, Review of Scientific Instrument 85, 02B918, 2014.
- [5]. Luca Martin, Progettazione meccanica delle box di diagnostica del front-end del progetto SPES, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2014/2015.
- [6]. Gianluca Vivian, Studio, progettazione e test della sorgente di ionizzazione al plasma per il progetto SPES, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova, 2013/2014.
- [7]. Liviu Penescu et al., Arc discharge ion source development at CERN ISOLDE, U.P.B. Sci. Bull., Series A, Vol.72, Iss.2, 2010
- [8]. Ian G.Brown, The Physics and Technology of Ion Sources, Wiley Interscience Publication, 1989.
- [9]. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Ion Sources, Senec, Slovakia, 29 May – 8 June 2012, edited by R. Bailey, CERN-2013-007, (CERN, Geneva, 2013)
- [10]. Bernhard Wolf, Handbook of Ion Source, 1995, CRC Press.
- [11]. M. Manzolaro, Study, Design and Test of the Target – Ion Source System for the INFN SPES Facility, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [12]. T. Kalvas, Beam Extraction and Transport, Department of Physics, University of Jyväskylä, 40500 Jyväskylä, Finland, 2014.
- [13]. A.T. Forrester, Large Ion Beams, Wiley-Interscience, New York, NY, 1988



# CAPITOLO 6: ANALISI NUMERICA DEL SISTEMA DI ESTRAZIONE DELLA SORGENTE DI IONIZZAZIONE AL PLASMA

## 6.1 Introduzione

In questo capitolo si vuole studiare un metodo numerico in grado di fornire importanti indicazioni per lo sviluppo del sistema di estrazione della sorgente di ionizzazione al plasma attraverso il codice di calcolo Ansys®. Si è deciso di concentrare l'attenzione sui due principali parametri di ottimizzazione per il sistema di estrazione, ovvero l'efficienza di estrazione e l'emittanza del fascio. Per fare ciò è necessario eseguire uno studio sulle traiettorie degli ioni estratti dalla sorgente.

Come spiegato nel capitolo 2, gli elettroni emessi dal catodo per effetto termoionico entrano all'interno dell'anodo spinti da una differenza di potenziale di 150V; la presenza di un solenoide posto esternamente e percorso da corrente continua provoca all'interno della sorgente e quindi anche nell'anodo, un campo magnetostatico lungo la direzione assiale, che ha essenzialmente la funzione di fare compiere una traiettoria elicoidale agli elettroni che dal catodo vengono accelerati in direzione dell'anodo e che hanno una velocità non parallela al vettore campo magnetico. In questo modo è possibile aumentare il loro cammino libero e quindi l'efficienza del processo di ionizzazione. Tali elettroni producono la ionizzazione degli atomi dell'elemento inserito nella sorgente; questi vengono poi estratti attraverso un particolare ugello (estrazione) e quindi accelerati verso l'elettrodo estrattore.

E' noto che l'efficienza è strettamente legata alla produzione di corrente elettronica da parte del catodo e alla geometria del sistema di estrazione del fascio; mentre l'emittanza è un parametro correlato direttamente alla geometria del sistema di estrazione; pertanto un miglioramento di questo sistema porterebbe a notevoli vantaggi. Con il seguente lavoro si vuole quindi capire fino a che punto Ansys® è in grado di fornire informazioni utili per lo studio di tale fenomeno, al fine di affiancare allo studio meccanico affrontato nei precedenti capitoli uno studio delle prestazioni della sorgente per quanto riguarda gli aspetti legati all'estrazione del fascio.

## 6.2 Generalità sui campi elettromagnetici [1]

I **campi elettromagnetici** sono campi vettoriali risultanti dall'effetto di sovrapposizione di un campo magnetico e di un campo elettrico. A loro volta i campi elettrici (magnetici) possono essere il risultato della sovrapposizione degli effetti di campi elettrici (magnetici) discreti. I vettori possono essere costanti nel tempo (*statici*) oppure variabili con frequenze più o meno elevate (*dinamici*).

Il **campo elettrico** viene generato da particelle cariche elettricamente. Il suo valore dipende direttamente dalla carica della particella ( $q_i$ ) ed è inversamente proporzionale al quadrato della distanza da essa ( $r^2$ ). Il campo elettrostatico prodotto in un punto P da un sistema di cariche ferme è definito come la forza elettrostatica  $\vec{F}$  che agisce su una carica di prova  $q_0$  posta in P divisa per la carica stessa. Se il sistema di cariche è discreto, il campo elettrostatico è dato dalla somma vettoriale dei campi applicati singolarmente:

$$\vec{E} = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u}_i \quad [V] \quad (6.1)$$

Il vettore campo elettrico ( $\vec{E}$ ) risulterà quindi uscente dalla carica  $q_i$  se questa è positiva mentre risulterà entrante se è negativa. La costante  $\epsilon_0$  è nota come costante dielettrica (o *permittività*) del vuoto ed ha il valore:

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \quad \left[ \frac{C^2}{Nm^2} \right] \quad (6.2)$$

La forza applicata ad una carica di prova  $q_0$  da un sistema di cariche vale:

$$\vec{F}(x, y, z) = q_0 \vec{E}(x, y, z) \quad [N] \quad (6.3)$$

Se la carica di prova ( $q_0$ ) è libera di muoversi nello spazio, subisce un'accelerazione. Secondo la *legge di Newton* è possibile scrivere:

$$q_0 \vec{E} = m \vec{a} \quad \text{quindi} \quad \vec{a} = \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{q_0}{m} \vec{E} \quad (6.4)$$

Se  $\vec{E}$  è uniforme (costante in modulo e direzione) l'accelerazione  $a$  è una costante del moto. Se la carica è positiva l'accelerazione sarà nel verso di  $\vec{E}$ , se la carica è negativa sarà nel verso opposto. In tale campo, a meno che i punti A e B coincidano o si trovino su una superficie equipotenziale, viene compiuto il lavoro:

$$W_E = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = -q(V^B - V^A) \quad (6.5)$$

dove nell'ultima uguaglianza si è introdotto l'ipotesi di *campo conservativo*. Infatti in un campo elettrostatico, la forza elettromotrice è uguale a zero, ovvero è nullo il lavoro compiuto dalla forza elettrostatica per qualsiasi percorso ciclico (A=B). Siccome la "circuitazione" di una forza conservativa è nulla, si può affermare che la forza elettrostatica è conservativa, pertanto lo è anche il campo ad essa associato. Matematicamente questa condizione si esprime, applicando il *teorema di Stokes*:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{l} = \int_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot \vec{u}_n dS = 0 \rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (6.6)$$

Inoltre è possibile affermare, per il teorema di *conservazione dell'energia*, che l'energia cinetica di una particella carica immersa in un campo magnetico varia; in generale la velocità può cambiare sia in modulo che in direzione:

$$\frac{1}{2} m v_A^2 + q_0 V_A = \frac{1}{2} m v_B^2 + q_0 V_B \quad (6.7)$$

Si ricorda inoltre che, per la *legge di Gauss*, il flusso del campo elettrostatico attraverso una superficie chiusa S è uguale alla somma algebrica delle cariche contenute dentro la superficie (volume V), comunque siano distribuite, diviso per  $\epsilon_0$ :

$$\Phi_E(\vec{E}) = \oint_S \vec{E} \cdot \vec{u}_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V dq \quad (6.8)$$

Per il *teorema della divergenza*, la (6.7) diventa:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (6.9)$$

Se il campo elettrico si sviluppa in un mezzo, subentra l'effetto di induzione dielettrica esprimibile attraverso un vettore  $\vec{D}$ :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad [V] \quad (6.10)$$

in cui  $\epsilon$  rappresenta la permittività nel mezzo.

Il **campo magnetico** viene generato dal movimento di cariche elettriche. L'analisi dei primi esperimenti sulle caratteristiche del campo magnetico prodotto da correnti in conduttori filiformi indusse Laplace a formulare una legge nota come prima *legge di Laplace*, che esprime il campo magnetico prodotto da un tratto infinitesimo di filo  $d\vec{l}$ , percorso dalla corrente  $i$ , in un punto  $P$  distante  $r$  dall'elemento di filo:

$$d\vec{B} = k_m i \frac{d\vec{l} \times \vec{n}_r}{r^2} = \frac{k_m i dl}{r^2} \vec{u}_t \times \vec{u}_r \quad (6.11)$$

dove  $\vec{u}_r$  è il versore della direzione orientata da  $d\vec{l}$  a  $P$ ,  $\vec{u}_t$  il versore tangente al filo per cui  $d\vec{l} = dl \vec{u}_t$ ,  $k_m$  è una costante che dipende dal sistema di unità di misura e dal mezzo materiale in cui si sperimenta. Assumendo di operare nel vuoto, nel sistema internazionale si ha:

$$k_m = 10^7 \left[ \frac{H}{m} \right] \quad (6.12)$$

e la costante:

$$\mu_0 = 4\pi k_m = 1.26 \times 10^6 \left[ \frac{H}{m} \right] \quad (6.13)$$

è chiamata permeabilità magnetica del vuoto. Anche per certi materiali può essere assegnata, in prima approssimazione, la permeabilità magnetica del vuoto (*diamagnetici*).

La prima legge di Laplace diventa pertanto:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\vec{l} \times \vec{n}_r}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i dl}{r^2} \vec{u}_t \times \vec{u}_r \quad (6.14)$$

Il campo magnetico elementare di un tratto infinitesimo di circuito risulta proporzionale alla corrente e inversamente proporzionale al quadrato della distanza; l'orientazione di  $B$  è legata al verso della corrente dalla regola del prodotto vettoriale o regola della vite; una vite che avanzi lungo la corrente indica con il suo verso di rotazione il verso delle linee di  $\vec{B}$ .

Come per il campo elettrostatico possiamo trovare una proprietà differenziale del campo magnetostatico utilizzando il *teorema della divergenza* e una corrispondente proprietà integrale utilizzando il teorema del flusso di Gauss. Il flusso attraverso qualsiasi superficie  $S$  che circonda il circuito è dato da:

$$\Phi_S(\vec{B}) = \int_S \vec{B} \cdot \vec{u}_n \cdot dS = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{B} \cdot dV \quad (6.15)$$

dove  $V$  è il volume della superficie generica  $S$ . A differenza di quanto accade per il campo elettrostatico, non è mai stata osservata una particella che si comporti come un monopolo magnetico, dunque il flusso di  $B$  è nullo. Essendo l'integrale calcolato su una superficie arbitraria segue che la divergenza di  $B$  è nulla:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (6.16)$$

Ovvero il campo magnetico è un campo solenoidale. Inoltre il campo magnetostatico non è conservativo e quindi non è irrotazionale cioè il suo rotore non è nullo ovunque. Per dimostrarlo si fa uso della *Legge di Ampere*:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_c \quad (6.17)$$

In forma differenziale questa equivale: (applicando il *teorema di Stokes*)

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \quad (6.18)$$

Il fatto che non sia conservativo ci dice che non è possibile definire un potenziale scalare. Tuttavia si può definire un potenziale vettore  $A$  detto anche potenziale magnetico tale che:

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{B} \quad (6.19)$$

Le azioni magnetiche sono quindi il risultato dell'interazione tra cariche in moto; adottando la rappresentazione tramite un campo, si può dire che l'azione magnetica è dovuta al fatto che un sistema di cariche in moto genera in una certa regione un campo magnetico, che indichiamo con il simbolo  $\vec{B}$ , e che l'altro sistema di cariche in moto risente di una forza in quanto immerso in  $\vec{B}$ .

Consideriamo ora una particella di massa  $m$  e carica  $q$ , posta in un campo magnetico  $\vec{B}$ ; se la particella è ferma in un sistema di riferimento solidale alle sorgenti del campo magnetico si trova che su di essa non agisce nessuna forza. In accordo col fatto che l'interazione magnetica si manifesta solamente tra cariche in movimento. Se invece la particella è in moto con velocità  $v$  rispetto al sistema di riferimento suddetto, si verifica che su di essa agisce la forza detta di Lorentz:

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (6.20)$$

Il modulo della forza di Lorentz ha il valore

$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\theta \quad (6.21)$$

essendo  $\theta$  l'angolo tra  $v$  e  $B$ : la forza è dunque nulla se la velocità è parallela al campo magnetico ( $\theta=0$  e  $\theta=\pi$ ) ed è massima, pari a  $qvB$ , quando  $v$  è ortogonale a  $B$  ( $\theta=\pi/2$ ). La direzione della forza è ortogonale al piano individuato dai vettori  $v$  e  $B$  e il verso è determinato dalla nota regola del prodotto vettoriale se la carica è positiva, mentre è opposta se la carica è negativa; ricordiamo che il verso del risultato di un prodotto vettoriale è quello di avanzamento di una vite destrorsa che nella sua rotazione porta  $v$  su  $B$  (regola della vite). In particolare la forza è sempre ortogonale alla velocità, cioè alla traiettoria e pertanto in base alla definizione di lavoro e di energia cinetica si ha:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2 = W_M = \int_A^B \vec{F}_L \cdot d\vec{l} = 0 \quad (6.22)$$

Per un qualsiasi spostamento dal punto A al punto B nella regione in cui esiste il campo magnetico  $\vec{B}$ , l'energia cinetica della particella resta costante in quanto la forza di Lorentz non compie lavoro su di essa; non comunica alla particella un'accelerazione tangenziale, ma soltanto un'accelerazione centripeta. In altre parole: quando una particella carica si muove in un campo magnetico la sua velocità cambia in direzione, ma non in modulo. Se il campo magnetico si sviluppa all'interno di un materiale il suo valore risulta diverso da quello ottenuto in vuoto. E' possibile esprimere un legame costitutivo del campo magnetico:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad [T] \quad (6.23)$$

Dove  $\mu$  rappresenta la permeabilità magnetica nel mezzo.

Il campo magnetico, solitamente indicato con il vettore  $B$ , storicamente era la *densità di flusso magnetico* o *induzione magnetica*, e  $H=(B/\mu)$  era il campo magnetico: questa terminologia è oggi utilizzata per distinguere tra il campo magnetico nel vuoto ( $B$ ) e quello in un materiale ( $H$ , con  $\mu$  diversa dall'unità). L'unità di misura dell'induzione magnetica nel SI è il tesla.

### 6.2.1. Moto di una particella carica in un campo elettromagnetico uniforme, $\theta$ generico

Consideriamo una particella carica in moto con velocità  $v$  in un campo magnetico uniforme. Se l'angolo  $\theta$  che la velocità della particella forma con il campo magnetico è qualsiasi, scomponiamo la velocità  $v$ , derivante dall'accelerazione fornita alla particella dal campo elettrostatico, nelle due componenti  $v_n=v \sin\theta$  ortogonale a  $B$  e  $v_p=v \cos\theta$  parallela a  $B$ ; la forza magnetica che agisce sulla particella è

$$\vec{F}_M = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = q(\vec{v}_n + \vec{v}_p) \times \vec{B} = q \cdot \vec{v}_n \times \vec{B} \quad (6.24)$$

in quanto  $\vec{v}_p \times \vec{B} = 0$  essendo i vettori paralleli. Abbiamo pertanto in un piano ortogonale a  $B$  un moto circolare uniforme con velocità  $v_n$ ; il raggio di curvatura è:

$$r = \frac{mv_n}{qB} = \frac{mv \sin\theta}{qB} \quad (6.25)$$

e la velocità angolare è data da:

$$\omega = \frac{v_n}{m} = \frac{qB}{m} \quad (6.26)$$

Questa relazione, indipendente dal valore dell'angolo  $\theta$  ( per cui è valida anche per  $\theta \neq \pi/2$ ), mostra che la velocità angolare è sempre parallela a  $\vec{B}$ ; se la carica  $q$  è negativa,  $\omega$  ha lo stesso verso di  $B$  e quindi, dalla punta di  $B$ , il moto appare antiorario se la carica  $q$  è positiva,  $\omega$  è opposta a  $B$  e il moto appare orario.

Di conseguenza, il tempo impiegato a percorrere una circonferenza ovvero il periodo del moto circolare uniforme non dipendono dal raggio dell'orbita e dalla velocità con cui questa viene descritta, valendo sempre:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (6.27)$$

Se lungo  $B$  non c'è forza,  $v_p$  resta costante e il moto proiettato nella direzione di  $B$  è rettilineo uniforme. La scomposizione del moto circolare uniforme in un piano ortogonale a  $B$  e del moto rettilineo uniforme lungo  $B$  dà luogo a un moto elicoidale uniforme avente come asse la direzione di  $B$ . Nel tempo, indipendente da  $v$  e pari al periodo del moto circolare uniforme, la particella si sposta lungo  $B$  della quantità:

$$p = v_p T = \frac{2\pi m v \cos\theta}{q B} \quad (6.28)$$

detta passo dell'elica. Fissato  $B$  il verso di percorrenza dell'elica corrisponde al verso di percorrenza del moto circolare. Se invece, come in molte applicazioni fisiche, la velocità  $v_p$  è variabile per la presenza di un campo elettrostatico, allora il moto sarà uniformemente accelerato, pertanto l'elica tenderà ad allungarsi ed il suo passo aumenterà progressivamente.

La forza totale applicata da un campo combinato elettromagnetico è data da:

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_M = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v}_n \times \vec{B} = m \vec{a} \quad (6.29)$$

### 6.3 Analisi elettromagnetiche con il software Ansys® [1][2]

Dalla formulazione analitica riferita a campi statici riportata nel precedente paragrafo è possibile risalire ad una formulazione più generale che considera anche la loro variazione nel tempo. La *legge di Ampere* (6.16) non va più bene e deve essere modificata per tener conto della dinamica dei campi nel seguente modo:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi(\vec{E})}{dt} \right) \quad (6.30)$$

Questa è detta *legge di Ampere-Maxwell* e stabilisce che i campi magnetici sono prodotti sia dalle correnti di conduzione ( $i_c$ ) che da variazioni temporali del campo elettrico ( $\vec{E}$ ). Applicando il *teorema di Stokes* alla (6.28) si ottiene:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{\nabla} \times \vec{B} \cdot \vec{u}_n dS = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot \vec{u}_n \cdot dS - \mu_0 \epsilon_0 \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \vec{u}_n \cdot dS \rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (6.31)$$

Applicando l'operatore divergenza ad entrambi i membri di (6.31) si ottiene l'*equazione di continuità*, dato che  $\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \times \vec{B}) = 0$ .

$$\mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \rightarrow \nabla \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (6.32)$$

Dove  $\rho$  è la densità di carica.

Vi è una simmetria di comportamento con la *legge di Faraday* che stabilisce l'esistenza di un campo elettrico nei punti in cui esistono variazioni di campo magnetico:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt} \quad (6.33)$$

Applicando il teorema di Stokes al primo membro della (6.33), e ricordando il *teorema di Gauss* per il secondo membro (6.15) otteniamo:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{\nabla} \times \vec{E} \cdot \vec{u}_n dS = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot \vec{u}_n \cdot dS = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{u}_n \cdot dS \rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6.34)$$

Il software Ansys® Mechanical APDL contiene al suo interno un solutore in grado di risolvere le equazioni costitutive dei campi elettromagnetici. Le equazioni risolte da Ansys si derivano dalle equazioni (6.31) e (6.34), ricordando le equazioni costitutive dei campi elettromagnetici che tengono conto del mezzo in cui si effettua il calcolo:  $\vec{H}=\vec{B}/\mu$  e  $\vec{E}=\vec{D}/\epsilon$ . Si ottiene, in forma matriciale, la seguente serie di equazioni valide sia nel caso di campi statici che dinamici:

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_e\} + \{J_v\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \quad (6.35)$$

$$\nabla \times \{E\} = - \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\} \quad (6.36)$$

Inoltre, dalle equazioni (6.9) e (6.15) si ricavano le seguenti, tenendo conto che la matrice  $\{D\}$  è definita in Ansys come  $\{D\}=\{\epsilon\}\{E\}$ :

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (6.37)$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho \quad (6.38)$$

dove:

- $\{B\}$  è il vettore densità di flusso magnetico (output come B ai nodi degli elementi)
- $\{H\}$  è il vettore intensità del campo magnetico (output come H ai nodi degli elementi)
- $\{E\}$  è il vettore intensità del campo elettrico (output come E ai nodi degli elementi)
- $\{J\}$  è il vettore densità di corrente totale
- $\{J_s\}$  è il vettore densità di corrente applicata
- $\{J_e\}$  è il vettore densità di corrente indotta
- $\{D\}$  è il vettore di induzione dielettrica
- t è il tempo
- $\rho$  è la densità di carica elettrica

L'equazione di continuità segue dal considerare la divergenza di entrambi i membri dell'equazione (6.31):

$$\nabla \cdot \left[ \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \right] = 0 \quad (6.39)$$

essa deve essere soddisfatta per settare correttamente l'equazione di Maxwell.

Le equazioni sopra sono integrate dalla relazione costitutiva che descrive il comportamento dei materiali elettromagnetici. Per problemi che considerano materiali saturabili senza magneti permanenti, la relazione costitutiva per i campi magnetici è:

$$\{B\} = \{\mu\}\{H\} \quad (6.40)$$

dove  $\{\mu\}$  è la matrice di permeabilità magnetica, in generale funzione di H. La permeabilità magnetica può essere inserita come input funzione della temperatura e del campo magnetico.

quando sono considerati invece magneti permanenti la relazione costitutiva diventa:

$$\{B\} = \{\mu\}\{H\} + \mu_0 \{M_0\} \quad (6.41)$$

dove  $\{M_0\}$  è il vettore di magnetizzazione intrinseca rimanente.

Riscrivendo l'equazione costitutiva generale in termini di riluttività essa diventa:

$$\{H\} = \{v\}\{B\} - \frac{1}{v_0} \{v\}\{M_0\} \quad (6.42)$$

dove  $\{v\}$  è la matrice di riluttività =  $\{\mu\}^{-1}$  e  $v_0$  è la riluttività de vuoto =  $\mu_0^{-1}$

Le formule costitutive relative ai campi elettrici sono invece:

$$\{J\} = \{\sigma\}[\{E\} + \{v\} \times \{B\}] \quad (6.43)$$

Dalla (6.9)

$$\{D\} = \{\epsilon\}\{E\} \quad (6.44)$$

dove  $\{\sigma\}$  è la matrice di conducibilità elettrica;  $\{\epsilon\}$  la matrice di permittività e  $\{v\}$  il vettore velocità. La soluzione di problemi di campi elettromagnetici è comunemente ottenuta usando funzioni potenziale. Due tipi di funzione potenziale, il potenziale vettore magnetico e il potenziale scalare magnetico sono usati a seconda dei problemi da risolvere.

### 6.3.1. Ansys® Particle Tracing<sup>[2]</sup>

Una volta risolto il modello elettromagnetico, è possibile utilizzare il *Particle tracing* implementato nel codice di calcolo Ansys®, per tracciare la traiettoria di particelle cariche ed aventi una certa massa. Per fare ciò, il calcolatore, risolve le equazioni del moto per ogni particella:

$$m\vec{a} = \vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (6.45)$$

dove:

$m$  = massa della particella

$q$  = carica della particella

$\vec{E}$  = vettore campo elettrico

$\vec{B}$  = vettore campo magnetico

$\vec{F}_L$  = Forza di Lorentz

$\vec{a}$  = accelerazione della particella

$\vec{v}$  = velocità della particella

La traccia della particella viene eseguita elemento per elemento, ovvero il punto di uscita della particella da un elemento diventa il punto di partenza per l'elemento successivo. Date le condizioni iniziali di velocità e le coordinate iniziali di ingresso per un elemento, le coordinate e le velocità finali sono ottenute per integrazione delle equazioni del moto al suo interno.

L'algoritmo utilizzato per il *Particle Tracing* si basa sulle seguenti ipotesi:

1. velocità molto più piccole della velocità della luce (non si considerano effetti relativistici);
2. analisi elettrostatiche e/o magnetostatiche;
3.  $\mathbf{E}$  e/o  $\mathbf{B}$  costanti all'interno dell'elemento;
4. tracciamento in campo puramente elettrostatico ( $\{\mathbf{B}\} = \{0\}$ ), puramente magnetico ( $\{\mathbf{E}\} = \{0\}$ ), o combinato elettromagnetico  $\{\mathbf{E-B}\}$ ;
5. si devono utilizzare elementi quadrilateri, triangolari, esaedrici, tetragonali, piramidali o a cuneo delimitati da superfici piane

Queste ipotesi semplificative riducono enormemente il tempo di calcolo della traccia delle particelle poiché le traiettorie possono essere scritte in forma analitica:

1. parabola nel caso di solo campo elettrostatico;
2. elica nel caso di solo campo magnetico;
3. Elica generalizzata nel caso di campi accoppiati elettromagnetici.

Il punto di uscita da un elemento è il punto in cui la traiettoria della particella incontra la superficie dell'elemento successivo e può essere facilmente calcolato nel caso la traiettoria sia una parabola. Invece se la traiettoria è un'elica, il punto di uscita deve essere calcolato con una equazione trascendente che pertanto può non avere una soluzione unica. Questa viene risolta tramite l'algoritmo di Newton-Raphson ma il punto di partenza deve essere opportunamente selezionato per assicurarne la convergenza. Questo strumento permette di ottenere un calcolo della traiettoria con una precisione pari a quella di macchina. Tuttavia ciò non significa che la soluzione sia esatta poiché dipende dal campo presente all'interno dell'elemento, il quale è funzione della dimensione della *mesh*.

Quanto detto ci fa capire che la dimensione degli elementi influenza pesantemente il risultato del calcolo della traiettoria: più fitta è la *mesh* e più aderenti alla realtà saranno i risultati ottenuti. Ovviamente bisognerà cercare una soluzione il più possibile vicina alla realtà ma che venga calcolata nel minor tempo possibile; quindi si dovrà accettare un certo errore dovuto alle semplificazioni fatte.

Per eseguire il tracciamento di una particella si deve innanzitutto entrare nel post-processore di Ansys®, successivamente bisogna generare le particelle (comando TRPOIN) ed infine tracciare quanto calcolato (comando PLTRAC). Per ogni particella è poi possibile ricavare alcune proprietà fisiche come: distanza percorsa (s), tempo impiegato, le componenti di velocità (lungo x, y, z, s), componenti del campo, valori di potenziale ecc. E' possibile eseguire anche delle animazioni. Per impostare il *Particle Tracing* si fa uso dei seguenti comandi:

- TRPOIN: Attraverso il comando *TRPOIN* si definisce il punto iniziale (X, Y, Z); cioè il punto da cui parte la particella carica. In particolare si definiscono, oltre a tale punto, anche la velocità iniziale (VX, VY, VZ), la carica (CHRG) e la massa (MASS) della particella.

TRPOIN, X, Y, Z, VX, VY, VZ, CHRG, MASS

- PLTRAC: Una volta definite le particelle cariche la traiettoria viene tracciata attraverso il comando *PLTRAC*. In Ansys® è possibile tracciare la traiettoria per un numero massimo di 50 particelle. E' possibile definire di tracciare la traiettoria solo nel campo elettrostatico (ELEC), solo magnetico (MAGN) oppure in accoppiata elettromagnetico (EMAG):

PLTRAC,EMAG, , ,1,TRAC,1000,1e-8,0,1,1

Il software salva le traiettorie delle particelle dentro dei vettori. L'array di maggiore interesse è TRACDATA, che con l'indice di riga scorre i punti della traiettoria del singolo punto, mentre con l'indice di colonna scorre i seguenti parametri:

(1)X| (2)Y| (3)Z| (4)S| (5)T\_TRACE| (6)VX\_TRACE| (7)VY\_TRACE| (8)VZ\_TRACE| (9)VS\_TRACE

Quindi abbiamo a disposizione posizione, velocità e tempo nel quale la particella esegue la traiettoria. Siccome il comando PLTRAC non consente di tracciare più di 50 particelle e comunque non tiene conto dell'interazione tra le stesse, si è pensato di far partire una particella alla volta da varie posizioni per riuscire ad analizzare il comportamento per diverse coordinate di partenza. Questo è stato fatto tramite dei cicli DO programmati all'interno del file utilizzato per il *post-processing*. Il limite principale di Ansys®, sta nel fatto che le equazioni di Poisson e di Lorentz vengono risolte in modo disaccoppiato; non si tiene conto dell'influenza del fascio sulla distribuzione del campo elettrico; tuttavia la bassa densità che si forma nelle sorgenti tipo FEBIAD (si riprendano a tale proposito le considerazioni introdotte al paragrafo 2.7 del capitolo 2) consente di adottare un modello di calcolo del moto a singola particella <sup>[5]</sup>.

## 6.4. Modello numerico per analisi elettrostatiche

Per lo studio del sistema di estrazione si utilizzerà un modello semplificato attraverso il quale sarà possibile variare la geometria del foro di estrazione per ottimizzare i parametri di efficienza ed emittanza. Le semplificazioni vengono adottate per ridurre il più possibile i tempi di calcolo e quindi per poter effettuare più analisi su diverse geometrie. Inoltre, data la natura della simulazione, verrà effettuata l'operazione di *meshatura* per il solo volume occupato dalle particelle che compongono il plasma (ioni, elettroni ed atomi neutri). Gli elementi che vengono rappresentati sono: il volume di anodo, il foro di estrazione ed il volume vuoto della camera. La geometria è stata costruita per punti collegati da linee; sono state quindi costruite le aree di rivoluzione dalle linee create. I volumi sono stati ottenuti per rivoluzione delle aree attorno all'asse Y. Le aree sono state a loro volta divise per creare l'area che dovrà essere ricoperta con elementi di piccola taglia poiché attraverso essi passeranno le particelle create tramite *particle tracing*.

La geometria modellata deve obbligatoriamente essere tridimensionale poiché è una condizione necessaria per lo studio del moto delle particelle mediante il *Particle tracing* di Ansys®.



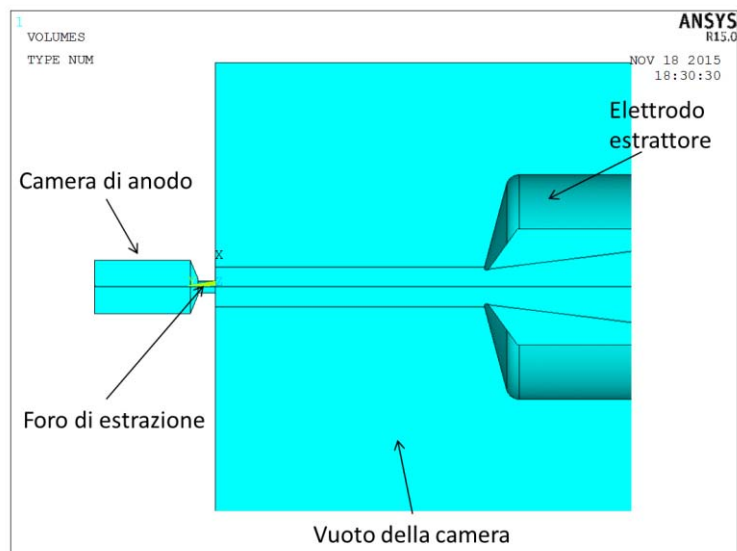


Figura 6-1: Geometria utilizzata per le analisi elettrostatiche con sistema di estrazione SPES

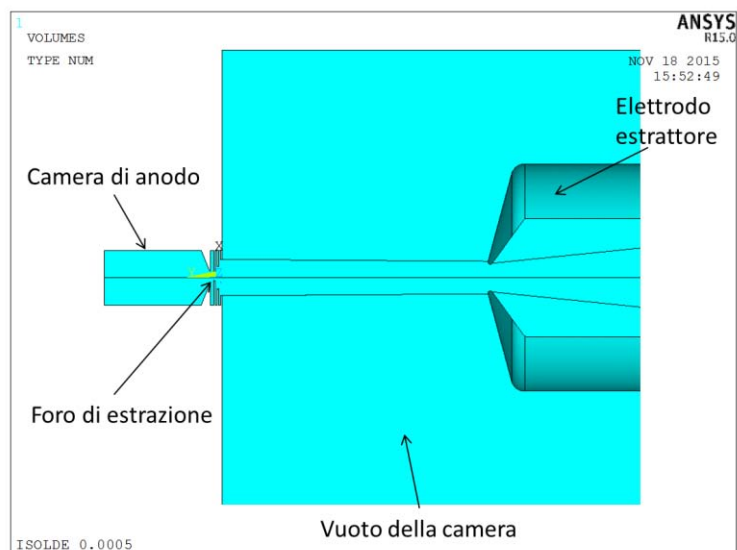


Figura 6-2: Geometria utilizzata per le analisi elettrostatiche con sistema di estrazione ISOLDE

Per l'esecuzione delle analisi elettrostatiche l'elemento a cui si fa riferimento è il SOLID123 (*3-D 10-Node Tetrahedral Electrostatic Solid*); si tratta di un elemento di forma tetraedrica a dieci nodi, ciascuno avente come unico grado di libertà il potenziale elettrico. A differenza delle analisi elettriche effettuate per lo studio del campo termico della sorgente (vedi capitolo 4), nelle quali veniva utilizzato l'elemento SOLID226 e in cui si applicava come carico la corrente elettrica, nelle analisi elettrostatiche si applica la densità di carica superficiale (*CHRG*). E' possibile inoltre applicare, come vincolo ai nodi, il potenziale elettrico (*VOLT*).

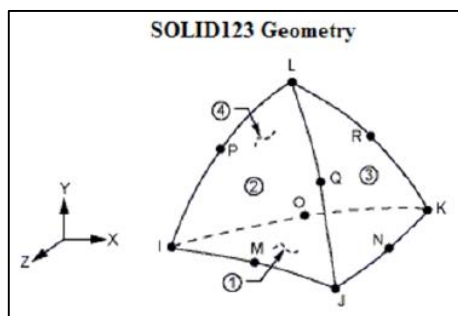


Figura 6-3: Elemento solid123

L'unica proprietà di interesse per l'esecuzione di un'analisi elettrostatica è la permittività elettrica del mezzo  $\epsilon$ . In Ansys® tale proprietà viene introdotta in termini relativi (in riferimento alla permittività del vuoto  $\epsilon_0$ ); basterà quindi assegnare un valore unitario. Il valore di riferimento per il vuoto deve, però, essere opportunamente settato: il comando *EMUNIT,MKS* fissa la permittività elettrica del vuoto a  $\epsilon_0=8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ . Successivamente si fornisce la proprietà al materiale tramite il seguente comando: *MP,PERX,1,1* dove il primo numero indica l'etichetta del materiale. Siccome viene *meshato* il volume potenzialmente occupabile dalle particelle, tale parametro è l'unico necessario per descrivere il comportamento del materiale.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, sono stati applicati alle aree esterne dei vincoli sul potenziale elettrostatico. L'anodo nella sorgente di ionizzazione al plasma, viene tenuto ad una differenza di potenziale di 150 V rispetto alla camera, la quale, a sua volta, è mantenuta ad una differenza di potenziale di 25'000V rispetto all'elettrodo estrattore. Pertanto sulle superfici interne dell'anodo è stato applicato un potenziale di 150 V, mentre per le altre due si è deciso di operare in questo modo: è stato assegnato il valore di 0V alle pareti della camera ed un potenziale di -25'000V alla superficie dell'elettrodo estrattore. In ogni caso, la differenza di potenziale tra anodo ed elettrodo di estrazione risulta essere pari a 25'150V.

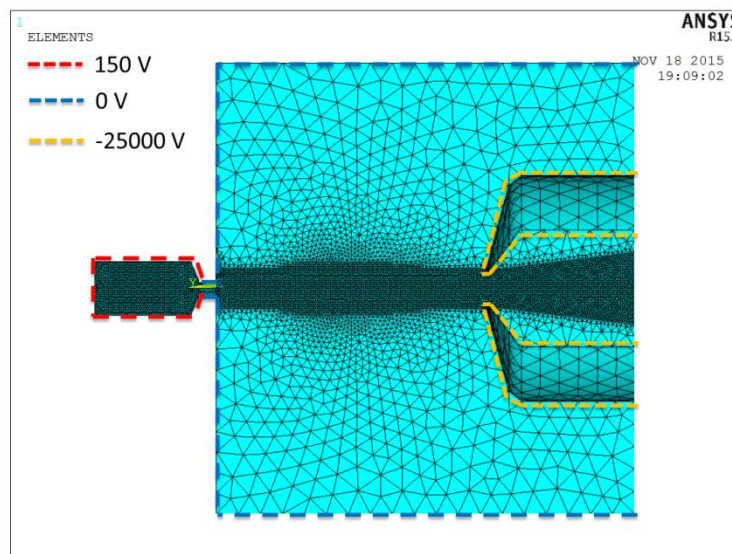


Figura 6-4: Applicazione dei vincoli di potenziale alle aree esterne. Estrazione SPES.

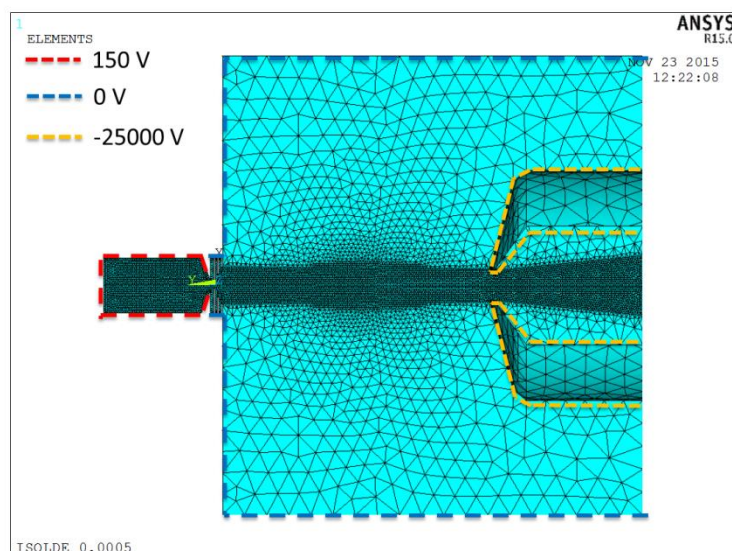


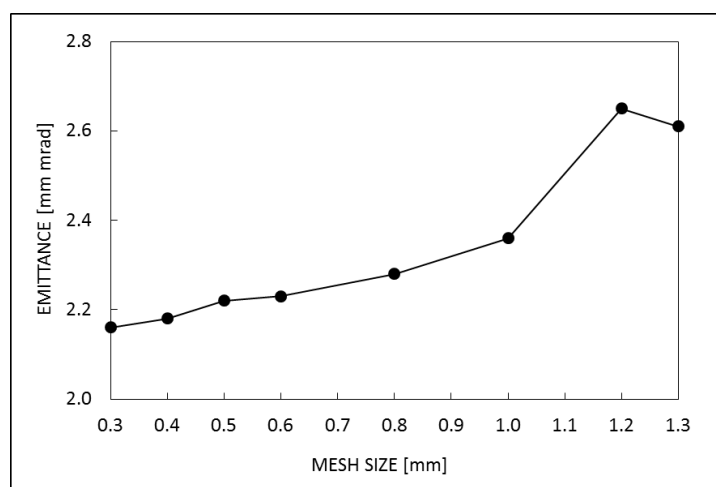
Figura 6-5: Applicazione dei vincoli di potenziale alle aree esterne. Estrazione ISOLDE.

Per determinare la dimensione della *mesh* da utilizzare è stata presa a riferimento l'emittanza ricavata tramite elaborazione dei dati ottenuti dal *particle tracing*. Si è osservato che l'infittimento della *mesh* del fascio incide sensibilmente nel calcolo dell'emittanza. Questo è dovuto alle approssimazioni portate dalla discretizzazione.

Una volta calcolato il valore di emittanza, si è visto per quale valore della dimensione della *mesh* si avesse un modello preciso ma che allo stesso tempo fosse in grado di fornire i risultati in tempi rapidi.

**Tabella 6-1: Mesh adottate per la discretizzazione dei volumi di passaggio del fascio**

mesh size [mm]	$\epsilon$ [mm mrad]	$\eta$ [%]
0.3	2.16	59.9%
0.4	2.18	60.2%
0.5	2.22	62.1%
0.6	2.23	60.0%
0.8	2.28	60.8%
1.0	2.36	58.8%
1.2	2.65	59.1%
1.3	2.61	59.6%



**Figura 6-6: Analisi di convergenza sull'emittanza**

Per la generazione delle particelle è stato effettuato uno studio con una distribuzione di tipo “cartesiano”, ovvero la generazione delle particelle avviene nel piano X-Z e risultano equi-spaziate lungo gli assi ( $\Delta X = \Delta Y$ ). Le particelle vengono generate prima lungo un asse incrementando la coordinata del punto di un certo passo “p”, poi si aumenta la coordinata dell’asse ad esso ortogonale nel piano X-Z, sempre di un valore costante “p”, finché si riempie la sezione dell’anodo. Successivamente si cambia piano, viene preso un piano parallelo al precedente distante “p”. Il ciclo continua finché non si raggiunge la coordinata desiderata.

Questo metodo di generazione sembra essere il migliore per rappresentare la reale posizione di formazione delle particelle. Infatti la nuvola di atomi neutri che viene investita dagli elettroni, guidati dalla griglia di anodo, risulta disposta uniformemente nello spazio. Si suppone pertanto che gli ioni vengano a formarsi in modo “ordinato”. La distribuzione viene generata per mezzo di un algoritmo studiato appositamente allo scopo di analizzare un numero elevato di particelle.

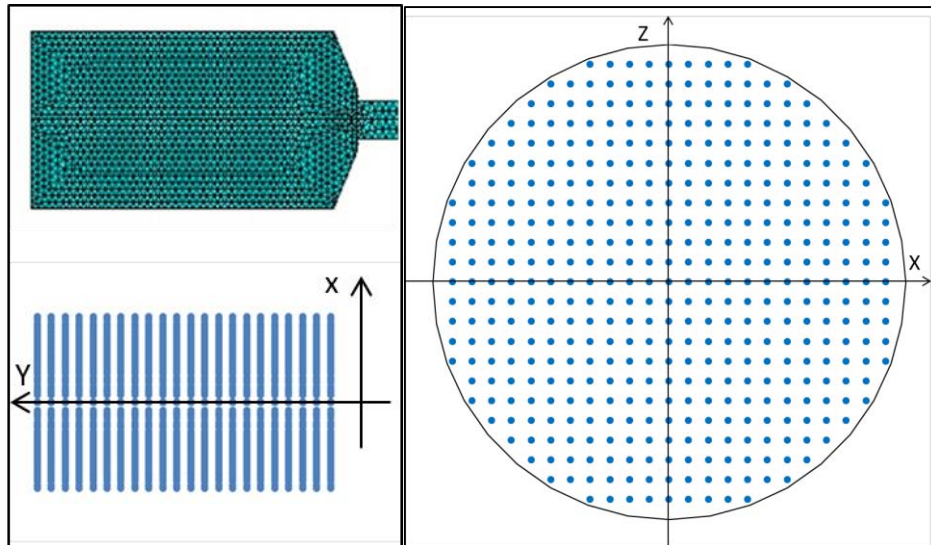


Figura 6-7: Rappresentazione della distribuzione cartesiana

Si è scelto di riprodurre quest'ultima per le analisi poiché descrive meglio ciò che succede all'interno dell'anodo, dove gli ioni si formano in posizioni uniformemente distribuite nello spazio. Una volta stabilita la distribuzione con cui gli ioni vengono generati, si deve stabilire il passo da adottare. Questo viene stabilito osservando come si comportano emittanza ed efficienza calcolati con i dati derivanti dall'analisi di *post-processing* con l'apposito file Excel. Il passo di generazione è stato ritenuto costante lungo le tre direzioni (X, Y, Z). Le analisi sul passo mostrano un andamento costante di emittanza ed efficienza, pertanto è possibile ottimizzare la distanza di generazione tra le particelle in modo tale da ottenere tempi di calcolo ridotti.

Un altro aspetto da considerare è la "profondità" di generazione degli ioni, ovvero la distanza massima dal foro di estrazione per la quale si estende la creazione delle particelle. Essa può essere presa uguale alla coordinata lungo Y, ottenuta dalla creazione di un PATH, nota la soluzione da un'analisi elettrostatica preliminare, per cui si ha una differenza di potenziale di 149,8V. In corrispondenza di questo valore si ha una differenza di energia potenziale sufficiente a vincere l'energia interna del plasma che risulta funzione della sua temperatura. Tale assunzione viene utilizzata per calcolare l'emittanza in quanto, così facendo, si tiene conto delle sole particelle effettivamente estratte, fornendo quindi un dato più realistico.

Tramite le analisi eseguite è stato possibile calcolare la differenza di energia acquistata dalle particelle accelerate dal campo elettrostatico. Questa rappresenta l'*energy spread*, ovvero la differenza in termini energetici tra la velocità massima e minima acquisita dagli ioni simulati con il software Ansys®.

E' stato osservato che le velocità massime ottenute dal modello FEM risultano maggiori di quelle teoricamente possibili. Eguagliando infatti l'energia potenziale fornita ad una particella, con carica  $q_i$  di massa  $m_i$ , all'energia cinetica da questa acquistata, abbiamo:

$$q_i \Delta V = \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (6.46)$$

Considerando uno ione di Argon ( $Ar^{1+}$ ) con  $q_i=1,602 \times 10^{-19}$  [C] e  $m_i=6.6 \times 10^{-26}$  [Kg], applicando una differenza di potenziale di  $\Delta V=25'150$  V, otteniamo una velocità massima teorica pari a:

$$v_i = \sqrt{\frac{2q_i \Delta V}{m_i}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,602 \times 10^{-19} \times 25150}{6,6 \times 10^{-26}}} = 349416,4 \frac{m}{s} \quad (6.47)$$

Da come si può osservare nel grafico in Figura 6-8 la velocità massima calcolata con il codice numerico risulta decrescente al diminuire della taglia della *mesh*.

Tabella 6-2: Velocità massima raggiunta da alcune particelle al variare della mesh dei volumi di passaggio del fascio

mesh size [mm]	Vmax [m/s]	$\epsilon_{RMS}$ [mm mrad]
0.3	349605.2	2.16
0.4	349674.1	2.18
0.5	349785.8	2.22
0.6	349868.9	2.23
0.8	349887.5	2.28
1.0	349974.8	2.36
1.2	351329.6	2.65
1.3	351020.6	2.61

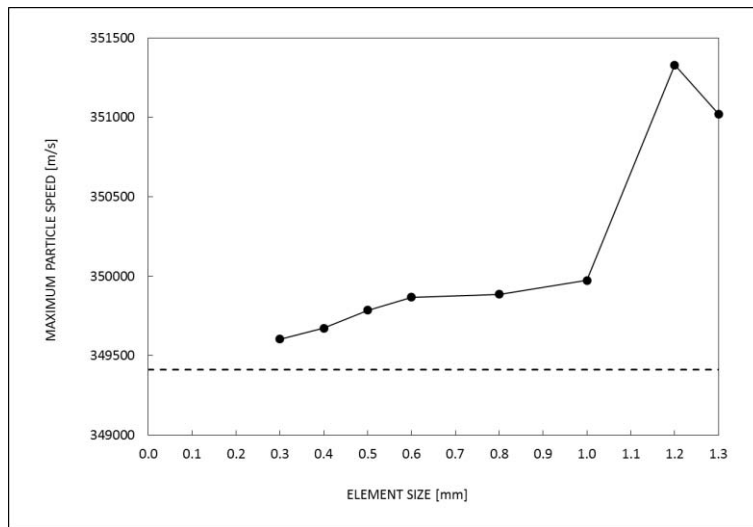
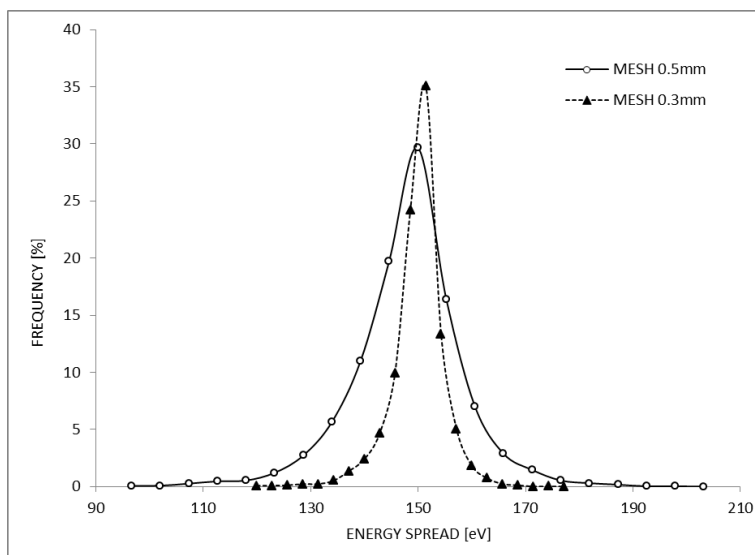


Figura 6-8: Velocità massima delle particelle calcolata con FEM confrontata con la massima velocità teorica (linea tratteggiata)

Il grafico precedentemente presentato contiene informazioni sulla singola particella, risulta di maggiore interesse il grafico in Figura 6-9 in cui viene presentata la percentuale di particelle che acquistano una certa quantità di energia. Si vede chiaramente che all'aumentare del grado di infittimento della *mesh* corrisponde un *energy spread* inferiore ed un picco sempre in corrispondenza di una energia pari a 150 eV. Tale studio risulta importante perché ci permette di affermare che i risultati ottenuti sono affetti dalle semplificazioni adottate dal software per il calcolo della traiettoria delle particelle e del campo elettrostatico.

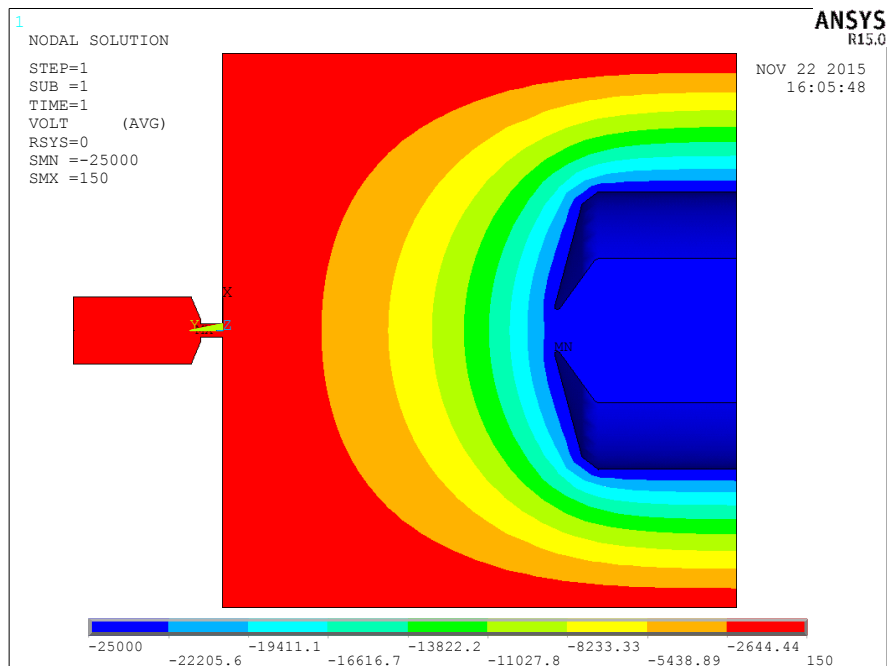


**Figura 6-9:** Frequenza delle particelle in funzione dell'energia posseduta. Si nota il notevole miglioramento al variare dell'infillimento della mesh

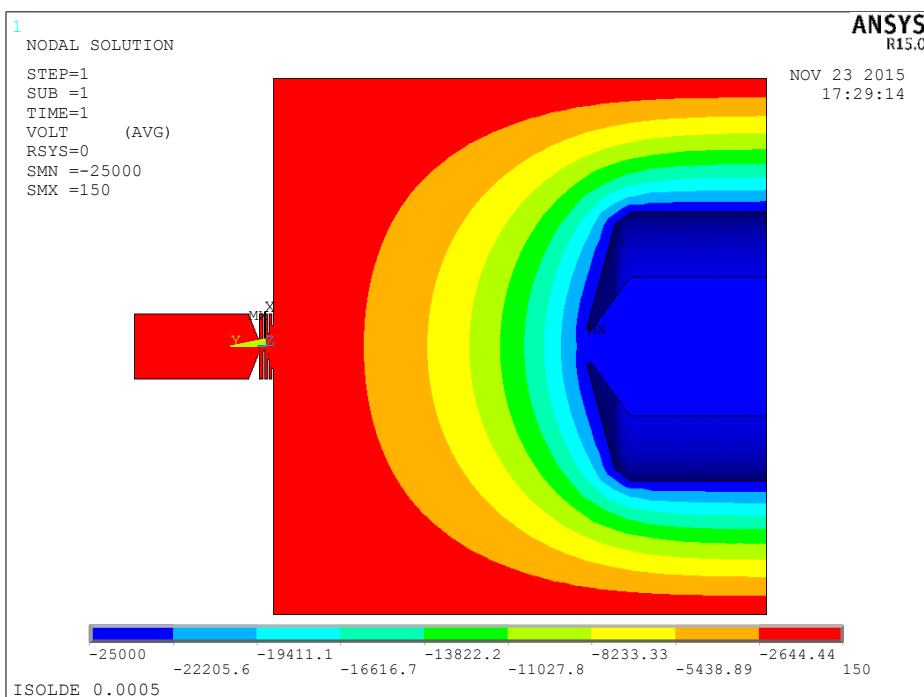
Sperimentalmente, per misurare l'energia assoluta e l'*energy spread* degli ioni estratti, è possibile utilizzare un analizzatore di campo ritardante (in inglese *retarding field analyser*, RFA). L'RFA è un analizzatore di energia elettrostatico che permette di misurare la distribuzione dell'energia cinetica di particelle cariche. Esso è formato da un collimatore con aperture intercambiabili, tre griglie, delle quali quella centrale è posta ad un potenziale elettrico elevato, ed infine da una *Faraday Cup* per la misura della corrente del fascio. Per il calcolo della distribuzione di energia di un fascio di particelle si procede nel seguente modo: incrementando gradualmente il potenziale della griglia si misura la corrente che arriva nella *Faraday cup*, successivamente, i valori di corrente rilevati in funzione del potenziale applicato, vengono differenziati e i dati vengono adattati con una gaussiana. In tal modo si ottiene la distribuzione di energia del fascio. Al centro della gaussiana si avrà il valore medio di energia assunto dalle particelle. L'*energy spread* viene calcolato come il valore definito dai due estremi che individuano la metà del massimo della gaussiana (*full width at half maximum*, FWHM)[5]. Secondo tale metodologia di calcolo, dalla Figura 6-9, si può calcolare un valore di *energy spread* pari a circa 25 eV per una *mesh* di 0.5 mm, mentre per la *mesh* più fitta otteniamo un valore di circa 14 eV. In letteratura sono riportati valori di *energy spread* variabili da 1 a 50 eV per le sorgenti tipo FEBIAD<sup>[6]</sup>, pertanto numericamente si ha compatibilità con i dati sperimentali.

#### 6.4.1. Risultati delle analisi elettrostatiche

Nella Figura 6-10 e nella Figura 6-11 viene riportato l'andamento del campo elettrostatico ricavato con il codice di calcolo Ansys® nel caso dell'estrazione SPES ed ISOLDE. Si nota che l'andamento del potenziale elettrostatico risulta praticamente coincidente nella zona della camera ed elettrodo estrattore. Nelle immagini successive verrà illustrato come invece varia fortemente in corrispondenza della zona di estrazione, al variare della geometria del foro. Si capisce quindi dell'importanza di riuscire a creare un modello numerico che sia in grado di fornire in output i parametri di ottimizzazione (efficienza ed emittanza) al variare dei parametri geometrici.



**Figura 6-10: Soluzione elettrostatica con estrazione SPES**



**Figura 6-11: Soluzione elettrostatica con estrazione ISOLDE**

Come già accennato per il calcolo di efficienza ed emittanza si fa ricorso ad un codice di calcolo scritto in formato APDL, appositamente studiato e messo a punto per l'occasione. Tale codice permette la creazione di particelle in diverse posizioni dello spazio equi-spaziate tra loro per permettere innanzitutto di aumentare il limite imposto da Ansys® di 50 particelle e poi per poter analizzare il comportamento per diverse posizioni di generazione degli ioni. Si fa ricorso a dei cicli DO che generano particelle equi- spaziate prima lungo l'asse X, poi si ha un incremento lungo l'asse Z; una volta completata la generazione sul piano viene effettuato un incremento lungo l'asse dell'anodo, Y, permettendo quindi di occupare tutto il volume. La posizione delle particelle è funzione del parametro "p", ovvero del passo di generazione, e del parametro "Deff" (distanza efficace) rappresentativo della profondità di penetrazione del campo elettrostatico. Impostato un certo "Deff", cambiando il passo, il limite dei cicli DO viene calcolato in automatico.

I risultati del modello elettrostatico sono stati valutati per le seguenti condizioni:

- Passo di generazione delle particelle = 0.5mm
- Mesh della zona del fascio = 0.5mm
- Mesh del vuoto della camera = 5 mm
- Profondità di generazione = Coordinata Y per cui si ha una differenza di potenziale (d.d.p.) di 149,8 V. Viene stabilita dalla soluzione dell'analisi elettrostatica attraverso la creazione di un PATH lungo l'asse Y contenente il valore del potenziale.
- Distanza elettrodo estrattore di 60 mm (circa il 50%)

Nella Tabella 6-3 vengono riportati i dati numerici ricavati con le condizioni sopracitate.

**Tabella 6-3: Valori di emittanza ed efficienza calcolati con il modello FEM elettrostatico**

Type	$\epsilon_{RMS}$ [mm mrad]	$\eta$ [%]
ISOLDE	2.08	94.08%
SPES	2.24	60.52%

Si nota che l'emittanza risulta piuttosto bassa, circa la metà di quella ricavata sperimentalmente. Ciò può essere dovuto a semplificazioni troppo forti del modello considerato; infatti oltre al campo elettrostatico è presente anche un campo magnetico all'interno dell'anodo il cui effetto di produrre traiettorie elicoidali degli ioni può spiegare la minor emittanza trovata. Inoltre il calcolatore non tiene in considerazione l'effetto repulsivo che hanno gli ioni che tende ad allargare la traiettoria del fascio. Pertanto il differente andamento tra dati sperimentali e numerici può essere dovuta a questi motivi.

**Tabella 6-4: Confronto tra dati numerici e sperimentali per una distanza del puller del 50%**

Type	$\epsilon_{RMS\_FEM}$ [mm mrad]	$\epsilon_{RMS\_EXP}$ [mm mrad]
ISOLDE	2.08	4.40
SPES	2.24	3.79

I valori numerici di emittanza sono mediamente più bassi dei dati sperimentali, inoltre presentando un andamento opposto per le due soluzioni studiate; ma in ogni caso il modello riesce a riprodurre valori sostanzialmente simili di emittanza (con differenza del 7%) tra SPES ed ISOLDE, come sono sostanzialmente simili anche a livello sperimentale (differenze attorno al 15%).



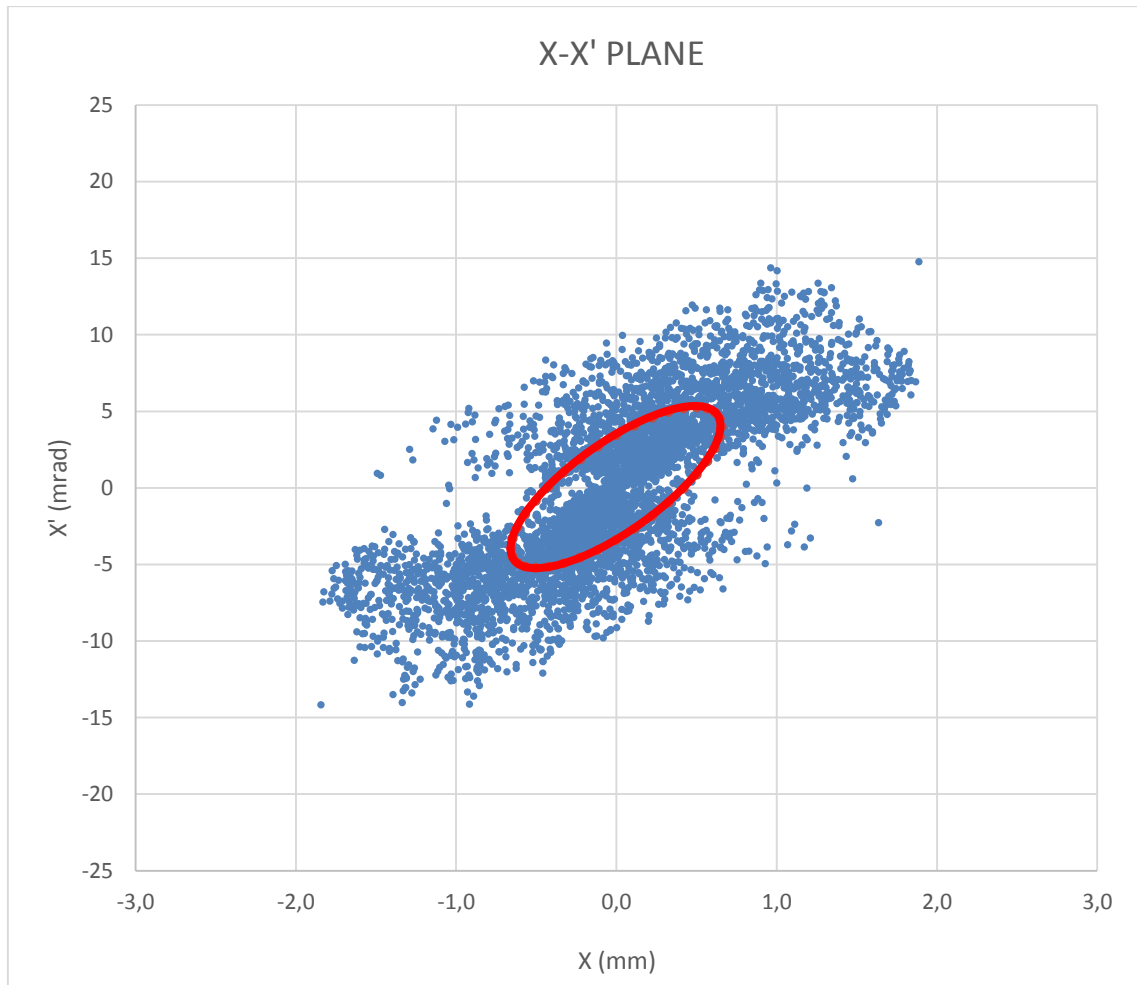


Figura 6-12: Rappresentazione nello spazio delle fasi delle particelle generate con il modello numerico. L'ellisse in rosso rappresenta l'emittanza r.m.s.

L'efficienza, invece, fornisce dei valori consistenti con quanto ricavato sperimentalmente. Questo dato ha una grande importanza poiché ci consente di trovare la causa della differenza sostanziale di prestazioni in termini di efficienza tra le due estrazioni in esame. Si è notato, infatti, che le particelle vanno a sbattere sulle superfici dell'estrazione annullando la loro carica. Questo effetto è molto evidente nel caso dell'estrazione SPES e ciò spiega l'importante riduzione di rendimento mostrato sperimentalmente.

Tuttavia si deve tenere presente che per questa tipologia di estrazione, la profondità del campo elettrico nell'anodo è superiore; quindi è presente un vantaggio in termini elettrostatici che però viene vanificato da una lunghezza del condotto di estrazione troppo elevata (Figura 6-13).

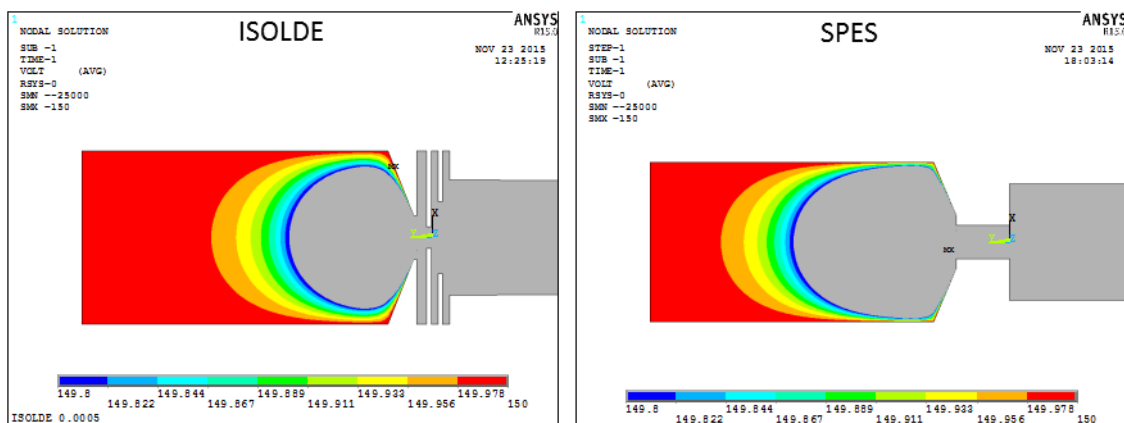


Figura 6-13: Profondità di penetrazione del campo elettrostatico. A) estrazione ISOLDE. B) estrazione SPES

Un altro dato importante che è possibile ricavare dalle analisi è l'andamento delle linee di campo elettrostatico, in quanto la morfologia di esse influenza la traiettoria delle particelle cariche. Gli ioni infatti subiscono una forza elettrica che risulta ortogonale alle linee di campo. Si capisce che queste possono avere un certo angolo rispetto alla direzione del moto e tendono quindi ad allargare il fascio e ad aumentarne così l'emittanza (Figura 6-14).

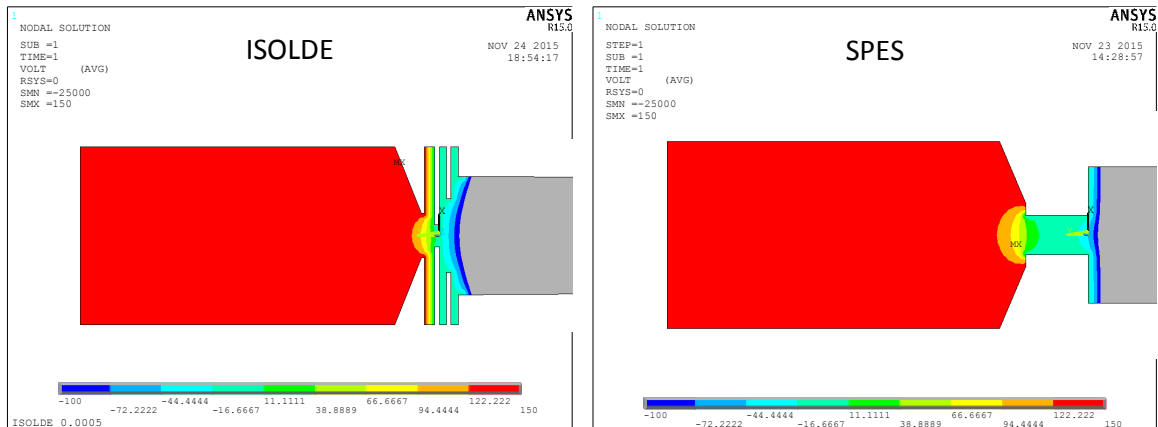


Figura 6-14: Andamento del campo elettrostatico a livello del foro di estrazione. A) ISOLDE. B) SPES

Tutte le considerazioni fatte portano a formulare alcune indicazioni per la progettazione dell'estrazione:

- Il diametro del foro di estrazione può essere piccolo (1.5 – 2 mm) per limitare l'emittanza;
- La lunghezza del foro di estrazione deve essere piccola per evitare perdite di efficienza elevate;
- L'estrazione deve essere posizionata il più vicino possibile all'anodo per aumentare la penetrazione del campo elettrico;
- E' necessario che il campo elettrico abbia componente parallela alla direzione di estrazione al fine di limitare l'emittanza del fascio.

## 6.5 Sviluppi futuri

Il modello elettrostatico presentato in questo capitolo fornisce importanti indicazioni per costruire una geometria innovativa del sistema di estrazione. Questo può e deve essere migliorato per cercare di arrivare a risultati più aderenti alla realtà sperimentale; in particolare si intende proseguire lo sviluppo del modello numerico nel seguente modo:

- Migliorare la generazione delle particelle, in quanto queste vengono create solo nella parte cilindrica dell'anodo. Sarebbe interessante vedere come si comportano le particelle generate nel volume conico situato a ridosso della zona di estrazione;
- Migliorare la fisica del modello considerando anche l'azione del campo magnetico indotto nell'anodo dalle bobine. In questo senso ci si è già mossi creando un modello preliminare con tanto di soluzione del campo elettromagnetico. Tramite una simulazione puramente magnetica si è visto che le particelle tendono a compiere una traiettoria elicoidale che va allargandosi, pertanto si pensa che un'analisi accoppiata possa portare a risultati migliori dal punto di vista dell'emittanza. Per effettuare le simulazioni è necessario fornire la permeabilità magnetica del mezzo  $\mu$ ; non avendo a che fare con materiali ferromagnetici è sufficiente dare in input la permeabilità magnetica del vuoto  $\mu_0$ . L'elemento utilizzato è il SOLID98 col quale è possibile risolvere campi elettromagnetici col metodo potenziale. Alternativamente è possibile utilizzare il metodo vettoriale utilizzando gli elementi SOLID236 o

SOLID237.<sup>[2]</sup> Il campo magnetico è stato generato attraverso un apposito comando (RACE) che crea in automatico una bobina, la quale non necessita di essere ricoperta da elementi.

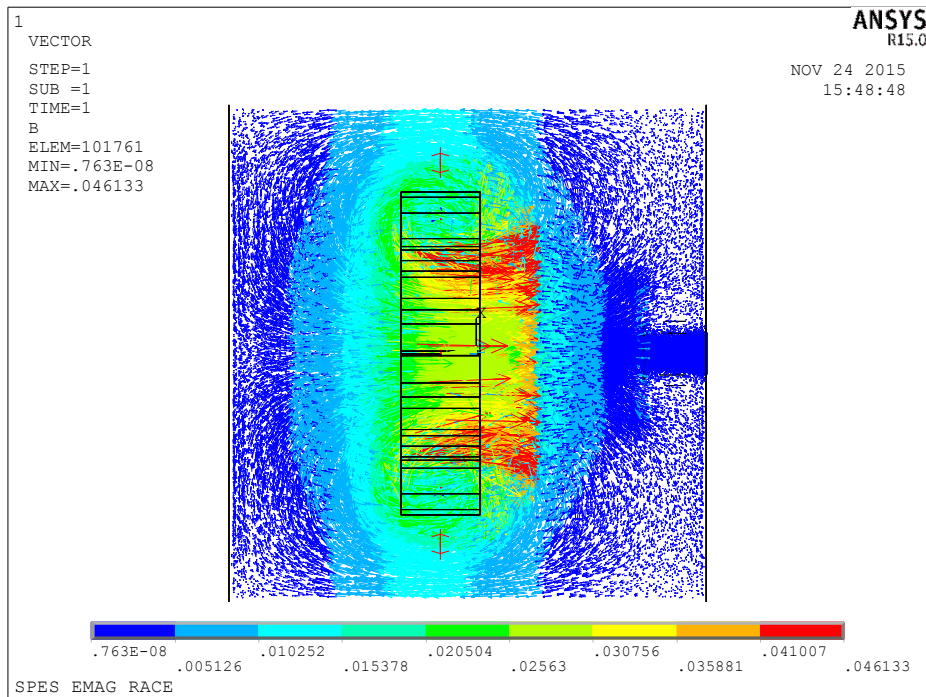


Figura 6-15: Soluzione vettoriale del campo magnetico

- Migliorare le condizioni al contorno come l'energia interna del plasma che può essere espressa come una velocità iniziale. Ovvero, secondo quanto già accennato nel capitolo 2:

$$\frac{1}{2}k_B T = \frac{1}{2}mv_{th}^2 \quad (6.48)$$

La possibilità di includere questa condizione permetterà di fornire valori più attendibili di efficienza ed emittanza.

## 6.6 Conclusioni

Il modello elettrostatico creato non corrisponde perfettamente alla realtà per quanto riguarda i valori di emittanza. Questa discrepanza può essere causata da alcune semplificazioni adottate; infatti non è stato considerato il campo magnetico dovuto alle bobine. Tale campo imprime alle particelle un moto elicoidale che tende ad allargare l'area dell'ellisse rappresentante l'emittanza, aumentandone il valore. Per quanto riguarda l'efficienza, invece, il modello fornisce importanti indicazioni. Si è visto che la geometria del foro di estrazione incide sensibilmente sull'efficienza di estrazione e quindi su quella totale di ionizzazione. Un tubo troppo lungo crea un ostacolo al passaggio degli ioni poiché questi vanno a sbattere contro le pareti perdendo così la propria carica elettrica. Il vantaggio di una migliore penetrazione del campo elettrostatico all'interno dell'anodo mostrato dall'estrazione SPES viene pertanto vanificato. Per quanto riguarda il foro di estrazione, l'adozione di un piccolo diametro consente di tenere bassa l'emittanza ma l'efficienza tende a ridursi e viceversa.

## Bibliografia Capitolo 6

- [1]. P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, *Elementi di fisica*, Edises
- [2]. *Ansys Release 16.1 Documentation*.
- [3]. Andrea Baraldo, Studio Elettro termo strutturale della sorgente di ionizzazione al plasma del progetto SPES, Tesi di Laurea Magistrale, 2009-2010
- [4]. Mirko Libralato, Studio elettro-termo-strutturale del sistema di estrazione e ionizzazione del progetto SPES, Tesi di Laurea Magistrale, 2008-2009
- [5]. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Ion Sources, Senec, Slovakia, 29 May – 8 June 2012, edited by R. Bailey, CERN-2013-007, (CERN, Geneva, 2013), pp. 192-194
- [6]. B.Wolf, Handbook of Ion Sources, 1995, CRC Press

## CONCLUSIONI

Lo studio effettuato durante lo svolgimento di questa tesi sulla sorgente di ionizzazione al plasma è stato molto importante poiché il confronto tra diverse configurazioni dal punto di vista numerico e soprattutto sperimentale ha permesso la scelta della soluzione migliore da utilizzare in futuro.

La scelta di cambiare il materiale del sistema di supporto e le modifiche apportate alla connessione elettrica della sorgente hanno portato a notevoli miglioramenti per quanto riguarda la contaminazione del fascio. Da questo ne trae beneficio anche l'efficienza di ionizzazione della sorgente (3%) che risulta migliore di quella ottenuta con la precedente versione provvista di supporto in Acciaio Inossidabile (0.22%). In particolare si sono raggiunti livelli di efficienza paragonabili a quelli riportati in letteratura per lo stesso apparato da altri gruppi di ricerca (efficienza pari al 5% misurata ad ISOLDE). Meccanicamente il sistema di supporto ha reagito molto bene durante i test, non presentando segni di rottura né di usura.

L'adozione della crociera di allineamento ha portato ad una elevata stabilità della sorgente unita ad una maggior durata della vita utile del catodo. Infatti le deformazioni plastiche della faccia frontale risultano praticamente annullate. La solidità mostrata da questo sistema ed i benefici mostrati permettono di confermare il suo inserimento nel design definitivo della sorgente.

Le prove sperimentali effettuate sul catodo SPES mostrano un lieve miglioramento nella produzione di corrente elettronica rispetto alla soluzione di ISOLDE, tuttavia la maggior corrente di alimentazione (circa 50 A in più) necessaria per alimentare la sorgente crea notevoli problemi di contaminazione del fascio a causa del riscaldamento dei collegamenti elettrici. Siccome la potenza riscaldante varia col quadrato della corrente, l'aumento anche di pochi ampere comporta un problema rilevante. E' stato pertanto necessario sostituire le viti in acciaio di collegamento al puntale di Rame con viti in Tantalo, ed aggiungere e ricoprire le viti che collegano la sorgente al piatto della camera da vuoto. Questa soluzione ha riscosso successo in quanto la contaminazione è diminuita e l'efficienza aumentata.

Per quanto riguarda l'estrazione, invece, è stato verificato sperimentalmente che la geometria originale ISOLDE risulta migliore in termini di efficienza (+50%) mentre l'emittanza risulta pressoché costante. Una riduzione del 16% di emittanza ottenuta con l'estrazione SPES non compensa il dimezzamento dell'efficienza. Il nuovo elettrodo estrattore adottato, caratterizzato da un foro di passaggio più ampio, garantisce una miglior emittanza per *range* di posizionamento più esteso; questo permette di trovare una posizione che ottimizzi sia l'emittanza che l'efficienza ( $d=60\%$ ). Con il vecchio elettrodo questo non era possibile poiché si avevano buone emittanze per distanze elevate ( $d=50\%$ ) mentre la massima efficienza si aveva per distanze inferiori ( $d=70\%$ ).

Per quanto riguarda il modello elettrostatico per lo studio dell'estrazione della sorgente, sono stati ottenuti dei valori di emittanza del 50% inferiori a quelli valutati sperimentalmente pertanto è necessario migliorare il modello aggiungendo anche la parte magnetica. I valori di efficienza invece seguono l'andamento atteso, presentando il valore più elevato per l'estrazione ISOLDE rispetto all'estrazione SPES.



## APPENDICE A. OPERAZIONI DI ASSEMBLAGGIO

### A.1. Introduzione

In questo capitolo si vuole presentare una metodologia per il corretto montaggio e smontaggio della sorgente di ionizzazione al plasma al fine di evitare errori che possono interferire col corretto funzionamento dei componenti presenti. E' importante cercare di imparare bene la fase di assemblaggio e disassemblaggio al fine di evitare inutili perdite di tempo. La pulizia e il corretto posizionamento dei vari componenti è necessario per garantire di ottenere un fascio di elevata purezza e soprattutto con elevata efficienza. Il montaggio dei componenti richiede una elevata manualità e pazienza dovuti alla delicatezza dei materiali utilizzati. E' doveroso pertanto controllare scrupolosamente ogni fase dell'assemblaggio facendo quindi attenzione a posizionamento ed allineamento dei componenti. Inoltre si deve controllare che le parti che dovrebbero essere isolate elettricamente lo siano effettivamente.

### A.2. Smontaggio PIS SPES in Acciaio Inox

Dopo un considerevole numero di cicli di riscaldamento/raffreddamento (circa 40) sono stati registrati malfunzionamenti della linea di alimentazione. Tali problemi potevano essere causati da un contatto elettrico tra l'anodo e il catodo, oppure tra il filo di collegamento dell'anodo e le pareti della camera di sostegno della sorgente. Pertanto si è deciso di smontare la sorgente per verificare lo stato dei vari componenti al fine di trovare la causa della brusca interruzione della corrente di alimentazione.

Si descrivono di seguito le fasi principali dello smontaggio e si riportano alcune osservazioni. In ogni caso vale la pena dire che in seguito ad esami approfonditi si è scoperto che il problema era imputabile ad un malfunzionamento degli alimentatori e non a contatti elettrici.

Per prima cosa si è dovuto togliere la camera da vuoto dal sistema front end. Tale operazione risulta lunga e necessita di particolari accortezze. Prima di tutto è necessario verificare che il sistema non sia sotto tensione e che il trasformatore sia spento. Una volta verificato ciò è necessario togliere il vuoto dalla camera ed eseguire una pulizia (*water purge*) dei canali di raffreddamento. Fatto questo è possibile chiudere le valvole del canale del fascio che collega la camera all' elettrodo estrattore. La camera può poi essere estratta grazie ad un sistema ad attuatori elettrici.

La camera deve poi essere tolta e sistemata sopra un tavolo di lavoro pulito e ricoperto di carta protettiva. A questo punto è utile preparare tutti gli utensili necessari per lo smontaggio; questi devono essere accuratamente puliti con l'acetone per evitare di sporcare le pareti della camera da vuoto. E' necessario, durante le operazioni di smontaggio e montaggio, indossare guanti protettivi in lattice senza polvere per non inquinare i vari componenti con impurità, come sudore e pelle.



Figura A-1: Utensili puliti necessari per lo smontaggio.

A questo punto è possibile togliere il coperchio ed iniziare ad operare sulla sorgente. E' consigliato ricoprire i componenti smontati con carta o fogli di alluminio per evitare che la polvere vi si depositi. La prima operazione da fare è quella di togliere il tubicino del gas dalla linea di trasferimento.



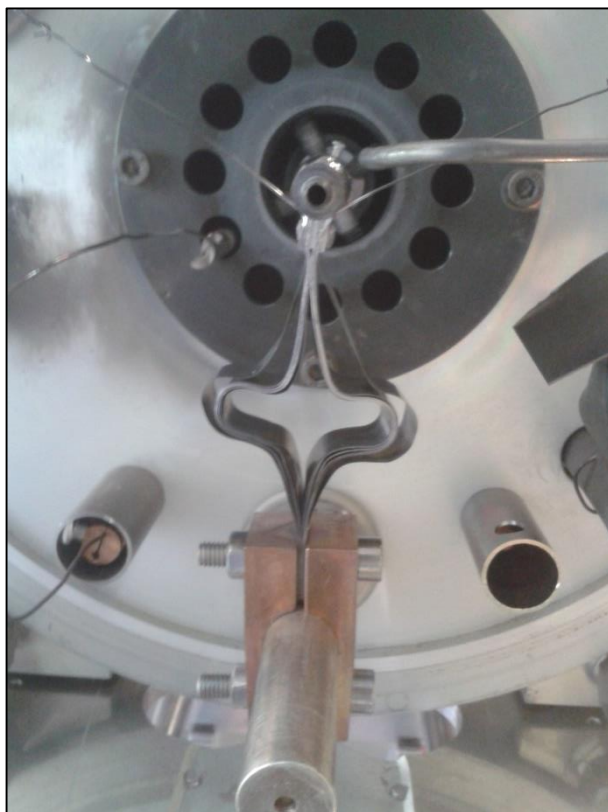
**Figura A-2: Sorgente montata sul piatto della camera**

Successivamente si deve togliere il filo collegato all'anodo svitando la vite che lo tiene vincolato al piatto della camera (Figura A-2). Successivamente è possibile allentare il sistema di tenuta verticale e staccare il condotto del gas dalla linea di trasferimento. Queste operazioni sono molto delicate poiché si opera con componenti in Tantalio e Grafite. Il Tantalio è molto duttile e maleabile pertanto anche piccoli sforzi producono delle deformazioni plastiche difficili da ripristinare. La Grafite invece risulta dura e fragile pertanto sforzi troppo elevati inducono a fratture superficiali e nei casi peggiori la rottura del componente. Anche i componenti in Molibdeno risultano assai fragili e richiedono particolare attenzione.

A questo punto è possibile allentare le viti che tengono serrati i morsetti di rame sul puntale che esce dal piatto della camera. I morsetti sono collegati alla transfer line attraverso dei fogli in Tantalio flessibili, i quali permettono il passaggio della corrente di alimentazione che riscalda il catodo per effetto joule. Si deve togliere la transfer line assieme alla sorgente poiché essa risulta saldamente incollata al catodo. Infatti il problema principale riscontrato durante la fase di smontaggio è stato il disassemblaggio delle parti metalliche che si sono saldate tra loro. Tali saldature hanno reso difficoltosa la fase di svitamento dei componenti che presentavano un danneggiamento delle filettature. Ciò ha comportato la sostituzione di alcuni pezzi quali viti e pin di supporto dell'anodo che non consentivano il rimontaggio preciso. Il nuovo modello di sorgente realizzata in grafite elimina, almeno per lo smontaggio del sistema di supporto, il problema delle saldature consentendo così uno smontaggio più rapido e con minori danni ai collegamenti filettati.

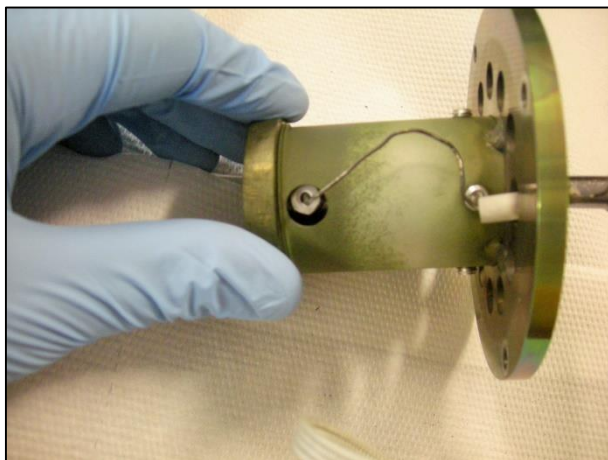
Una volta allentate le viti dei morsetti è possibile iniziare a svitare quelle che collegano la sorgente al piatto della camera. Questa operazione deve essere eseguita con attenzione e se possibile va fatta con l'aiuto di una seconda persona che sostenga la sorgente. Se l'operazione viene eseguita in solitaria si consiglia di svitare le tre viti inferiori e lasciare la vite superiore per ultima per evitare che la sorgente si stacchi e possa cadere, danneggiandosi.





**Figura A-3: Connessione elettrica**

A questo punto è possibile sfilare la sorgente assieme al collegamento elettrico. In seguito si possono togliere i morsetti di rame il cui peso e ingombro intralcia le successive operazioni di smontaggio. Se possibile si può togliere la linea di trasferimento dal catodo; tale operazione non sempre è possibile per via di micro saldature che si formano durante la fase di riscaldamento della sorgente, date le elevate temperature raggiunte (superiori a 2000 °C). Se la linea di trasferimento risulta incollata al catodo è necessario proseguire lo smontaggio dalla parte anteriore della sorgente. Innanzitutto si cerca di svitare la ghiera del sistema di supporto. Anche questa può risultare incollata, pertanto è possibile cercare di forzare con una pinza lo svitamento della ghiera, ponendo la flangia di supporto in morsa. Si ricorda che per la vecchia PIS il sistema di supporto è in acciaio inox pertanto i pezzi presentano una buona resistenza a questo tipo di sollecitazione. Se ciò non bastasse è possibile utilizzare uno specifico sbloccante, però tale operazione comporta l'inquinamento dei componenti che quindi necessitano di un lavaggio completo. Solitamente con questi metodi si riesce a compiere l'operazione.



**Figura A-4: Sorgente smontata dalla camera**

Arrivati a questo punto è possibile svitare la flangia che contiene il sistema di estrazione quindi si possono svitare i bulloni che sostengono l'anodo nella camera di scarica. E' possibile ora estrarre i componenti interni alla sorgente sfilandoli dalla parte posteriore.



**Figura A-5: Componente estratto dalla parte posteriore della sorgente. La transfer line risulta ben saldata al catodo**

Si possono smontare gli isolatori in Allumina, i puntalini di sostegno dell'anodo e l'anodo stesso. I puntalini di sostegno, essendo costruiti in Molibdeno, possono rompersi lasciando dei residui incastrati nell'anodo; pertanto è necessario toglierli con l'ausilio di un piccolo cacciavite. E' utile maneggiare i piccoli componenti con delle pinzette.

Rimane da smontare il catodo, per farlo bisogna svitare la ghiera che lo tiene fissato alla camera di scarica. E' necessario forzare lo smontaggio poiché l'incollaggio dei pezzi è particolarmente elevato in questa zona pur avendo avuto l'accortezza di assemblare componenti di materiale diverso (camera di scarica in Tantalio e ghiera in Molibdeno). In questa fase la possibilità di rottura della ghiera è molto elevata pertanto è necessario verificare che vi siano dei componenti di scorta prima di effettuare le operazioni di smontaggio.



**Figura A-6: Ghiera di fissaggio del catodo rotta**

L'ultima fase rimasta è quella dello smontaggio del catodo dalla linea di trasferimento. Essendo incollata è possibile come prima alternativa stringere delicatamente la transfer line con una pinza, ruotandola al fine di far avvenire una espansione del tubo collegato al collo del catodo. L'utilizzo di uno sbloccante può facilitare l'operazione. In questa fase è necessario avvalersi di ogni metodo possibile per cercare di staccare i componenti senza rovinarli.

Dallo smontaggio della sorgente è stato possibile fare delle valutazioni sullo stato dei componenti:

- 1) L'anodo risulta leggermente danneggiato da piccole fratture sulla superficie esterna ma risulta riutilizzabile.
- 2) I componenti di sostegno dell'anodo risultano danneggiati e non riutilizzabili. Pin di supporto e dadi dovrebbero essere cambiati spesso.
- 3) La ghiera di serraggio del catodo risulta danneggiata e risulta faticoso il riassetto pertanto si consiglia la sostituzione di tale componente
- 4) La linea di trasferimento risulta danneggiata soprattutto a causa del metodo di smontaggio utilizzato ma potrebbe essere riutilizzata se c'è comunque contatto con il collo del catodo.

- 5) Il catodo non risulta particolarmente danneggiato, a parte l'evidente ricristallizzazione imputabile alle elevate temperature raggiunte. La faccia frontale non risulta deformata e ciò conferma la bontà dello studio effettuato con il precedente lavoro di tesi (G.Vivian). Si nota che l'appoggio dei puntali sullo spallamento del catodo produce delle deformazioni in senso assiale che creano dei punti di contatto con la transfer line. Questi punti di contatto si saldano e creano molte difficoltà per lo smontaggio.

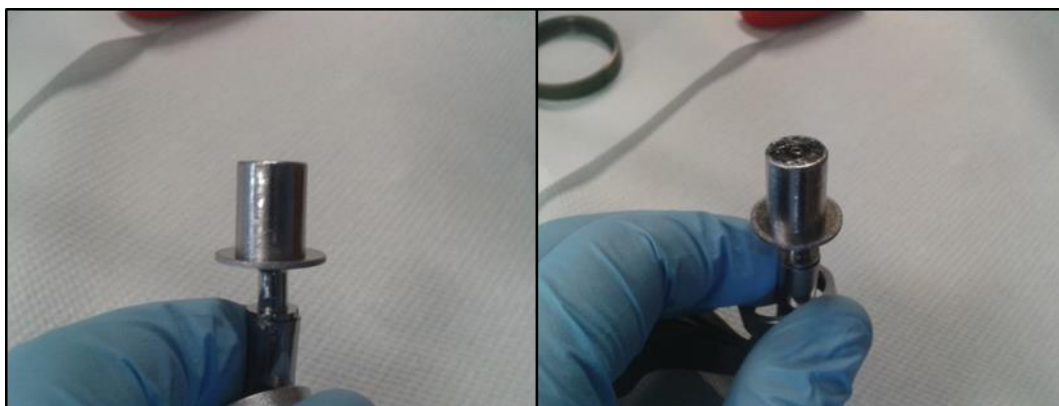


Figura A-7: Stato del catodo dopo circa 40 cicli di riscaldamento/raffreddamento della sorgente di ionizzazione al plasma

### A.3. Dati storici

Un importante studio è stato effettuato sulla storia di utilizzo della sorgente al plasma. Si è osservato il numero di cicli di riscaldamento/raffreddamento effettuati e le prestazioni in termini di corrente elettronica raggiunta. Come già accennato nel capitolo 3 la corrente di riferimento per la quale si raggiunge una temperatura massima del catodo di 2200°C è di 390 A. Pertanto si ricercano per tale valore di corrente di alimentazione i valori della corrente elettronica prodotta.

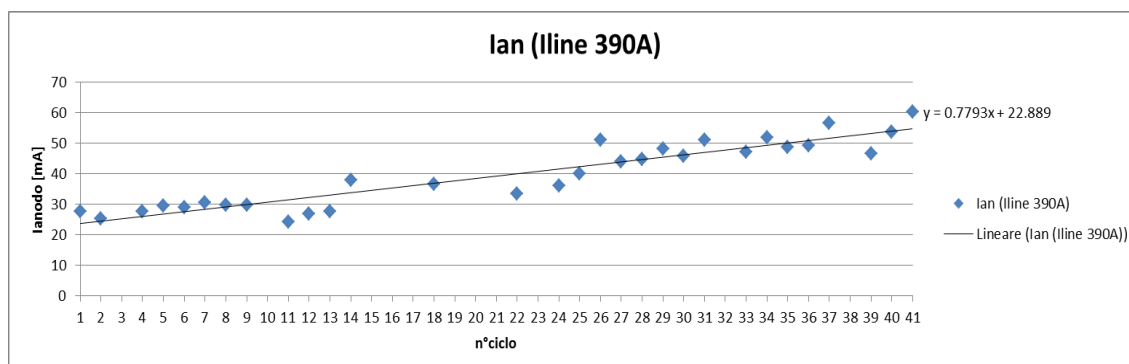


Figura A-8: Valori di corrente elettronica prodotta dal catodo per una corrente di alimentazione di 390 A

Nella figura si nota un valore crescente della corrente elettronica all'aumentare del numero di cicli effettuati. Appare evidente che per un migliore funzionamento del catodo, questo debba essere condizionato. Di seguito viene riportato il grafico che presenta la massima potenza raggiunta durante i cicli di riscaldamento/raffreddamento. Per alcuni cicli non è stato possibile risalire ad alcun valore di potenza massima raggiunta per la mancanza di dati. Potrebbe essere interessante in futuro valutare la durata in continuo della sorgente a regime termico raggiunto per la corrente limite di utilizzo valutata in 390 A.

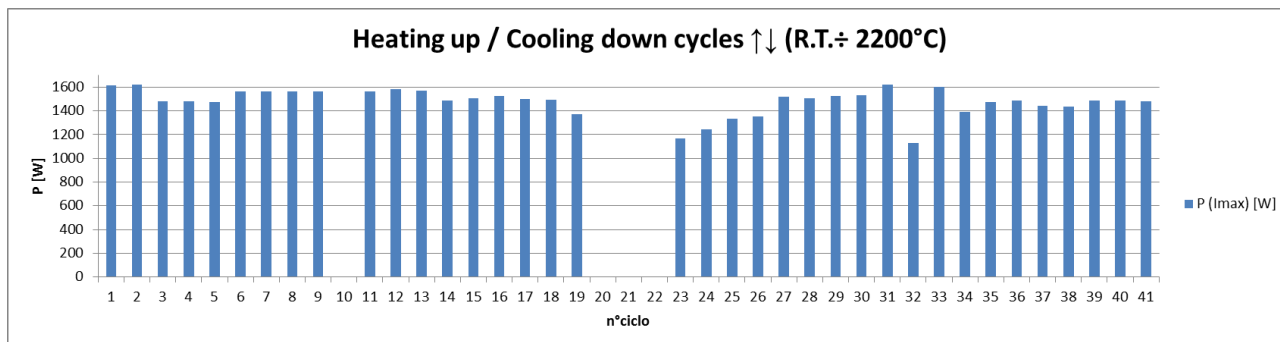


Figura A-9: Rappresentazione Potenza massima raggiunta per ogni ciclo di utilizzo di riscaldamento /raffreddamento della sorgente EBPIIS

## A.4. Lavaggio componenti

Il lavaggio dei componenti è un'operazione molto importante e delicata la cui buona riuscita influenza positivamente la qualità del fascio ionico prodotto. Dato che la sorgente di ionizzazione al plasma non è selettiva, se si vuole ottenere un fascio di uno specifico elemento, oltre ad operare in alto vuoto, è necessario che non vi siano altri tipi di contaminanti esterni. A seconda del contaminante, è richiesta una "pulizia a regime" che può essere anche lunga (alcuni giorni). Per evitare dunque perdite di tempo si deve effettuare la pulizia ogni qualvolta venga sostituito un componente. Si utilizza una speciale lavatrice ad ultrasuoni in grado di emettere delle vibrazioni all'interno della vasca piena d'acqua che staccano le impurità. Possono essere lavati solo i componenti metallici o che non assorbono liquidi; pertanto i materiali ceramici quali l'allumina e la grafite non possono essere sottoposti a tale operazione.

La procedura deve essere svolta con l'ausilio di guanti protettivi in nitrile in quanto i fluidi pulenti utilizzati possono irritare la pelle, inoltre è vivamente consigliato l'utilizzo di occhiali che garantiscono una protezione da eventuali schizzi. Se possibile è bene svolgere tutte le operazioni sotto una cappa ventilata per evitare di inalare i vapori che si sprigionano dalle sostanze utilizzate.

Viene qui riportata una lista degli strumenti necessari per effettuare la pulizia, ovviamente le quantità possono variare in base al numero e alle dimensioni dei componenti che devono essere sottoposti all'operazione di pulitura. Componenti di piccole dimensioni possono essere posti in un contenitore separato dalla vasca; in questo modo si sprecano minori quantità di fluidi pulenti. La procedura risulta comunque simile a quella da effettuare per grandi pezzi.

Strumenti necessari:

- Guanti in nitrile e occhiali di protezione;
- Pinzette;
- Carta pulita;
- Beckers o contenitori rigidi;
- Acetone;
- Alcohol (puro al 98%);
- Acqua bi-distillata o deionizzata;
- Liquido specifico per pulizia agli ultrasuoni (FALC sonic cleaner);
- Lavatrice ad ultrasuoni (SOLTEC mod. SONICA, Figure 2). Consente di riscaldare l'acqua fino a 60°C e di settare il tempo di pulizia;
- Fornetto (ISCO mod. micra 18t, Figure 3). Può raggiungere temperature di 200°C. Nel nostro caso sono sufficienti 60°C per far evaporare l'acetone e l'alcohol in eccesso;
- Fogli di Alluminio;
- Scatole o sacchetti di plastica puliti.

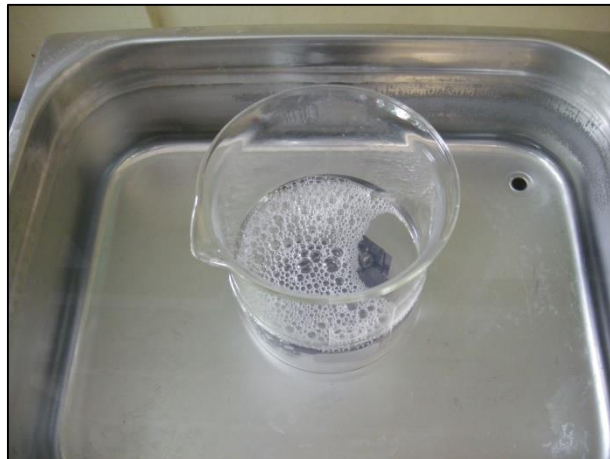
Viene ora descritta la procedura da seguire per effettuare la pulizia dei componenti:

1. E' necessario effettuare una pulizia preliminare dei componenti utilizzando l'acetone, strofinandoli con carta pulita per eliminare la sporcizia più grossolana;
2. Riempire i 2/3 della vasca con acqua (se i componenti sono in un contenitore separato si può utilizzare acqua di rubinetto) ed accendere il sistema di riscaldamento. Ci vogliono circa 20÷30 minuti per raggiungere i 60°C. Per velocizzare l'operazione, la vasca può essere coperta con l'apposito coperchio;



**Figura A-10: Lavatrice ad ultrasuoni in fase di riscaldamento**

3. Porre i componenti in un contenitore riempito con liquido per pulizia ad ultrasuoni diluito in acqua bidistillata nella proporzione di 20ml per litro. Il livello di riempimento deve essere circa lo stesso di quello della vasca;



**Figura A-11: Componenti immersi in una miscela di acqua bidistillata e sapone per pulizia agli ultrasuoni**

4. Ora è possibile mettere il becker nella vasca e attivare il timer. 15 minuti sono sufficienti per effettuare la prima pulitura. Una volta che il ciclo è finito si deve spegnere il riscaldatore e svuotare la vasca attraverso l'apposita valvola;
5. Rimuovere quindi il becker dalla vasca e sciacquare i componenti con acqua bidistillata;
6. Completato il risciacquo, porre i pezzi in un becker pulito riempito con alcohol (purezza 98%);



**Figura A-12: Componenti immersi in alcohol**



7. Riempire nuovamente la vasca con acqua che, stavolta, non deve essere riscaldata altrimenti l'alcol evapora. Quindi mettere il becker nella vasca e fare partire un secondo ciclo di pulitura per 15 minuti;
8. Esaurito il tempo, prelevare i componenti e porli in un altro contenitore riempito di acetone. Lasciare a bagno i pezzi per 15 minuti mescolando di tanto in tanto;



Figura A-13: Componenti immersi in acetone

9. Ora è possibile asciugare i componenti. Per fare ciò si consiglia di disporli su un foglio di alluminio e mettere il tutto nel fornello preriscaldato a 60°C. Si possono lasciare lì per un tempo di circa 10 minuti;



Figura A-14: Forno per l'asciugatura dei componenti

10. Una volta asciutti, i pezzi possono essere estratti e lasciati raffreddare. In seguito sarà possibile riporli in un sacchettino di plastica o in un contenitore pulito per evitare contaminazioni fino al successivo utilizzo.

## A.5. Sostituzione del filtro del gas: "Leak"

Il *leak* è sostanzialmente un filtro, un componente molto piccolo ma importantissimo poiché permette il passaggio di una quantità di gas ben definita. Esso viene testato dal produttore, il quale ne fornisce la portata espressa in  $mbar \cdot l \cdot s^{-1}$ . Da questa, applicando l'equazione di stato di un gas ideale alla pressione di 1 bar, è possibile risalire al numero di atomi che attraversano la sezione del *leak*. Per effettuare la conversione si considera l'equazione di stato di un gas ideale:

$$pV = nRT; \quad (A.1)$$

dove  $p$  e  $V$  sono pressione e volume del gas,  $n$  è il numero di moli,  $R$  è la costante universale dei gas e  $T$  è la temperatura assoluta. Se si esprimono le grandezze con le unità di misura citate sopra, invertendo la (A.1) si ricava che:

$$\frac{\text{mol}}{\text{sec}} = \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}} * \frac{10^{-1}}{8.314 \cdot 273.15} = 4.4 * 10^{-5} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}} ; \quad (\text{A.2})$$

dove  $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $T = 273.15 \text{ K}$  e il fattore  $10^{-1}$  è dovuto alla conversione di  $\text{mbar} \cdot \text{l}$  nelle unità del sistema internazionale. Quindi moltiplicando il fattore di conversione trovato per il numero di Avogadro ( $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ atomi} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) si possono calcolare il numero di particelle al secondo che vengono inviate alla sorgente partendo dal valore fornito dalla casa produttrice. La conoscenza della quantità esatta del numero di atomi di gas che entrano nella sorgente FEBIAD è essenziale per riuscire a fornire una valutazione oggettiva dell'efficienza di ionizzazione. Questo componente è molto delicato dato che anche la più piccola quantità di sporcizia può causare un'ostruzione importante e quindi può portare a valori di efficienza molto bassi. Pertanto ogni qualvolta si ottengono dei risultati di molto inferiori rispetto alle aspettative prove è consigliato sostituire tale componente.



Figura A-15: Componente *leak*

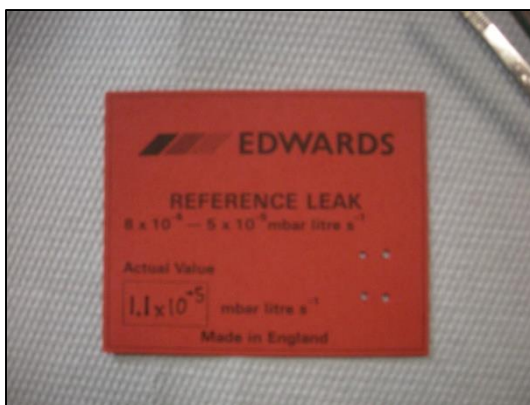
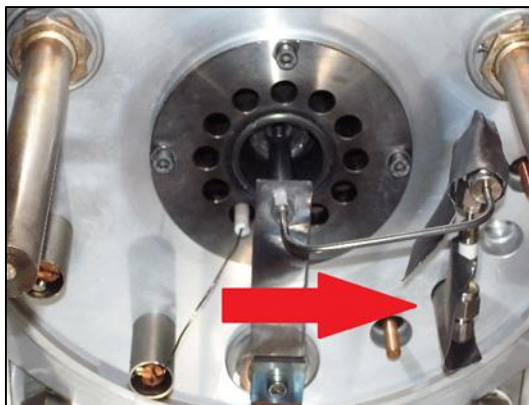


Figura A-16: Foglietto di calibrazione del *leak*

L'operazione di smontaggio e rimontaggio del *leak* non è complicata ma necessita di particolare attenzione nel posizionamento delle guarnizioni e nel serraggio dei componenti; se vengono schiacciate troppo, le guarnizioni non lavorano correttamente e consentono fughe di gas all'esterno della camera. Tale componente viene posizionato con delle guarnizioni all'interno di un puntone in Acciaio all'inizio della linea di trasporto del gas; questo puntone fa da tramite fra il piatto della camera rimovibile e il canale di passaggio del gas fissato sul *Front-End* e consente l'alloggiamento del filtro (Figura A-17); il canale poi attraverso il sistema composto dai due connettori *Swagelock* e il tubo in Tantalio arriva alla sorgente (Figura A-18).



**Figura A-17: Puntone del gas contenente il *leak***



**Figura A-18: Linea di connessione del gas. Sistema di isolamento elettrico**

Per sostituire il componente quindi bisogna smontare il puntone (componente AC\_0003 nelle tavole costruttive) svitandolo prima dal supporto collegato ad uno dei due connettori *Swagelock* e poi svitando i bulloni che lo vincolano al piatto della camera da vuoto.



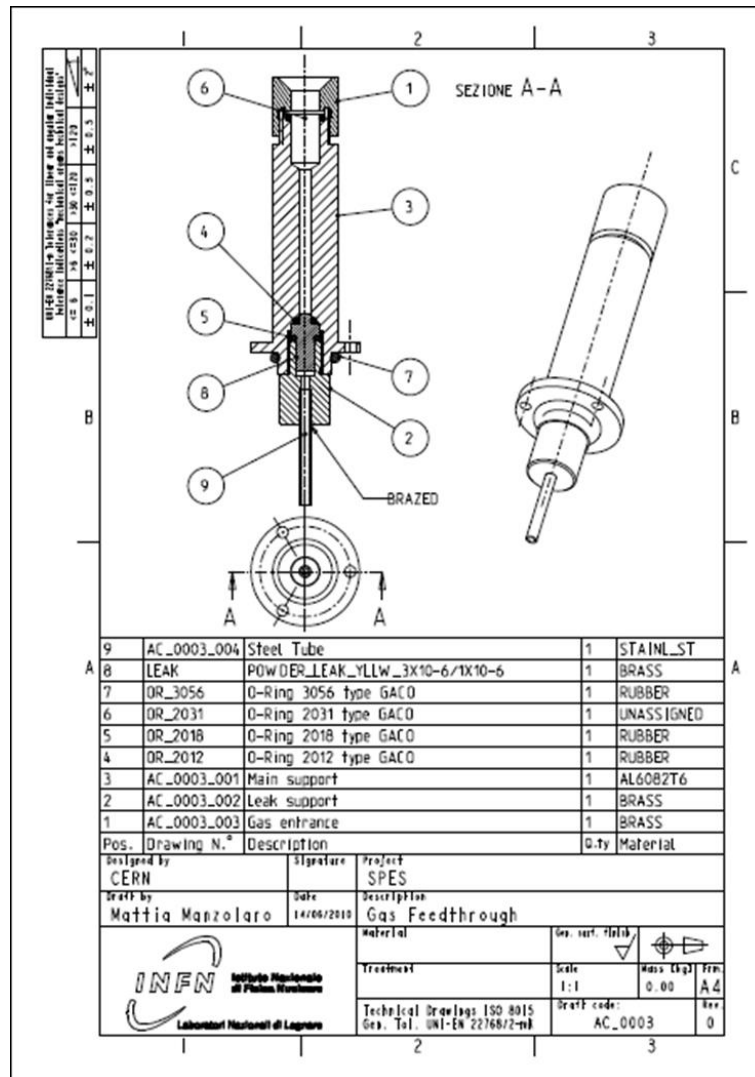


Figura A-19: Disegno tecnico del puntone del gas connesso alla camera da vuoto

A questo punto è possibile estrarre il puntone e procedere alla sostituzione del *leak*, che si trova all'interno, sfilando quello vecchio dalla sua sede, con l'aiuto di pinzette, e reinserendo quello nuovo al suo posto facendo attenzione che le guarnizioni mantengano la giusta posizione. E' possibile riutilizzare le guarnizioni se queste non presentano segni di usura o di deformazione evidenti.



Figura A-20: Assemblaggio del *leak*

Si consiglia sempre di controllare lo stato delle guarnizioni, in particolare quella che viene sollecitata maggiormente durante l'accoppiamento della camera con il sistema front end (la n°6 sulla tavola relativa al

componente, Figura A-19). La vite che comprime tale guarnizione non deve essere stretta eccessivamente, altrimenti questa si deforma restringendo la sezione dove dovrà passare il connettore del gas posizionato nel front end. L'elevato attrito che si viene a creare infatti può lacerare la gomma. Quindi occorre verificare che tale connettore possa essere accoppiato e disaccoppiato a mano con una discreta resistenza. Se non si infila a mano significa che si è stretto eccessivamente il dado che comprime la guarnizione e ciò può comportare la rottura della stessa durante la fase di accoppiamento; se invece si riesce ad infilarlo liberamente, si rischia di avere delle perdite. Si ricorda che un isolamento non ottimale avrebbe come conseguenze sia la dispersione di gas da ionizzare che infiltrazioni di aria all'interno del canale, e quindi contaminazione di Azoto e Ossigeno e altri elementi nel fascio che si estrae attraverso la sorgente. Una volta fatte queste verifiche è possibile riposizionare il puntale contenente il *leak* nell'apposita fessura nel piatto della camera. E' consigliato avvitare alternativamente le tre viti di fissaggio al fine di ottenere un buon allineamento con lo *Swagelock*; sono possibili comunque degli aggiustamenti a posteriori.

## **A.6. Montaggio nuova PIS in Grafite**

L'assemblaggio della sorgente PIS è una fase molto importante poiché dal posizionamento relativo dei vari componenti dipende anche il rendimento dell'intero sistema. Il modello di sorgente precedente era costruito in acciaio, se ciò creava semplificazioni nella fase di montaggio ed eliminava il problema del posizionamento del foro dell'anodo, la fase di smontaggio non era affatto semplice. Con il cambio del materiale si pensa di migliorare alcune fasi dell'assemblaggio. In seguito vengono riportate le fasi da seguire per effettuare l'assemblaggio della nuova sorgente di ionizzazione con supporto in Grafite e l'installazione nella camera da vuoto.

La seguente vuole essere una guida per facilitare delle persone inesperte e pertanto presenterà molti commenti al suo interno con l'obiettivo di focalizzare l'attenzione su alcune fasi particolari, dalle quali dipenderà l'esito finale delle prove sperimentali.

### FASE 1: PREPARAZIONE

- 1) Procurarsi il disegno tecnico della sorgente di ionizzazione aggiornato;
- 2) Fare una lista di tutti i component necessari (Tabella A-1). Alcuni component utilizzati per i test possono essere realizzati indifferentemente in Tantalio o Molibdeno;
- 3) Munirsi di un paio di guanti in Nitrile per prevenire la contaminazione dei component con sudore o sporcizia;
- 4) Procurarsi tutti i component presenti nella lista. Alcuni potrebbero non essere disponibili e devono dunque essere fabbricati. Si consiglia di tenere sempre sotto controllo le scorte a magazzino;
- 5) Procurarsi gli strumenti necessari:
  - Pinzette
  - Cacciaviti
  - Chiavi inglesi
    - Strumento di allineamento appositamente studiato
    - Brugole
    - Calibro
    - Tester
- 6) Valutare con attenzione lo stato strutturale e di pulizia dei component;

### FASE 2: PULIZIA DEI COMPONENTI

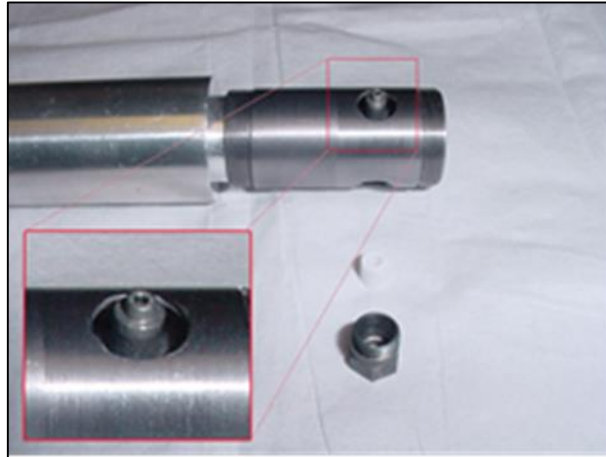
Pulire per bene tutti i componenti in metallo utilizzando una lavatrice ad ultrasuoni e seguendo la procedura riportata nell'Appendice A.4. Utilizzare i guanti per maneggiare i componenti sia durante la pulizia che l'assemblaggio. I componenti ceramici, come gli isolatori in Allumina ed il supporto in Grafite, non devono essere lavati poiché assorbono i liquidi; questa caratteristica risulta negativa poiché se è presente del liquido è molto più difficile creare il vuoto all'interno della camera. Controllare sempre lo stato strutturale dei componenti e se danneggiati pensare alla sostituzione. E' utile provare ad assemblare i componenti prima del lavaggio per verificarne la compatibilità. Si raccomanda di pulire molto bene anche gli utensili utilizzati con carta pulita ed acetone.

Tabella A-1: Lista dei componenti della EBPIS

Componente	Materiale	Codice I.D.	Quantità
<b>Electrical connection</b>		AC_0005	1
Transfer line sub-assembly		AC_0005_01	1
Electrical Clamp	Cu_ETP	AC_0005_003	2
Tantalum screw	Ta	AC_0005_004	2
Rectangular nut	Mo	AC_0005_005	4
Thickness	Mo	AC_0005_006	1
Tantalum spring	Ta	AC_0005_001	1
<b>Gas connection</b>		AC_0007	1
Gas tube	Ta	AC_0005_002	1
Swagelok 90° elbow	SS	SS-3M0-9	2
CABURN current break 3.2 mm	SS + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CYB3_SW	1
<b>Cathode</b>	Ta	ST_PIS_01	1
Cathode spacer 0.3	Mo		1
Support nut	Mo	ST_PIS_005	1
<b>Anode</b>		ST_PIS_02	1
Anode tube	Ta / Mo	ST_PIS_02_001	1
Outlet	Ta / Mo	ST_PIS_02_002	1
Grid	Ta / Mo	ST_PIS_02_003	1
Anode support nut	Mo	ST_PIS_003	3
Anode support insulator	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ST_PIS_002	3
Anode support pin	Mo	ST_PIS_001	3
Filament	Ta(2.5%W)		1
Discharge chamber	Ta	ST_PIS_004	1
<b>Extraction system</b>		ST_PIS_03	1
Extraction flange	Mo	ST_PIS_03_001	1
Extractor	Ta	ST_PIS_03_002	1
Extraction insulator	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ST_PIS_006	1
<b>PIS Support</b>		ST_PIS_04	1
Head flange	C	ST_PIS_04_001	1
Outer tube	C	ST_PIS_04_002	1
End flange	C	ST_PIS_04_003	1
Centering grain M4 x 0.75	C	ST_PIS_04_004	1
<b>Alignment system</b>		ST_PIS_05	4
Pin	W	ST_PIS_05_003	4
Support	Ta	ST_PIS_05_002	4
Insulator	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ST_PIS_002	4
M8 grain	Ta	ST_PIS_05_001	4

### FASE 3: ASSEMBLAGGIO

- 1) Per prima cosa si deve assemblare l'anodo (*anode sub assembly*) con la camera di scarica (*discharge chamber*). Inserire l'anodo nell'apposito strumento per l'allineamento. Quindi inserire la camera di scarica in modo che i fori combacino. Tenere un foro rivolto verso l'alto.
- 2) Prendere un puntalino di supporto per l'anodo (*support pin*) con una pinzetta ed inserirlo nel foro presente sull'anodo. Deve entrare perfettamente per evitare problemi di allineamento. I puntalini in Molibdeno riciclati sono molto fragili e possono rompersi facilmente, bisogna prestare quindi molta attenzione durante l'inserimento.



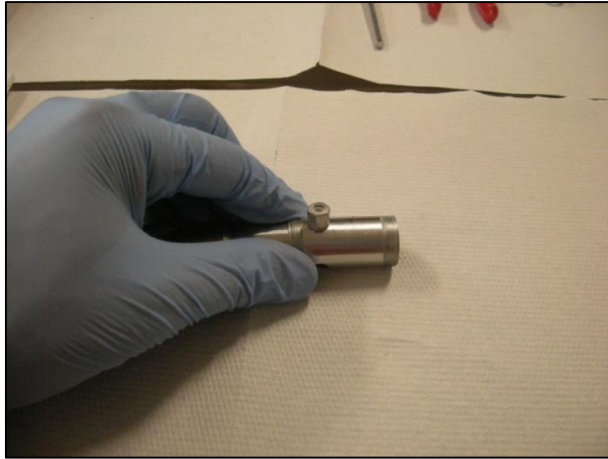
**Figura A-21: Inserimento del puntalino di supporto**

- 3) Prendere un isolatore da 5 mm di lunghezza (assicurarsi di prendere tre isolatori con dimensione longitudinale simile) e posarlo delicatamente sopra il puntalino.



**Figura A-22: Inserimento dell'isolatore in Allumina**

- 4) Prendere una bullone di supporto (*support nut*) e avvitarlo sulla camera di scarica per fissare i componenti appena installati. Non è necessario stringere molto poiché bisogna prima assemblare gli altri due supporti.



**Figura A-23: Posizionamento del sistema di bloccaggio ed allineamento dell'anodo**

- 5) Ruotare lo strumento di allineamento di  $120^\circ$  e ripetere le operazioni da 2) a 4)



**Figura A-24: Completamento dell'operazione di fissaggio dell'anodo**

- 6) Quando tutti i supporti sono installati, fissare i bulloni mantenendo centrato l'anodo. Guardare da ambo i lati che la distanza tra anodo e camera di scarica sia circa la stessa in direzione radiale. Aiutarsi con un piccolo cacciavite per valutare la fessura. Anche l'inclinazione assiale deve essere tenuta sotto controllo. Per evitare di avere in seguito problemi di distanze troppo elevate tra anodo e catodo, è necessario spingere l'anodo verso la direzione in cui verrà montato il catodo.



**Figura A-25: Verifica dell'allineamento dell'anodo**

- 7) Testare l'isolamento elettrico tra anodo e camera di scarica mediante l'uso di un multimetro. Se lo strumento emette un suono significa che le parti sono a contatto, pertanto è necessario rivedere l'accoppiamento dei componenti per individuare le parti metalliche che si toccano;
- 8) Misurare con un calibro la distanza alla quale è stato posizionato l'anodo; prendere 15 misure e fare la media. Eseguire la stessa operazione sul catodo. La differenza tra le due medie delle misure consentirà di trovare la distanza relativa tra anodo e catodo (detta *gap*), che stabilirà la corrente di saturazione secondo la legge di Child-Langmuire. Questa misura deve essere compresa tra 0.9 e 1.4 mm; anche se i valori di ottimo variano tra 1 e 1.2 mm. Se il *gap* è minore dei valori consigliati è possibile interporre un anello distanziatore (il minimo attualmente disponibile è di 0.3 mm di spessore) tra catodo e camera di scarica, se invece tale distanza risulta maggiore è necessario riassembleare l'anodo, avendo cura di spingerlo con un dito verso il catodo;



**Figura A-26: Misurazione del gap tra anodo e catodo**

- 9) A questo punto è possibile assemblare il sistema di estrazione. Prendere l'isolatore di Allumina accorciato e inserirlo nel tubicino di estrazione. Posizionare poi il tutto all'interno della flangia;





**Figura A-27: Pre assemblaggio del sistema di estrazione SPES**

- 10) Prendere la camera di scarica assemblata con l'anodo ed avvitarla alla flangia di estrazione. E' necessario controllare che l'anodo vada a contatto con l'isolatore in Allumina ma non con la parete metallica del tubo di estrazione;



**Figura A-28: Posizionamento dell'anello distanziatore (se necessario)**

- 11) Ricontrollare, quindi, che sia mantenuto l'isolamento elettrico tra anodo e il resto dei component;



**Figura A-29: Verifica dell'isolamento elettrico tra anodo e camera di scarica**

- 12) Inserire il catodo nella camera di scarica (interponendo tra le due parti un distanziatore, se necessario) e fissarlo con la relativa ghiera. Avvitarlo a mano cercando di fare forza. Il serraggio manuale è sufficiente per garantire il fissaggio dei componenti.



**Figura A-30: Pre-assemblato anodo-catodo**

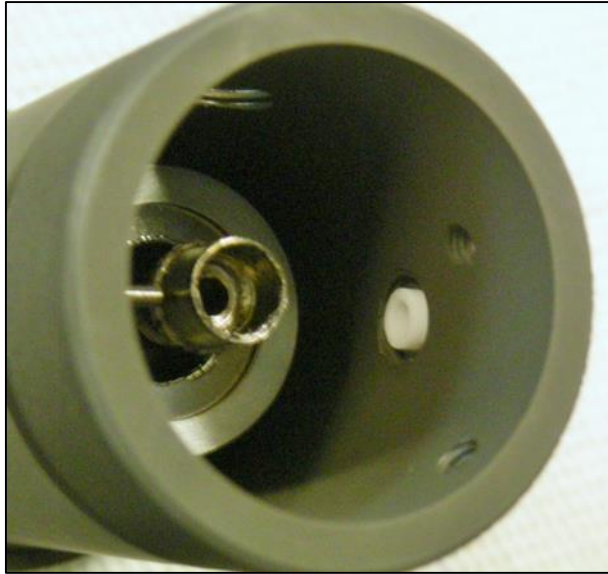
- 13) Prendere il tubo del sistema di supporto in Grafite e inserire il pre-assemblato anodo-catodo nell'apposito foro. Il diametro della flangia in Molibdeno è lo stesso del diametro del foro quindi il componente è automaticamente centrato. E' possibile ruotare delicatamente la flangia per fare in modo che il foro presente sul supporto sia coincidente con uno dei puntali di supporto dell'anodo; in questo modo è possibile inserirvi il filo per dare una differenza di potenziale all'anodo. Una volta posizionate, le parti possono essere fissate con la ghiera di fissaggio in Grafite;



**Figura A-31: Inserimento del pre assemblato anodo-catodo nel sistema di supporto**

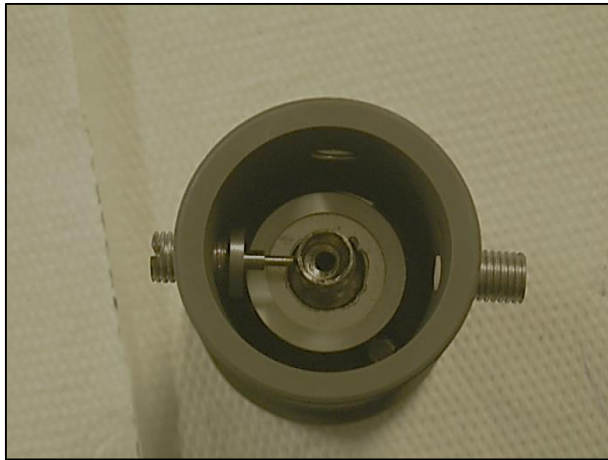
- 14) E' possibile ora fissare la crociera di allineamento. Pendere un isolatore in Allumina, da 5 mm di lunghezza, ed inserirlo nella tasca creata nel grano M8 in Tantalio. Avvitare quindi il grano sul supporto in Grafite fermandosi non appena si vede spuntare l'isolatore all'interno del tubo;





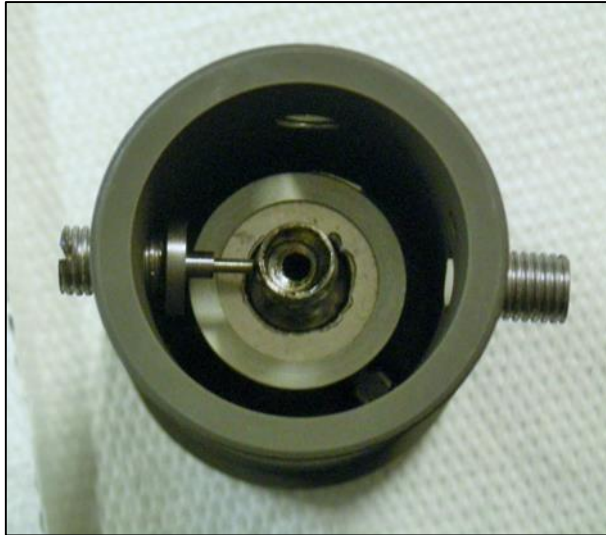
**Figura A-32: Installazione dei grani della crociera di allineamento**

- 15) A questo punto prendere il puntalino in Tungsteno ed inserirlo nel supporto in Tantalio appositamente creato; quindi prenderlo con una pinzetta ed inserirlo in modo tale che l'estremità cilindrica entri nel foro dell'isolatore in Allumina. E' possibile inclinare leggermente l'oggetto per farlo passare. Una volta posizionato, avvitare il grano e, sempre tenendo il puntalino in posizione con l'ausilio delle pinzette, arrivare a contatto con il collo del catodo. In questa fase non è necessario avvitare con forza altrimenti si rischierebbe di deformare il catodo;



**Figura A-33: Installazione della crociera di allineamento**

- 16) E' necessario ripetere le operazioni da 14) a 15) assemblando prima i puntalini opposti. Controllare con un calibro che la distanza tra i puntalini ed l'estremità del catodo sia maggiore di 3,7mm (sommandoci 0.8mm, che è raggio dei puntalini, ottengo 4.5mm, distanza massima alla quale i puntalini possono toccare il collo del catodo). In ogni caso dei piccoli aggiustamenti sono possibili;



**Figura A-34: Crociera posizionata**

- 17) Ora è possibile avvitare la flangia di supporto in Grafite sul tubo. Questa deve essere avvitata finché il foro per grano di centraggio risulta allineato. Quindi inserirvi l'apposito grano M4 in Grafite (o Tantalio);



**Figura A-35: Assemblaggio della flangia di supporto**

- 18) Inserire la *transfer line* sul collo del catodo. Dopo questa operazione è possibile stringere i puntalini di centraggio facendo attenzione poiché, insistendo sulla Grafite, il filetto può cedere. E' necessario tenere fissata la linea di trasferimento in quanto essa può ruotare se il contatto tra puntali e collo del catodo non è perfettamente simmetrico e lungo il diametro;
- 19)



**Figura A-36: Posizionamento della *transfer line***

- 20) Quindi è possibile posizionare il filo in Tantalio inserendone l'estremità nel forellino presente nei *pin* di supporto dell'anodo. Esso deve poi passare per i fori di diametro 10 mm presenti nella flangia di supporto in Grafite ma senza toccarla; per evitare contatti si deve inserire un isolatore in Allumina lungo 15-20 mm sul filo;



**Figura A-37: Inserimento del filo di Tantalio per fornire la differenza di potenziale all'anodo**

- 21) La sorgente PIS è ora completa e può essere montata sul piatto della camera da vuoto. Inserire quindi cautamente la sorgente nel foro presente sulla camera facendo attenzione a toccare il meno possibile il filamento in Tantalio che si collega all'anodo. Inserire per prima la vite superiore in modo che la sorgente stia in posizione senza bisogno di sostegno. Poi è possibile avvitare la altre viti stringendole alternativamente finché la sorgente non risulta ben fissata (utilizzare 8 viti se queste sono in SS; se sono in Tantalio ne sono sufficienti 4);



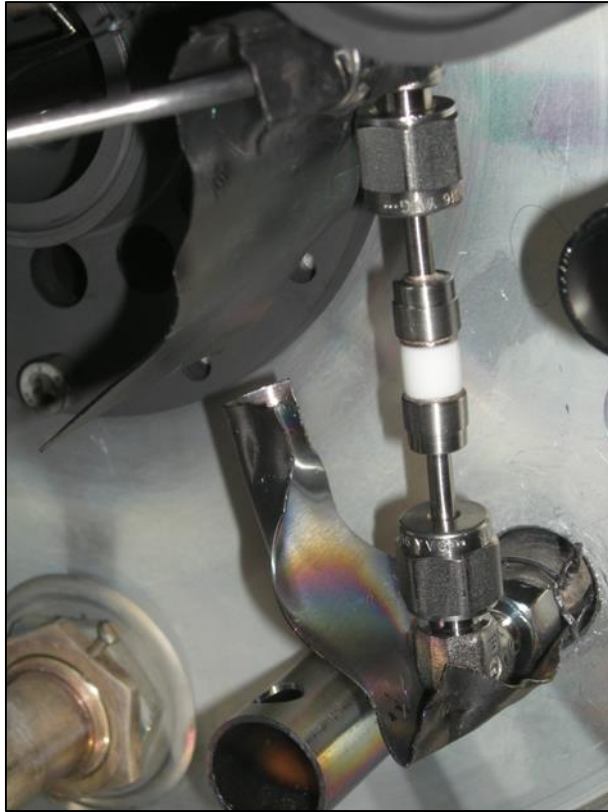
**Figura A-38: PIS Montata sul piatto della camera**

22) Ora è possibile collegare la connessione elettrica e il filo di anodo al piatto della camera;



**Figura A-39: Sorgente collegata elettricamente alla camera ed al circuito del gas**

23) Alla fine il tubo del gas può essere collegato alla *transfer line*, verificandone prima l'isolamento elettrico. Quindi la camera può essere chiusa ed installata sul *front end*.



**Figura A-40: Connessione del gas ricoperta da fogli in Tantalio per proteggerla dalla radiazione termica**



## A.7. Montaggio del sistema per prove ad alta temperatura (HT)

Il sistema per le prove ad alta temperatura è stato progettato appositamente per riuscire ad effettuare le misure del campo di temperatura del catodo. Esso presenta un foro sulla parte laterale del catodo per riuscire a valutarne la temperatura sul bordo esterno e uno sulla parte frontale per valutare quella sulla faccia. Questo sistema risulta utile anche per riuscire a valutare le deformazioni che subisce la faccia frontale del catodo a causa del riscaldamento.

Per iniziare l'assemblaggio è necessario munirsi delle tavole costruttive e quindi recuperare tutti i componenti necessari (Figura A-42).

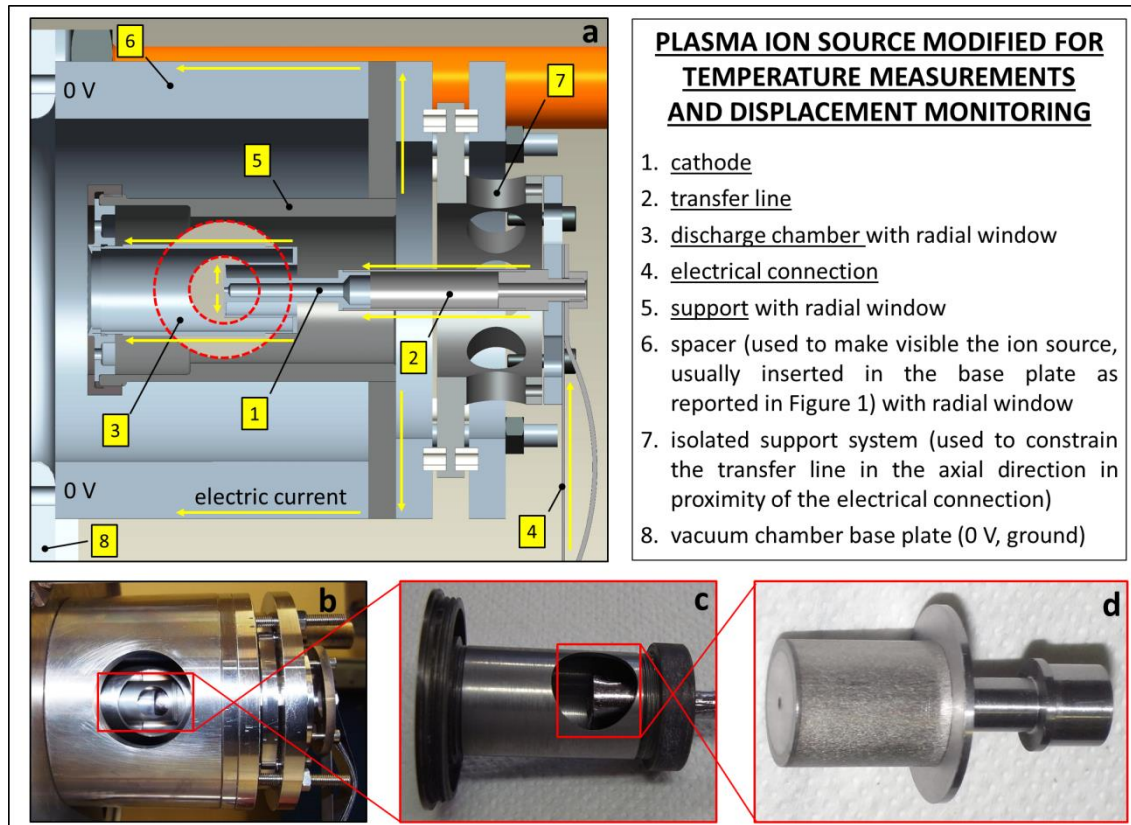


Figura A-41: PIS modificata per le prove di temperatura

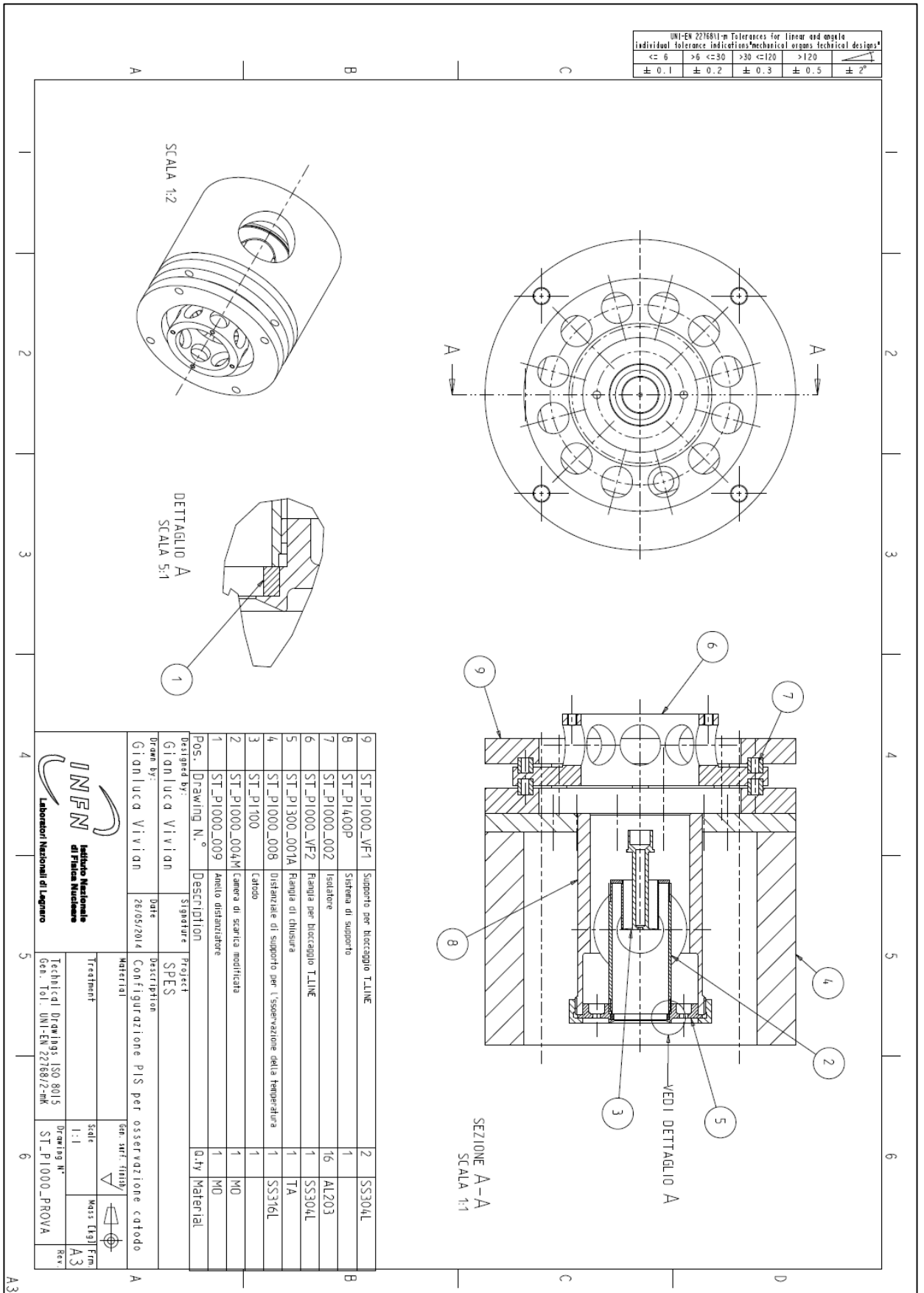


Figura A-42: Tavola costruttiva del sistema di fissaggio per misure HT

- 1) Si inizia prendendo il catodo e inserendolo nella camera di scarica modificata; dunque si deve avvitare la ghiera di fissaggio del catodo (si consiglia l' utilizzo di una ghiera in Molibdeno).
- 2) Successivamente avvitare la flangia di chiusura sulla camera di scarica, inserendo tra i due componenti un distanziatore che permetta il corretto allineamento dei fori di osservazione. Dunque è possibile avvitare il sub-assemblato al sistema di supporto modificato costruito in acciaio Inox. In questa fase si deve verificare l' allineamento dei fori; se ciò non è verificato si deve cambiare il distanziatore.
- 3) Una volta completato l' allineamento, si può inserire il tutto nel distanziale di supporto. Presenta anch' esso un foro laterale per l' osservazione del catodo che ovviamente deve essere allineato con gli altri due.
- 4) Assemblare a parte il sistema di bloccaggio della linea, interponendo almeno quattro isolatori di Allumina per strato, e sistemarlo come da disegno.
- 5) A questo punto è possibile inserire il tubo della *transfer line*, provvisto del tappino di chiusura (Figura A-43), sul collo del catodo.

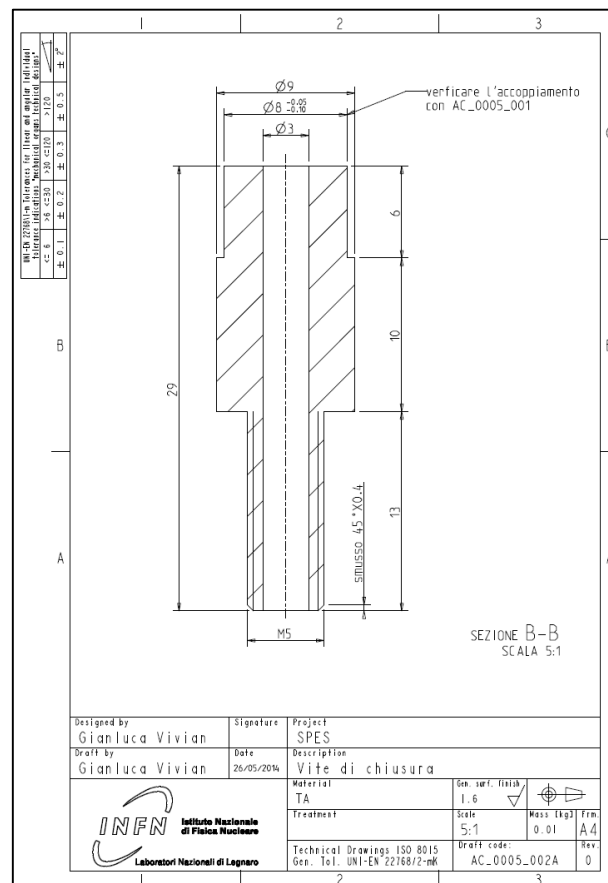


Figura A-43: Tappino di chiusura della linea di trasferimento

- 6) Quindi è possibile montare il supporto che permette il bloccaggio della *transfer line* in senso assiale (Figura A-44). Tale componente deve essere bloccato con dei bulloni sulla flangia per il bloccaggio.



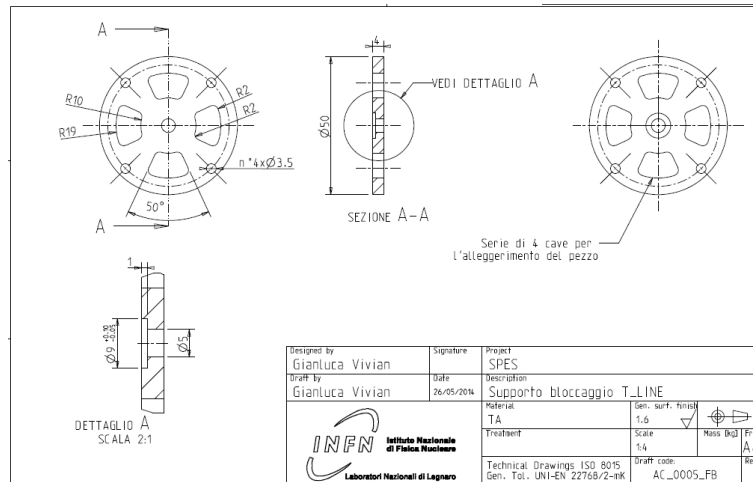


Figura A-44: Supporto di bloccaggio della transfer line

- 7) Avvitare i due prigionieri (lungi almeno 120 mm) diagonalmente opposti sulla camera da vuoto quindi prendere il sistema pre-assemblato, comprimendolo per non fare uscire gli isolatori dalla loro sede, e posizionarlo inserendo gli appositi fori ai prigionieri. Mantenendo premuto avvitare i dadi per fissare il sistema; a questo punto si può completare il fissaggio inserendo gli altri due prigionieri e avvitando i rispettivi dadi.
- 8) Ora si deve installare la connessione elettrica inserendo i fogli in Tantalio nel tubicino che esce dalla transfer line e contemporaneamente si deve fare in modo che i morsetti in rame centrino il puntale di alimentazione della camera. A questo punto è possibile fissare i morsetti e serrare i fogli della connessione elettrica sul supporto di bloccaggio (Figura A-44) con un dado in Tantalio. Quindi è possibile chiudere la camera ed avviare il vuoto per eseguire i test programmati.

## A.8. Conclusioni

In questo capitolo si è cercato di presentare una guida dettagliata che consenta ad un ricercatore inesperto di procedere al montaggio/smontaggio della Sorgente al Plasma senza incorrere in errori o disattenzioni che potrebbero costare il fallimento delle prove sperimentali o ancor peggio il mal funzionamento del dispositivo in linea portando ad inevitabili perdite di tempo.

Quindi sarà possibile, nel caso si registrassero dei valori inattesi durante le prove, confrontare le operazioni eseguite in fase di montaggio con quelle qui descritte ed escludere come cause per i risultati ottenuti possibili macro errori eseguiti montando la Sorgente stessa. Anche un solo piccolo errore può costare caro in termini di efficienza di ionizzazione.

Risulta altresì importante seguire quanto descritto per cercare di preservare i componenti durante lo smontaggio ed evitare quindi spreco di materiale e scorte di ricambio.

## Bibliografia Appendice A

- [1]. Mattia Manzolaro, Study, design and test of the Target – Ion Source system for the INFN SPES facility, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [2]. D. Stracener, Guideline for assembly of Electron-Beam Plasma Ion Source, internal report, HRIBF, ORNL (US Department Of Energy).



# APPENDICE B.

## MACRO MATERIALI

### B.1. Introduzione

In questa appendice vengono raccolti i listati APDL relativi ai materiali usati durante le simulazioni numerica della sorgente FEBIAD. I materiali in esame sono Tantalio, Molibdeno, Acciaio AISI 316L (le proprietà termiche sono state ritenute simili per l'acciaio AISI 304L), Allumina ( $Al_2O_3$ ), lega di Alluminio 5083, Grafite .

Per tutti sono stati usati dei codici sviluppati nel corso degli anni presso i ricercatori di INFN.

Nel codice APDL il testo inserito dopo il simbolo ("!") viene letto da Ansys® come un commento, perciò non è un comando che viene eseguito. Alcune proprietà nelle macro sono appunto segnate come commento, e spesso si è approssimata una caratteristica dipendente dalla temperatura con un valore costante.

### B.2. Tantalio

```
!macro: Tantalio per analisi elastoplastiche

/!prep7          !entro nel pre-processore

Ta=26           !Numero del materiale nella libreria di ansys
MPDELE,all,Ta

!1 - proprietà meccaniche
!2 - proprietà termiche
!3 - proprietà elettriche
!nb: le proprietà espresse in K sono riferite a
!differenze di temperatura, perciò non occorre convertire in °C

!1:
!densità
!fonti: F.C. Nix, D. MacNair, Physical Review e A.G. Worthing, Physical Review
!calcolati dall'espansione lineare
!Tabella temperatura [°C]
MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente
!      n      T [°C]
MPTEMP, 1, 25.85
MPTEMP, 2, 125.85
MPTEMP, 3, 225.85
MPTEMP, 4, 325.85
MPTEMP, 5, 425.85
MPTEMP, 6, 525.85
MPTEMP, 7, 625.85
MPTEMP, 8, 725.85
MPTEMP, 9, 825.85
MPTEMP, 10, 925.85
MPTEMP, 11, 1025.85
MPTEMP, 12, 1125.85
MPTEMP, 13, 1225.85
MPTEMP, 14, 1325.85
MPTEMP, 15, 1425.85
MPTEMP, 16, 1525.85
MPTEMP, 17, 1625.85
MPTEMP, 18, 1725.85
MPTEMP, 19, 1825.85
MPTEMP, 20, 1925.85
MPTEMP, 21, 2025.85
MPTEMP, 22, 2125.85
MPTEMP, 23, 2225.85
MPTEMP, 24, 2325.85
MPTEMP, 25, 2425.85
MPTEMP, 26, 2526.85
MPTEMP, 27, 2625.85
MPTEMP, 28, 2725.85
MPTEMP, 29, 2825.85

!densità [kg/m^3]
```

```

MPDATA, DENS, Ta, 1, 16597
MPDATA, DENS, Ta, 2, 16567
MPDATA, DENS, Ta, 3, 16532
MPDATA, DENS, Ta, 4, 16496
MPDATA, DENS, Ta, 5, 16463
MPDATA, DENS, Ta, 6, 16428
MPDATA, DENS, Ta, 7, 16393
MPDATA, DENS, Ta, 8, 16358
MPDATA, DENS, Ta, 9, 16322
MPDATA, DENS, Ta, 10, 16285
MPDATA, DENS, Ta, 11, 16249
MPDATA, DENS, Ta, 12, 16211
MPDATA, DENS, Ta, 13, 16174
MPDATA, DENS, Ta, 14, 16136
MPDATA, DENS, Ta, 15, 16098
MPDATA, DENS, Ta, 16, 16059
MPDATA, DENS, Ta, 17, 16020
MPDATA, DENS, Ta, 18, 15980
MPDATA, DENS, Ta, 19, 15941
MPDATA, DENS, Ta, 20, 15900
MPDATA, DENS, Ta, 21, 15860
MPDATA, DENS, Ta, 22, 15819
MPDATA, DENS, Ta, 23, 15778
MPDATA, DENS, Ta, 24, 15736
MPDATA, DENS, Ta, 25, 15695
MPDATA, DENS, Ta, 26, 15652
MPDATA, DENS, Ta, 27, 15600
MPDATA, DENS, Ta, 28, 15559
MPDATA, DENS, Ta, 29, 15517

```

```

!modulo elastico E
!fonti: R. Farraro e R.B. McLellan, Metall. Trans. e
!P.E. Armstrong, H.L. Brown, Trans. AIME
!tabella temperatura

```

```

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente
!
! n T [°C]
MPTEMP, 1, 20.85
MPTEMP, 2, 120.85
MPTEMP, 3, 220.85
MPTEMP, 4, 320.85
MPTEMP, 5, 420.85
MPTEMP, 6, 520.85
MPTEMP, 7, 620.85
MPTEMP, 8, 720.85
MPTEMP, 9, 820.85
MPTEMP, 10, 920.85
MPTEMP, 11, 1020.85
MPTEMP, 12, 1120.85
MPTEMP, 13, 1220.85
MPTEMP, 14, 1320.85
MPTEMP, 15, 1420.85
MPTEMP, 16, 1520.85
MPTEMP, 17, 1620.85
MPTEMP, 18, 1720.85
MPTEMP, 19, 1820.85
MPTEMP, 20, 1920.85
MPTEMP, 21, 2020.85
MPTEMP, 22, 2120.85
MPTEMP, 23, 2220.85
MPTEMP, 24, 2320.85
MPTEMP, 25, 2420.85
MPTEMP, 26, 2520.85
MPTEMP, 27, 2620.85
MPTEMP, 28, 2720.85
MPTEMP, 29, 2820.85

```

```

!modulo elastico [Pa]
MPDATA, EX, Ta, 1, 1.82750E+11
MPDATA, EX, Ta, 2, 1.81760E+11
MPDATA, EX, Ta, 3, 1.78030E+11
MPDATA, EX, Ta, 4, 1.71030E+11
MPDATA, EX, Ta, 5, 1.65440E+11
MPDATA, EX, Ta, 6, 1.61460E+11
MPDATA, EX, Ta, 7, 1.59110E+11
MPDATA, EX, Ta, 8, 1.57870E+11
MPDATA, EX, Ta, 9, 1.56630E+11
MPDATA, EX, Ta, 10, 1.55360E+11

```

```

MPDATA, EX, Ta, 11, 1.54060E+11
MPDATA, EX, Ta, 12, 1.52740E+11
MPDATA, EX, Ta, 13, 1.51390E+11
MPDATA, EX, Ta, 14, 1.50010E+11
MPDATA, EX, Ta, 15, 1.48600E+11
MPDATA, EX, Ta, 16, 1.47170E+11
MPDATA, EX, Ta, 17, 1.45710E+11
MPDATA, EX, Ta, 18, 1.44220E+11
MPDATA, EX, Ta, 19, 1.42700E+11
MPDATA, EX, Ta, 20, 1.38860E+11
MPDATA, EX, Ta, 21, 1.33480E+11
MPDATA, EX, Ta, 22, 1.26680E+11
MPDATA, EX, Ta, 23, 1.18470E+11
MPDATA, EX, Ta, 24, 1.08850E+11
MPDATA, EX, Ta, 25, 9.789267E+10
MPDATA, EX, Ta, 26, 8.665418E+10
MPDATA, EX, Ta, 27, 7.541570E+10
MPDATA, EX, Ta, 28, 6.417721E+10
MPDATA, EX, Ta, 29, 5.293872E+10

```

```

!modulo di Poisson v
!fonti: R. Farraro e R.B. McLellan, Metall. Trans. calcolato da
!modulo di Young e modulo di taglio
!Tabella temperatura

```

```

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente
!
!      n      T [°C]
MPTEMP, 1, 20.85
MPTEMP, 2, 120.85
MPTEMP, 3, 220.85
MPTEMP, 4, 320.85
MPTEMP, 5, 420.85
MPTEMP, 6, 520.85
MPTEMP, 7, 620.85
MPTEMP, 8, 720.85
MPTEMP, 9, 820.85
MPTEMP, 10, 920.85
MPTEMP, 11, 1020.85
MPTEMP, 12, 1120.85
MPTEMP, 13, 1220.85
MPTEMP, 14, 1320.85
MPTEMP, 15, 1420.85
MPTEMP, 16, 1520.85
MPTEMP, 17, 1620.85
MPTEMP, 18, 1720.85
MPTEMP, 19, 1820.85
MPTEMP, 20, 1920.85
MPTEMP, 21, 2020.85
MPTEMP, 22, 2120.85
MPTEMP, 23, 2220.85
MPTEMP, 24, 2320.85
MPTEMP, 25, 2420.85
MPTEMP, 26, 2520.85
MPTEMP, 27, 2620.85
MPTEMP, 28, 2720.85
MPTEMP, 29, 2820.85

```

```

!modulo di Poisson

```

```

MPDATA, PRXY, Ta, 1, 0.277450000
MPDATA, PRXY, Ta, 2, 0.277640000
MPDATA, PRXY, Ta, 3, 0.277820000
MPDATA, PRXY, Ta, 4, 0.278010000
MPDATA, PRXY, Ta, 5, 0.278200000
MPDATA, PRXY, Ta, 6, 0.278390000
MPDATA, PRXY, Ta, 7, 0.278570000
MPDATA, PRXY, Ta, 8, 0.278761650
MPDATA, PRXY, Ta, 9, 0.278949409
MPDATA, PRXY, Ta, 10, 0.279137167
MPDATA, PRXY, Ta, 11, 0.279324926
MPDATA, PRXY, Ta, 12, 0.279512685
MPDATA, PRXY, Ta, 13, 0.279700443
MPDATA, PRXY, Ta, 14, 0.279888202
MPDATA, PRXY, Ta, 15, 0.280075961
MPDATA, PRXY, Ta, 16, 0.280263719
MPDATA, PRXY, Ta, 17, 0.280451478
MPDATA, PRXY, Ta, 18, 0.280639236
MPDATA, PRXY, Ta, 19, 0.280826995

```

```

MPDATA, PRXY, Ta, 20, 0.281014754
MPDATA, PRXY, Ta, 21, 0.281202512
MPDATA, PRXY, Ta, 22, 0.281390271
MPDATA, PRXY, Ta, 23, 0.281578030
MPDATA, PRXY, Ta, 24, 0.281765788
MPDATA, PRXY, Ta, 25, 0.281953547
MPDATA, PRXY, Ta, 26, 0.282141306
MPDATA, PRXY, Ta, 27, 0.282329064
MPDATA, PRXY, Ta, 28, 0.282516823
MPDATA, PRXY, Ta, 29, 0.282704581

```

! curve vere sforzo-deformazione plastica per il modello incrudimento cinematico  
!fonti: S.R. Chen, G.T. Gray III, Metall. Mater. Trans.  
!per T da 25°C a 727°C. Le curve per T maggiori sono state estrapolate  
!dai dati precedenti

TB, KINH, Ta, 15, 14, PLASTIC

!Temperature [°C]

TBTEMP, 25.0

```

!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 5.8618E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 7.2004E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 7.5696E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 7.8311E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 8.0296E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 8.1937E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 8.3398E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 8.4750E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 8.6005E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 8.7146E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 8.8162E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 8.9077E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 8.9989E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 9.0499E+08

```

!Temperature [°C]

TBTEMP, 52.0

```

!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 5.3179E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 6.6555E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 7.0247E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 7.2862E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 7.4847E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 7.6488E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 7.7949E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 7.9301E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 8.0556E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 8.1697E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 8.2713E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 8.3628E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 8.4540E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 8.5050E+08

```

!Temperature [°C]

TBTEMP, 102.0

```

!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 4.4535E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 5.7916E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 6.1607E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 6.4223E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 6.6207E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 6.7848E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 6.9309E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 7.0662E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 7.1917E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 7.3058E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 7.4073E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 7.4989E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 7.5900E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 7.6411E+08

```

!Temperature [°C]

TBTEMP, 152.0

```

!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 3.7457E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 5.0844E+08

```

```

TBPT,, 4.0000E-02, 5.4535E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 5.7151E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 5.9135E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 6.0776E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 6.2237E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 6.3590E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 6.4845E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 6.5986E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 6.7001E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 6.7917E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 6.8828E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 6.9339E+08

```

```

!Temperature [°C]
TBTEMP,202.0

```

```

!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 3.1663E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 4.5040E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 4.8731E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 5.1347E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 5.3331E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 5.4972E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 5.6433E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 5.7786E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 5.9040E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 6.0181E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 6.1197E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 6.2113E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 6.3024E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 6.3535E+08

```

```

!Temperature [°C]
TBTEMP,277.0

```

```

!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 2.4881E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 3.8257E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 4.1949E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 4.4564E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 4.6548E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 4.8189E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 4.9651E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 5.1003E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 5.2258E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 5.3399E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 5.4415E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 5.5330E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 5.6241E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 5.6752E+08

```

```

!Temperature [°C]
TBTEMP,427.0

```

```

!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.6135E+08
TBPT,, 2.0000E-02, 2.9521E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 3.3213E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 3.5828E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 3.7812E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 3.9453E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 4.0915E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 4.2267E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 4.3522E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 4.4663E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 4.5679E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 4.6594E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 4.7506E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 4.8016E+08

```

```

!Temperatura [°C]
TBTEMP,727.0

```

```

!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 8.7024E+07
TBPT,, 2.0000E-02, 2.2079E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 2.5770E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 2.8385E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 3.0370E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 3.2011E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 3.3472E+08

```

```

TBPT,, 1.4000E-01, 3.4825E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 3.6079E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 3.7220E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 3.8236E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 3.9152E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 4.0063E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 4.0574E+08

```

!da qui i valori sono stati estrapolati

```

!Temperatura [°C]
TBTEMP,1027.0
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 4.8480E+07
TBPT,, 2.0000E-02, 1.8228E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 2.1918E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 2.4538E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 2.6528E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 2.8168E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 2.9628E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 3.0978E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 3.2228E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 3.3378E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 3.4388E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 3.5308E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 3.6218E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 3.6728E+08

```

```

!Temperatura [°C]
TBTEMP,1327.0
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 8.3200E+06
TBPT,, 2.0000E-02, 1.4212E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 1.7902E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 2.0522E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 2.2512E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 2.4152E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 2.5612E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 2.6962E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 2.8212E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 2.9362E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 3.0372E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 3.1292E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 3.2202E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 3.2712E+08

```

```

!Temperatura [°C]
TBTEMP,1627.0
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
TBPT,, 2.0000E-02, 1.1018E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 1.4708E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 1.7328E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.9318E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 2.0958E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 2.2418E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 2.3768E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 2.5018E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 2.6168E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 2.7178E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 2.8098E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 2.9008E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.9518E+08

```

```

!Temperatura [°C]
TBTEMP,1927.0
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
TBPT,, 2.0000E-02, 0.8367E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 1.2057E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 1.4677E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.6667E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 1.8307E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 1.9767E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 2.1117E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 2.2367E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 2.3517E+08

```



```
TBPT,, 2.0000E-01, 2.4527E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 2.5447E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 2.6357E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.6867E+08
```

```
!Temperatura [°C]
TBTEMP,2227.0
```

```
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
TBPT,, 2.0000E-02, 0.6099E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 0.9789E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 1.2409E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.4399E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 1.6039E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 1.7499E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 1.8849E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 2.0099E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 2.1249E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 2.2259E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 2.3179E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 2.4089E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.4599E+08
```

```
!Temperatura [°C]
TBTEMP,2527.0
```

```
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
TBPT,, 2.0000E-02, 0.4119E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 0.7809E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 1.0429E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.2419E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 1.4029E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 1.5519E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 1.6869E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 1.8119E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 1.9269E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 2.0279E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 2.1199E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 2.2109E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.2619E+08
```

```
!Temperatura [°C]
TBTEMP,2827.0
```

```
!      stress[Pa]      strain
TBPT,, 0.00000000, 1.00000000
TBPT,, 2.0000E-02, 0.2361E+08
TBPT,, 4.0000E-02, 0.6051E+08
TBPT,, 6.0000E-02, 0.8671E+08
TBPT,, 8.0000E-02, 1.0661E+08
TBPT,, 1.0000E-01, 1.2301E+08
TBPT,, 1.2000E-01, 1.3761E+08
TBPT,, 1.4000E-01, 1.5111E+08
TBPT,, 1.6000E-01, 1.6361E+08
TBPT,, 1.8000E-01, 1.7511E+08
TBPT,, 2.0000E-01, 1.8521E+08
TBPT,, 2.2000E-01, 1.9441E+08
TBPT,, 2.4000E-01, 2.0351E+08
TBPT,, 2.5000E-01, 2.0861E+08
```

```
!2:
```

```
!Conducibilità termica
```

```
!fonti: C.Y. Ho, R.W. Powell, P.E. Liley, J. Phys.Chem. Ref. Data
```

```
!Tabella temperatura [°C]
```

```
MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente
```

```
!      n      T [°C]
```

```
MPTEMP, 1, 25.85
MPTEMP, 2, 125.85
MPTEMP, 3, 225.85
MPTEMP, 4, 325.85
MPTEMP, 5, 425.85
MPTEMP, 6, 525.85
MPTEMP, 7, 625.85
MPTEMP, 8, 725.85
MPTEMP, 9, 825.85
MPTEMP, 10, 925.85
MPTEMP, 11, 1025.85
MPTEMP, 12, 1125.85
```

```

MPTEMP, 13, 1225.85
MPTEMP, 14, 1325.85
MPTEMP, 15, 1425.85
MPTEMP, 16, 1525.85
MPTEMP, 17, 1625.85
MPTEMP, 18, 1725.85
MPTEMP, 19, 1825.85
MPTEMP, 20, 1925.85
MPTEMP, 21, 2025.85
MPTEMP, 22, 2125.85
MPTEMP, 23, 2225.85
MPTEMP, 24, 2325.85
MPTEMP, 25, 2425.85
MPTEMP, 26, 2525.85
MPTEMP, 27, 2625.85
MPTEMP, 28, 2725.85
MPTEMP, 29, 2825.85

```

!Conducibilità termica [W/mK]

```

MPDATA, KXX, Ta, 1, 5.746800E+01
MPDATA, KXX, Ta, 2, 5.779200E+01
MPDATA, KXX, Ta, 3, 5.819700E+01
MPDATA, KXX, Ta, 4, 5.859400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 5, 5.899500E+01
MPDATA, KXX, Ta, 6, 5.939700E+01
MPDATA, KXX, Ta, 7, 5.979900E+01
MPDATA, KXX, Ta, 8, 6.020200E+01
MPDATA, KXX, Ta, 9, 6.060400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 10, 6.100500E+01
MPDATA, KXX, Ta, 11, 6.140400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 12, 6.180100E+01
MPDATA, KXX, Ta, 13, 6.219300E+01
MPDATA, KXX, Ta, 14, 6.258100E+01
MPDATA, KXX, Ta, 15, 6.296200E+01
MPDATA, KXX, Ta, 16, 6.333600E+01
MPDATA, KXX, Ta, 17, 6.370000E+01
MPDATA, KXX, Ta, 18, 6.405300E+01
MPDATA, KXX, Ta, 19, 6.439400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 20, 6.471900E+01
MPDATA, KXX, Ta, 21, 6.502700E+01
MPDATA, KXX, Ta, 22, 6.531600E+01
MPDATA, KXX, Ta, 23, 6.558400E+01
MPDATA, KXX, Ta, 24, 6.582600E+01
MPDATA, KXX, Ta, 25, 6.604300E+01
MPDATA, KXX, Ta, 26, 6.622900E+01
MPDATA, KXX, Ta, 27, 6.638200E+01
MPDATA, KXX, Ta, 28, 6.650000E+01
MPDATA, KXX, Ta, 29, 6.657900E+01

```

!emissività - fonte: Thermophysical Properties of Matter, v7,

!Y.S. Touloukian & D.P. DeWitt, 1970, IFI/Plenum, NY, NY

!vedi tesi Marco Marin

!Tabella temperatura [°C]

```

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente
!
! n T [°C]
MPTEMP, 1, 726.9
MPTEMP, 2, 825.0
MPTEMP, 3, 925.0
MPTEMP, 4, 1025.0
MPTEMP, 5, 1125.0
MPTEMP, 6, 1225.0
MPTEMP, 7, 1325.0
MPTEMP, 8, 1425.0
MPTEMP, 9, 1525.0
MPTEMP, 10, 1625.0
MPTEMP, 11, 1725.0
MPTEMP, 12, 1825.0
MPTEMP, 13, 1925.0
MPTEMP, 14, 2025.0
MPTEMP, 15, 2125.0
MPTEMP, 16, 2225.0
MPTEMP, 17, 2325.0
MPTEMP, 18, 2425.0
MPTEMP, 19, 2525.0
MPTEMP, 20, 2625.0
MPTEMP, 21, 2725.0
MPTEMP, 22, 2825.0

```

MPTEMP, 23, 2925.0  
MPTEMP, 24, 2996.9

!emissività [adimensionale]

MPDATA, EMIS, Ta, 1, 1.081100E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 2, 1.222300E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 3, 1.361700E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 4, 1.496800E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 5, 1.627400E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 6, 1.753700E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 7, 1.875500E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 8, 1.993000E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 9, 2.106000E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 10, 2.214600E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 11, 2.318900E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 12, 2.418700E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 13, 2.514100E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 14, 2.605100E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 15, 2.691800E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 16, 2.774000E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 17, 2.851800E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 18, 2.925200E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 19, 2.994200E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 20, 3.058800E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 21, 3.119000E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 22, 3.174800E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 23, 3.226200E-01  
MPDATA, EMIS, Ta, 24, 3.260400E-01

!Calore specifico - fonte: MPDB e I. Barin,  
!Thermochemical Data of Pure Substances, pub. VCH, Weinheim (1993)  
! per l'ultimo dato, vedi tesi Marco Marin  
!Tabella temperatura [°C]

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente

! n T [°C]  
MPTEMP, 1, 25.85  
MPTEMP, 2, 125.85  
MPTEMP, 3, 225.85  
MPTEMP, 4, 325.85  
MPTEMP, 5, 425.85  
MPTEMP, 6, 525.85  
MPTEMP, 7, 625.85  
MPTEMP, 8, 725.85  
MPTEMP, 9, 825.85  
MPTEMP, 10, 925.85  
MPTEMP, 11, 1025.85  
MPTEMP, 12, 1125.85  
MPTEMP, 13, 1225.85  
MPTEMP, 14, 1325.85  
MPTEMP, 15, 1425.85  
MPTEMP, 16, 1525.85  
MPTEMP, 17, 1625.85  
MPTEMP, 18, 1725.85  
MPTEMP, 19, 1825.85  
MPTEMP, 20, 1925.85  
MPTEMP, 21, 2025.85  
MPTEMP, 22, 2125.85  
MPTEMP, 23, 2225.85  
MPTEMP, 24, 2325.85  
MPTEMP, 25, 2425.85  
MPTEMP, 26, 2525.85  
MPTEMP, 27, 2625.85  
MPTEMP, 28, 2725.85  
MPTEMP, 29, 2825.85

!calore specifico [J/kgK]

MPDATA, C, Ta, 1, 1.3965E+02  
MPDATA, C, Ta, 2, 1.4273E+02  
MPDATA, C, Ta, 3, 1.4564E+02  
MPDATA, C, Ta, 4, 1.4804E+02  
MPDATA, C, Ta, 5, 1.5012E+02  
MPDATA, C, Ta, 6, 1.5195E+02  
MPDATA, C, Ta, 7, 1.5357E+02  
MPDATA, C, Ta, 8, 1.5504E+02  
MPDATA, C, Ta, 9, 1.5642E+02  
MPDATA, C, Ta, 10, 1.5774E+02  
MPDATA, C, Ta, 11, 1.5906E+02

```

MPDATA, C, Ta, 12, 1.6043E+02
MPDATA, C, Ta, 13, 1.6188E+02
MPDATA, C, Ta, 14, 1.6347E+02
MPDATA, C, Ta, 15, 1.6522E+02
MPDATA, C, Ta, 16, 1.6719E+02
MPDATA, C, Ta, 17, 1.6940E+02
MPDATA, C, Ta, 18, 1.7188E+02
MPDATA, C, Ta, 19, 1.7469E+02
MPDATA, C, Ta, 20, 1.7783E+02
MPDATA, C, Ta, 21, 1.8131E+02
MPDATA, C, Ta, 22, 1.8488E+02
MPDATA, C, Ta, 23, 1.8882E+02
MPDATA, C, Ta, 24, 1.9328E+02
MPDATA, C, Ta, 25, 1.9834E+02
MPDATA, C, Ta, 26, 2.0414E+02
MPDATA, C, Ta, 27, 2.1079E+02
MPDATA, C, Ta, 28, 2.1842E+02
MPDATA, C, Ta, 29, 2.2715E+02

```

!coefficiente di espansione termica - fonte:  
!Data taken from: Shabalyn, Igor L. Ultra-High Temperature Materials I:  
!Carbon (Graphene/Graphite) and Refractory Metals. Springer, 2014.

!Tabella temperatura [°C]  
MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente  
! n T [°C]

```

MPTEMP, 1, 0
MPTEMP, 2, 100
MPTEMP, 3, 200
MPTEMP, 4, 300
MPTEMP, 5, 400
MPTEMP, 6, 500
MPTEMP, 7, 600
MPTEMP, 8, 700
MPTEMP, 9, 800
MPTEMP, 10, 900
MPTEMP, 11, 1000
MPTEMP, 12, 1100
MPTEMP, 13, 1200
MPTEMP, 14, 1300
MPTEMP, 15, 1400
MPTEMP, 16, 1500
MPTEMP, 17, 1600
MPTEMP, 18, 1700
MPTEMP, 19, 1800
MPTEMP, 20, 1900
MPTEMP, 21, 2000
MPTEMP, 22, 2100
MPTEMP, 23, 2200
MPTEMP, 24, 2300
MPTEMP, 25, 2400
MPTEMP, 26, 2500
MPTEMP, 27, 2600

```

!coefficiente di espansione termica [1/°C]

```

MPDATA, ALPX, Ta, 1, 6.5000E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 2, 6.5352E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 3, 6.5728E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 4, 6.6128E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 5, 6.6552E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 6, 6.7000E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 7, 6.7472E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 8, 6.7968E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 9, 6.8488E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 10, 6.9032E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 11, 6.9600E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 12, 7.0192E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 13, 7.0808E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 14, 7.1448E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 15, 7.2112E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 16, 7.2800E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 17, 7.3512E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 18, 7.4248E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 19, 7.5008E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 20, 7.5792E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 21, 7.6600E-06

```

```

MPDATA, ALPX, Ta, 22, 7.7432E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 23, 7.8288E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 24, 7.9168E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 25, 8.0072E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 26, 8.1000E-06
MPDATA, ALPX, Ta, 27, 8.1952E-06

```

!3:

!resistività elettrica

!fonti: P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James, C.Y. Ho, J. Phys. Ref. Data

!Nota:

!dati sotto 60K sono per Ta con resistività residua

!di 0.1 x 10E-8 ohm-m; non corretti per l'espansione termica

!Tabella temperatura [°C]

MPTEMP,,,,,,,, ! cancella la tabella precedente

! n T [°C]

```

MPTEMP, 1, 25.85
MPTEMP, 2, 125.85
MPTEMP, 3, 225.85
MPTEMP, 4, 325.85
MPTEMP, 5, 425.85
MPTEMP, 6, 525.85
MPTEMP, 7, 625.85
MPTEMP, 8, 725.85
MPTEMP, 9, 825.85
MPTEMP, 10, 925.85
MPTEMP, 11, 1025.85
MPTEMP, 12, 1125.85
MPTEMP, 13, 1225.85
MPTEMP, 14, 1325.85
MPTEMP, 15, 1425.85
MPTEMP, 16, 1525.85
MPTEMP, 17, 1625.85
MPTEMP, 18, 1725.85
MPTEMP, 19, 1825.85
MPTEMP, 20, 1925.85
MPTEMP, 21, 2025.85
MPTEMP, 22, 2125.85
MPTEMP, 23, 2225.85
MPTEMP, 24, 2325.85
MPTEMP, 25, 2425.85
MPTEMP, 26, 2525.85
MPTEMP, 27, 2625.85
MPTEMP, 28, 2725.85
MPTEMP, 29, 2825.85

```

!resistività elettrica [ohm m]

```

MPDATA, RSVX, Ta, 1, 1.3488E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 2, 1.8237E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 3, 2.2841E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 4, 2.7307E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 5, 3.1641E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 6, 3.5850E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 7, 3.9941E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 8, 4.3919E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 9, 4.7792E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 10, 5.1568E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 11, 5.5249E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 12, 5.8844E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 13, 6.2360E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 14, 6.5802E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 15, 6.9175E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 16, 7.2495E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 17, 7.5752E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 18, 7.8970E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 19, 8.2142E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 20, 8.5281E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 21, 8.8394E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 22, 9.1483E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 23, 9.4563E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 24, 9.7628E-07
MPDATA, RSVX, Ta, 25, 1.0069E-06
MPDATA, RSVX, Ta, 26, 1.0376E-06
MPDATA, RSVX, Ta, 27, 1.0684E-06
MPDATA, RSVX, Ta, 28, 1.0994E-06
MPDATA, RSVX, Ta, 29, 1.1306E-06

```

### B.3. Molibdeno

```
!*****
!Molibdenum
!*****
!create by Nicola Baccini University of Padova
!Phone: +39 3289455733
!e-mail: nicola.baccini@yahoo.it
!*****
!Ver. 1.0 - 9 Sept 2009
!*****

/PREP7
Mo=30      !material number in the ANSYS library
MPDELE,ALL,Mo

!*****
!ELECTRICAL RESISTIVITY
!Reference: P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James and C.Y. Ho, J.
!Phys. Ref. Data, vol 13, no. 4, p1069 (1984)
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700,
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000,
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300,

!Electrical resistivity table [ohm m]
MPDATA,RSVX,Mo, 1, 4.9147E-08, 7.3993E-08, 9.9298E-08,
MPDATA,RSVX,Mo, 4, 1.2505E-07, 1.5122E-07, 1.7780E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 7, 2.0478E-07, 2.3214E-07, 2.5986E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 10, 2.8792E-07, 3.1632E-07, 3.4503E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 13, 3.7404E-07, 4.0333E-07, 4.3288E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 16, 4.6269E-07, 4.9273E-07, 5.2299E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 19, 5.5345E-07, 5.8410E-07, 6.1492E-07,
MPDATA,RSVX,Mo, 22, 6.4589E-07, 6.7700E-07, 7.0823E-07,

!*****
!THERMAL CONDUCTIVITY
!Composition: 99.95%
!Note: well-annealed with residual resistivity of 0.167 uohm-cm;
!error is 4% near RT, 4-10% at others
!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v1,
!Y.S. Touloukian, R.W. Powell, C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum, NY, NY
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700,
MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000,
MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300,

!Thermal conductivity table [W/m°C]
MPDATA,KXX,Mo, 1, 1.3904E+02, 1.3505E+02, 1.3106E+02,
MPDATA,KXX,Mo, 4, 1.2711E+02, 1.2322E+02, 1.1944E+02,
MPDATA,KXX,Mo, 7, 1.1578E+02, 1.1228E+02, 1.0895E+02,
MPDATA,KXX,Mo, 10, 1.0580E+02, 1.0285E+02, 1.0012E+02,
MPDATA,KXX,Mo, 13, 9.7601E+01, 9.5305E+01, 9.3229E+01,
MPDATA,KXX,Mo, 16, 9.1369E+01, 8.9720E+01, 8.8270E+01,
MPDATA,KXX,Mo, 19, 8.7006E+01, 8.5910E+01, 8.4962E+01,
MPDATA,KXX,Mo, 22, 8.4138E+01, 8.3411E+01, 8.2750E+01,
```

```

!*****
!HEMISPHERICAL TOTAL EMISSIVITY
!note: polished; 25% error
!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v7,
!Y.S. Touloukian & D.P. DeWitt, 1970, IFI/Plenum, NY, NY
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 200, 300, 400,
MPTEMP, 4, 500, 600, 700,
MPTEMP, 7, 800, 900, 1000,
MPTEMP, 10, 1100, 1200, 1300,
MPTEMP, 13, 1400, 1500, 1600,
MPTEMP, 16, 1700, 1800, 1900,
MPTEMP, 19, 2000, 2100, 2200,

!Emissivity table
MPDATA,EMIS,Mo, 1, 6.2388E-02, 7.3011E-02, 8.3558E-02,
MPDATA,EMIS,Mo, 4, 9.4030E-02, 1.0443E-01, 1.1475E-01,
MPDATA,EMIS,Mo, 7, 1.2499E-01, 1.3516E-01, 1.4525E-01,
MPDATA,EMIS,Mo, 10, 1.5527E-01, 1.6521E-01, 1.7508E-01,
MPDATA,EMIS,Mo, 13, 1.8487E-01, 1.9459E-01, 2.0423E-01,
MPDATA,EMIS,Mo, 16, 2.1379E-01, 2.2328E-01, 2.3269E-01,
MPDATA,EMIS,Mo, 19, 2.4203E-01, 2.5129E-01, 2.6048E-01,

!*****!DENSITY
!calculated from the linear expansion
!*****
!Temperature table [°C]
!MPTEMP!erase previous table
!MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
!MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
!MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
!MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,
!MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,
!MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700,
!MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000,
!MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300,

!Density table [Kg/m^3]
!MPDATA,DENS,Mo, 1, 1.0203E+04, 1.0188E+04, 1.0172E+04,
!MPDATA,DENS,Mo, 4, 1.0156E+04, 1.0140E+04, 1.0124E+04,
!MPDATA,DENS,Mo, 7, 1.0107E+04, 1.0089E+04, 1.0071E+04,
!MPDATA,DENS,Mo, 10, 1.0052E+04, 1.0033E+04, 1.0012E+04,
!MPDATA,DENS,Mo, 13, 9.9907E+03, 9.9681E+03, 9.9444E+03,
!MPDATA,DENS,Mo, 16, 9.9194E+03, 9.8931E+03, 9.8654E+03,
!MPDATA,DENS,Mo, 19, 9.8362E+03, 9.8055E+03, 9.7732E+03,
!MPDATA,DENS,Mo, 22, 9.7392E+03, 9.7035E+03, 9.6660E+03,

! --- constant value assigned ---
MP,DENS,Mo,9.7732E+03 !density [kg/m^3]
! --- constant value assigned ---

!*****
!SPECIFIC HEAT
!Note: for the non-superconducting state; 1.5% to 3% error
!Reference: P.D. Desai, J. Phys. Chem. Ref. Data, v16(1), p91 (1987)
!*****

!Temperature table [°C]
!MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
!MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
!MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
!MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,
!MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,
!MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700,
!MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000,
!MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300,

!Specific Heat table
!MPDATA,C,Mo, 1, 2.4386E+02, 2.5699E+02, 2.6611E+02,
!MPDATA,C,Mo, 4, 2.7284E+02, 2.7841E+02, 2.8334E+02,
!MPDATA,C,Mo, 7, 2.8804E+02, 2.9290E+02, 2.9817E+02,
!MPDATA,C,Mo, 10, 3.0406E+02, 3.1069E+02, 3.1810E+02,
!MPDATA,C,Mo, 13, 3.2626E+02, 3.3504E+02, 3.4426E+02,
!MPDATA,C,Mo, 16, 3.5363E+02, 3.6282E+02, 3.7388E+02,

```

```
!MPDATA,C,Mo, 19, 3.8675E+02, 4.0055E+02, 4.1529E+02,
!MPDATA,C,Mo, 22, 4.3128E+02, 4.4910E+02, 4.6967E+02,
```

```
! --- constant value assigned ---
MP,C,Mo,4.1529E+02 !specific heat [J/kg°C]
! --- constant value assigned ---
```

```
!*****
!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION
!Note: the reference temperature is 20C; 3% error below 900K, 5% above 900K
!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v12,
!Y.S. Touloukian, R.K. Kirby, R.E. Taylor & P.D. Desai, 1975, IFI/Plenum, NY, NY
!*****
```

```
!Temperature table [°C]
!MPTEMP!erase previous table
!MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
!MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
!MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
!MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,
!MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,
!MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700,
!MPTEMP, 19, 1800, 1900, 2000,
!MPTEMP, 22, 2100, 2200, 2300,
```

```
!Coefficient of thermal expansion table
!MPDATA,ALPX,Mo, 1, 4.7229E-06, 4.8771E-06, 5.0508E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 4, 5.2420E-06, 5.4486E-06, 5.6683E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 7, 5.8990E-06, 6.1386E-06, 6.3849E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 10, 6.6358E-06, 6.8732E-06, 7.1020E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 13, 7.3632E-06, 7.6622E-06, 8.0045E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 16, 8.3955E-06, 8.8407E-06, 9.3454E-06,
!MPDATA,ALPX,Mo, 19, 9.9151E-06, 1.0555E-05, 1.1271E-05,
!MPDATA,ALPX,Mo, 22, 1.2069E-05, 1.2952E-05, 1.3929E-05,
```

```
!*****
!ELASTIC MODULUS
!Composition: commercially pure
!Note: values below 298K were decreased by 2% to match the high temperature values
!Reference: ASM Handbook, vol 2, 10th edition, ASM International (1992);
!below 273K W. Koester, Z. Metallkde., v39(1), p1 (1948) (in German)
!*****
```

```
!Temperature table [°C]
!MPTEMP!erase previous table
!MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
!MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
!MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
!MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,
!MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,
!MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700,
!MPTEMP, 19, 1800, 1900,
```

```
!Elastic modulus table
!MPDATA,EX,Mo, 1, 3.2827E+11, 3.2179E+11, 3.1602E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 4, 3.1080E+11, 3.0596E+11, 3.0135E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 7, 2.9681E+11, 2.9219E+11, 2.8731E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 10, 2.8203E+11, 2.7619E+11, 2.6963E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 13, 2.6218E+11, 2.5370E+11, 2.4402E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 16, 2.3299E+11, 2.2044E+11, 2.0623E+11,
!MPDATA,EX,Mo, 19, 1.9018E+11, 1.7215E+11,
```

```
!*****
!POISSON'S RATIO
!Note: calculated from E and G; errors may be large
!Reference: see E and G
!*****
```

```
!Temperature table [°C]
!MPTEMP!erase previous table
!MPTEMP, 1, 25, 100, 150,
!MPTEMP, 4, 200, 250, 300,
!MPTEMP, 7, 350, 400, 450,
!MPTEMP, 10, 500, 550, 600,
!MPTEMP, 13, 650, 700, 750,
!MPTEMP, 16, 800, 850,
```

```
!Poisson's ratio table
```



```
!MPDATA,PRXY,Mo, 1, 3.6861E-01, 3.6036E-01, 3.5627E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 4, 3.5321E-01, 3.5112E-01, 3.4992E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 7, 3.4955E-01, 3.4992E-01, 3.5097E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 10, 3.5263E-01, 3.5482E-01, 3.5748E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 13, 3.6052E-01, 3.6389E-01, 3.6749E-01,
!MPDATA,PRXY,Mo, 16, 3.7128E-01, 3.7516E-01,
```

## B.4. Acciaio inossidabile AISI 316L

```
!*****
!Stainless Steel 316
!*****
!create by
!Mattia Manzolaro
!INFN
!Phone: +39 349 2824765
!e-mail: mattia.manzolaro@lnl.infn.it
!*****
!Ver. 1.0 - 30/11/2012
!*****
```

/PREP7

```
SS316=50 !material number in the ANSYS library
MPDELE,ALL,SS316
```

```
!*****!ELECTRICAL RESISTIVITY
!Composition: bal. Fe, 16.8 Cr, 11.66 Ni, 2.2 Mo, 1.6 Mn, 0.1 C, 0.26 Si (wt%)
!Note: Allegheny Ludlum Corp.
!Reference: M. Rouby and P. Blanchard, Physical and Mechanical Properties of
!Stainless Steels, Stainless Steels, les editions de physique, p111-158, (1993)
!and A.F. Clark, G.E. Childs and G.H. Wallace, Cryogenics, v10, p295 (1970)
!*****
```

```
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600,
```

```
!Electrical resistivity table [ohm m]
MPDATA,RSVX,SS316, 1, 7.33E-07, 8.01E-07, 8.64E-07,
MPDATA,RSVX,SS316, 4, 9.24E-07, 9.81E-07, 1.03E-06,
MPDATA,RSVX,SS316, 7, 1.08E-06,
```

```
!*****
!THERMAL CONDUCTIVITY
!Composition: bal. Fe, 16.8 Cr, 11.66 Ni, 2.2 Mo, 1.6 Mn, 0.1 C, 0.26 Si (wt%)
!Note: material below 110K is reported as 316LN; Allegheny Ludlum Corp.
!Reference: below 110K O. Umezawa and K. Ishikawa, Cryogenics, v32(10), p873 (1992);
!above 135K Lucks, C.F., Thompson, H.B., Smith, A.R., Curry, F.P., Deem, H.W. and
!Bing, G.F., USAF TR 6145, I, p1-127, 1951 [ATI 117 715]
!*****
```

```
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
MPTEMP, 10, 900,
```

```
!Thermal conductivity table [W/m°C]
MPDATA,KXX,SS316, 1, 1.29E+01, 1.45E+01, 1.60E+01,
MPDATA,KXX,SS316, 4, 1.74E+01, 1.87E+01, 2.00E+01,
MPDATA,KXX,SS316, 7, 2.13E+01, 2.24E+01, 2.35E+01,
MPDATA,KXX,SS316, 10, 2.46E+01,
```

```
!*****!HEMISPHERICAL TOTAL EMISSIVITY
(!NORMAL TOTAL EMISSIVITY!)
!Composition: bal. Fe, 16.8 Cr, 11.66 Ni, 2.2 Mo, 1.6 Mn, !0.1 C, 0.26 Si (wt%)
!Note: cleaned as-received; 30% error; Allegheny Ludlum Corp.
!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v7, Y.S.
!Touloukian & D.P. DeWitt, 1970, IFI/Plenum, NY, NY
```

```

!*****
!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 100, 200, 300,
MPTEMP, 4, 400, 500, 600,
MPTEMP, 7, 700, 800, 900,

!Emissivity table
MPDATA,EMIS,SS316, 1, 2.91E-01, 3.02E-01, 3.10E-01,
MPDATA,EMIS,SS316, 4, 3.18E-01, 3.32E-01, 3.57E-01,
MPDATA,EMIS,SS316, 7, 3.96E-01, 4.56E-01, 5.41E-01,

!*****
!DENSITY
!calculated from the linear expansion
!*****

! --- constant value assigned ---
MP,DENS,SS316,8000 !density [kg/m^3]
! --- constant value assigned ---

!*****
!SPECIFIC HEAT
!Note: for the non-superconducting state; 1.5% to 3% error
!Reference: P.D. Desai, J. Phys. Chem. Ref. Data, v16(1), p91 (1987)
!*****

! --- constant value assigned ---
MP,C,SS316,600 !specific heat [J/kg°C]
! --- constant value assigned ---

```

## B.5. Allumina

```

!*****
!Al2O3_XX (alpha)
!*****!create by
!Nicola Baccini
!University of Padova
!Phone: +39 3289455733
!e-mail: nicola.baccini@yahoo.it
!*****
!Ver. 1.0 - 9 Sept 2009
!*****

/PREP7

Al2O3_XX=31 !material number in the ANSYS library
MPDELE,ALL,Al2O3_XX

!*****
!THERMAL CONDUCTIVITY
!Composition: 99.5 Al2O3_XX
!Note: 98% dense; error is 6% from 500-1000K, 6-10% at others; alpha
!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v2,
!Y.S. Touloukian, R.W. Powell, C.Y. Ho & P.G. Klemens, 1970, IFI/Plenum, NY, NY
!*****

!Temperature table [°C]
MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700,
MPTEMP, 19, 1800

!Thermal conductivity table [W/m°C]
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,1,3.9486E+01,2.8637E+01,2.1662E+01,
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,4,1.6899E+01,1.3406E+01,1.0908E+01,
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,7,9.3546E+00,8.1919E+00,7.3374E+00,
MPDATA,KXX,Al2O3_XX,10, 6.7210E+00,6.2846E+00,5.9824E+00,

```

MPDATA,KXX,Al2O3\_XX,13,5.7812E+00,5.6599E+00,5.6097E+00,  
MPDATA,KXX,Al2O3\_XX,16,5.6342E+00, 5.7491E+00,5.9828E+00,  
MPDATA,KXX,Al2O3\_XX,19,6.3756E+00,

!\*\*\*\*\*  
!HEMISPHERICAL TOTAL EMISSIVITY  
!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)  
!Note: sapphire; depends on purity; alpha  
!Reference: R.J. Tiernan and J.E. Saunders, J. Applied Physics, v 64(2), p459 (1988)  
!\*\*\*\*\*

!Temperature table [°C]  
MPTEMP !erase previous table  
MPTEMP, 1, 750, 800, 850,  
MPTEMP, 4, 900, 950, 1000,  
MPTEMP, 7, 1050, 1100, 1150,  
MPTEMP, 10, 1200,

!Emissivity table [-]  
MPDATA,EMIS,Al2O3\_XX,1,2.6511E-01,2.5020E-01,2.3588E-01,  
MPDATA,EMIS,Al2O3\_XX,4,2.2216E-01,2.0903E-01,1.9649E-01,  
MPDATA,EMIS,Al2O3\_XX,7,1.8454E-01,1.7319E-01,1.6243E-01,  
MPDATA,EMIS,Al2O3\_XX,10,1.5227E-01,

!\*\*\*\*\*  
!ELECTRICAL RESISTIVITY  
!Composition:  
!Note:  
!Reference:  
!\*\*\*\*\*

!Temperature table [°C]  
MPTEMP !erase previous table  
MPTEMP, 1, 0, 500, 600,  
MPTEMP, 4, 700, 800, 900,  
MPTEMP, 7, 1000, 1100, 1200,  
MPTEMP, 10, 1300

!Electrical resistivity table [Kg/m^3]  
MPDATA,RSVX,Al2O3\_XX,1,1E+14,5.012E+13,2.09E+13,  
MPDATA,RSVX,Al2O3\_XX,4,1.585E+13,1.7380E+12,7.586E+10,  
MPDATA,RSVX,Al2O3\_XX,7,1.38E+09,5.012E+07,3.02E+06,  
MPDATA,RSVX,Al2O3\_XX,10,2.884E+05,

!\*\*\*\*\*  
!DENSITY  
!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)  
!Note: alpha  
!Reference: calculated from the linear expansion  
!\*\*\*\*\*

!Temperature table [°C]  
MPTEMP !erase previous table  
MPTEMP, 1, 0, 100, 200,  
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,  
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,  
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,  
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,  
MPTEMP, 16, 1500, 1600,

!Density table [Kg/m^3]  
MPDATA,DENS,Al2O3\_XX,1,3.9896E+03,3.9826E+03,3.9745E+03,  
MPDATA,DENS,Al2O3\_XX,4,3.9656E+03,3.9560E+03,3.9460E+03,  
MPDATA,DENS,Al2O3\_XX,7,3.9356E+03, 3.9250E+03,3.9142E+03,  
MPDATA,DENS,Al2O3\_XX,10,3.9032E+03,3.8922E+03,3.8810E+03,  
MPDATA,DENS,Al2O3\_XX,13,3.8696E+03,3.8579E+03,3.8459E+03,  
MPDATA,DENS,Al2O3\_XX,16,3.8333E+03,3.8201E+03,

!\*\*\*\*\*!SPECIFIC HEAT  
!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)  
!Note: less than 1% error; alpha  
!Reference: D.A. Archer, J. Phys. Chem. Ref. Data, v22(6), p1441 (1993)  
!\*\*\*\*\*

!Temperature table [°C]

```

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,
MPTEMP, 16, 1500, 1600, 1700,
MPTEMP, 19, 1800, 1900,

```

!Specific Heat table

```

MPDATA,C,Al2O3_XX,1,7.1784E+02,9.0600E+02,1.0187E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,4,1.0885E+03,1.1357E+03,1.1701E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,7,1.1948E+03,1.2157E+03,1.2336E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,10,1.2493E+03,1.2634E+03,1.2762E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,13,1.2883E+03,1.2998E+03,1.3110E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,16,1.3220E+03,1.3329E+03, 1.3435E+03,
MPDATA,C,Al2O3_XX,19,1.3537E+03,1.3633E+03,

```

!\*\*\*\*\*

!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION

!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)

!Note: the reference temperature is 20C; 3% error; alpha

!Reference: Thermophysical Properties of Matter, v13,

!Y.S. Touloukian, R.K. Kirby, R.E. Taylor & T.Y.R. Lee, 1977, IFI/Plenum, NY, NY

!\*\*\*\*\*

!Temperature table [°C]

```

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 0, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,
MPTEMP, 13, 1200, 1300, 1400,
MPTEMP, 16, 1500, 1600,

```

!Coefficient of thermal expansion table

```

MPDATA,ALPX,Al2O3_XX, 1,5.0548E-06,6.8436E-06,7.4041E-06,
MPDATA,ALPX,Al2O3_XX, 4,7.7599E-06,8.1000E-06,8.4243E-06,
MPDATA,ALPX,Al2O3_XX, 7,8.7329E-06,9.0257E-06,9.3027E-06,
MPDATA,ALPX,Al2O3_XX, 10,9.5640E-06,9.8095E-06,1.0039E-05,
MPDATA,ALPX,Al2O3_XX, 13,1.0253E-05,1.0452E-05,1.0634E-05,
MPDATA,ALPX,Al2O3_XX, 16,1.0801E-05,1.0952E-05,

```

!\*\*\*\*\*

!ELASTIC MODULUS

!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)

!Note: average of hot-pressed (from Avco) and sintered samples (from GE),

! >99% pure, >99% dense; the modulus decreases by approx. !5% per 1% of density;

!dynamic method; alpha

!Reference: N. Soga and O.L. Anderson, J. American Ceramic Society, v49(7), p355, (1966)

!\*\*\*\*\*

!Temperature table [°C]

```

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 50, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,
MPTEMP, 7, 600, 700, 800,
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,

```

!Elastic modulus table

```

MPDATA,EX,Al2O3_XX, 1,3.9110E+11,3.8866E+11,3.8373E+11,
MPDATA,EX,Al2O3_XX, 4,3.7874E+11,3.7368E+11,3.6855E+11,
MPDATA,EX,Al2O3_XX, 7,3.6336E+11,3.5811E+11,3.5278E+11,
MPDATA,EX,Al2O3_XX,10,3.4740E+11,3.4194E+11,3.3642E+11,

```

!\*\*\*\*\*

!POISSON'S RATIO

!Composition: 52,9 Al, 47,1 O (wt%)

!Note: calculated from E and G; errors may be large; alpha

!Reference: see E and G

!\*\*\*\*\*

!Temperature table [°C]

```

MPTEMP !erase previous table
MPTEMP, 1, 50, 100, 200,
MPTEMP, 4, 300, 400, 500,

```

MPTEMP, 7, 600, 700, 800,  
MPTEMP, 10, 900, 1000, 1100,

!Poisson's ratio table  
MPDATA, PRXY, Al203\_XX, 1, 2.2849E-01, 2.2932E-01, 2.3093E-01,  
MPDATA, PRXY, Al203\_XX, 4, 2.3249E-01, 2.3401E-01, 2.3547E-01,  
MPDATA, PRXY, Al203\_XX, 7, 2.3689E-01, 2.3825E-01, 2.3957E-01,  
MPDATA, PRXY, Al203\_XX, 10, 2.4084E-01, 2.4205E-01, 2.4322E-01,

## B.6. Lega di Alluminio 5083

!\*\*\*\*\*!Aluminium alloy 5083 H111, sheet  
!Version 1.0, Feb 08  
!\*\*\*\*\*!by

!Luca Bruno  
!C.E.R.N. tel. 0041-22-76.75372  
!Accelerators & Beams Dep. 0041-76-487.3885  
!Mailbox C26200 fax 0041-22-76.69627  
!1211 Geneva 23 e-mail luca.bruno@cern.ch  
!SWITZERLAND web www.cern.ch  
!\*\*\*\*\*  
!Ver. 1.0 - 19 Feb 08 - Only thermal properties  
!\*\*\*\*\*

/prep7

Al5083 = 23 !Material number in the ANSYS library  
MPDELE, all, 23

!\*\*\*\*\*  
!NOTE 1 - Unless otherwise stated, data are taken from:  
!E.A.Brandes & G.B.Brook Eds., "Smithells metals reference book",  
!Table 14.4b, p.14-15  
!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.  
!\*\*\*\*\*

!\*\*\*\*\*!Density  
!\*\*\*\*\*

MP, DENS, Al5083, 2670 !density [kg/m^3]

!\*\*\*\*\*!Thermal conductivity  
!Data taken from NIST Cryogenic Technologies Group, Bolder CO and C.Y.Ho,  
!M.W.Ackerman, K.Y.Wu, S.G.Oh and T.N.Havill,  
!J. Phys, Chem. Ref. Data, v7(3), p959 (1978)  
!\*\*\*\*\*

!Temperature points to interpolate the material properties ![Celsius]  
!(The same for all the material properties defined below)

MPTEMP ! erase previous table  
MPTEMP, 1, -269.1, -219.1, -169.1, -119.1,  
MPTEMP, 5, -69.1, -19.1, 30.9, 80.9,  
MPTEMP, 9, 130.9, 180.9, 230.9, 280.9,  
MPTEMP, 13, 330.9, 380.9, 430.9, 480.9,  
MPTEMP, 17, 530.9, 575.9

!Thermal conductivity, [W/(m\*C)]  
MPDATA, KXX, Al5083, 1, 2.875192e+000, 4.217026e+001, 6.798818e+001, 8.640142e+001,  
MPDATA, KXX, Al5083, 5, 1.002552e+002, 1.110588e+002, 1.199628e+002, 1.268330e+002,  
MPDATA, KXX, Al5083, 9, 1.321078e+002, 1.360260e+002, 1.388263e+002, 1.407474e+002,  
MPDATA, KXX, Al5083, 13, 1.420279e+002, 1.429067e+002, 1.436224e+002, 1.444138e+002,  
MPDATA, KXX, Al5083, 17, 1.455195e+002, 1.469807e+002

!\*\*\*\*\*!Specific heat - Alloy 1050  
(99.5% aluminium)  
!Data taken from B.J. McBride, S. Gordon and M.A. Reno,  
!NASA Technical Paper 3287 (1993)  
!\*\*\*\*\*  
MP, C, Al5083, 950 !specific heat [J/kg K]

!\*\*\*\*\*!Hemispherical total emissivity  
!\*\*\*\*\*

```

!Temperature points to interpolate the material properties [Celsius]
!(The same for all the material properties defined below)
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP,      1,      0.

!Hemispherical total emissivity, [-]
!Data are taken from Table No.1, Curve 31, of Y.S.Touloukian,D.P.DeWitt
!Note: hand polished plate, measured in vacuum, T=227-282K, err +/-3%
!Vol.7, p.7.
MPDATA,EMIS, A15083, 1,0.1

```

## B.7. Grafite POCO C\_EDM3

```

!-----
!EDM-3 graphite
!Composition: isotropic ultrafine grain graphite

!-----
!Version 1.0 (May 2015) by
!Fabio D'Agostini
!University of Padova
!Master's Thesis Work at INFN - LNL
!-----
!
!Ver. 1.0 - May 2015
!-----

/prep7
!
C_EDM3=10          !Material number in the ANSYS library
MPDELE,all,C_EDM3
!

!-----
!ELECTRICAL RESISTIVITY
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!          Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,
Decatur, 2002.
!
!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP,      1,      12.4,      157.5,      206.2,
MPTEMP,      4,      265.9,      314.9,      391.2,
MPTEMP,      7,      440.3,      555.1,      615.4,
MPTEMP,     10,      719.4,      889.4,      977.1,
MPTEMP,     13,     1015.5,     1114.3,     1174.7,
MPTEMP,     16,     1262.6,     1339.5,     1405.5,
MPTEMP,     19,     1465.9,     1553.9,     1608.8,
MPTEMP,     22,     1707.8,     1762.8,     1856.2,
MPTEMP,     25,     1911.2,     2004.6,     2109.0,
MPTEMP,     28,     2202.4,     2251.9,     2312.4,

!Electrical resistivity table [ohm m]
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 1, 1.318E-05, 1.081E-05, 1.032E-05,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 4, 9.861E-06, 9.550E-06, 9.181E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 7, 9.006E-06, 8.754E-06, 8.676E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 10, 8.579E-06, 8.579E-06, 8.618E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 13, 8.638E-06, 8.735E-06, 8.812E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 16, 8.948E-06, 9.084E-06, 9.206E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 19, 9.317E-06, 9.511E-06, 9.627E-06,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 22, 9.860E-06, 9.977E-06, 1.017E-05,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 25, 1.029E-05, 1.044E-05, 1.062E-05,
MPDATA,RSVX , C_EDM3 , 28, 1.081E-05, 1.091E-05, 1.106E-05,

!-----
!THERMAL CONDUCTIVITY
!

```

!NOTE 1 - Data are taken from:  
 ! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,  
 Decatur, 2002.

!NOTE 2 - Data are valid for all POCO "Ultrafine" graphite (average grain size <=5µm).

!NOTE 3 - Above 1653.1°C data refer to POCO AXM-5Q (average grain size =5µm) and are taken  
 from:

! Taylor, R. E., & Groot, H. Thermophysical Properties of POCO Graphite. (West  
 Lafayette, Indiana: Purdue University, July 1978. [NTIS No.ADA060419]), p.16.

!NOTE 4 - The S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	25.9,	39.3,	66.2,
MPTEMP,	4,	126.7,	207.6,	298.8,
MPTEMP,	7,	393.3,	508.2,	623.2,
MPTEMP,	10,	734.8,	843.0,	954.7,
MPTEMP,	13,	1056.3,	1161.2,	1266.1,
MPTEMP,	16,	1377.8,	1486.2,	1581.0,
MPTEMP,	19,	1635.1,	1728.0,	1878.6,
MPTEMP,	22,	1979.8,	2076.9,	2128.5,

!Thermal conductivity table [W/m°C]

MPDATA,KXX , C_EDM3	, 1,	119.027,	116.132,	111.304,
MPDATA,KXX , C_EDM3	, 4,	102.611,	94.876,	89.066,
MPDATA,KXX , C_EDM3	, 7,	81.808,	75.268,	69.932,
MPDATA,KXX , C_EDM3	, 10,	66.043,	61.432,	58.266,
MPDATA,KXX , C_EDM3	, 13,	55.584,	52.4203,	49.256,
MPDATA,KXX , C_EDM3	, 16,	47.536,	45.094,	43.137,
MPDATA,KXX , C_EDM3	, 19,	41.434,	41.32,	40.66,
MPDATA,KXX , C_EDM3	, 22,	39.88,	39.31,	39.12,

!EMISSIVITY (hemispherical total emittance)

!NOTE 1 - Data are taken from:  
 ! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite, Decatur,  
 2002.

!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP,	1,	1426.85,	1526.85,	1626.85,
MPTEMP,	4,	1726.85,	1826.85,	1926.85,
MPTEMP,	7,	2026.85,	2126.85,	2226.85,
MPTEMP,	10,	2326.85,	2426.85,	2526.85,
MPTEMP,	13,	2626.85,		

!Emissivity table [-]

MPDATA,EMIS , C_EDM3	, 1,	0.833,	0.835,	0.837,
MPDATA,EMIS , C_EDM3	, 4,	0.840,	0.842,	0.844,
MPDATA,EMIS , C_EDM3	, 7,	0.846,	0.849,	0.851,
MPDATA,EMIS , C_EDM3	, 10,	0.853,	0.856,	0.858,
MPDATA,EMIS , C_EDM3	, 13,	0.86,		

!DENSITY

!NOTE 1 - Data are taken from:  
 ! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,  
 Decatur, 2002.

!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.

!Temperature table [°C]

MPTEMP ! erase previous table

MPTEMP, 1, 20,

```

!Density table [kg/m^3]
MPDATA,DENS , C_EDM3 , 1, 1810,

!-----
!SPECIFIC HEAT
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,
Decatur, 2002.
!
!NOTE 2 - the S.I. system of units is used.
!-----

MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 25.1, 128.0, 224.8,
MPTEMP, 4, 327.2, 423.5, 525.6,
MPTEMP, 7, 627.5, 729.3, 825.1,
MPTEMP, 10, 926.8, 1028.4, 1130.0,
MPTEMP, 13, 1225.6, 1327.2, 1428.7,
MPTEMP, 16, 1530.2, 1631.7, 1727.2,
MPTEMP, 19, 1828.7, 1930.2, 2031.6,
MPTEMP, 22, 2133.1, 2228.6, 2330.0,
MPTEMP, 25, 2431.5, 2527.0, 2628.4,
MPTEMP, 28, 2729.9,

!Specific heat table [J/kg°C]
MPDATA,C , C_EDM3 , 1, 711.332, 956.655, 1184.858,
MPDATA,C , C_EDM3 , 4, 1367.325, 1509.815, 1623.712,
MPDATA,C , C_EDM3 , 7, 1714.752, 1782.936, 1845.428,
MPDATA,C , C_EDM3 , 10, 1896.469, 1936.082, 1969.980,
MPDATA,C , C_EDM3 , 13, 1998.188, 2026.373, 2048.842,
MPDATA,C , C_EDM3 , 16, 2065.599, 2082.355, 2099.134,
MPDATA,C , C_EDM3 , 19, 2115.890, 2126.933, 2137.975,
MPDATA,C , C_EDM3 , 22, 2149.017, 2160.082, 2171.124,
MPDATA,C , C_EDM3 , 25, 2182.166, 2193.230, 2198.558,
MPDATA,C , C_EDM3 , 28, 2209.600,

!-----
!COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
! Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,
Decatur, 2002.
!
!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP, 1, 100, 200, 300,
MPTEMP, 4, 400, 500, 600,
MPTEMP, 7, 700, 800, 901,
MPTEMP, 10, 1000, 1100, 1200,
MPTEMP, 13, 1300, 1400, 1500,
MPTEMP, 16, 1600, 1700, 1800,
MPTEMP, 19, 1900, 2000, 2100,
MPTEMP, 22, 2200, 2300, 2400,
MPTEMP, 25, 2500,

!Secant coefficient of thermal expansion [1/°C]
MPDATA,ALPX , C_EDM3 , 1, 7.27E-06, 7.34E-06, 7.44E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3 , 4, 7.51E-06, 7.60E-06, 7.68E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3 , 7, 7.77E-06, 7.86E-06, 7.95E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3 , 10, 8.03E-06, 8.10E-06, 8.20E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3 , 13, 8.29E-06, 8.38E-06, 8.46E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3 , 16, 8.53E-06, 8.62E-06, 8.71E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3 , 19, 8.79E-06, 8.88E-06, 8.96E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3 , 22, 9.03E-06, 9.10E-06, 9.20E-06,
MPDATA,ALPX , C_EDM3 , 25, 9.27E-06,

!-----
!ELASTIC MODULUS
!

```



```

!NOTE 1 - Data are taken from:
!           Properties and Characteristics of Graphite for the EDM Industry, Poco Graphite,
Decatur, 2002.
!
!NOTE 2 - The S.I. system of units is used.
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP,          1,          20.,

!Elastic modulus [Pa]
MPDATA,EX , C_EDM3      ,   1,   1.03E+10,

!-----
!POISSON'S RATIO
!
!NOTE 1 - Data are taken from:
!           Seisson, Gabriel, et al. "Dynamic cratering of graphite: Experimental results
and simulations." International Journal of Impact Engineering 63 (2014): 18-28.
!
!-----

!Temperature table [°C]
MPTEMP ! erase previous table
MPTEMP,          1,          20.,

!Poisson's ratio [-]
MPDATA,PRXY , C_EDM3      ,   1,   3.0E-01,

```

## APPENDICE C.

### CODICI APDL PER LE ANALISI NUMERICHE

#### C.1. Introduzione

In questa appendice vengono riportati degli esempi dei codici APDL usati per le analisi numeriche in campo elettro-termico ed elettromagnetico accoppiato sulla sorgente FEBIAD, per quanto riguarda le fasi di pre-processamento e soluzione. Inoltre saranno inseriti anche dei codici usati per la fase di post-processamento ed analisi dei risultati. Inoltre vengono riportati i codici di calcolo utilizzati per le analisi elettrostatiche relative al sistema di estrazione della sorgente di ionizzazione al plasma con il relativo file di postprocessing usati per il *particle tracing*, ovvero per il tracciamento della traiettoria di particelle cariche in moto in un campo elettrostatico. Con tali file è stato possibile studiare efficienza dell'estrazione ed emittanza del fascio.

Il simbolo "!" prima di una stringa rappresenta un commento che non viene letto dal programma.

Nel caso nel modello geometrico vengano aggiunte o tolte delle entità (come aree nel caso dello studio sul catodo, o volumi nel caso di presenza della camera) bisognerà correggere manualmente l'assegnazione delle etichette sui comandi di discretizzazione e di assegnazione di carichi e vincoli poiché la numerazione automatica di Ansys® assegna delle etichette ad ogni entità che può cambiare al variare della geometria. Particolare attenzione va posta nell'utilizzo del comando "VGLUE" il quale crea nuove aree rinominandole con numerazione automatica e casuale.

#### C.2. APDL per analisi in campo Elettro-Termico della sorgente FEBIAD con maschera in Grafite

```
! Modello FEM per il confronto fra i risultati su Temp della superficie
! di interfaccia del catodo, la temperatura media della superficie interna
dell'anodo,
! e Temp massima. Camera semplificata costituita da cilindri concentrici
! command *use to call macro to solve with grid
! called macros in this command file:
! "M26Ta.mac"
! "M10C_EDM3.mac"
! "M30Mo.mac"
! "M31A1203_XX.mac"
! "remove_radial_load.mac"

!---select a title for the analysis---
FINISH
/CLEAR, START
/FILNAME,NEW PIS 280A,0
/TITLE,NEWPIS280

/CONFIG,NRES,100000 !assigns values to ANSYS configuration parameters
(max number of substeps)
!-----
!MAIN_SCALAR_PARAMETER
T_par = 50 !temperature on the side of electrical connection
[°C]
I_LINE = 280 !current through the electrical connection [A]
FINISH !exits normally from a processor
!-----

/PREP7 !enters the model creation preprocessor

!c: material properties definition by macros
```

```

!c: Ta
*USE,M26Ta_mlep.mac           !calls the macro for Tantalum

!c: C_EDM3
*USE,M10C_EDM3.mac           !calls the macro for graphite

!c: Mo
*USE,M30Mo.mac               !calls the macro for Molibdenum

!c: Al2O3
*USE,M31Al2O3_XX.mac        !calls the macro for Alluminum

!-----
!-----
!c: THERMAL-ELECTRIC MODEL
!-----
!-----

!c: element type
ET,1,SOLID226                !defines a local element type
KEYOPT,1,1,110               !specification of thermal-electric capability for ET
1

! Start of build of geometrical model
! geometry import

FINISH                        !exits normally from a processor
/AUX15                        !enters the IGES file transfer processor

IOPTN,IGES,NODEFEAT          !controls options relating to importing a model
IOPTN,MERGE,YES              !controls options relating to importing a model
IOPTN,SOLID,YES              !controls options relating to importing a model
IOPTN,SMALL,YES              !controls options relating to importing a model
IOPTN,GTOLER,0.00001        !controls options relating to importing a model

!c: anode_body
IGESIN,'anode_body','igs'    !transfers IGES data from a file
into ANSYS

!c: discharge chamber
IGESIN,'anode_cathode_body','igs' !transfers IGES data from a file
into ANSYS

!c: anode extractor
IGESIN,'anode_extractor','igs' !transfers IGES data from a file
into ANSYS

!c: grid anode
IGESIN,'anode_grid','igs'    !transfers IGES data from a file
into ANSYS

!c: anode support insulator
IGESIN,'anode_insulator','igs' !transfers IGES data from a file
into ANSYS

!c: anode support insulator
IGESIN,'anode_insulator_cpy_1','igs' !transfers IGES data from a file
into ANSYS

!c: anode support insulator

```

```

    IGESIN,'anode_insulator_cpy_2','igs'           !transfers IGES data
from a file into ANSYS

    !c: grhaphite support system
    IGESIN,'box_graphite','igs'                   !transfers IGES data from a
file into ANSYS

    !c: cathode
    IGESIN,'cathode','igs'                         !transfers IGES data from a file
into ANSYS

    !c: cathode support nut
    IGESIN,'cathode_ferrule','igs'                 !transfers IGES data from
a file into ANSYS

    !c: extraction disk
    IGESIN,'extraction_disk','igs'                !transfers IGES data from a file
into ANSYS

    !c: extraction ferrule
    IGESIN,'extraction_ferrule','igs'             !transfers
IGES data from a file into ANSYS

    !c: extraction insulator
    IGESIN,'extraction_insulator','igs'           !transfers
IGES data from a file into ANSYS

    !c: extractor
    IGESIN,'extractor','igs'                       !transfers IGES data from a
file into ANSYS

    !c: transfer line
    IGESIN,'transfer_line','igs'                   !transfers IGES data from
a file into ANSYS

    FINISH           !exits normally from a processor
    /PREP7           !enters the model creation preprocessor

    !c: thermal contact effects are not considered
    !c: all the components are considered welded

    !c: gluing of volumes
    VGLUE,ALL        !generates new volumes by "gluing" volumes

    !c: scaling geometry from "mm" to "m"

    VLSCALE,ALL,,,0.001,0.001,0.001,,0,1         !generates a scaled set of
volumes from a pattern of volumes

    NUMCMP,VOLU      !compressed entity number
    NUMCMP,AREA
    NUMCMP,LINE
    NUMCMP,KP

    ! surface on wich give external
condition !324 interna!325 esterna
    K,10000,0.0316,0,0
    K,10001,0.0316,0.04,0
    K,10002,0.0316,-0.04,0
    K,10003,0.0316,0,0.04
    K,10004,0.0316,0,-0.04

```

```

LARC,10001,10004,10000,0.04
LARC,10004,10002,10000,0.04
LARC,10002,10003,10000,0.04
LARC,10003,10001,10000,0.04

FLST,3,4,4,ORDE,2
FITEM,3,777
FITEM,3,-780
ASBL,      142,P51X

! End of geometrical model
!-----
-----
! Start of FEM model build

!c: Volume MESHING

!c: anode_insulator / extraction_insulator (thermal-electric-SOLID226)

MAT,Al2O3_XX                                !sets the element material attribute
pointer
TYPE,1                                       !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D                                 !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape
MSHKEY,0                                     !to be used for meshing
meshing should be used to mesh a model      !specifies whether free meshing or mapped

VSEL,S,,,1                                  !selects a subset of volumes
VSEL,A,,,2                                  !selects a subset of volumes
VSEL,A,,,3                                  !selects a subset of volumes
VSEL,A,,,6                                  !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU                           !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0018                           !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL                                    !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL                                       !selects all entities with a single command

!c: box_graphite (thermal-electric-SOLID226)

MAT,C_EDM3                                  !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                                       !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D                                 !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape
MSHKEY,0                                     !to be used for meshing
meshing should be used to mesh a model      !specifies whether free meshing or mapped

VSEL,S,,,15                                 !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU                           !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0058                           !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL                                    !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL                                       !selects all entities with a single command

!c: anode_body (thermal-electric-SOLID226)

```

```

MAT,Ta                                !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                                !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D                            !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape            !to be used for meshing
MSHKEY,0                                !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,11                            !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU                      !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0013                      !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL                              !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL                                  !selects all entities with a single command

!c: anode_extractor (thermal-electric-SOLID226)
MAT,Ta                                !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                                !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D                            !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape            !to be used for meshing
MSHKEY,0                                !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,4                             !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU                      !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0016                      !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL                              !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL                                  !selects all entities with a single command

!c: anode_grid (thermal-electric-SOLID226)

MAT,Mo                                !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                                !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D                            !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape            !to be used for meshing
MSHKEY,0                                !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,14                            !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU                      !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0017                      !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL                              !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL                                  !selects all entities with a single command

!c: cathode (thermal-electric-SOLID226)

MAT,Ta                                !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                                !sets the element type attribute pointer

```

```

MSHAPE,1,3D          !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape
                    !to be used for meshing
MSHKEY,0             !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,13         !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU  !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0013  !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL           !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL              !selects all entities with a single command

!c: Cathode_ferrule (thermal-electric-SOLID226)

MAT,Ta              !sets the element material attribute pointer
TYPE,1             !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D          !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape
                    !to be used for meshing
MSHKEY,0             !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,7         !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU  !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0032  !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL           !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL              !selects all entities with a single command

!c: Extractor (thermal-electric-SOLID226)

MAT,Ta              !sets the element material attribute pointer
TYPE,1             !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D          !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape
                    !to be used for meshing
MSHKEY,0             !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,8         !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU  !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0010  !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL           !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL              !selects all entities with a single command

!c: extraction_disk (thermal-electric-SOLID226)

MAT,Ta              !sets the element material attribute pointer
TYPE,1             !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D          !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape
                    !to be used for meshing

```

```

MSHKEY,0                !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,9              !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU      !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0020      !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL               !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL                  !selects all entities with a single command

!c: extraction_ferrule (thermal-electric-SOLID226)

MAT,Ta                  !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                 !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D            !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape
                        !to be used for meshing
MSHKEY,0                !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,10            !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU      !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0033      !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL               !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL                  !selects all entities with a single command

!c: anode_cathode_body (thermal-electric-SOLID226)

MAT,Ta                  !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                 !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D            !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape
                        !to be used for meshing
MSHKEY,0                !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,12            !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU      !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0030      !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL               !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL                  !selects all entities with a single command

!c: transfer line (thermal-electric-SOLID226)

MAT,Ta                  !sets the element material attribute pointer
TYPE,1                 !sets the element type attribute pointer

MSHAPE,1,3D            !for elements that support multiple shapes,
specifies the element shape
                        !to be used for meshing
MSHKEY,0                !specifies whether free meshing or mapped
meshing should be used to mesh a model

VSEL,S,,,5              !selects a subset of volumes

```



```

ALLSEL,BELOW,VOLU      !selects all entities with a single command
AESIZE,ALL,0.0020      !specifies the element size to be meshed onto
areas
VMESH,ALL              !generates nodes and volume elements within
volumes
ALLSEL                 !selects all entities with a single command

!c: defining the Radiating Surfaces (Single ENCLOSURE)

!c: box_graphite (radiating surfaces)

VSEL,S,,,15           !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU     !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1 !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL                 !selects all entities with a single command

!c: anode_insulator / extraction_insulator (radiating surfaces)

VSEL,S,,,1            !selects a subset of volumes
VSEL,A,,,2            !selects a subset of volumes
VSEL,A,,,3            !selects a subset of volumes
VSEL,A,,,6            !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU     !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Al2O3_XX,1 !specifies surface loads on the selected
areas
ALLSEL                 !selects all entities with a single command

!c: anode_body (radiating surfaces)

VSEL,S,,,11           !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU     !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1  !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL                 !selects all entities with a single command

!c: anode_extractor (radiating surfaces)

VSEL,S,,,4            !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU     !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1  !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL                 !selects all entities with a single command

!c: anode_grid (radiating surfaces)

VSEL,S,,,14           !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU     !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Mo,1  !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL                 !selects all entities with a single command

!c: cathode (radiating surfaces)

VSEL,S,,,13           !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU     !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1  !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL                 !selects all entities with a single command

!c: Cathode_ferrule (radiating surfaces)

VSEL,S,,,7            !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU     !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1  !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL                 !selects all entities with a single command

```

```

!c: Extractor (radiating surfaces)

VSEL,S,,,8           !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU   !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1 !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL              !selects all entities with a single command

!c: extraction_disk (radiating surfaces)

VSEL,S,,,9           !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU   !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1 !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL              !selects all entities with a single command

!c: extraction_ferrule (radiating surfaces)

VSEL,S,,,10          !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU   !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1 !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL              !selects all entities with a single command

!c: anode_cathode_body (radiating surfaces)

VSEL,S,,,12          !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU   !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1 !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL              !selects all entities with a single command

!c: transfer line (radiating surfaces)

VSEL,S,,,5           !selects a subset of volumes
ALLSEL,BELOW,VOLU   !selects all entities with a single command
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1 !specifies surface loads on the selected areas
ALLSEL              !selects all entities with a single command

! remove of radiation load from internal common surface (macro by A.
Monetti)

*USE,delete_rad_surface.mac           !calls the macro to remove wrong
radial loads

!-----
-----

!c: thermal initial conditions

TUNIF,T_par           !assigns a uniform temperature to all nodes [°C]

!c: thermal loads

!c: graphite flange temperature constraint

ASEL,S,AREA,,325      !selects a subset of areas
DA,ALL,TEMP,T_par     !defines DOF constraints on areas [°C]

!c: electrical loads

!c: graphite flange voltage constraint

DA,ALL,VOLT,0         !defines DOF constraints on areas [V]

```

```

ALLSEL

!c: power generation - Joule effect / current load for the main clamp
[A]
ASEL,S,AREA,,221,221      !selects a subset of areas
NSLA,S,1                  !selects those nodes associated with the selected
areas
CP,1,VOLT,ALL            !defines (or modifies) a set of coupled degrees
of freedom
ni=ndnext(0)             !c: master node definition
F,ni,AMPS,I_LINE         !specifies force loads at nodes
ALLSEL                    !selects all entities with a single command

!c: OPTIONS

!c: SPACE Temperature definition (open enclosure)
SPCTEMP,1,T_par          !defines a free-space ambient
temperature for radiation using the Radiosity method [°C]

!c: defining Solution Options
STEF,5.67e-8              !specifies Stefan-Boltzmann radiation
constant [W/(m^2*K^4)]
RADOPT,,0.001,0,20000,0.1,0.1 !specifies Gauss-Seidel Radiosity
Solver options
TOFFST,273.15            !specifies the temperature offset
from absolute zero to zero [°C]

!c: defining View Factor Options
HEMIOPT,100              !specifies options for Hemicube
view factor calculation
VFOPT,OFF                !specifies options for view factor
file

FINISH                    !exits normally from a processor

!c: SOLVER
/SOLU                    !enters the solution processor
SOLCONTROL,ON            !specifies whether to use optimized
nonlinear solution defaults !and some enhanced internal solution
algorithms
ANTYPE,TRANS             !specifies the analysis type and restart
status
AUTOTS,ON                !use automatic time stepping
KBC,1                    !specifies stepped or ramped loading
within a load step
DELTIM,0.0001,0.00005,100 !specifies the time step sizes to be used
for this load step
OUTRES,NSOL,ALL         !controls the solution data written to
the database
TIME,5000                !sets the time for a load step
SAVE,,,,,ALL
SOLVE                    !starts a solution
SAVE,,,,,ALL            !saves all current database information
FINISH                    !exits normally from a processor

```

### C.3. APDL per analisi Elettrostatiche

```

!Creazione della geometria per le analisi ELETTROSTATICHE
/FILNAME,SPES PAR,0

```

```

/TITLE,SPES PAR

FINISH
/PREP7

! MAIN PARAMETERS per l'ottimizzazione bisogna aggiungere dei
!parametri relativi alle dimensioni dell'anodo: d,L,alfa,D2
Dis_el=60 ! dimensions in "mm" only for the
!distance "ion source - extracion electrode"
Vanode=150 ! anode voltage in "V"
Vextr=25000 ! extraction voltage in "V"
d=2.5 ! extraction hole diameter in "mm"
!(dmax = 4 mm)
L=4 ! extraction lenght in "mm"
f=1

!
! ELEMENT TYPE
ET,1,SOLID123

!
! MATERIAL PROPERTIES
EMUNIT,MKS !Free-space permittivity is set to 8.85 e-12 F/m
MP,PERX,1,1

!
! GEOMETRY
!

KX1=((0)/1000) ! dimensions in !"m"
KY1=-((0)/1000)

KX2=((0)/1000)
KY2=-((Dis_el+32.866)/1000)

KX3=((13)/1000)
KY3=-((Dis_el+32.866)/1000)

KX4=((13)/1000)
KY4=-((Dis_el+7.866)/1000)

KX5=((12.67)/1000)
KY5=-((Dis_el+7.219)/1000)

KX6=((3.956)/1000)
KY6=-((Dis_el+0.887)/1000)

KX7=((4.379)/1000)
KY7=-((Dis_el)/1000)

KX8=((22.776)/1000)
KY8=-((Dis_el+4.929)/1000)

KX9=((25)/1000)
KY9=-((Dis_el+7.827)/1000)

KX10=((25)/1000)
KY10=-((Dis_el+32.866)/1000)

KX11=((50)/1000)

```

$$KY11 = -((Dis\_el + 32.866) / 1000)$$

$$KX12 = (50) / 1000$$

$$KY12 = -(0) / 1000$$

$$KX13 = (d/2) / 1000$$

$$KY13 = (0) / 1000$$

$$KX14 = (d/2) / 1000$$

$$KY14 = (L) / 1000$$

$$KX15 = (2) / 1000$$

$$KY15 = (L) / 1000$$

$$KX16 = (6) / 1000$$

$$KY16 = (L + 1.7) / 1000$$

$$KX17 = (6) / 1000$$

$$KY17 = (27 - 4 + L) / 1000$$

$$KX18 = (0) / 1000$$

$$KY18 = (27 - 4 + L) / 1000$$

$$KX19 = (0) / 1000$$

$$KY19 = (5.7 - 4 + L) / 1000$$

$$KX20 = (0) / 1000$$

$$KY20 = (L) / 1000$$

K, 1, KX1, KY1

K, 2, KX2, KY2

K, 3, KX3, KY3

K, 4, KX4, KY4

K, 5, KX5, KY5

K, 6, KX6, KY6

K, 7, KX7, KY7

K, 8, KX8, KY8

K, 9, KX9, KY9

K, 10, KX10, KY10

K, 11, KX11, KY11

K, 12, KX12, KY12

K, 13, KX13, KY13

K, 14, KX14, KY14

K, 15, KX15, KY15

K, 16, KX16, KY16

K, 17, KX17, KY17

K, 18, KX18, KY18

K, 19, KX19, KY19

K, 20, KX20, KY20

L, 1, 2

L, 2, 3

L, 3, 4

L, 5, 6

L, 7, 8

L, 9, 10

L, 10, 11

L, 11, 12

L, 12, 13

L, 13, 1

L, 13, 14

```

L,14,15
L,15,16
L,16,17
L,17,18
L,18,19
L,19,20
L,20,1
L,16,19
L,14,20
LARC,4,5,2,(0.8/1000)
LARC,6,7,11,(0.5/1000)
LARC,8,9,2,(3/1000)

LSEL,S,LINE,,1,10,1
LSEL,A,LINE,,21,23,1
AL,ALL
ALLSEL

LSEL,S,LINE,,10,11,1
LSEL,A,LINE,,18,18,1
LSEL,A,LINE,,20,20,1
AL,ALL
ALLSEL

LSEL,S,LINE,,12,13,1
LSEL,A,LINE,,17,17,1
LSEL,A,LINE,,19,20,1
AL,ALL
ALLSEL

LSEL,S,LINE,,14,16,1
LSEL,A,LINE,,19,19,1
AL,ALL
ALLSEL

! refined domain for particle tracing

KX21=KX7
KY21=KY1

KX22=KX6
KY22=KY2

K,21,KX21,KY21
K,22,(KX22*2),KY22

L,7,21
L,6,22

LSBL,9,24,,DELETE,KEEP
LSBL,2,25,,DELETE,KEEP

LSEL,S,,,22,22,1
LSEL,A,,,24,25,1
ASBL,1,ALL
ALLSEL

VROTAT,ALL,,,,,18,2,360,4

!
```

```

! MESHING
!

ESIZE_BEAM=0.0005

VSEL,S,VOLU,,1,3,1
VSEL,A,VOLU,,5,5,1
VSEL,A,VOLU,,7,9,1
VSEL,A,VOLU,,11,11,1
VSEL,A,VOLU,,13,15,1
VSEL,A,VOLU,,17,17,1
VSEL,A,VOLU,,19,21,1
VSEL,A,VOLU,,23,23,1
ESIZE,ESIZE_BEAM/f
VMESH,ALL
ALLSEL

ESIZE_CONTOUR=0.0050

VSEL,S,VOLU,,4,4,1
VSEL,A,VOLU,,6,6,1
VSEL,A,VOLU,,10,10,1
VSEL,A,VOLU,,12,12,1
VSEL,A,VOLU,,16,16,1
VSEL,A,VOLU,,18,18,1
VSEL,A,VOLU,,22,22,1
VSEL,A,VOLU,,24,24,1
ESIZE,ESIZE_CONTOUR/f
VMESH,ALL
ALLSEL

!
! ELECTRIC POTENTIAL
!

ASEL,S,AREA,,19,21
ASEL,A,AREA,,25,25
ASEL,A,AREA,,29,31
ASEL,A,AREA,,48,50
ASEL,A,AREA,,54,54
ASEL,A,AREA,,58,60
ASEL,A,AREA,,77,79
ASEL,A,AREA,,83,83
ASEL,A,AREA,,87,89
ASEL,A,AREA,,103,105
ASEL,A,AREA,,108,108
ASEL,A,AREA,,111,113
DA,ALL,VOLT,-Vextr
ALLSEL

ASEL,S,AREA,,9,9
ASEL,A,AREA,,27,27
ASEL,A,AREA,,33,34
ASEL,A,AREA,,38,38
ASEL,A,AREA,,56,56
ASEL,A,AREA,,62,63
ASEL,A,AREA,,67,67
ASEL,A,AREA,,85,85
ASEL,A,AREA,,91,92
ASEL,A,AREA,,96,96
ASEL,A,AREA,,110,110

```

```

ASEL,A,AREA,,115,116
DA,ALL,VOLT,0
ALLSEL

```

```

ASEL,S,AREA,,12,12
ASEL,A,AREA,,15,16
ASEL,A,AREA,,41,41
ASEL,A,AREA,,44,45
ASEL,A,AREA,,70,70
ASEL,A,AREA,,73,74
ASEL,A,AREA,,98,98
ASEL,A,AREA,,100,101
DA,ALL,VOLT,Vanode
ALLSEL

```

```

!
! SOLUZIONE
!
SAVE,,,,ALL
/SOL
SOLVE
SAVE,,,,ALL
FINISH

```

#### C.4. Elaborazione dei risultati

Vengono ora riportati alcuni codici APDL relativi al *post-processor*. In particolare gli esempi riguardano la definizione di un andamento di temperatura lungo un percorso definito (*path*) e la selezione delle temperature su superfici di interesse. Durante la tesi per l'elaborazione di questi dati si è poi fatto ricorso a Microsoft® Excel.

##### **!Temperatura superficie catodo**

```

/POST1
ALLSEL
ASEL,S,,,45      !seleziona area frontale del catodo
NSLA,S,1        !seleziona nodi contenuti nell'area
PRNSOL,TEMP     !lista delle soluzioni nodali
ALLSEL

```

##### **!Temperatura superficie anodo**

```

/POST1
ALLSEL
ASEL,S,,,89     !seleziona area laterale interna anodo
ASEL,A,,,90
ASEL,A,,,261    !seleziona area posteriore interna anodo
ASEL,A,,,262
ASEL,A,,,299    !seleziona area frontale interna anodo
NSLA,S,1
PRNSOL,TEMP
ALLSEL

```

##### **!Creazione di un path tra due punti temperatura radiale catodo**

```

/POST1
PATH,tcat,2,30,30      !crea path a due punti nvariabili 30 e n
suddivisioni 30
PPATH,1,0,-0.0316,0,0.0006,      !seleziona primo punto path
PPATH,2,0,-0.0316,0,0.006,      !seleziona secondo punto path
PDEF,,TEMP             !definisci variabile da prendere
PLPATH,TEMP            !plotta in un grafico la variabile lungo il path
PRPATH,XG,YG,ZG,TEMP  !fai un listato con le grandezze esaminate

```

##### **!Creazione di un path tra due punti Anodo**



```

/POST1
PATH,tcat,2,30,30      !crea path a due punti nvariabili 30 e n
suddivisioni 30
PPATH,1,0,-0.05606364,0.006,0,      !seleziona primo punto path
ultimi 3 numeri x,y,z
PPATH,2,0,-0.0346,0.006,0      !seleziona secondo punto path
PDEF,,TEMP      !definisci variabile da prendere
PLPATH,TEMP      !plotta in un grafico la variabile lungo il path
PRPATH,XG,YG,ZG,TEMP

```

**!Creazione di un path tra due punti temperature sistema di supporto**

```

/POST1
PATH,tcat,6,30,30      !crea path a due punti nvariabili 30 e n
suddivisioni 30
PPATH,1,0,0.006,0.016,0,      !seleziona primo punto path
PPATH,2,0,-0.039,0.016,0,      !seleziona secondo punto path
PPATH,3,0,-0.039,0.0175,0,      !seleziona terzo punto path
PPATH,4,0,-0.0555,0.0175,0,      !seleziona quarto punto path
PPATH,5,0,-0.0555,0.0185,0,      !seleziona quinto punto path
PPATH,6,0,-0.059,0.0185,0,      !seleziona sesto punto path
PDEF,,TEMP      !definisci variabile da prendere
PLPATH,TEMP      !plotta in un grafico la variabile lungo il path
PRPATH,XG,YG,ZG,TEMP      !fai un listato con le grandezze esaminate

```

**!Ciclo DO per la generazione delle particelle del particle tracing, distribuzione di tipo Cartesiano**

```

FINISH      !exits normally from a processor
/POST1      !enters the database results postprocessor

```

**! LOCATION OF THE DIAGNOSTIC SECTION**

```

DIAG_Y=-0.9286600E-01      !Y coordinate of the domain final section in the
direction of the beam (considered as a diagnostic !section)

```

**! PARTICLE TRACING (single particle study and DO loop for multi-particle)**

```

charge=1.6022e-19 !particle charge [C]
m=6.6E-26      !particle mass [kg]
PI=3.1415926535      !pi greco value [/]

```

```

PR_NUM=1      !particle counter initialization
PR_LOST=0      !particles lost in the domain boundaries during the
extraction procedure
PR_DIAG=0      !particles reaching the DIAGNOSTIC SECTION during
the extraction procedure

```

```

*CFOPEN,TRACDATA_TOT,txt,,APPEND      !file containing information of the
total amount of particles

```

```

*VWRITE,'PR_NUM','X[m]','Y[m]','Z[m]','S[m]','T[s]','VX[m/s]','VY[m/s]','
VZ[m/s]','VS[m/s]'

```

```

(A,8x,A,8x,A,8x,A,8x,A,8x,A,8x,A,8x,A,8x,A,8x,A)

```

```

*CFCLOSE

```

```

*CFOPEN,IN_POINTS_TOT,txt,,APPEND      !file containing information on the
initial positions of the particles

```

```

*VWRITE,'PR_NUM','X_IN[m]','Y_IN[m]','Z_IN[m]'

```

```

(A,8x,A,8x,A,8x,A)

```

```

*CFCLOSE

```

```

*CFOPEN,TRACDATA_DIAG,txt,,APPEND      !file containing information only of
the particles reaching the DIAGNOSTIC SECTION

```

```

*VWRITE, 'PR_NUM', 'X[m]', 'Y[m]', 'Z[m]', 'S[m]', 'T[s]', 'VX[m/s]', 'VY[m/s]', '
VZ[m/s]', 'VS[m/s]'
(A, 8x, A, 8x, A, 8x, A, 8x, A, 8x, A, 8x, A, 8x, A, 8x, A, 8x, A)
*CFCLOS

*CFOPEN, IN_POINTS_DIAG, txt, , APPEND !file containing information on the
initial positions of the particles
*VWRITE, 'PR_NUM', 'X_IN[m]', 'Y_IN[m]', 'Z_IN[m]'
(A, 8x, A, 8x, A, 8x, A)
*CFCLOS

Y_IN=0.0058           !initial Y coordinate
Deff=0.0162          !final Y coordinate
h=0.0005             !passo di generazione particelle
D_Y=((Deff-Y_IN)/h)+1 !Iterazione finale ciclo DO lungo Y
*DO, I, 1, D_Y, 1     !Inizia ciclo DO per Y

r=0.006              !raggio dell'anodo

X=-r                 !coordinata di partenza per X
D_X=(2*r/h)+1        ! Iterazione finale ciclo DO lungo X

*DO, J, 1, D_X, 1

D_Z=(2*r/h)+1        ! Iterazione finale ciclo DO lungo Z

Z=-r-h               !reference axis position

*DO, K, 1, D_Z, 1

Z=Z+h                !mi riporto alle coordinate (X,Z)=(-r,-r)

X_IN=X               !initial X coordinate
Z_IN=Z               !initial Z coordinate
VX_IN=0              !initial X velocity
VY_IN=0              !initial Y velocity
VZ_IN=0              !initial Z velocity

*IF, Z_IN**2+X_IN**2, GE, r**2, CYCLE

TRPOIN, X_IN, Y_IN, Z_IN, VX_IN, VY_IN, VZ_IN, charge, m

PLTRAC, ELEC, VOLT, , 1, TRAC, 1000, 1e-008, , 1, 1

! NB: dopo la quarta virgola si indica il numero di punti per cui si
vuole salvare i dati del particle tracing in posizione e velocità
! Il nome TRAC è un nome scelto dall'utente (ma potrebbe essere anche
TRAC_1, TR_PART, ...) e viene usato per la nomina automatica da parte
di ANSYS degli array
! generati con il particle tracing, con suffissi "DATA", "LABL",
"POIN", che vengono nominati di conseguenza come "TRACDATA",
"TRACLABL", "TRACPOIN".
! L'array di maggiore interesse è TRACDATA, che con l'indice di riga
scorre i punti della traiettoria del singolo punto, mentre con
l'indice di colonna scorre i seguenti parametri:
! | (1) X      | (2) Y      | (3) Z      | (4) S      | (5) T_TRACE | (6)
VX_TRACE     | (7) VY_TRACE | (8) VZ_TRACE | (9) VS_TRACE

*get, NPTS, PARM, TRACPOIN, DIM, X ! fix NPTS as the row index of
the last point of the trace

```

```

        PR_X=TRACDATA(NPTS,1)!particle trace X coordinate (at
final position)
        PR_Y=TRACDATA(NPTS,2)           !particle trace Y
coordinate (at final position)
        PR_Z=TRACDATA(NPTS,3)           !particle trace Z
coordinate (at final position)
        PR_S=TRACDATA(NPTS,4)           !particle trace S
coordinate (at final position)
        PR_T=TRACDATA(NPTS,5)           !particle trace TIME (at
final position)
        PR_VX=TRACDATA(NPTS,6)          !particle trace VELOCITY
along X (at final position)
        PR_VY=TRACDATA(NPTS,7)          !particle trace VELOCITY
along Y (at final position)
        PR_VZ=TRACDATA(NPTS,8)          !particle trace VELOCITY
along Z (at final position)
        PR_VS=TRACDATA(NPTS,9)          !particle trace VELOCITY
along S (at final position)

*CFOPEN,TRACDATA_TOT,txt,,APPEND !file containing information of the
total amount of particles
*VWRITE,PR_NUM,PR_X,PR_Y,PR_Z,PR_S,PR_T,PR_VX,PR_VY,PR_VZ,PR_VS
(f7.0,9x,e11.4,4x,e11.4,5x,e11.4,5x,e11.4,5x,e11.4,5x,f11.4,6x,f13.4,2x,f
11.4,7x,f11.4)
*CFCLOS

*CFOPEN,IN_POINTS_TOT,txt,,APPEND !file containing information on the
initial positions of the particles
*VWRITE,PR_NUM,X_IN,Y_IN,Z_IN
(f7.0,9x,e11.4,4x,e11.4,5x,e11.4)
*CFCLOS

!-----
-----
*IF,PR_Y,EQ,DIAG_Y,THEN

*CFOPEN,TRACDATA_DIAG,txt,,APPEND !file containing information only of
the particles reaching the DIAGNOSTIC SECTION
*VWRITE,PR_NUM,PR_X,PR_Y,PR_Z,PR_S,PR_T,PR_VX,PR_VY,PR_VZ,PR_VS
(f7.0,9x,e11.4,4x,e11.4,5x,e11.4,5x,e11.4,5x,e11.4,5x,f11.4,6x,f13.4,2x,f
11.4,7x,f11.4)
*CFCLOS

*CFOPEN,IN_POINTS_DIAG,txt,,APPEND !file containing information on the
initial positions of the particles
*VWRITE,PR_NUM,X_IN,Y_IN,Z_IN
(f7.0,9x,e11.4,4x,e11.4,5x,e11.4)
*CFCLOS

        PR_DIAG=PR_DIAG+1

*ELSE

        PR_LOST=PR_LOST+1

*ENDIF
!-----
-----

        PR_NUM=PR_NUM+1

```

```

TRPDEL,ALL

*ENDDO

X=X+h
*ENDDO

EXTR_EFF=PR_DIAG/(PR_DIAG+PR_LOST) !calcola efficienza di estrazione

*CFOPEN,GENERAL_RESULTS,txt,, !file containing information only of the
particles reaching the DIAGNOSTIC SECTION
*VWRITE,'PR_NUM' ! total number of generated particles
(A)
*VWRITE,PR_NUM
(f7.0)
*VWRITE,'PR_DIAG' ! total number of particles reaching the DIAGNOSTIC
SECTION during the extraction procedure
(A)
*VWRITE,PR_DIAG
(f7.0)
*VWRITE,'PR_LOST' ! total number of particles lost in the domain boundaries
during the extraction procedure
(A)
*VWRITE,PR_LOST
(f7.0)
*VWRITE,'EXTR_EFF' ! extraction efficiency
(A)
*VWRITE,EXTR_EFF
(f7.4)
*CFCLOS

Y_IN=Y_IN+h
*ENDDO

```

## **APPENDICE D.**

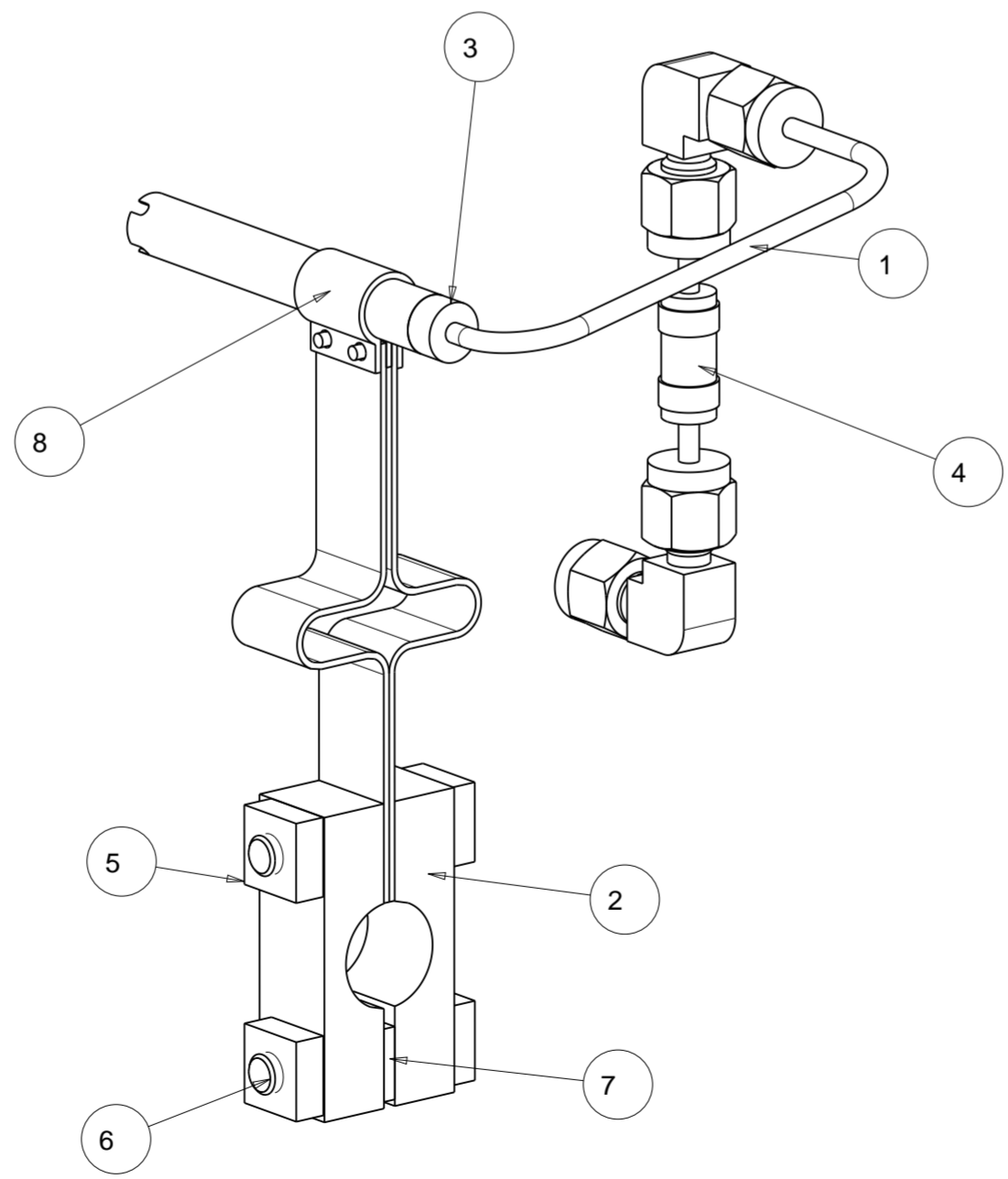
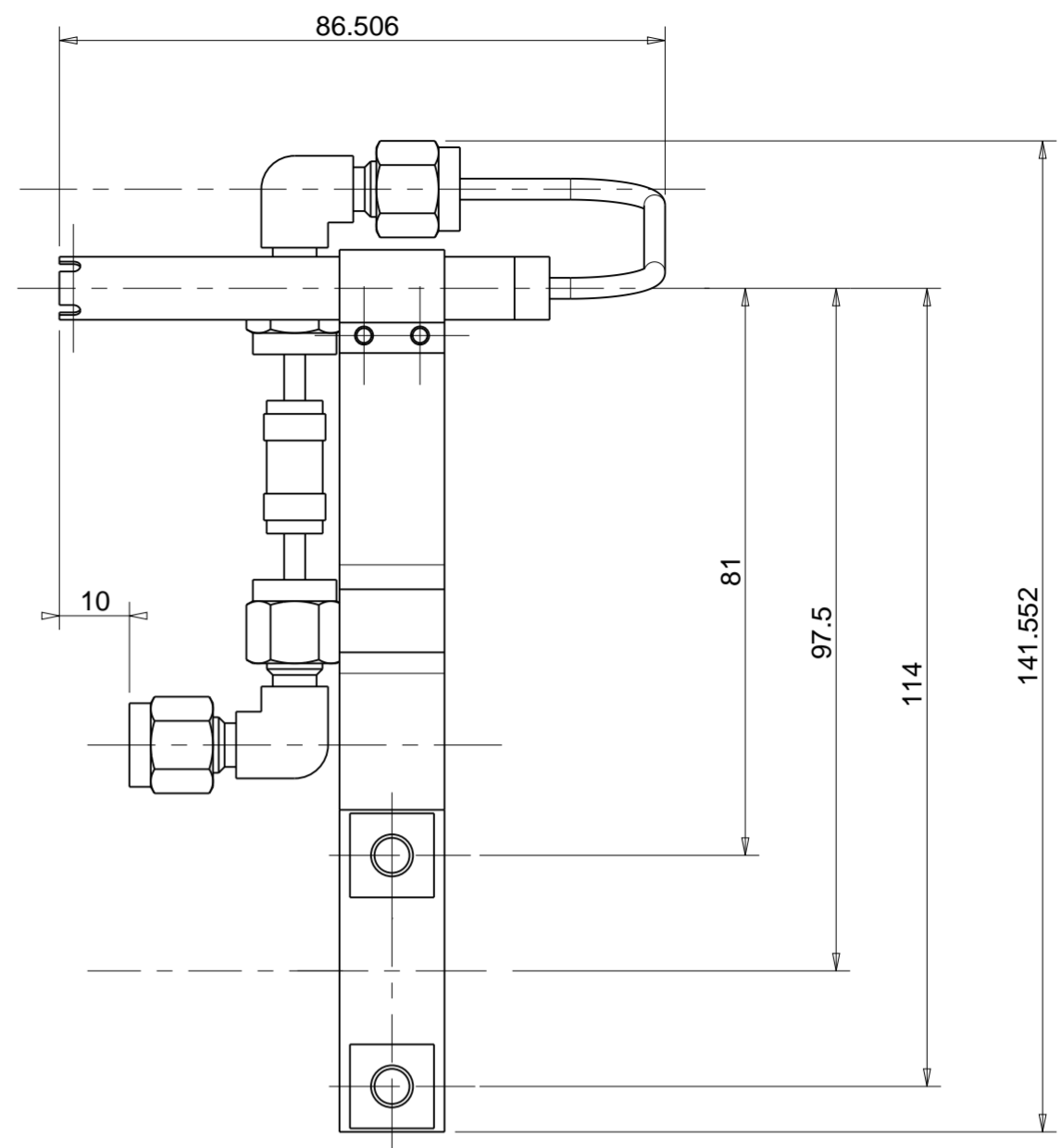
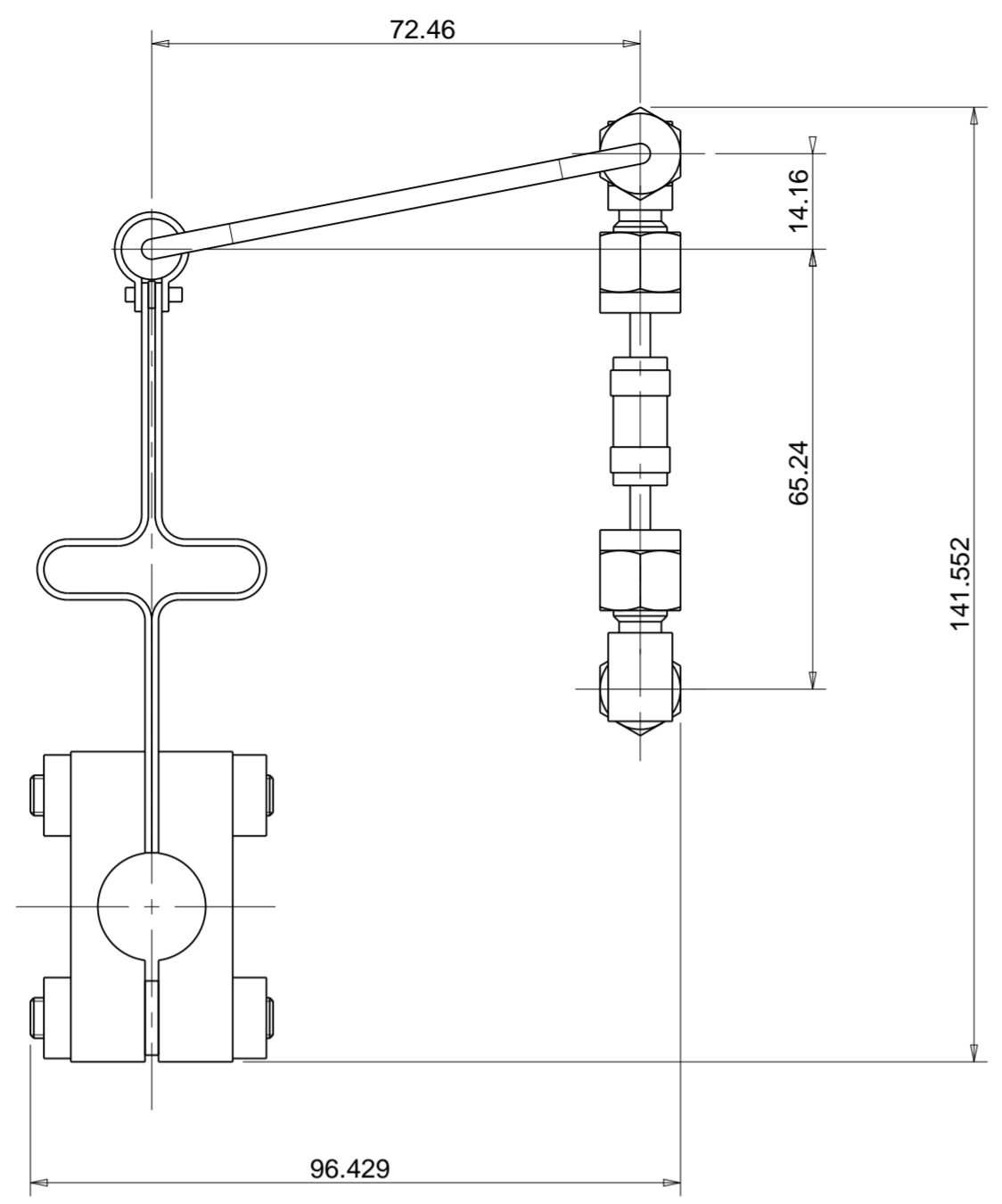
### **DISEGNI TECNICI DEI COMPONENTI PROGETTATI**

#### **D.1. Introduzione**

Nella seguente Appendice saranno presentati i disegni tecnici dei vari componenti progettati ed utilizzati durante le prove sulla sorgente al plasma.

In particolare si possono osservare le tavole relative al nuovo sistema di supporto (ST\_PIS\_04) ai nuovi puntali di centraggio (ST\_PIS\_05) e alla nuova versione di sorgente contenente i miglioramenti descritti nel Capitolo 3 (ST\_PIS). Vengono anche mostrate le tavole dei componenti ausiliari utilizzati per effettuare i test e riprogettati per l'occasione (AC\_0005). Inoltre verranno presentate anche le tavole relative ad alcune proposte di miglioramento per l'esecuzione dei test.

UNI-EN 22768/2-mK	Tolerances for linear and angular	
individual tolerance indicators	mechanical drawings	technical designs
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3
± 0.5	± 0.5	± 0.5



Nota: Gli attacchi degli isolatori (CABURN CYB3-SW) devono essere ridotti ad un diametro minore o uguale a 3,13 mm per un tratto di almeno 10 mm. Si consiglia l'utilizzo di carta vetrata per la rimozione del materiale in eccesso.

Pos.	Drawing N.°	Description	Qty	Material
8	AC_0005_01	Transfer Line	1	
7	AC_0005_006	Thickness	1	MO
6	AC_0005_004	Tantalum screw	2	TA
5	AC_0005_005	Rectangular nut	4	MO
4	AC_0007	Plasma Ionization Test Assembly	1	
3	AC_0005_001	Ion Source Test- Tantalum bush	1	TA
2	AC_0005_003	Ion Source Test - Clamp	2	CU_ETP
1	AC_0005_002	Gas tube	1	TA

Designed by <b>Mattia Manzolaro</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 16-06-2015	Description <b>Plasma Ionizzazione Test - Assembly</b>
		Material
		Gen. surf. finish
Treatment	Scale 1:1	Mass [kg] 0.00
Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>AC_0005</b>	Frm. <b>A2</b>
		Rev. <b>0</b>

1

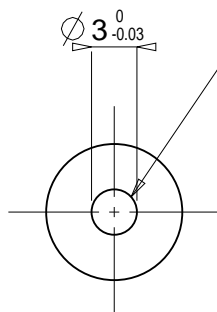
2

3

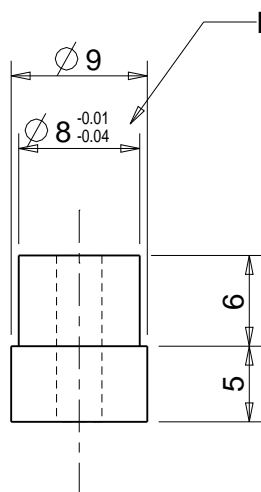
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

B

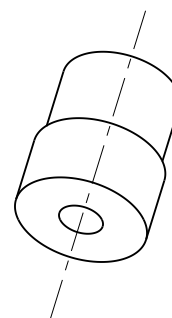
A



Da accoppiare con AC\_0005\_002





Da accoppiare con AC\_0005\_01\_001



C

B

A

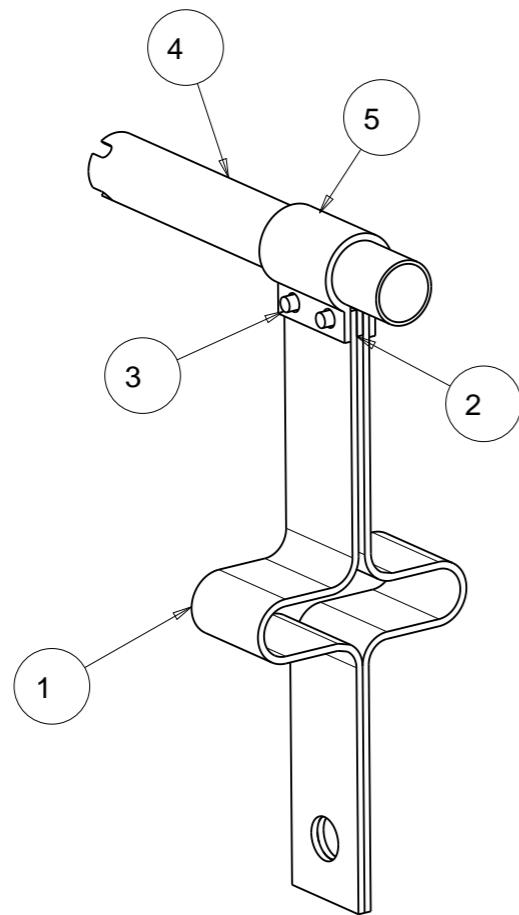
Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 12-06-2015	Description <b>Ion Source Test- Tantalum bush</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment	Scale 2:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>AC_0005_001</b>
		Rev. <b>0</b>

1

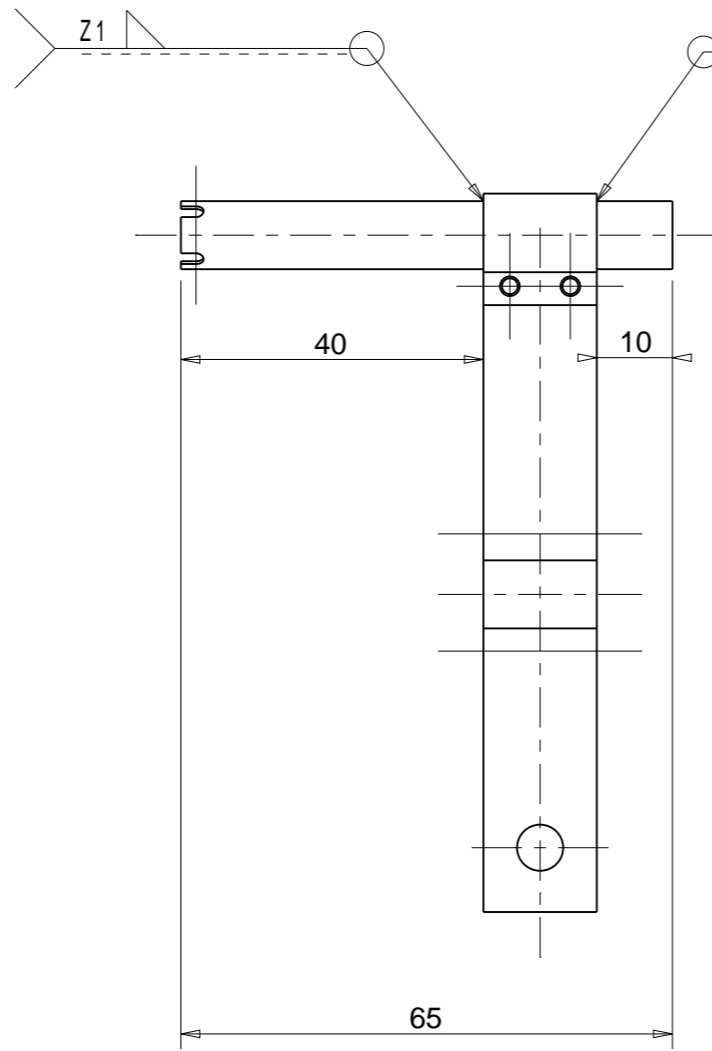
2

3

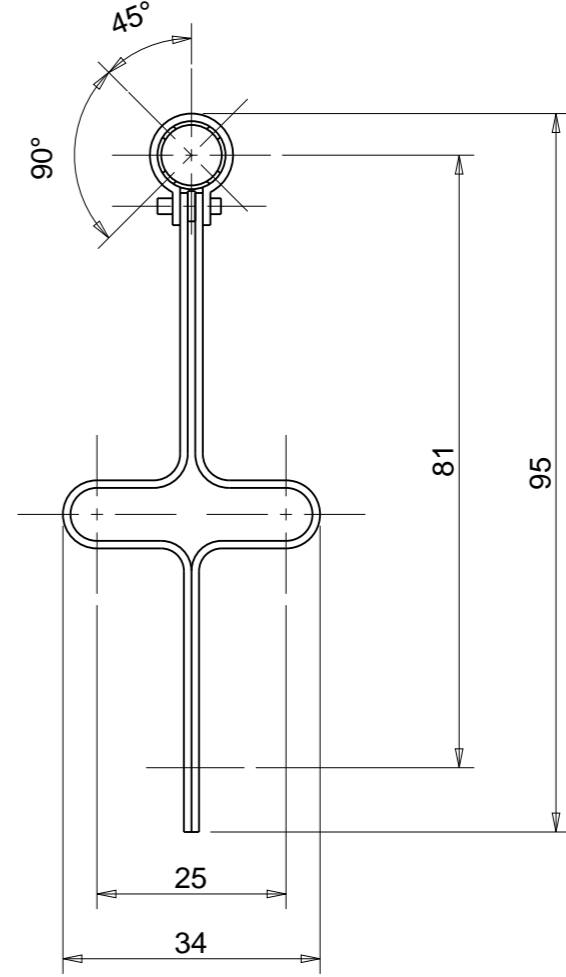
UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indicators "mechanical designs"	
$\leq 6$	$\pm 0.1$
$> 6 \leq 30$	$\pm 0.2$
$> 30 \leq 120$	$\pm 0.3$
$> 120$	$\pm 0.5$
	$\pm 2$



Circumferential welding




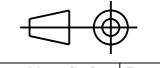
Circumferential welding



5	AC_0005_01_002	Transfer line support	1	TA
4	AC_0005_01_001	Transfer line	1	TA
3	AC_0005_01_005	Pin	2	TA
2	AC_0005_01_003	Ion Source Test - Thickness	1	TA
1	AC_0005_01_004	Electrical connection	2	TA
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

Designed by: <b>Mattia Manzolaro</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
---	-----------	------------------------

Drawn by: <b>Fabio Visentin</b>	Date 21/09/2015	Description <b>Transfer Line</b>
------------------------------------	--------------------	-------------------------------------

 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material	Gen. surf. finish	
	Treatment	Scale 1:1	
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Drawing N° AC_0005_01	Frm. <b>A3</b>

1

2

3

4

5

6

C

B

A

1

2

3

4

5

6

D

C

B

A

A3



UNI-EN 22768(1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs")				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

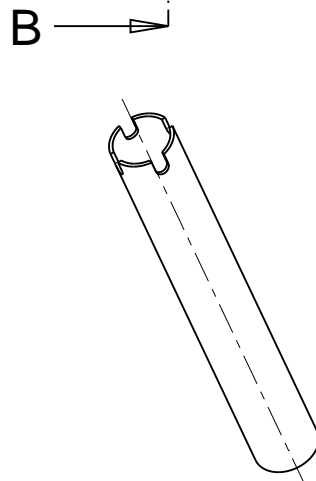
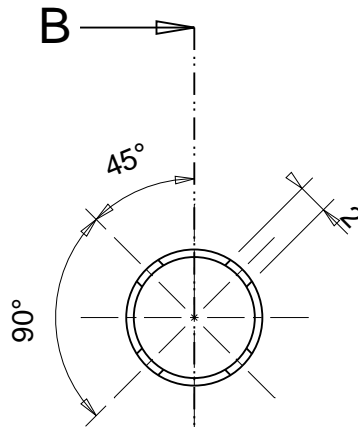
1

2

3

A

B



SCALE 1:1

Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>		
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 23/06/2015	Description <b>Transfer line</b>		
		Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 0.8	
		Treatment	Scale 2:1	
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Draft code: <b>AC_0005_01_001</b>
				Rev. <b>0</b>

A

B

C

1

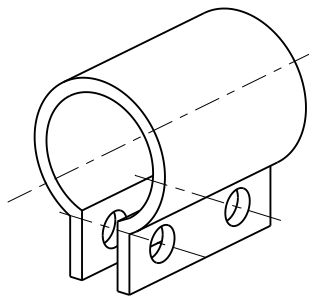
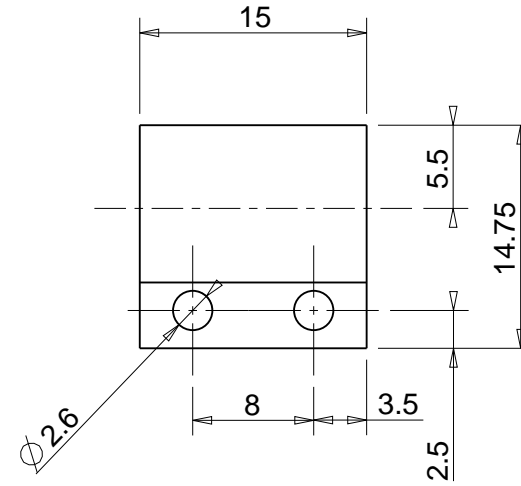
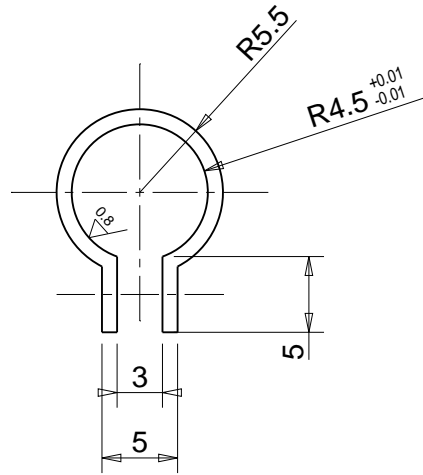
2


3

UNI-EN 22768(1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs")				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B



Designed by <b>Mattia Manzolaro</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 23/06/2015	Description <b>Transfer line support</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 2:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
Draft code: <b>AC_0005_01_002</b>		Rev. <b>0</b>

A

B

C

1

2

3

1

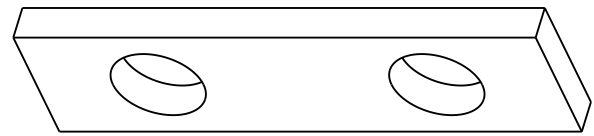
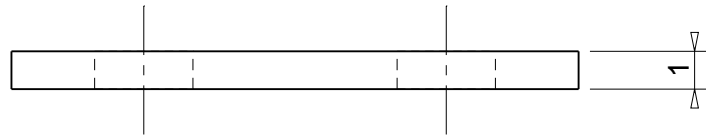
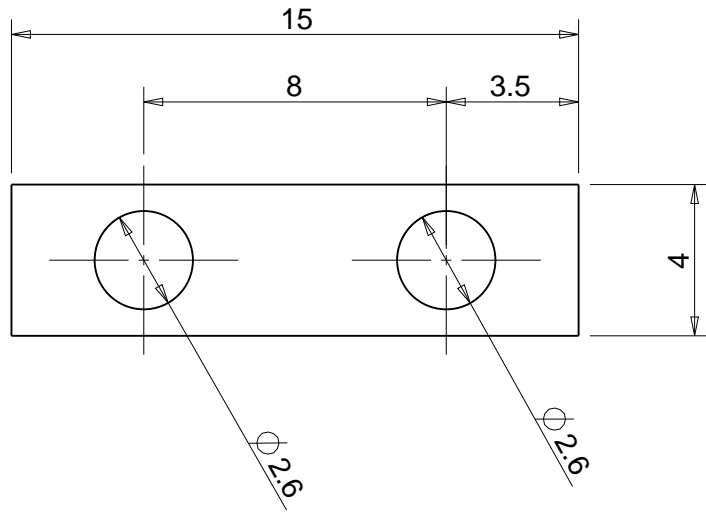
2

3

UNI-EN 22768/2-m: Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

B

A





SCALE 5:1

C

B

A

Designed by <b>Mattia Manziolo</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 16-06-2015	Description <b>Ion Source Test - Thickness</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>AC_0005_01_003</b>
		Rev. <b>0</b>

1

2

3

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

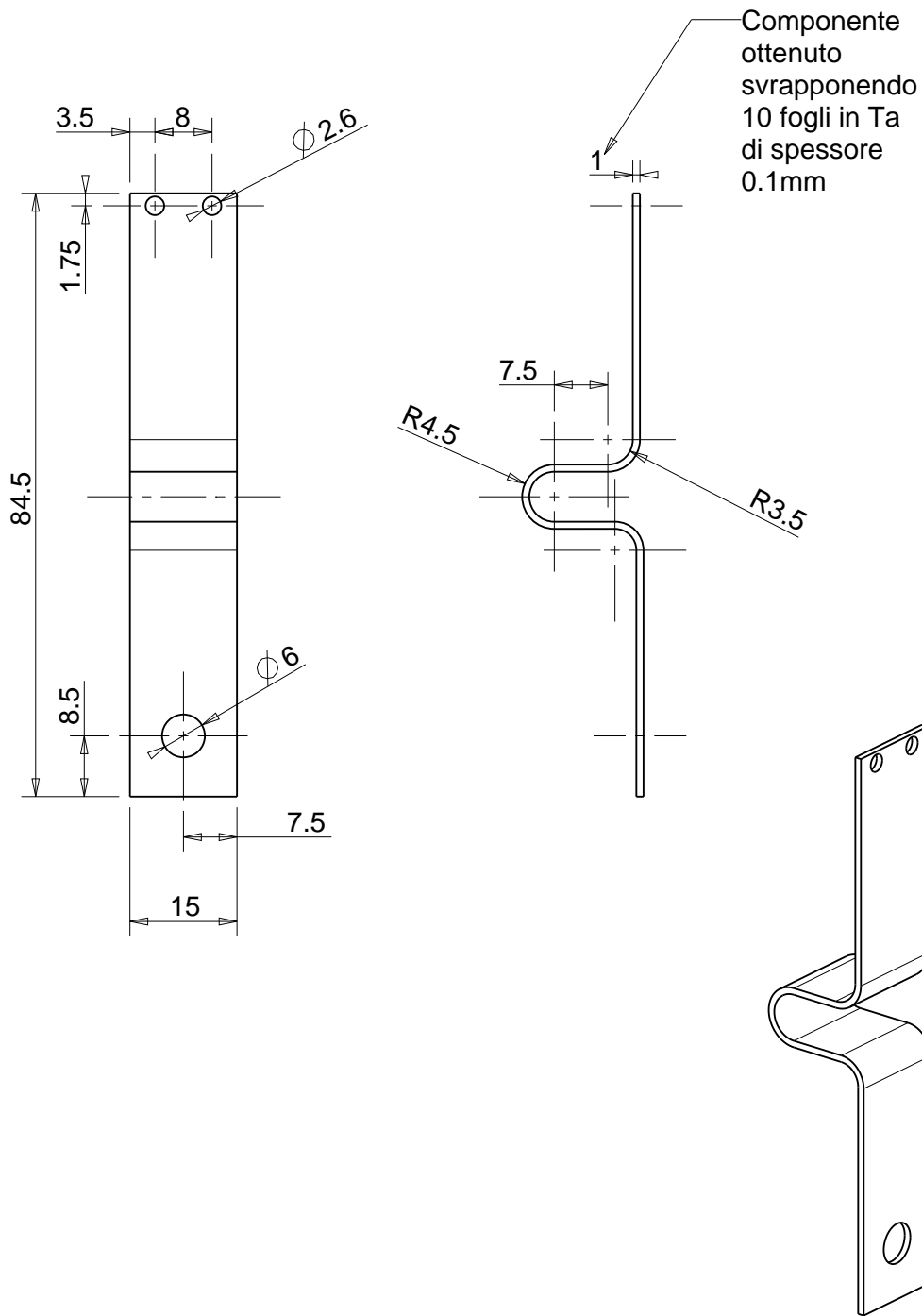
B

A

1

2



3



C

B

A

Designed by <b>Mattia Manziolo</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 23/06/2015	Description <b>Electrical connection</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 1:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>AC_0005_01_004</b>
		Mass [kg] 0.01
		Frm. <b>A4</b>
		Rev. 0

1

2

3

UNI-EN 22768(1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs")				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B

1

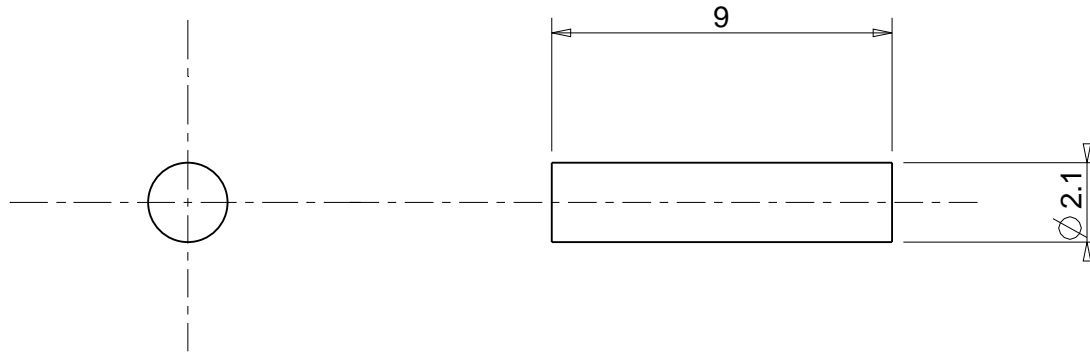
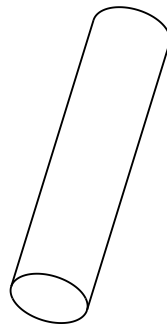
1



2

2

3

3



Designed by <b>Mattia Manzolaro</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 23/06/2015	Description <b>Pin</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>AC_0005_01_005</b>
		Rev. <b>0</b>

A

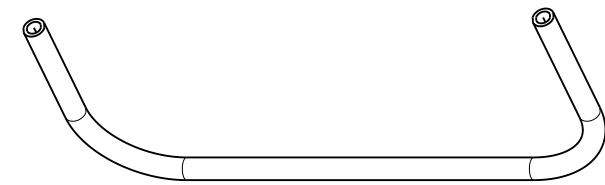
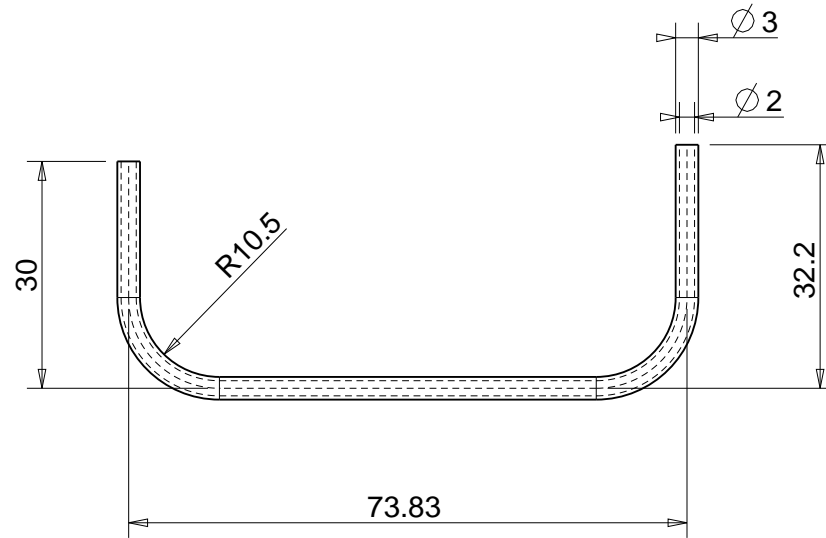
B

C

UNI-EN 22768(1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B



Designed by <b>Mattia Manzolaro</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 23/06/2015	Description <b>Gas tube</b>
	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 1:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>AC_0005_002</b>
		Rev. <b>0</b>

A

B

C

1

1

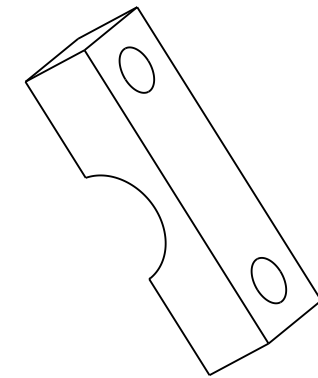
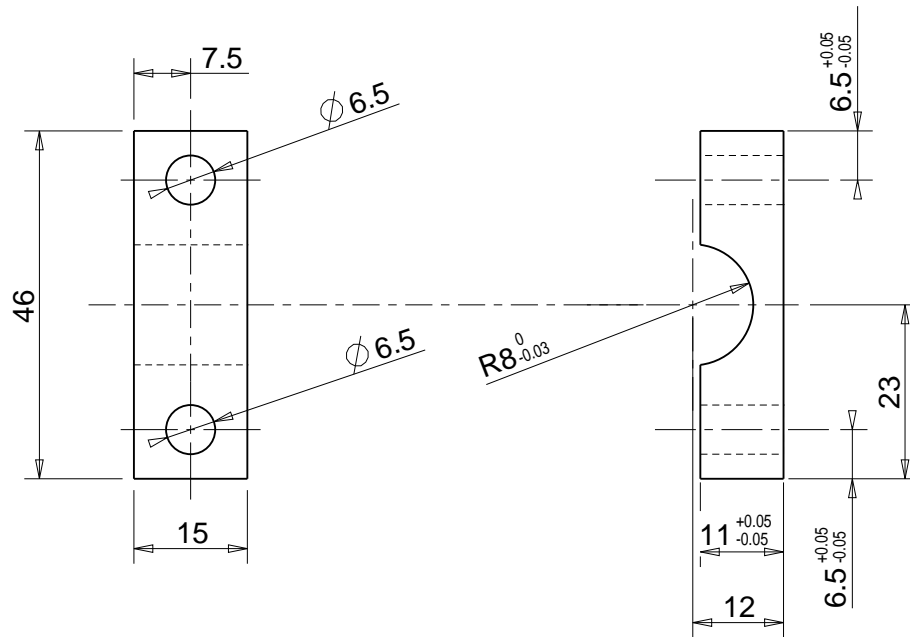
2

2

3

3

UNI-EN 22768(1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs")				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°



SCALE 1:1

Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 12-06-2015	Description <b>Ion Source Test - Clamp</b>
<b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>CU_ETP</b>	Gen. surf. finish 0.8
	Treatment	Scale 1:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.05
Draft code: <b>AC_0005_003</b>		Frm. <b>A4</b>
		Rev. <b>0</b>

A

B

C

1

2

3

1

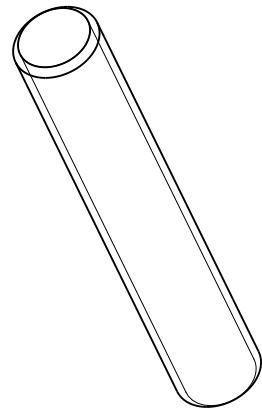
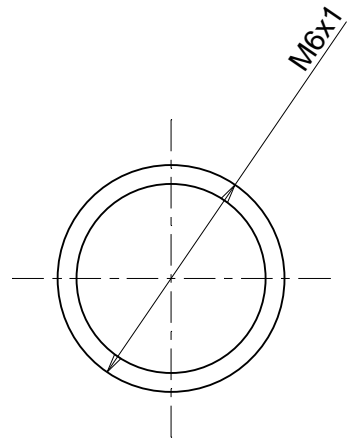
2

3

UNI-EN 22768(1)-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B



SCALA 2:1

Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 10/10/2015	Description <b>Tantalum screw</b>
	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.01
		Draft code: <b>AC_0005_004</b>
		Rev. <b>0</b>

A

B

C

1

1

2

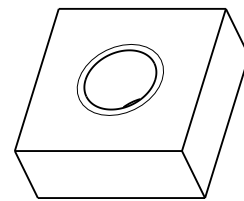
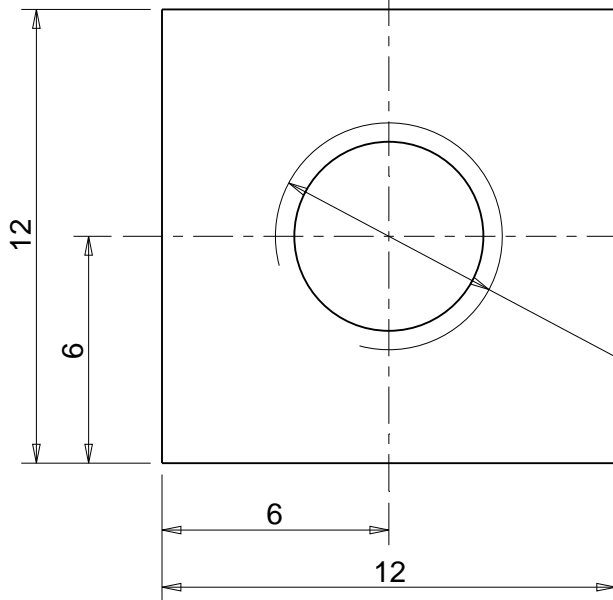
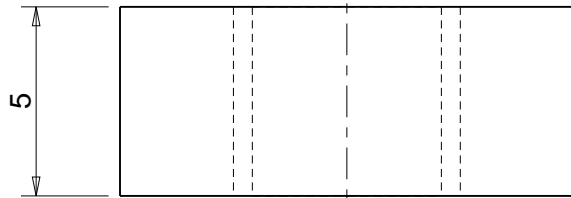
2

3

3





UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



SCALA 2:1

M6x1

Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 10/10/2015	Description <b>Rectangular nut</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>MO</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.01
		Draft code: <b>AC_0005_005</b>
		Rev. 0

1

2

3

B

A

C

B

A

1

2

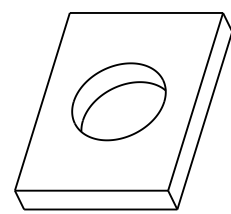
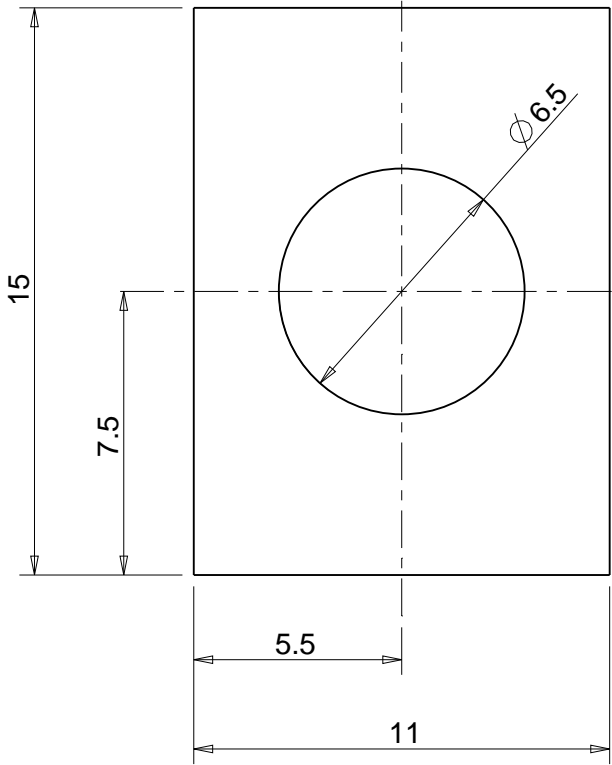
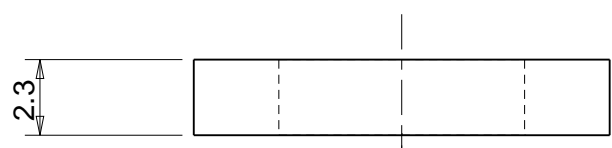
3

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <= 30	>30 <= 120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

B

A

1 2 3





SCALA 2:1

C

B

A

Designed by <b>Fabio Visentin</b>		Signature		Project <b>SPES</b>		
Draft by <b>Fabio Visentin</b>		Date 10/10/2015		Description <b>Thickness</b>		
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro		Material <b>MO</b>		Gen. surf. finish 		
		Treatment		Scale 5:1		Mass [kg] 0.00
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Draft code: <b>AC_0005_006</b>		Frm. <b>A4</b>
				Rev. 0		

1 2 3

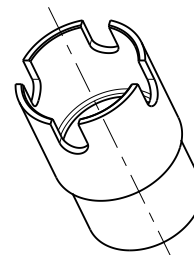
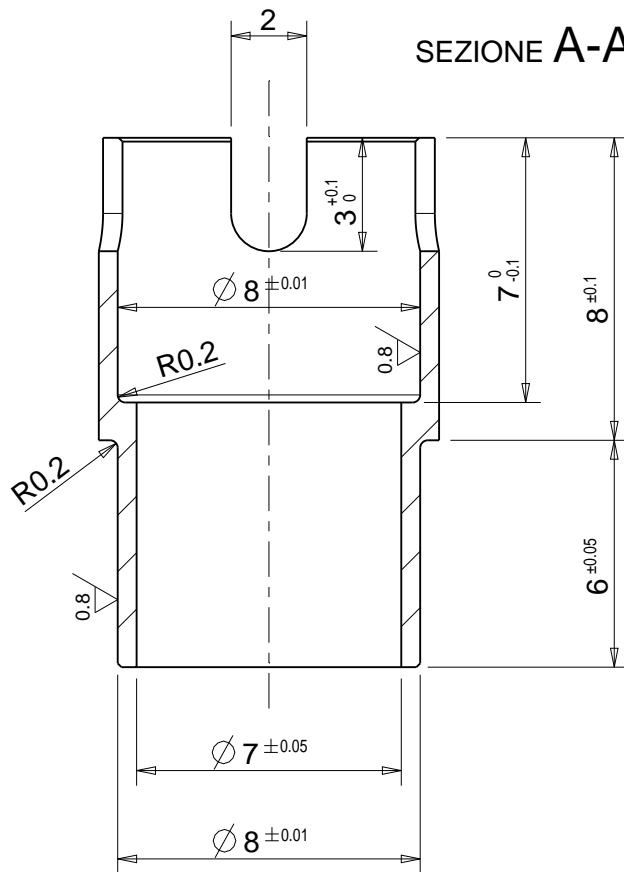
UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

1

2

3

## SEZIONE A-A



SCALA 2:1

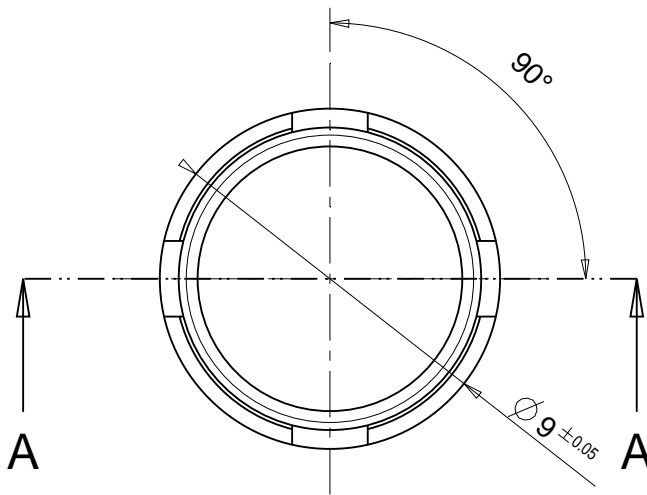
B

A



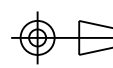
C

B

A



Smussi non quotati 0.1x45°

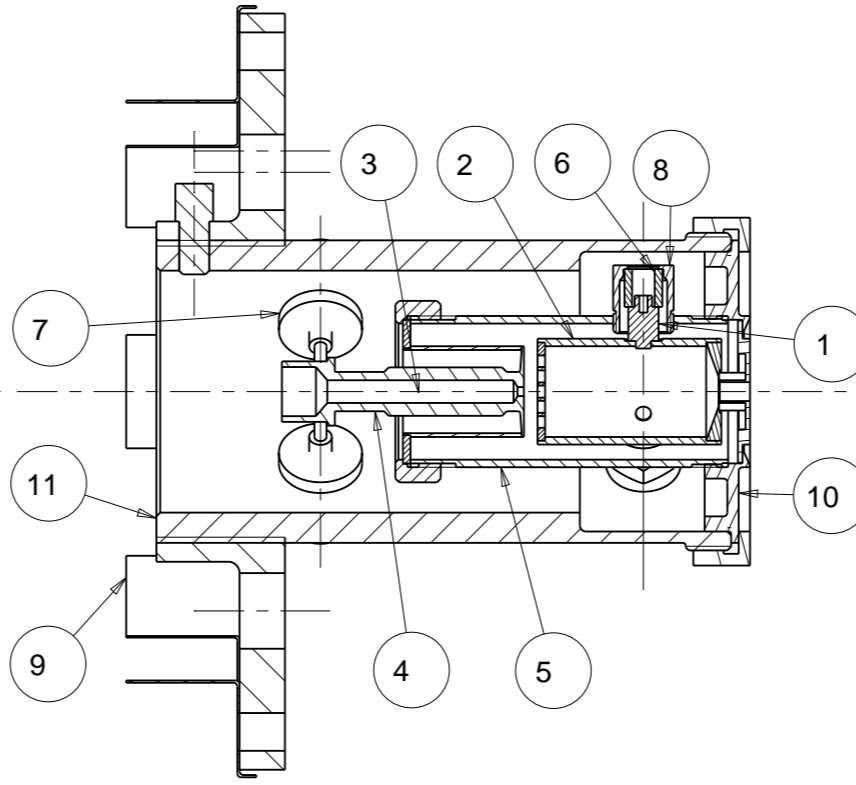
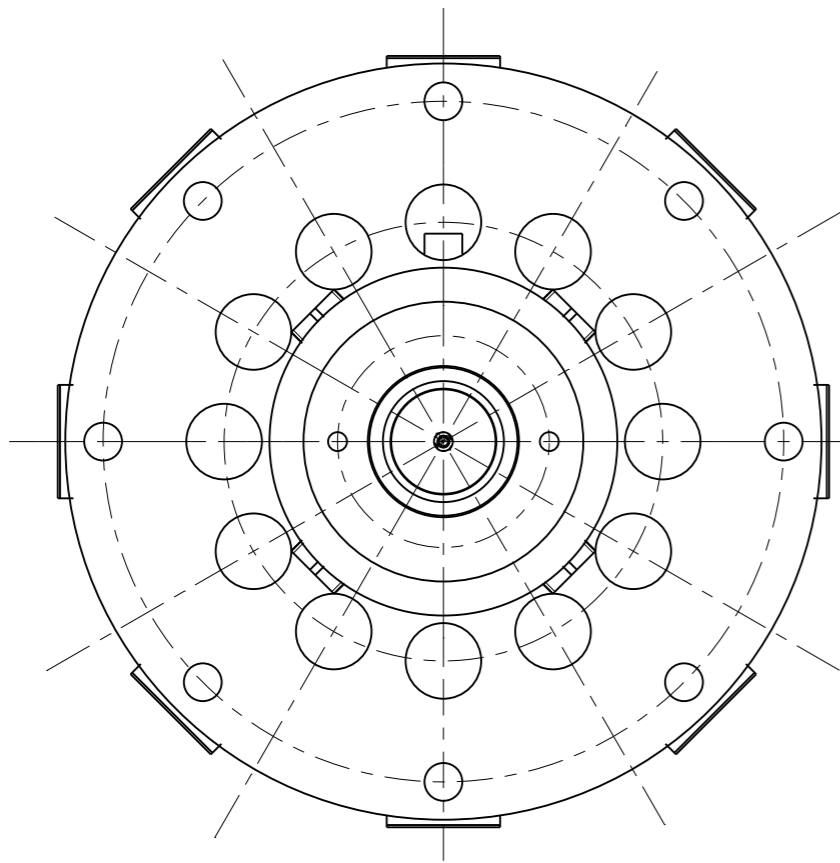
Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 22/10/2015	Description <b>Cathode adapter</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>Mo</b>	Gen. surf. finish 3.2 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>AC_0005_007</b>
		 Mass [kg]    Frm. <b>A4</b> Rev. <b>revisione</b>

1

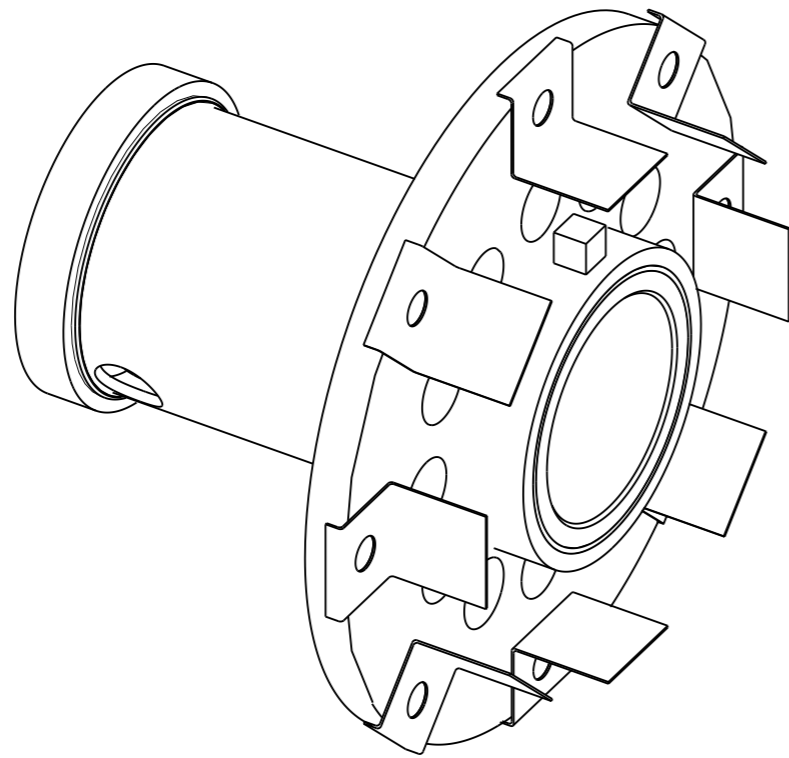
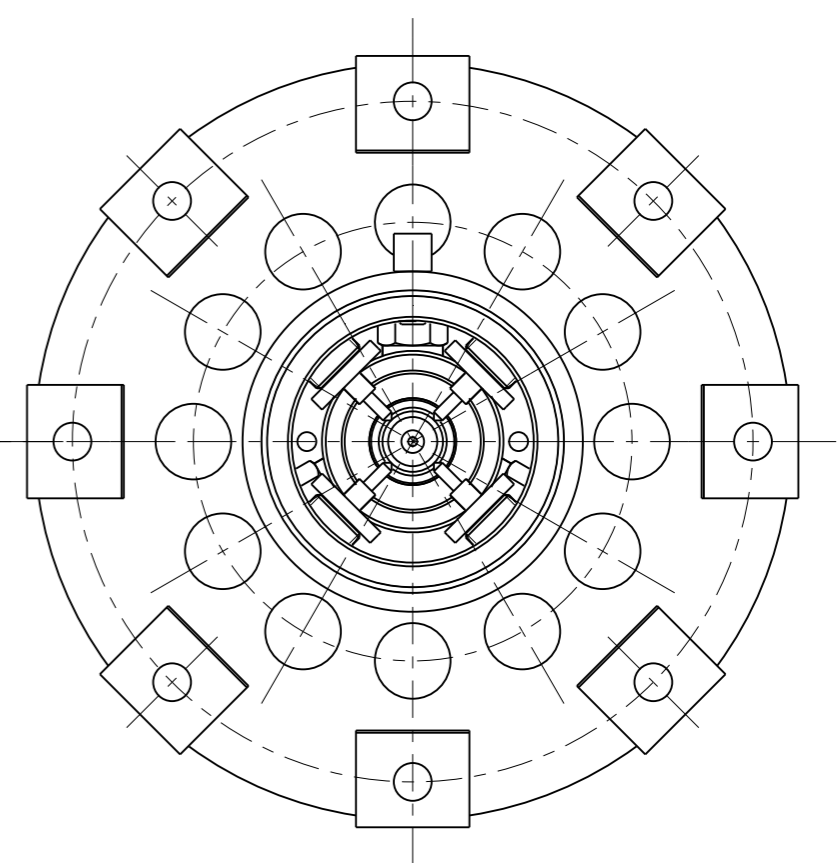
2

3


UNI-EN 22768/2-mk Tolerances for linear and angular individual tolerance indicators mechanical designs			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



SEZIONE A-A  
SCALA 1:1

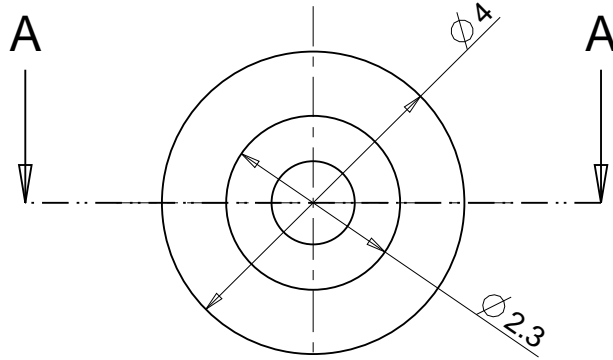


11	ST_PIS_04	Sistema di supporto	1	
10	ST_PIS_03	Sistema di estrazione	1	
9	ST_PIS_007	Screw cover	8	TA
8	ST_PIS_003	Retainer Nut	3	MO
7	ST_PIS_05	Puntali	4	
6	ST_PIS_002	Isolatore	3	AL203
5	ST_PIS_004	Discharge Chamber	1	TA
4	ST_PIS_01	Catodo ottimizzato per sorgente di ionizzazione al plasma	1	
3	ST_PIS_005	Cathode support nut	1	TA
2	ST_PIS_02	Camera di anodo	1	
1	ST_PIS_001	Anode support pin	3	MO
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

Designed by: Fabio Visentin	Signature	Project <b>SPES</b>
Drawn by: Fabio Visentin	Date 22/09/2015	Description <b>Plasma Ion Source</b>
Material		Gen. surf. finish <input checked="" type="checkbox"/>
Treatment		Scale 1:1
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro		Mass [kg] 0.00
Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mk		Drawing N° <b>ST_PIS</b>
		Frm. <b>A3</b>
		Rev. 0

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

1 | 2 | 3

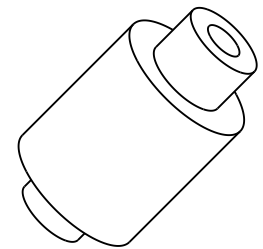
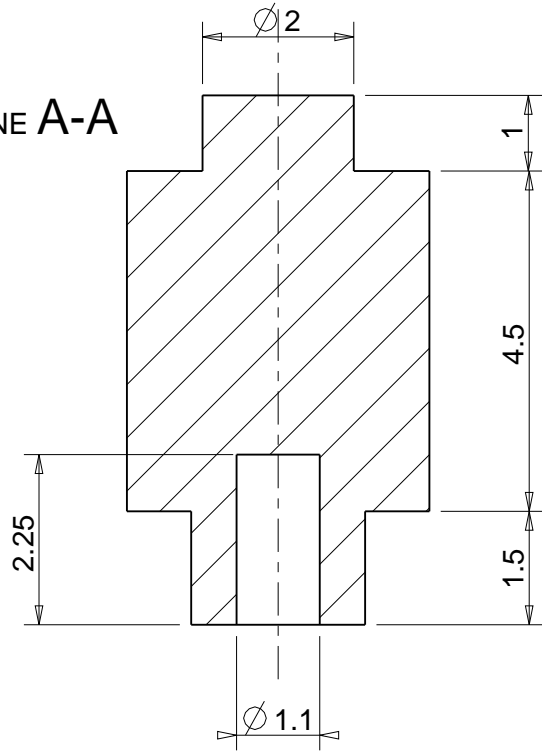


C



B

A

SEZIONE A-A

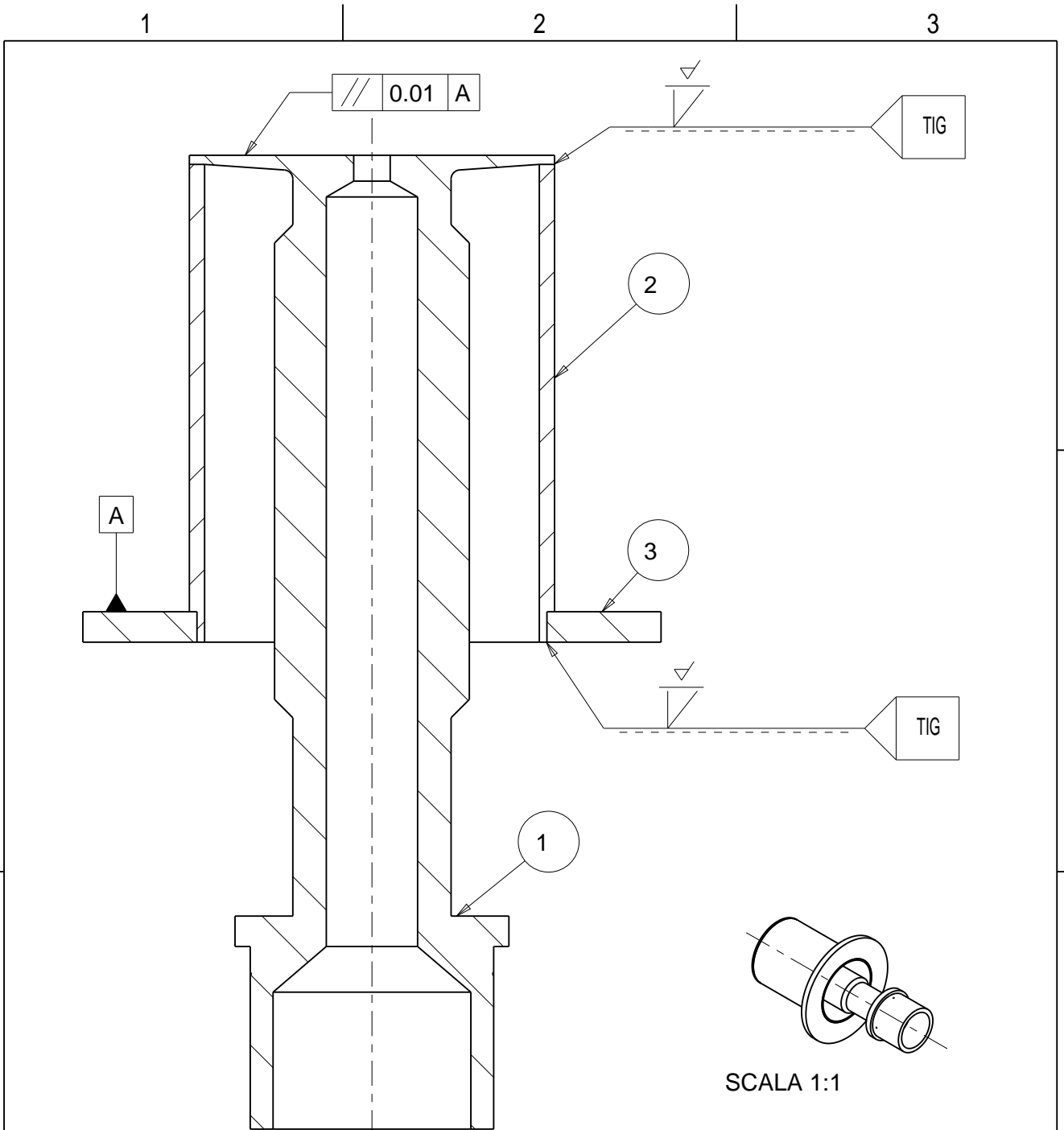


SCALA 5:1

Designed by <b>CERN</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 13/05/2010	Description <b>Anode support pin</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>MO</b>	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment <b>FALSO</b>	Scale 10:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>ST_PIS_001</b>
		Mass [kg] 0.00
		Frm. <b>A4</b>
		Rev. 0


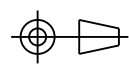
1 | 2 | 3

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
± 2°			



SEZIONE A-A  
SCALA 5:1

3	ST_PIS_01_003	Flangia di sostegno	1	TA
2	ST_PIS_01_002	Collare di sostegno	1	TA
1	ST_PIS_01_001	Cathode main body	1	TA
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

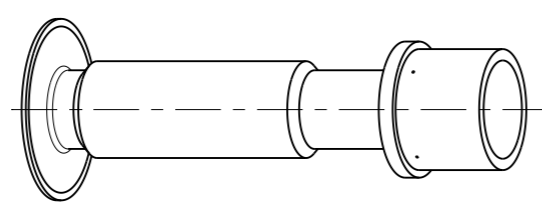
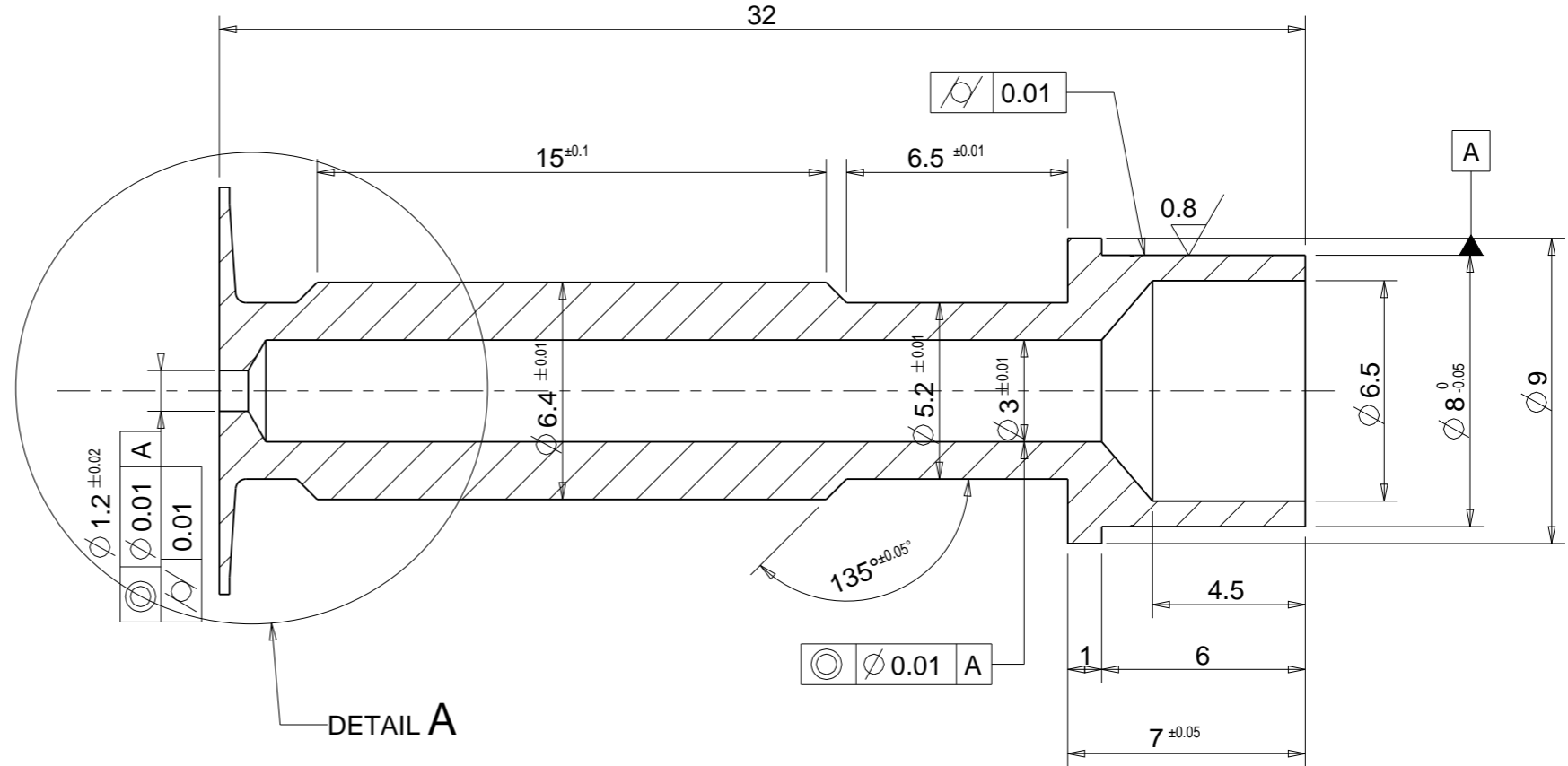
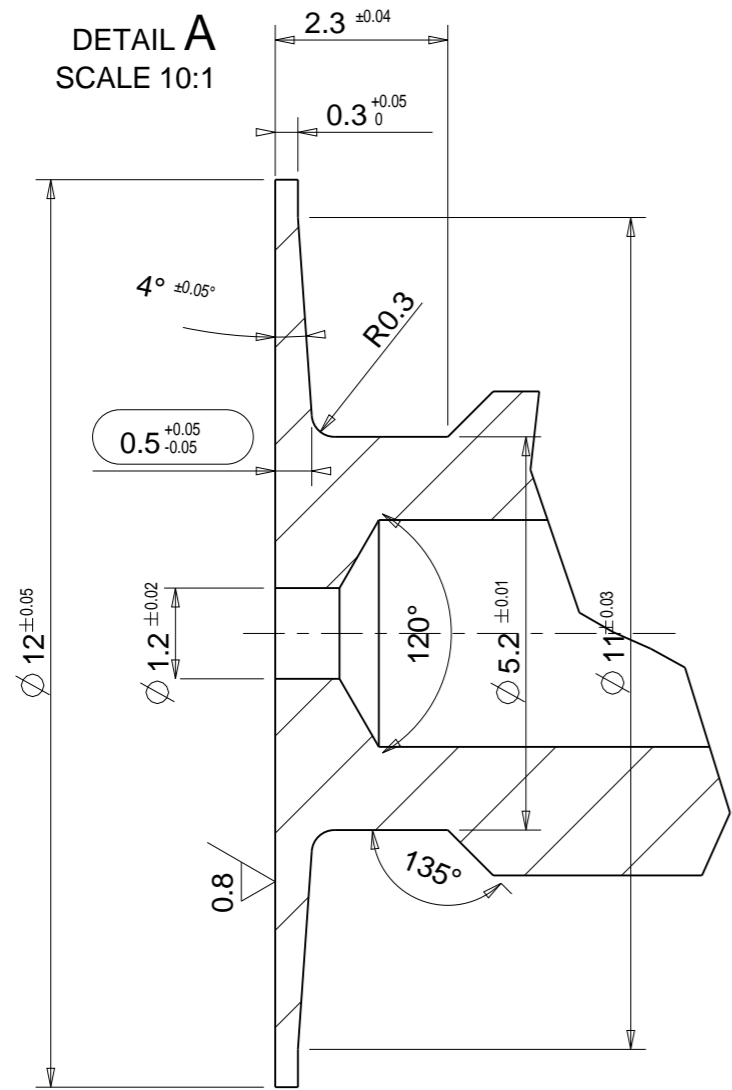
Designed by <b>Gianluca Vivian</b>		Signature	Project <b>SPES</b>	
Draft by <b>Fabio Visentin</b>		Date 26/5/2014	Description Catodo ottimizzato per sorgente di ionizzazione al plasma	
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro		Material	Gen. surf. finish	
		Treatment	Scale 5:1	
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK		Draft code: <b>ST_PIS_01</b>


1

2

3

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indicators "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
± 2			



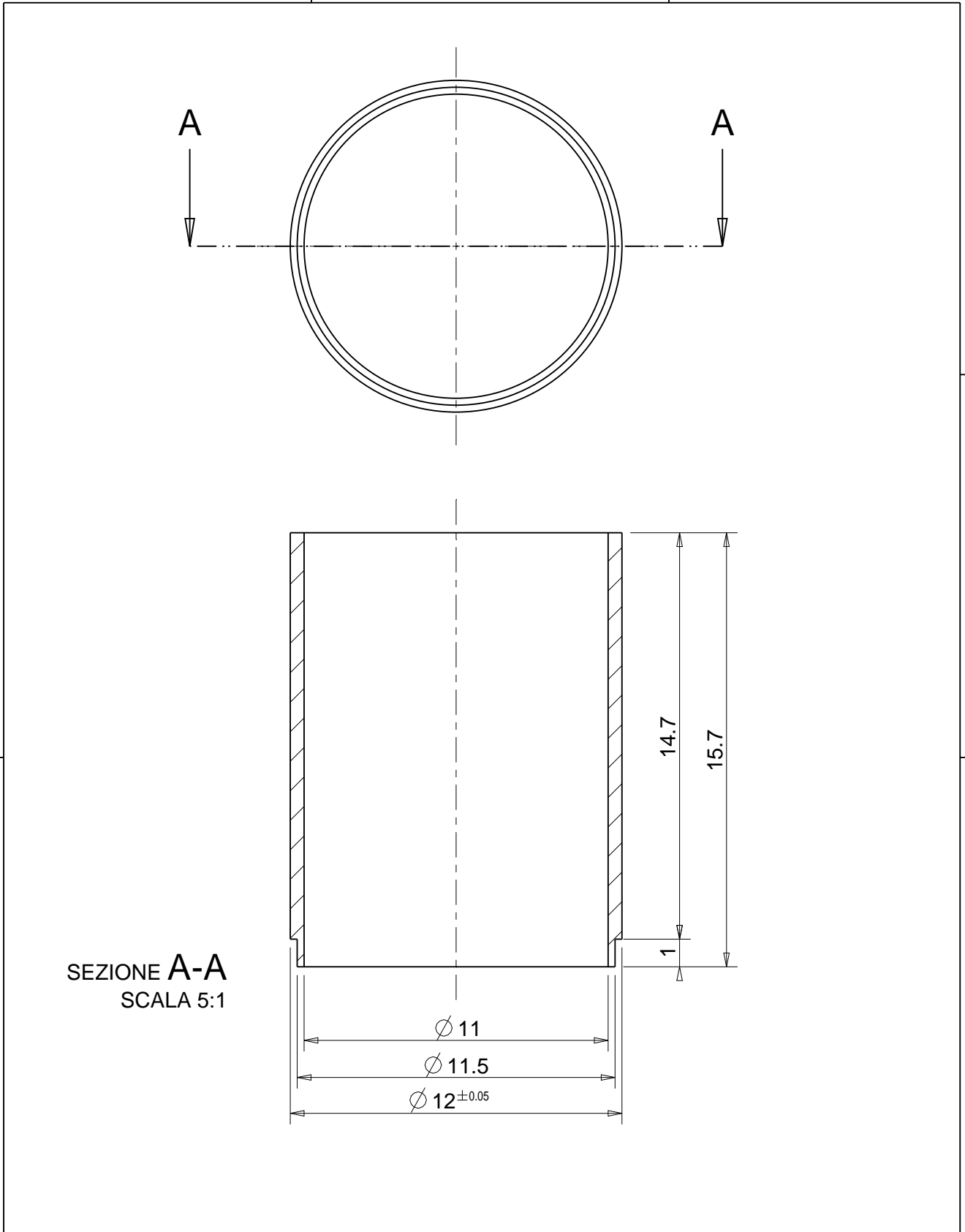
Designed by: <b>Gianluca Vivian</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Drawn by: <b>Fabio Visentin</b>	Date 26/05/2014	Description <b>Cathode main body</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 1.6
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Drawing N° <b>ST_PIS_01_001</b>
	Mass [kg] 0.01	Frm. <b>A3</b>
		Rev. 0

1 2 3 4 5 6



C  
B  
A

D  
C  
B  
A  
A3

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
$\leq 6$	$>6 \leq 30$	$>30 \leq 120$	$>120$
$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.5$
			$\pm 2^\circ$



SEZIONE A-A  
SCALA 5:1

Designed by <b>CERN</b>	Signature	Project <b>SPES</b>	
Draft by <b>Gianluca Vivian</b>	Date 26/05/2014	Description <b>Collare di sostegno</b>	
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 1.6 	
	Treatment	Scale 5:1	
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>ST_PIS_01_002</b>	
		Mass [kg]	Frm. <b>A4</b>
		Rev. <b>0</b>	

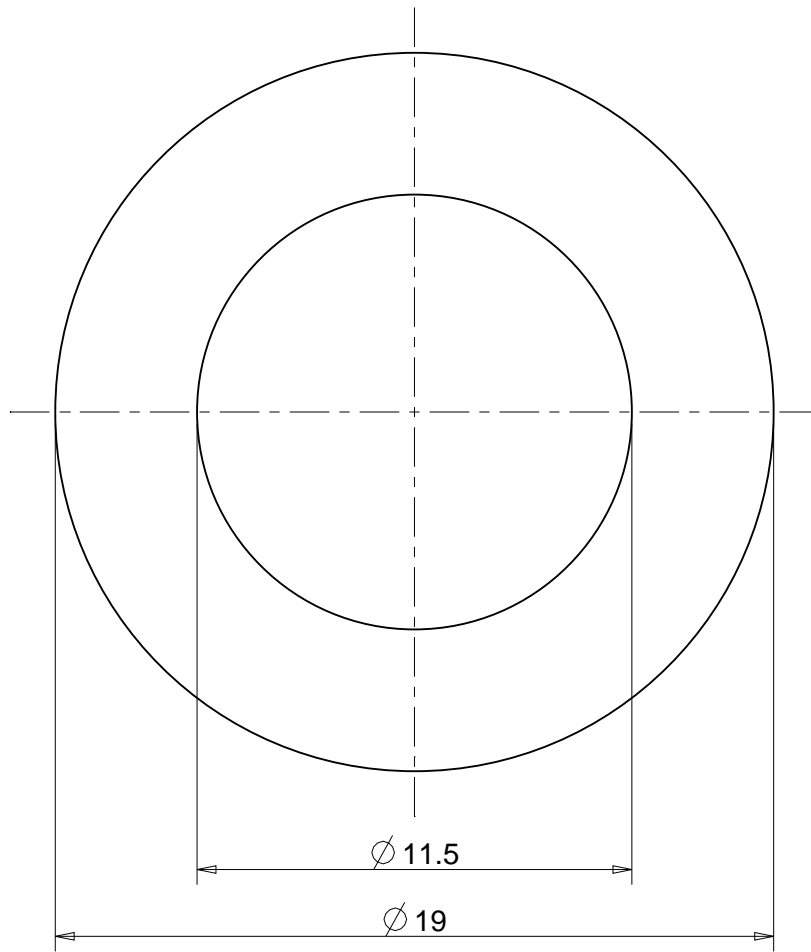
1

2


3



UNI-EN 22768/2-m Tollerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <= 30	>30 <= 120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



SCALA 5:1

Designed by <b>CERN</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Gianluca Vivian</b>	Date 26/05/2014	Description <b>Flangia di sostegno</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 1.6 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>ST_PIS_01_003</b>
		Rev. <b>0</b>

1

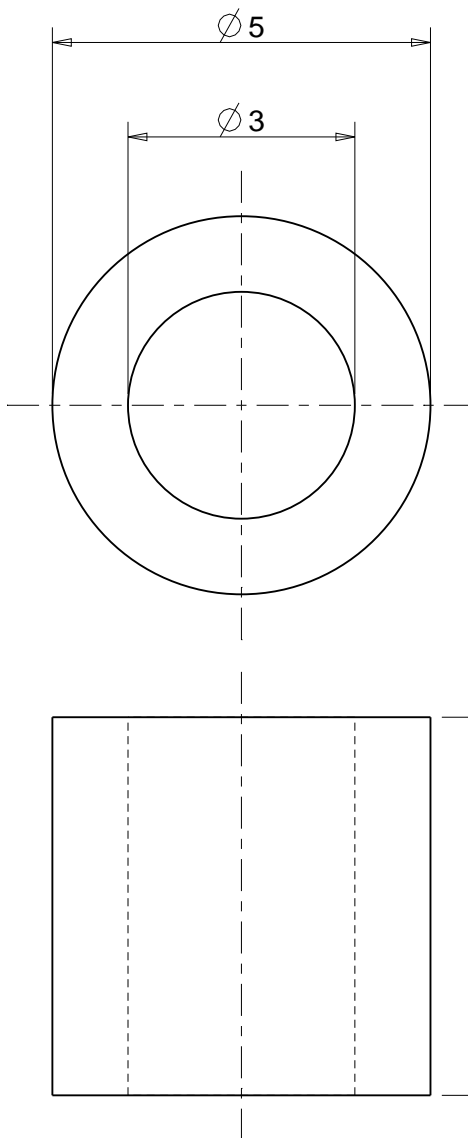
2

3

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <= 30	>30 <= 120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

B



A



C

B

A

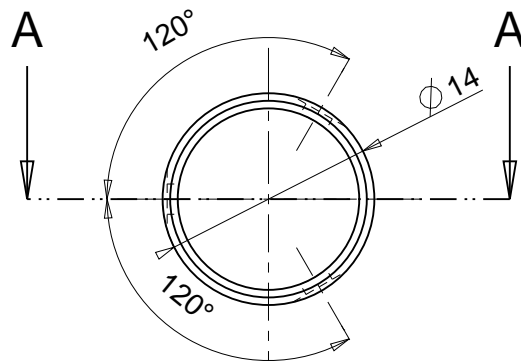
Designed by <b>CERN</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 20/05/2015	Description <b>Isolatore</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>AL203</b>	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment trattamento	Scale 10:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>ST_PIS_002</b>
		Rev. 0

1

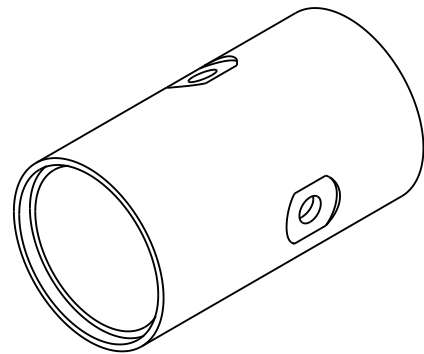
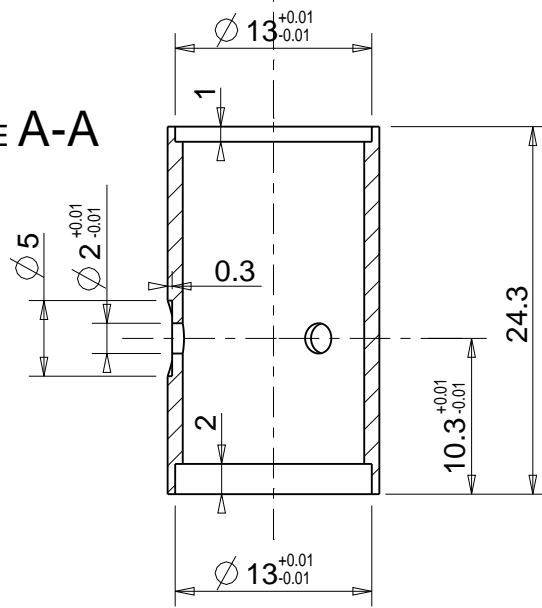
2



3

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <= 30	>30 <= 120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



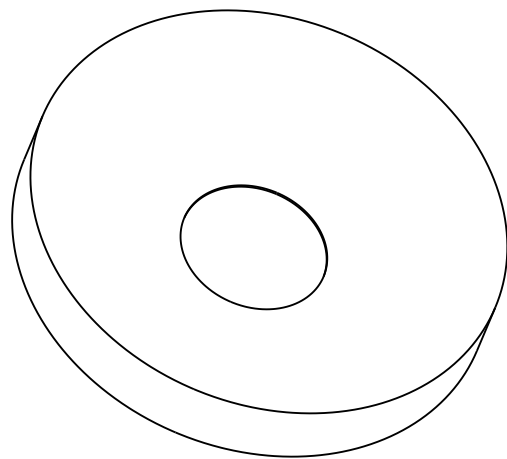
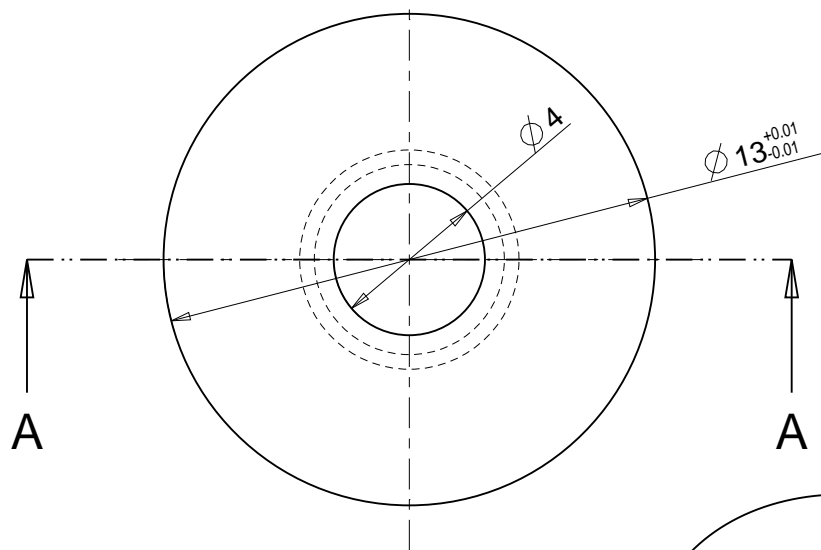
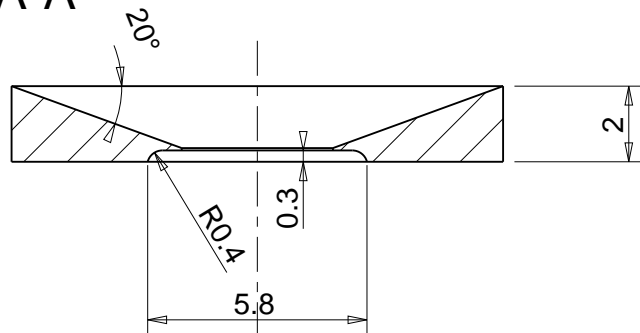
SEZIONE A-A





Designed by <b>CERN</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 03/10/2015	Description <b>Anode body</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment	Scale 2:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.01
		Draft code: <b>ST_PIS_02_001</b>
		Rev. 0

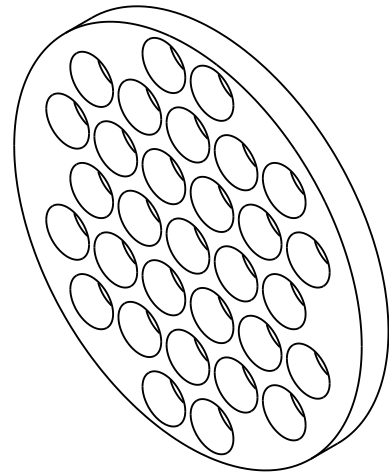
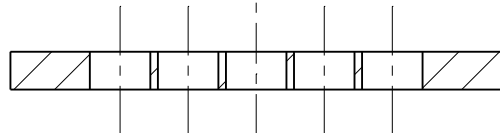
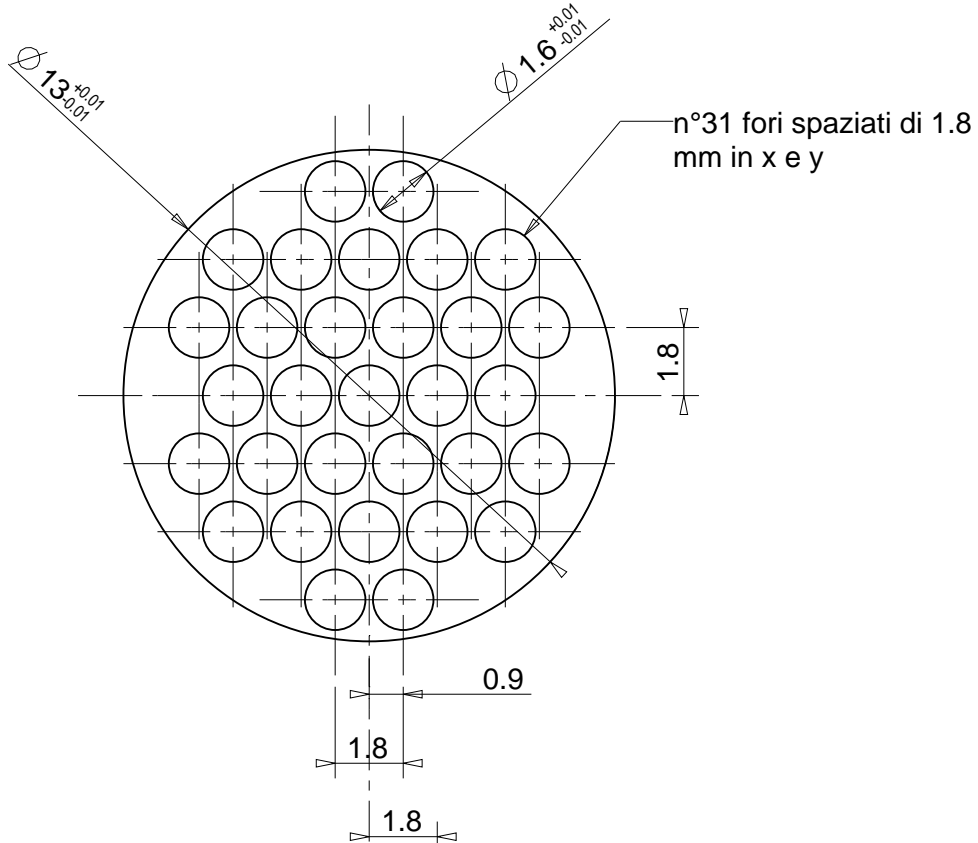
UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



SEZIONE A-A



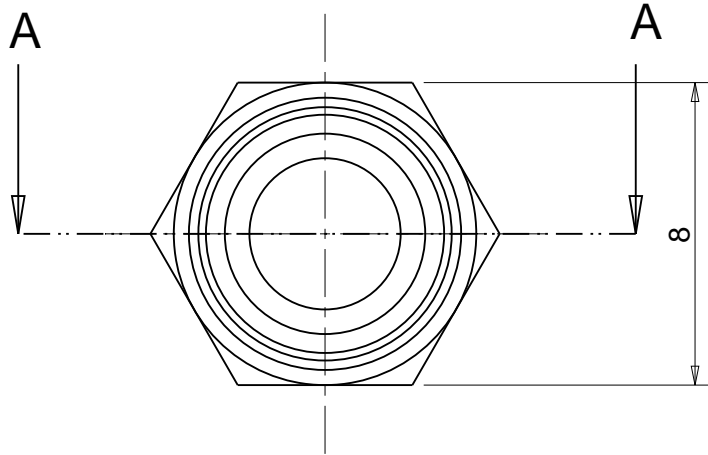
Designed by <b>Monetti Alberto</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 03/10/2015	Description <b>Outlet</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>ST_PIS_02_002</b>
		Rev. 0

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
± 2°			

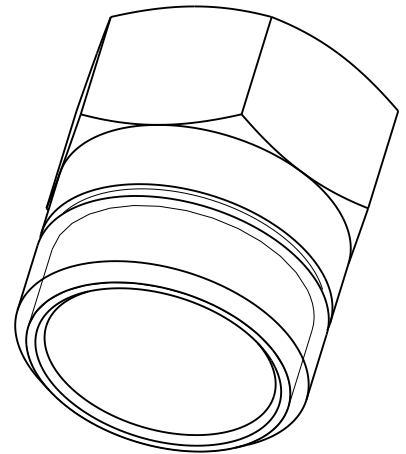
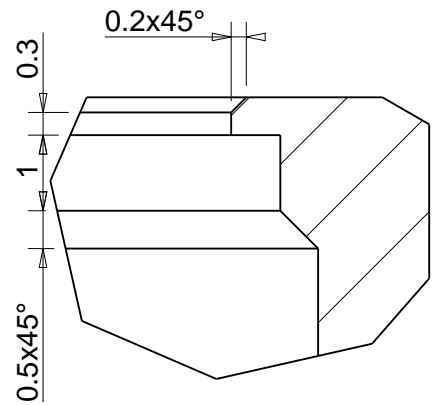
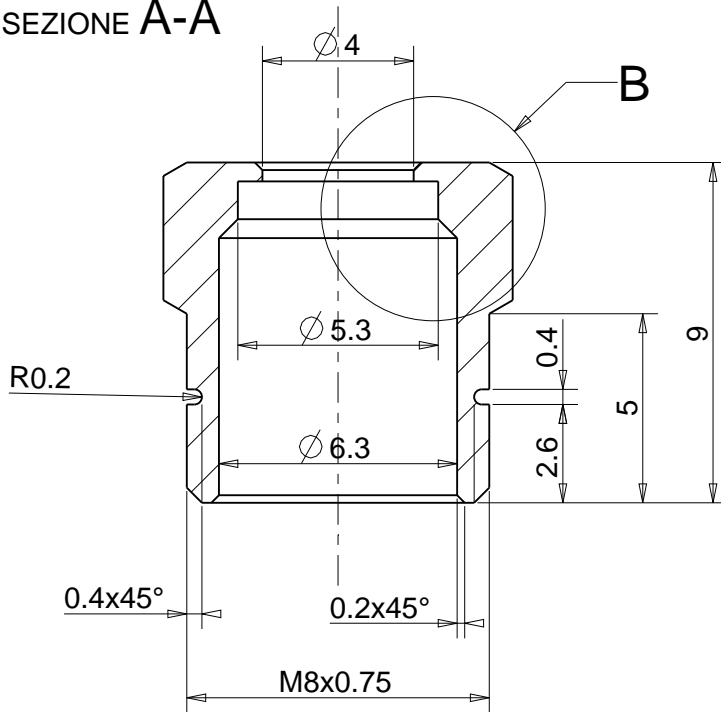




Designed by <b>CERN</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 13/05/2010	Description <b>Anode grid</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>ST_PIS_02_003</b>
		Rev. 0

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



SEZIONE A-A



Designed by <b>CERN</b>	Signature	Project <b>SPES.</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 13/05/2010	Description <b>Retainer Nut</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>MO</b>	Gen. surf. finish 1.6 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>ST_PIS_003</b>
		Rev. 0

<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°

A

B

1

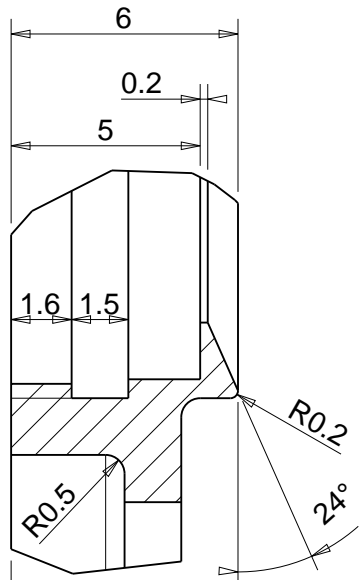
2

3

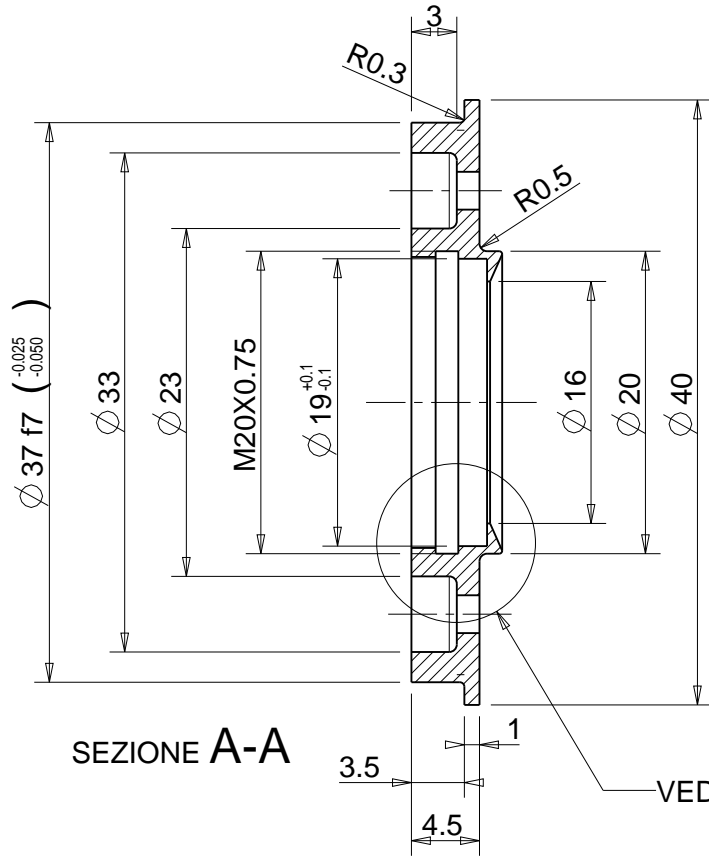
1

2

3

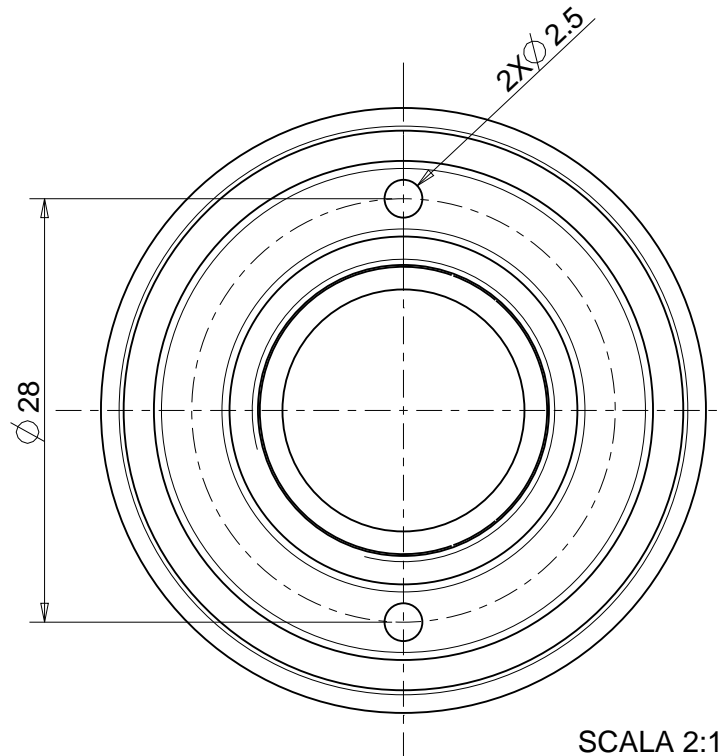


DETTAGLIO A  
SCALA 5:1

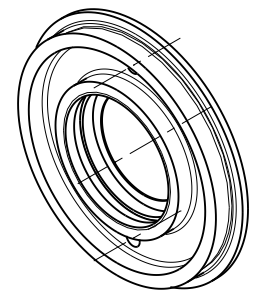


SEZIONE A-A

VEDI DETTAGLIO A



SCALA 2:1



SCALA 1:1

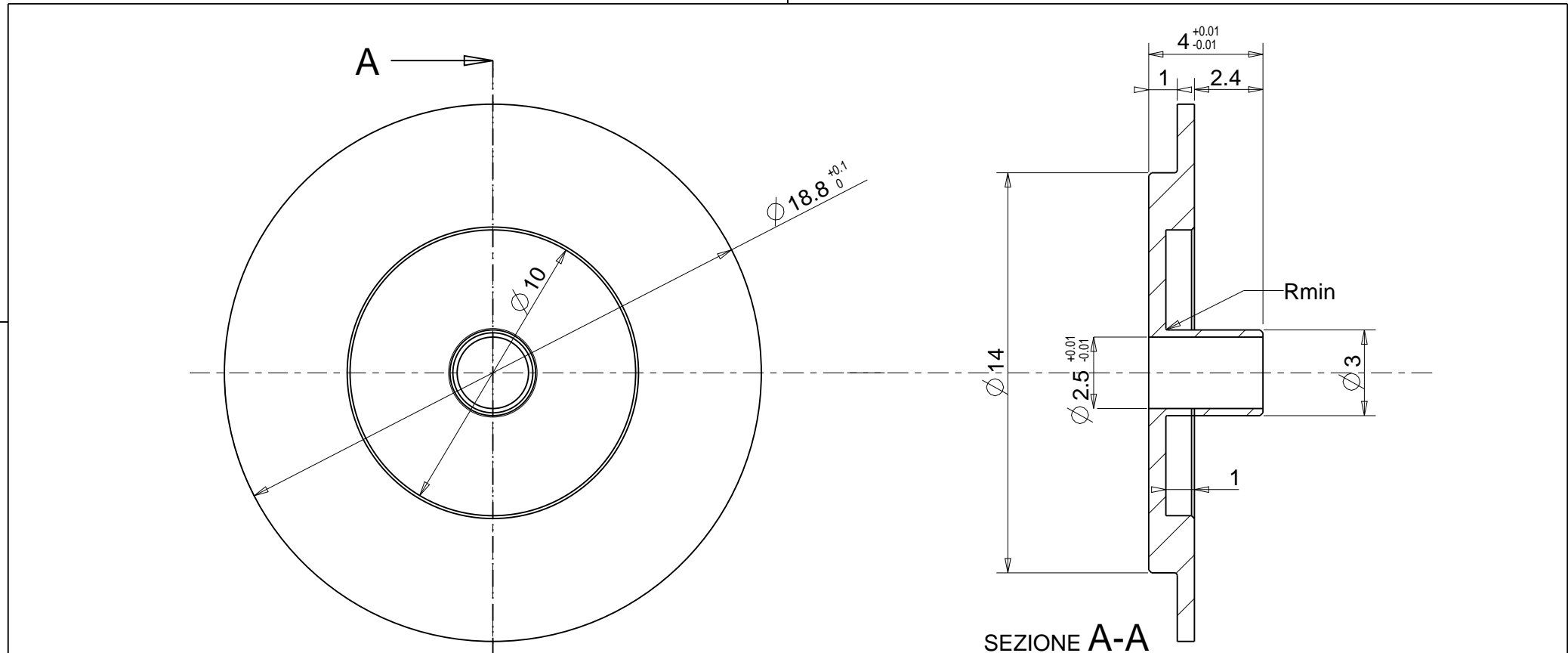
Designed by <b>Gianluca Vivian</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Gianluca Vivian</b>	Date 26/05/2014	Description <b>Flangia di chiusura</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>MO</b>	Gen. surf. finish 0.8
	Treatment	Scale 2:1
Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>ST_PIS_03_001</b>	Mass [kg] 0.03
		Frm. <b>A4</b>
		Rev. 0

A

B

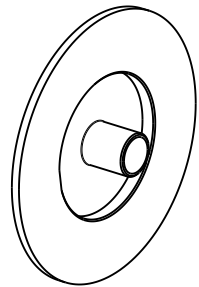
C

UNI-EN 22768(1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs")				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°



SEZIONE A-A

Smussi non quotati 0.1x45°



SCALA 2:1

Designed by <b>Monetti Alberto</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date	Description <b>Source extraction</b>
<p><b>INFN</b> Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Laboratori Nazionali di Legnaro</p>	Material <b>MOLYBDENUM</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
Draft code: <b>ST_PIS_03_002</b>		Rev. <b>0</b>

A

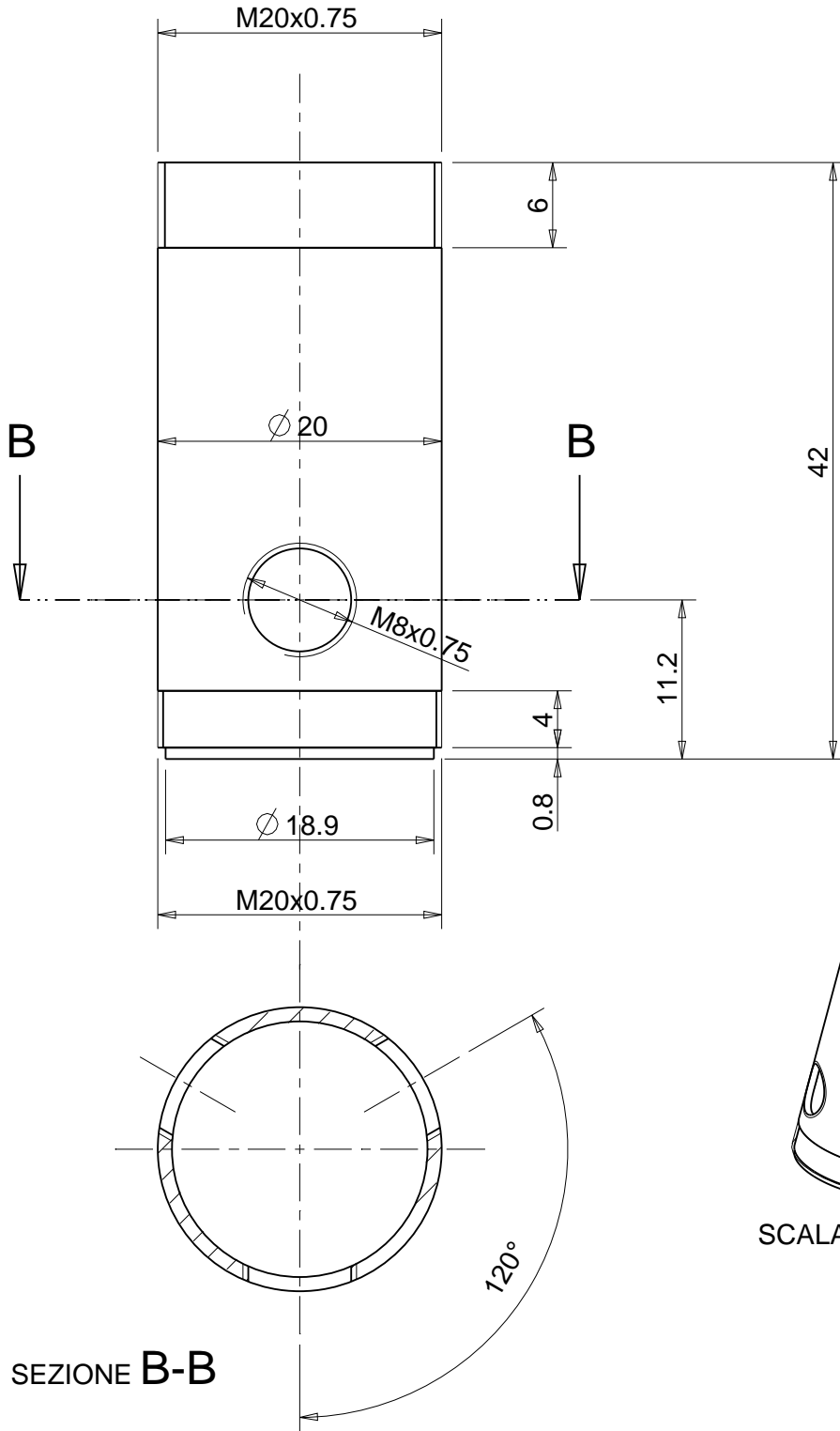
B

C



UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

1 | 2 | 3





B

A

C

B

A

Designed by <b>CERN</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 01/10/2015	Description <b>Discharge Chamber</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment	Scale 2:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.02
		Draft code: <b>ST_PIS_004</b>
		Rev. 0

1

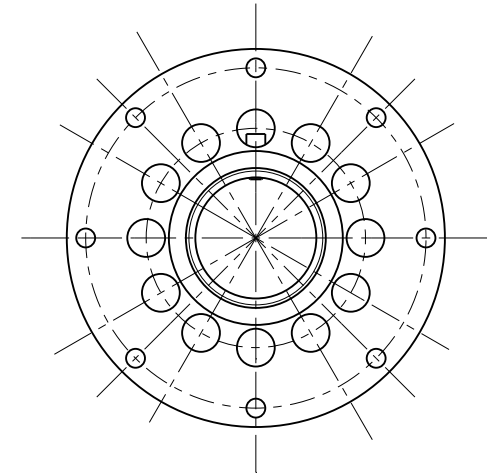
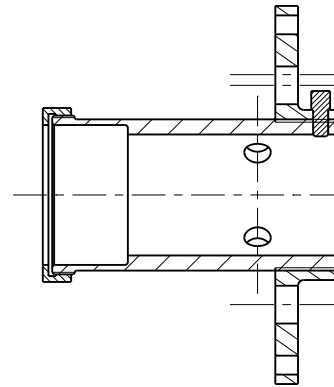
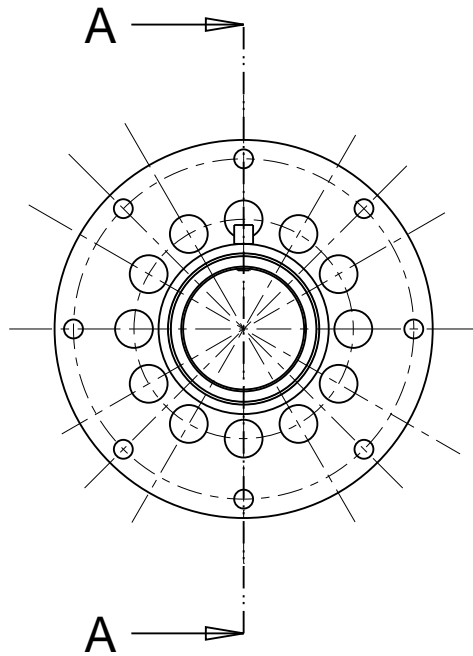
2

3

<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2'

A

B



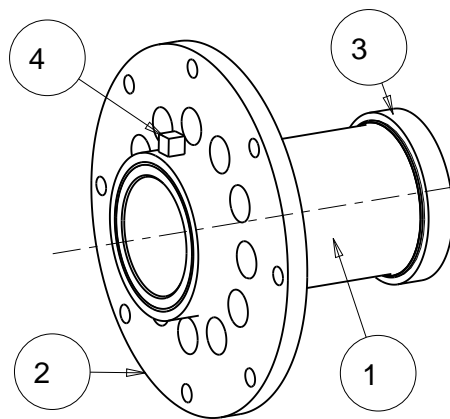
SEZIONE A-A

1

1

2

2



SCALA 1:2

3

3

4	ST_PIS_04_004	Grano di centraggio	1	Graphite EDM3
3	ST_PIS_04_003	Ghiera di bloccaggio	1	Graphite EDM3
2	ST_PIS_04_001	Flangia di supporto	1	Graphite EDM3
1	ST_PIS_04_002	Camera di supporto	1	Graphite EDM3
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
--------------------------------------	-----------	------------------------

Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 19/05/2015	Description <b>Sistema di supporto</b>
-----------------------------------	--------------------	---

<b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material	Gen. surf. finish	
	Treatment	Scale 1:2	

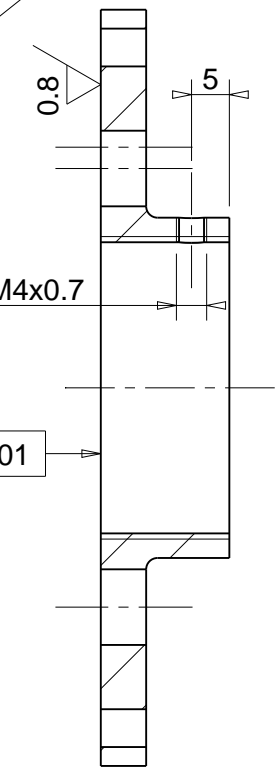
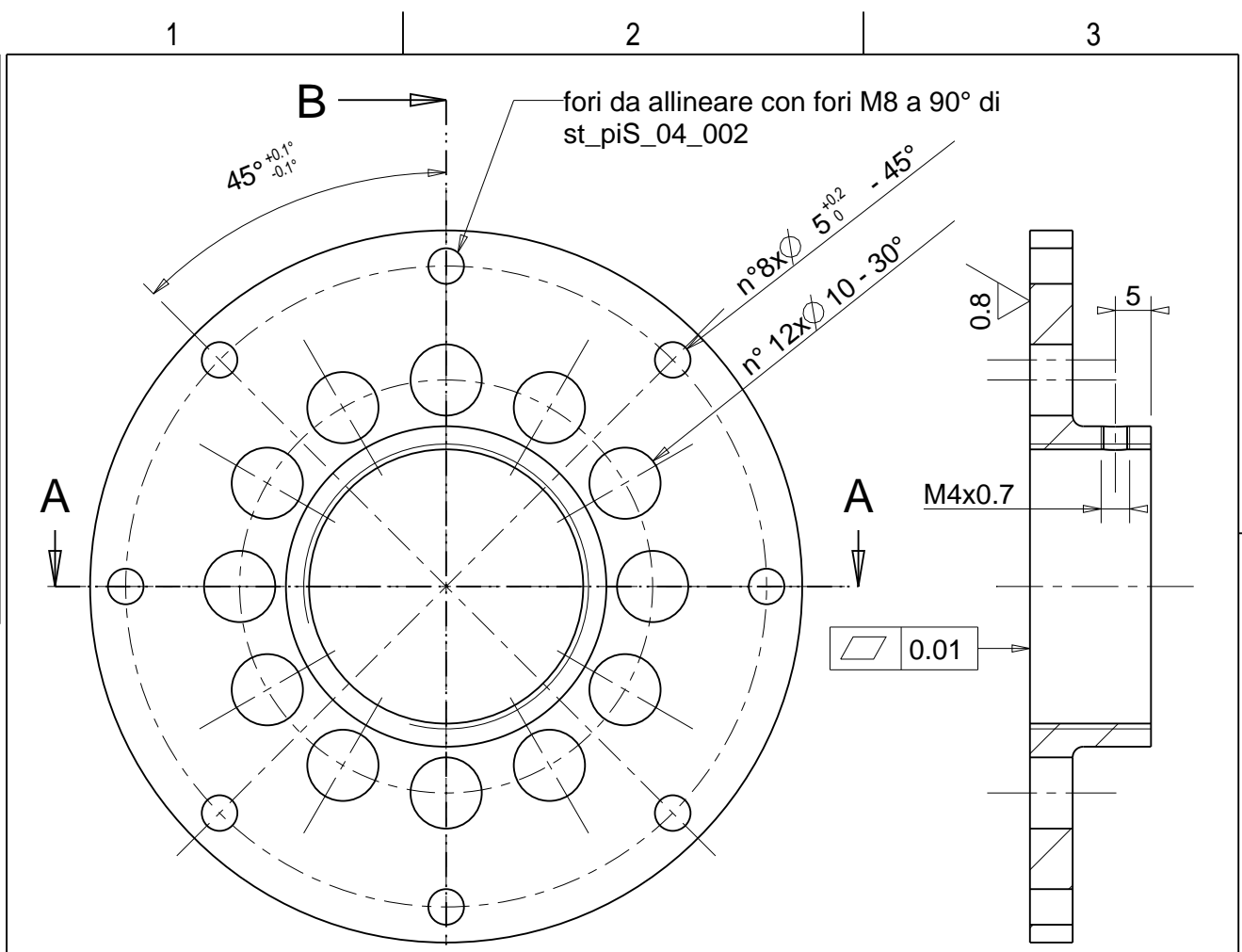
Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code:	<b>ST_PIS_04</b>	Frm. <b>A4</b>
			Rev. <b>0</b>

A

B

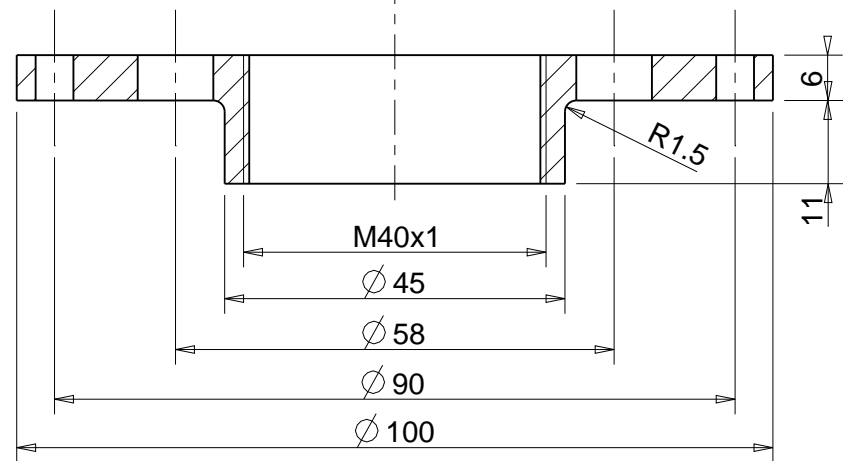
C


UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5



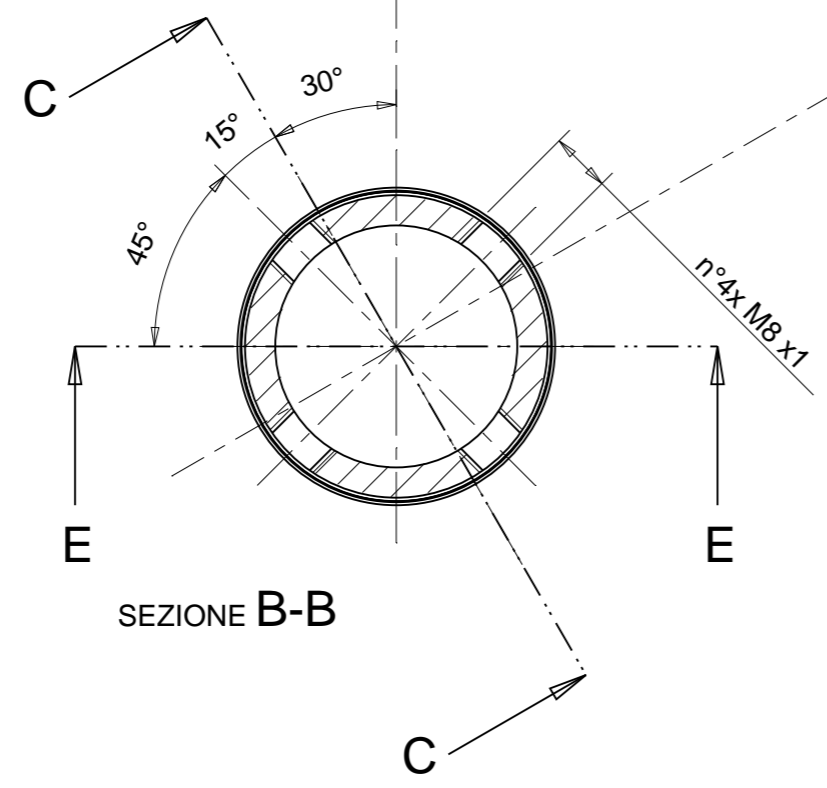
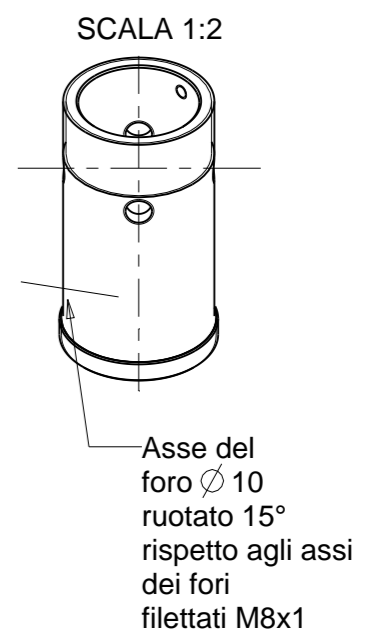
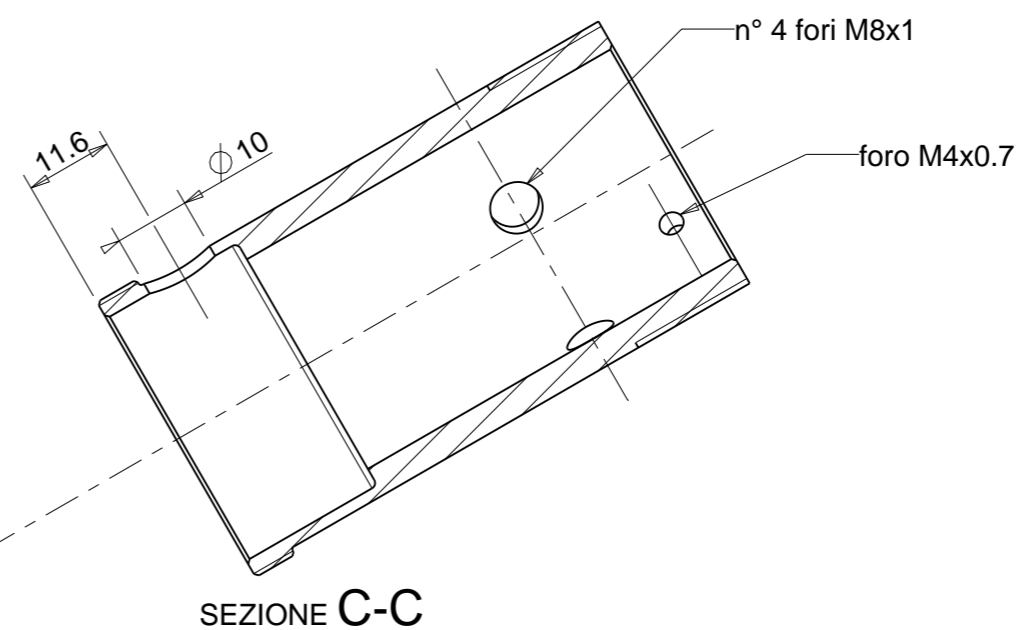
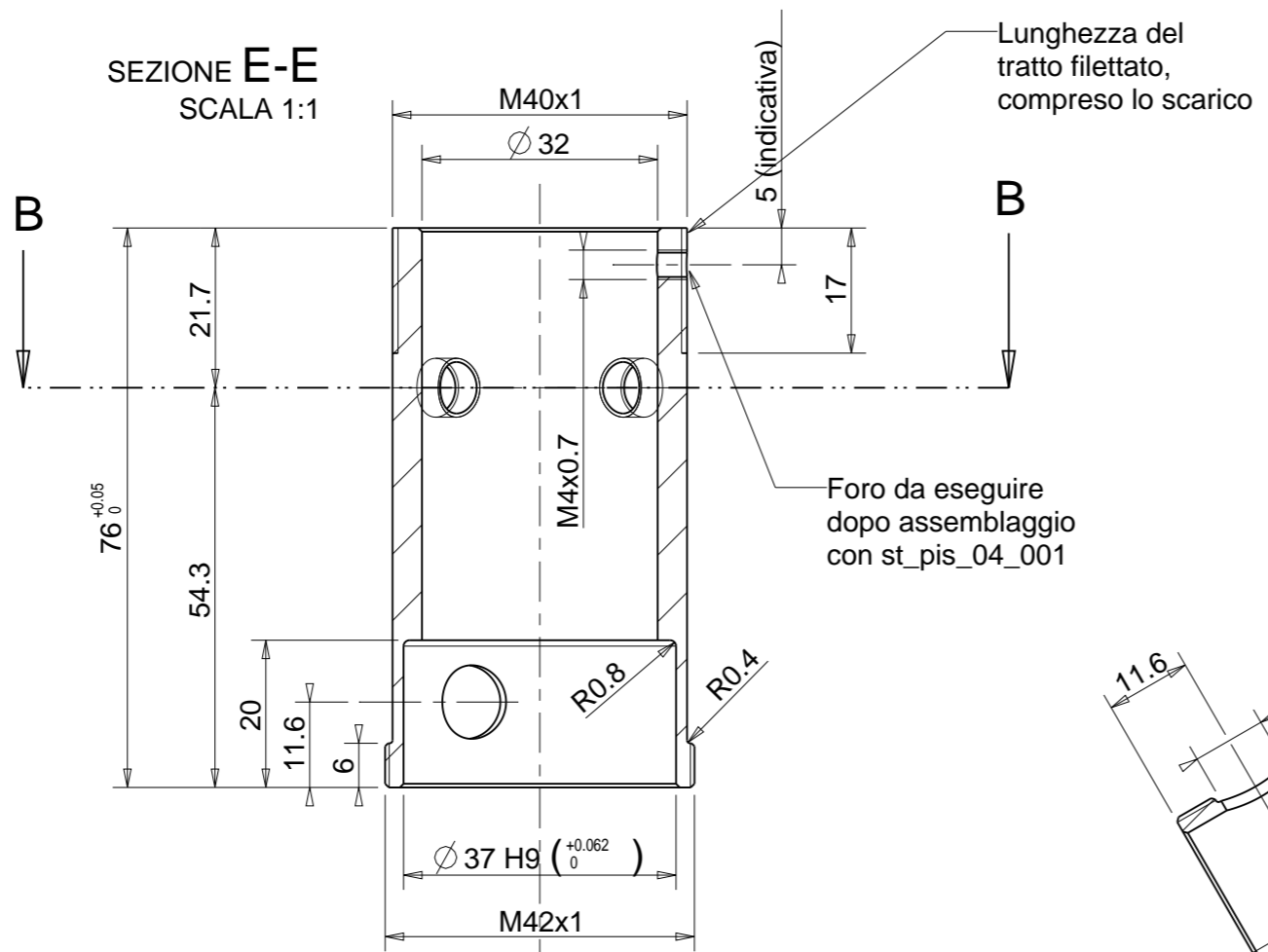
SEZIONE B-B

SEZIONE A-A




Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 19/05/2015	Description <b>Flangia di supporto</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>Graphite EDM3</b>	Gen. surf. finish <input checked="" type="checkbox"/>
	Treatment	Scale 1:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>ST_PIS_04_001</b>
		Mass [kg] 0.08
		Frm. <b>A4</b>
		Rev. 0

UNI-EN 22768/2-mk Tolerances for linear and angular individual tolerance indicators "mechanical designs"	
<= 6	± 0.1
> 6 <= 30	± 0.2
> 30 <= 120	± 0.3
> 120	± 0.5



Smussi non quotati 0.5X45°

Designed by: <b>G.Vivian-F.Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Drawn by: <b>Fabio Visentin</b>	Date 20/05/2015	Description <b>Camera di supporto</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>GRAPHITE</b>	Gen. surf. finish 0.8
	Treatment	Scale 1:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mk	Mass [kg] 0.06
Drawing N° <b>ST_PIS_04_002</b>		Rev. 0

1 2 3 4 5 6

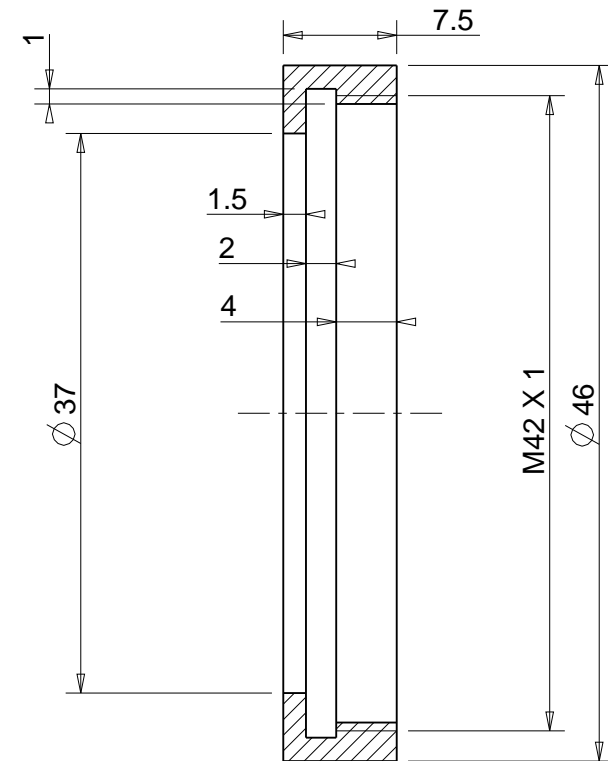
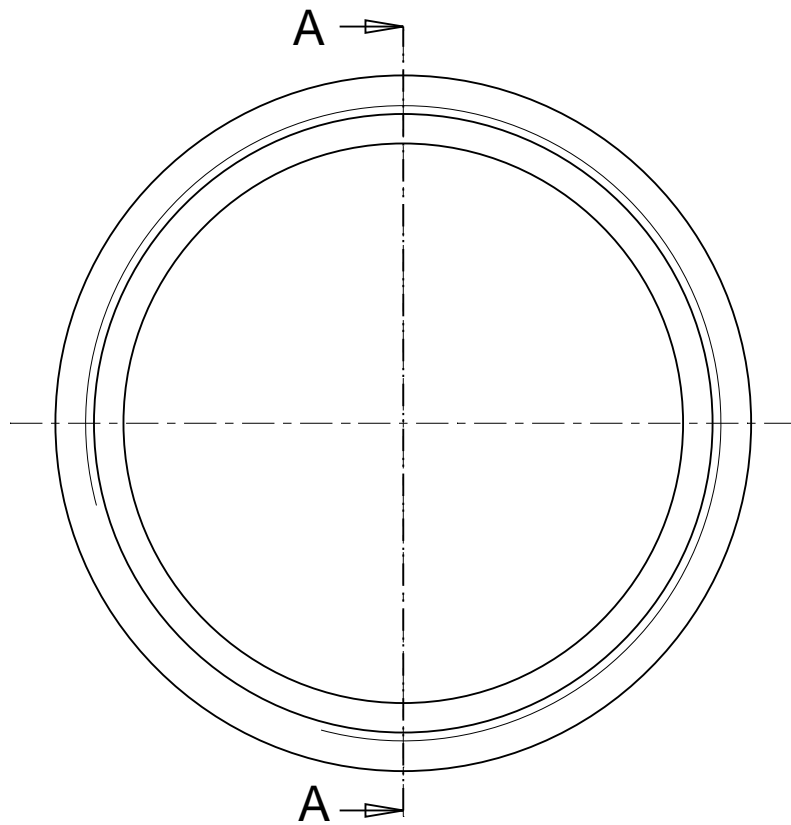
C  
B  
A

D  
C  
B  
A

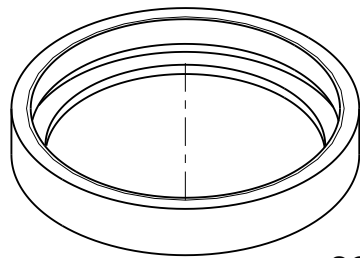
1 2 3 4 5 6

A3

UNI-EN 22768(1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs")				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2°



SEZIONE A-A



SCALA 1:1

Designed by <b>Gianluca Vivian</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 19/05/2015	Description <b>Ghiera di bloccaggio</b>
	Material <b>Graphite EDM3</b>	Gen. surf. finish 0.8
	Treatment	Scale 2:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.01
Draft code: <b>ST_PIS_04_003</b>		Rev. <b>0</b>

A

B

C

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <= 30	>30 <= 120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

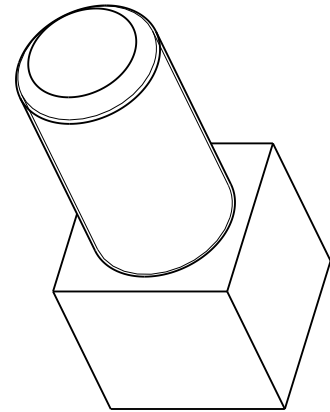
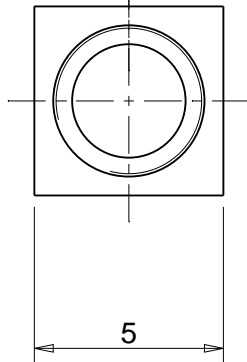
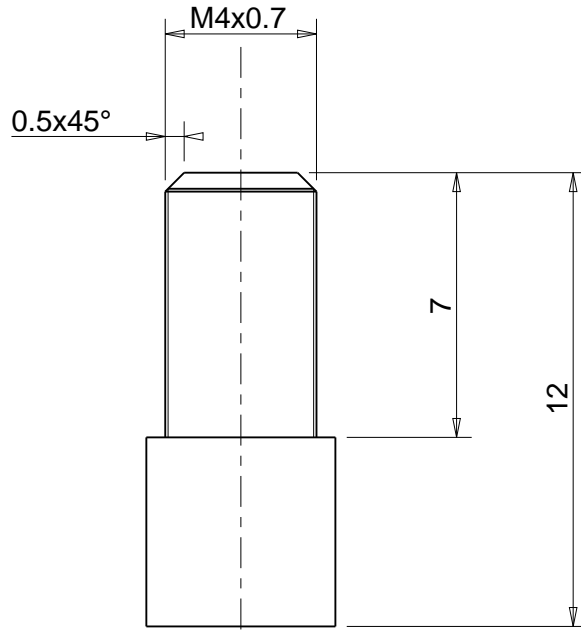
B

A

1

2



3



C

B

A

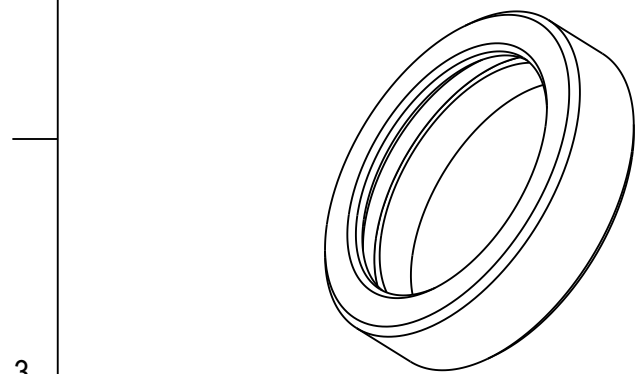
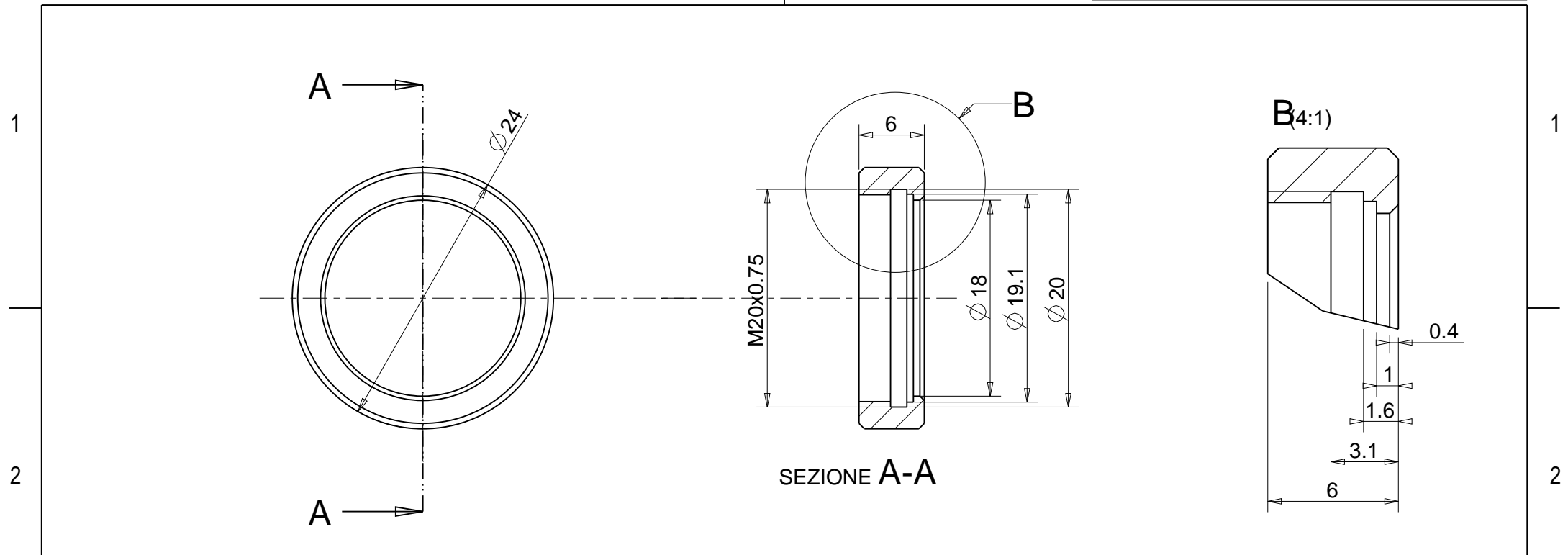
Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 20/05/2015	Description <b>Grano di centraggio</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>GRAPHITE</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>ST_PIS_04_004</b>
		Rev. 0

1

2

3

UNI-EN 22768(1)-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"				
<= 6	>6 <=30	>30 <=120	>120	
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 2'

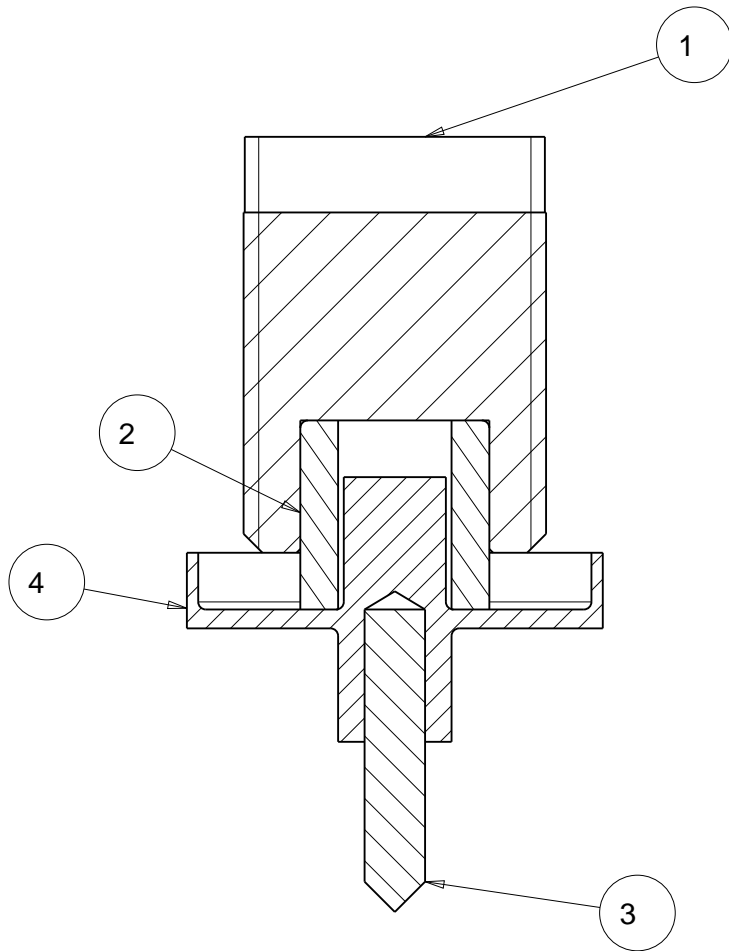


Smussi non quotati 0.5x45°

Designed by <b>CERN</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 13/05/2010	Description <b>Cathode support nut</b>
<b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 0.8
	Treatment	Scale 2:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.01
Draft code: <b>ST_PIS_005</b>		Frm. <b>A4</b>
		Rev. <b>0</b>

A | B | C

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			$\pm 2^\circ$
$\leq 6$	$>6 \leq 30$	$>30 \leq 120$	$>120$
$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.5$



SEZIONE A-A  
SCALA 5:1

4	ST_PIS_05_002	Supporto del puntale	1	TA
3	ST_PIS_05_003	Puntale	1	TUNGSTEN
2	ST_PIS_002	Isolatore	1	AL203
1	ST_PIS_05_001	Grano M8	1	Ta
Pos.	Drawing N.°	Description	Q.ty	Material

Designed by <b>Fabio Visentin</b>		Signature	Project <b>SPES</b>		
Draft by <b>Fabio Visentin</b>		Date 25/05/2015	Description <b>Puntali</b>		
<b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro		Material	Gen. surf. finish 0.8		
		Treatment	Scale 5:1	Mass [kg] 0.00	Frm. <b>A4</b>
		Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>ST_PIS_05</b>		Rev. 0

1

2

3

C

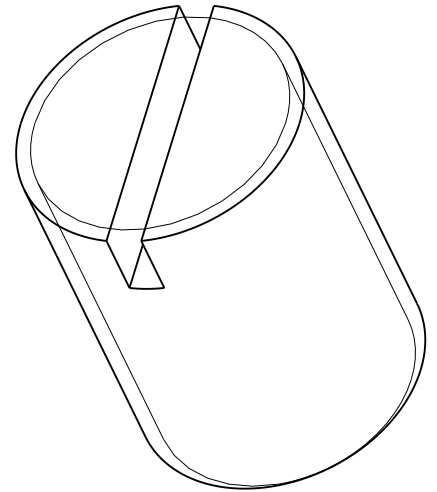
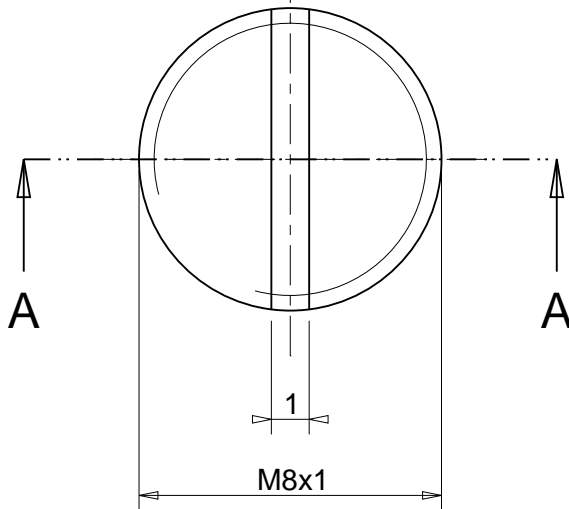
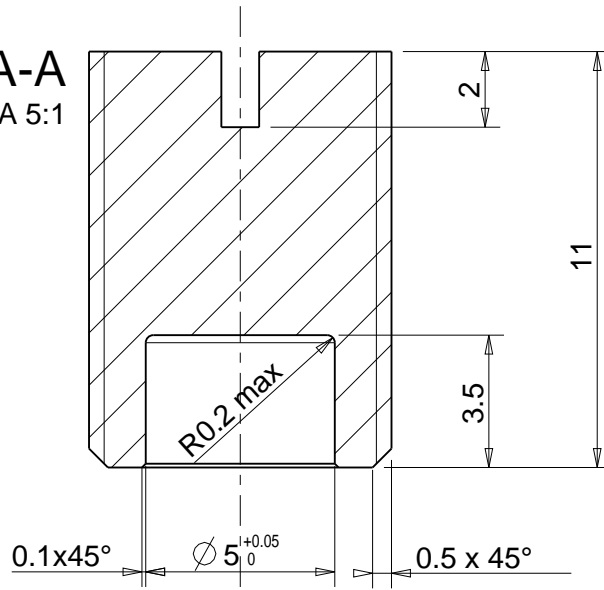
B

A




UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			$\pm z$
$\leq 6$	$>6 \leq 30$	$>30 \leq 120$	$>120$
$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.5$

SEZIONE A-A  
SCALA 5:1



SCALA 5:1

Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 25/05/2015	Description <b>Grano M8</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>Ta</b>	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment trattamento	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>ST_PIS_05_001</b>
		Frm. <b>A4</b>
		Rev. <b>FALSO</b>

1

2

3

C

B

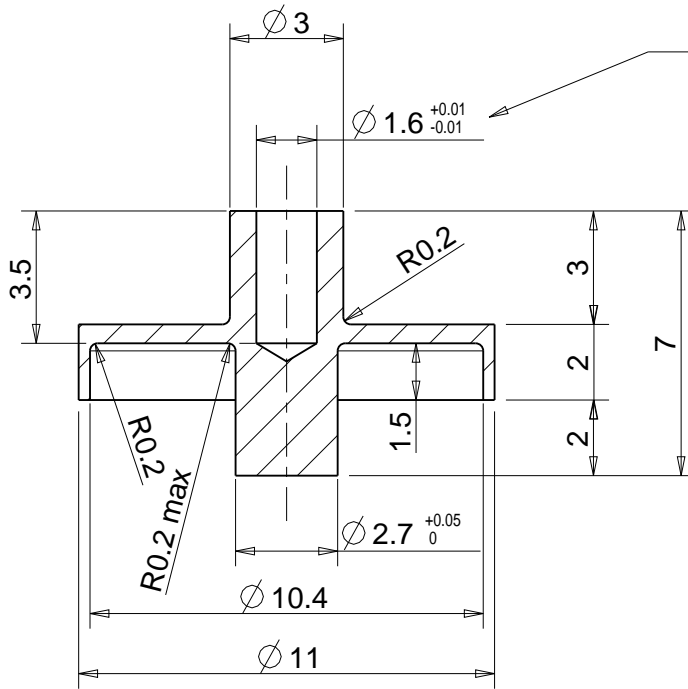
A

B

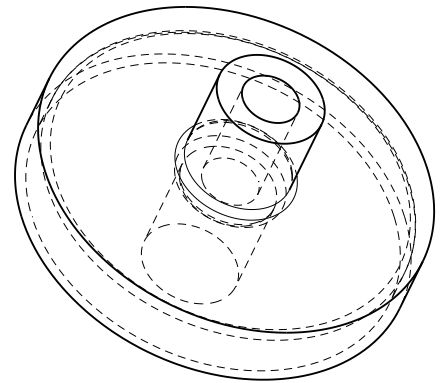
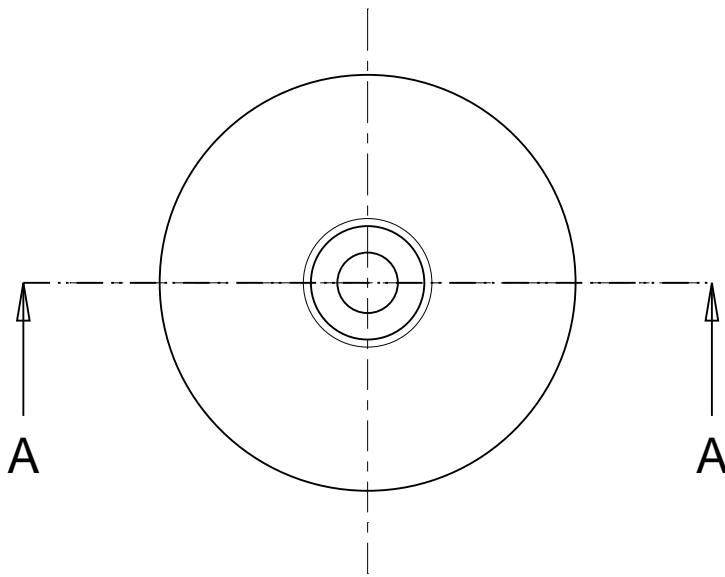
A

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <= 30	>30 <= 120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



### SEZIONE A-A



Da accoppiare con  
st\_pis\_05\_003



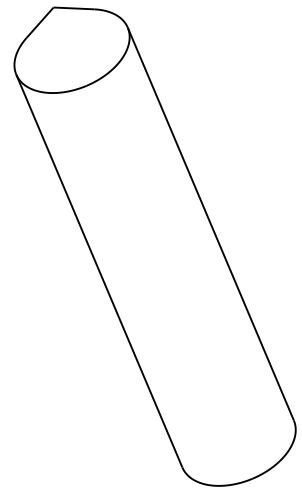
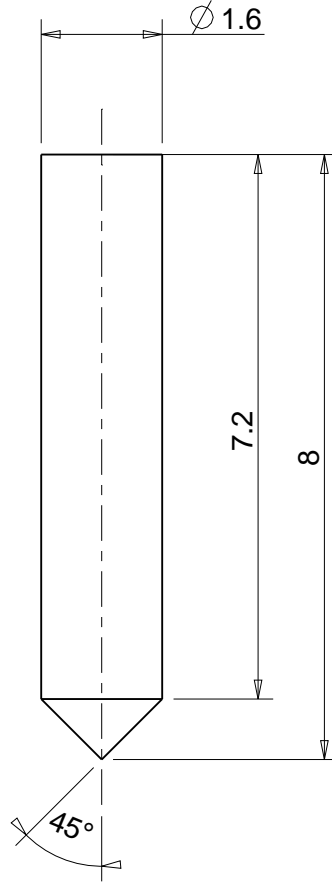
SCALA 5:1

Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 20/05/2015	Description <b>Supporto del puntale</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 0.8 
	Treatment trattamento	Scale 5:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Draft code: <b>ST_PIS_05_002</b>
		Mass [kg] 0.00
		Frm. <b>A4</b>
		Rev.

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

B



A



C

B

A

Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 20/05/2015	Description <b>Puntale</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TUNGSTEN</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment trattamento	Scale 10:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>ST_PIS_05_003</b>
		Rev.

1

2

3

1

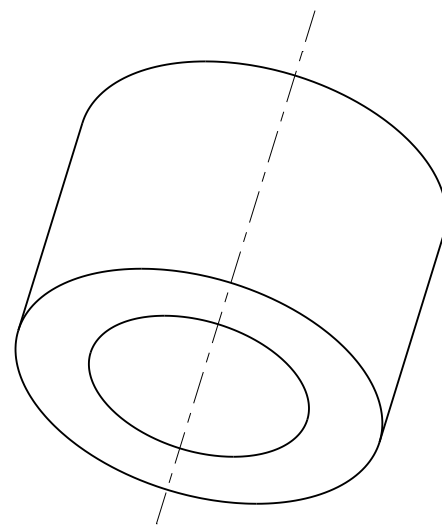
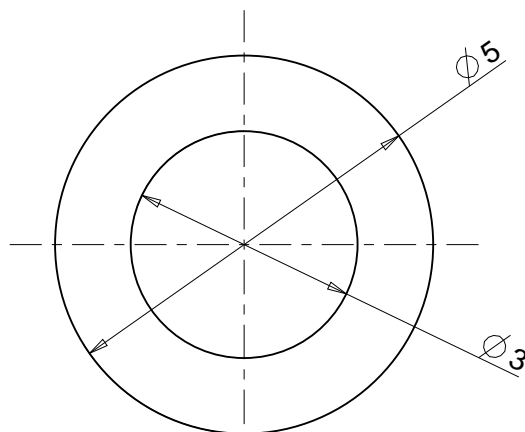
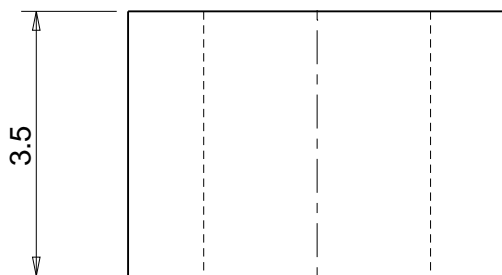
2

3

UNI-EN 22768/2-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	> 6 <= 30	> 30 <= 120	> 120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°

B



A



C

B

A

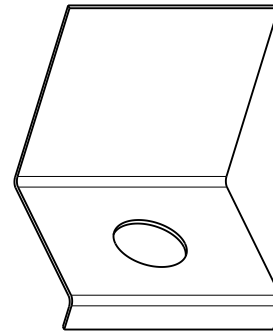
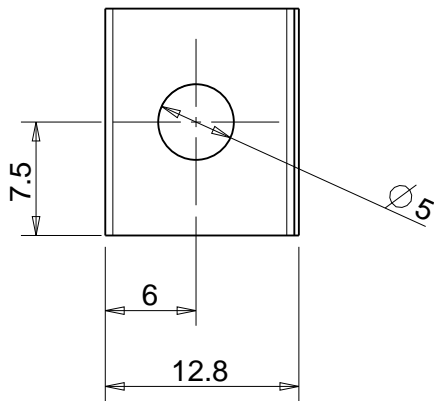
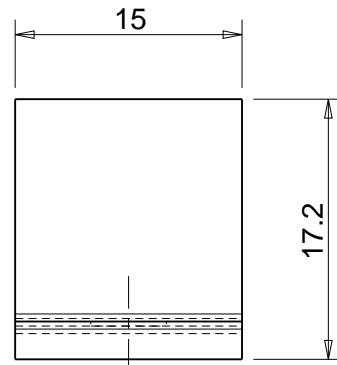
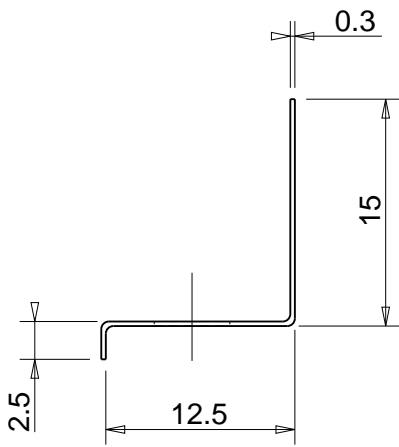
Designed by <b>Monetti Alberto</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date	Description <b>Extraction insulator</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>AL203</b>	Gen. surf. finish 
	Treatment	Scale 10:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>ST_PIS_006</b>
		Rev. 0



1

2

3

UNI-EN 22768/1-m Tolerances for linear and angular individual tolerance indications "mechanical organs technical designs"			
<= 6	>6 <= 30	>30 <= 120	>120
± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5
			± 2°



Designed by <b>Fabio Visentin</b>	Signature	Project <b>SPES</b>
Draft by <b>Fabio Visentin</b>	Date 29/11/2015	Description <b>Screw cover</b>
 <b>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</b> Laboratori Nazionali di Legnaro	Material <b>TA</b>	Gen. surf. finish 1.6 
	Treatment	Scale 2:1
	Technical Drawings ISO 8015 Gen. Tol. UNI-EN 22768/2-mK	Mass [kg] 0.00
		Draft code: <b>ST_PIS_007</b>
		Rev. <b>0</b>