



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**PROGETTAZIONE E SVILUPPO DELLA CELLA DI KNUDSEN  
PER APPLICAZIONI LASER  
DEL PROGETTO SPES**

Relatore: Ch.mo Prof. Giovanni Meneghetti

Correlatori: Ing. Massimo Rossignoli

Dott. Alberto Andrighetto

Laureando: Davide Amatuzio

Matricola: 1084742

Anno Accademico 2015/2016







# Indice

<b>Sommario .....</b>	<b>1</b>
-----------------------	----------

<b>Capitolo 1 Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici .....</b>	<b>3</b>
--	----------

1.1 - Introduzione .....	3
1.2 - Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro .....	5
1.3 - La produzione di fasci di ioni radioattivi (SPES- $\beta$ ) .....	6
1.4 - Configurazione della <i>facility</i> .....	7
1.4.1 - L'acceleratore primario .....	8
1.4.2 - Il target di produzione e il sistema di estrazione e di ionizzazione .....	9
1.4.3 - Sorgenti di ionizzazione .....	12
1.4.4 - Separatori magnetici e post accelerazione .....	15
1.5 - Applicazioni dei fasci di ioni esotici .....	16
1.5.1 - Applicazioni in fisica nucleare .....	16
1.5.2 - Applicazioni nella fisica dello stato solido .....	18
1.5.3 - Applicazioni in medicina nucleare.....	19
1.5.4 - Applicazioni in astrofisica.....	20
1.6 - Conclusioni.....	21

<b>Capitolo 2 La ionizzazione laser e l'apparato <i>Time of Flight</i> del progetto SPES. 23</b>	
--	--

2.1 - Introduzione.....	23
2.2 - La teoria della ionizzazione .....	23
2.2.1 - L'affinità elettronica .....	24
2.2.2 - L'elettronegatività.....	25
2.3 - La ionizzazione laser mediante la tecnica RILIS ( <i>Resonant Laser Ion Source</i> ).....	26
2.3.1 - Il problema dei contaminanti ionizzati superficialmente per sorgenti <i>RILIS</i> .....	27
2.4 - Introduzione alla camera TOF .....	29
2.5 - La cella di Knudsen.....	32
2.6 - Knudsen Effusion Mass Spectrometry (KEMS).....	34
2.6.1 - Calcolo della pressione parziale, calibrazione e background .....	35
2.7 - Elementi di progettazione di una cella di Knudsen.....	36
2.8 - La cella di Knudsen progettata ai LNL .....	36
2.9 - Conclusioni.....	39

<b>Capitolo 3 Analisi elettro-termica del prototipo della cella di Knudsen e validazione del modello numerico.....</b>	<b>41</b>
--	-----------

3.1 - Basi teoriche per la costruzione del modello.....	41
3.1.1 - Il problema termico.....	41
3.1.2 - Il problema elettrico.....	43
3.2 - Il modello geometrico .....	44
3.3 - Il modello FEM.....	45
Risultati numerici.....	48
3.4 - Test sperimentali.....	51
3.5 - Confronto tra risultati numerici e sperimentali .....	55
3.6 - Conclusioni.....	59

<b>Capitolo 4 Progettazione ed ottimizzazione termica della camera Time of Flight .....</b>	<b>61</b>
---	-----------

4.1 -	Introduzione.....	61
4.2 -	Progettazione della camera TOF .....	61
4.2.1 -	Scelte costruttive per la linea di potenza elettrica .....	62
4.2.2 -	Scelte costruttive per il sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen .....	63
4.3 -	Il modello geometrico per l'analisi FE .....	66
4.4 -	Il modello FE.....	68
4.5 -	Analisi della convergenza e definizione della mesh .....	70
4.6 -	Risultati numerici.....	77
4.7 -	Conclusioni.....	79
<b>Capitolo 5 Progettazione degli schermi termici e del sistema di separazione ...</b>		<b>81</b>
5.1 -	Introduzione.....	81
5.2 -	Gli schermi termici in tantalio .....	81
5.2.1 -	Progettazione e definizione del modello CAD degli schermi .....	82
5.2.2 -	Modello FEM e analisi dei dati numerici .....	84
5.2.3 -	Discussione dei risultati .....	86
5.3 -	Sistema di separazione .....	88
5.3.1 -	Progettazione e definizione del modello CAD del sistema di separazione .....	89
5.3.2 -	Modello FE e analisi dei dati numerici .....	94
5.3.3 -	Discussione dei risultati .....	97
5.4 -	Conclusioni.....	98
<b>Capitolo 6 Analisi di effusione del piombo attraverso la cella di Knudsen.....</b>		<b>101</b>
6.1 -	Introduzione.....	101
6.2 -	Test sperimentali .....	101
6.3 -	Analisi dei campioni ottenuti al microscopio SEM .....	104
6.3.1 -	Il microscopio SEM .....	104
6.3.2 -	Risultati delle analisi sperimentali .....	105
6.4 -	Simulazione del cono di effusione della cella di Knudsen.....	109
6.4.1 -	Il metodo Monte Carlo ed il software MOLFLOW® .....	109
6.4.2 -	Modello geometrico e modello numerico .....	110
6.4.3 -	Risultati numerici e confronto con i risultati sperimentali .....	113
6.5 -	Conclusioni.....	114
<b>Conclusioni .....</b>		<b>117</b>
<b>Appendice A Classificazione dei pirometri e leggi della radiazione termica ...</b>		<b>119</b>
A.1 -	Classificazione dei pirometri [19].....	119
A.2 -	Pirometri a due colori .....	121
A.2.1 -	Informazioni generali.....	121
A.2.2 -	Definizione della scala.....	122
A.2.3 -	Misure di temperatura di corpi non grigi .....	124
A.3 -	Pirometri automatici .....	124
A.3.1 -	Lenti.....	124
A.3.2 -	Fibra ottica .....	127
A.3.3 -	Specchi .....	127
A.3.4 -	Sensori.....	128
A.4 -	Pirometri a due lunghezze d'onda .....	130
<b>Appendice B Termografia infrarossa per misure di temperatura [20] .....</b>		<b>133</b>
B.1 -	Introduzione.....	133
B.1.1 -	Alcune applicazioni della termografia .....	134
B.2 -	Principi fisici della termografia infrarossa .....	135
B.2.1 -	Bande .....	138
B.2.2 -	Digitalizzazione .....	139
B.3 -	Misure di temperatura .....	140

B.3.1 - Misure di emissività e temperatura riflessa .....	141
---	-----

**Appendice C Esempi di comandi Ansys® APDL utilizzati per le analisi numeriche**

.....	<b>143</b>
C.1 - Macro APDL per la grafite EDM-3®.....	143
C.2 - Comandi APDL utilizzati per le analisi elettro-termiche della cella di Knudsen .....	146
C.3 - Comandi APDL utilizzati per le analisi strutturali della cella di Knudsen .....	150

**Bibliografia .....** **161**





# Sommario

Dall'inizio del ventesimo secolo si è affermata la crescente importanza della fisica nucleare, aprendo nuovi campi di ricerca e portando alla creazione di nuove tecnologie. Molte di queste hanno poi conosciuto applicazioni in un vasto numero di campi, come la medicina, l'industria e la fisica applicata, arrivando talvolta addirittura a influenzare usi e costumi della società.

Nel corso degli anni l'Europa ha assunto la leadership in questo campo di ricerca 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, nel range di massa compreso tra 80 e 160 uma.

La produzione di fasci di ioni radioattivi richiede l'impiego di tecnologie estremamente complesse ed innovative; come sarà descritto dettagliatamente in seguito, il progetto SPES prevede il bombardamento di un bersaglio (*target*) in carburo di uranio con un fascio primario in modo da generare, tramite una reazione nucleare, specie radioattive all'interno del *target* stesso. Tali particelle vengono successivamente estratte, ionizzate, separate in massa ed accelerate come fascio di ioni radioattivi.

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 (potenza stimata in circa 8 kW).

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 ionizzazione (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 ionizzazione differenti; in particolare si possono avere sorgenti con ionizzazione superficiale, sorgenti laser (RILIS), sorgenti al plasma (FEBIAD) o le sorgenti ECR (*Electron Cyclotron Resonance*).

Gli ioni prodotti dalla sorgente di ionizzazione vengono accelerati da un elettrodo estrattore in lega di titanio, che viene mantenuto ad una differenza di potenziale di 60 kV rispetto alla sorgente.

Lo studio del funzionamento, nonché lo sviluppo, del sistema *target-ion source* è assai complesso. Per tale motivo i Laboratori Nazionali di Legnaro hanno avviato delle strette collaborazioni con i Dipartimenti di Ingegneria Meccanica, di Scienze Chimiche e di Scienze Farmaceutiche dell'Università degli Studi di Padova, il CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* - Svizzera) ed i Laboratori di Oak Ridge (USA).

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel progetto SPES, ed è volto allo studio e sviluppo della cella di Knudsen per applicazioni laser del progetto SPES.

La cella di Knudsen verrà utilizzata per la realizzazione di una camera *Time Of Flight*, con l'obiettivo finale di valutare l'efficienza di ionizzazione di laser risonanti che verranno utilizzati per la ionizzazione selettiva degli isotopi fuoriusciti dal *target*. Per le fasi di sviluppo e progettazione descritte in questo lavoro di tesi sono stati usati il programma di modellazione geometrica tridimensionale Creo® ed il codice di calcolo agli elementi finiti Ansys® Mechanical APDL.

Questo elaborato si divide in sei capitoli, il cui contenuto viene di seguito brevemente riassunto:

**Capitolo 1:** La prima parte del capitolo si sofferma sulla 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:** In questo capitolo verrà affrontata preliminarmente la teoria della ionizzazione, focalizzandosi poi sulla ionizzazione laser mediante tecnica RILIS. Verranno poi illustrate la spettrometria di massa a tempo di volo, e la camera TOF a disposizione dei LNL. Infine sarà spiegato cos'è una cella di Knudsen, quali sono i vincoli progettuali da rispettare, e verrà presentato il prototipo realizzato ai LNL.

**Capitolo 3:** La trattazione seguente è incentrata sull'elaborazione di un modello agli elementi finiti in grado di rappresentare le condizioni di esercizio della cella di Knudsen assemblata all'interno di una camera muletto adibita a prove termiche ad alta temperatura. L'obiettivo principale dello studio è quello di valutare la distribuzione di temperatura in corrispondenza delle pareti interne della cella stessa: infatti, come specificato nel precedente capitolo, al fine di ottenere una buona efficienza del processo di effusione, tale temperatura deve essere il più uniforme possibile. A tal fine, in questo capitolo verranno descritti i passi principali per la creazione di un modello numerico capace di descrivere il comportamento termo-elettrico della sorgente di ionizzazione. Il modello verrà poi validato sperimentalmente mediante l'utilizzo di un apposito apparato di test.

**Capitolo 4:** Nel seguente capitolo si affronteranno le scelte progettuali effettuate per poter installare la cella di Knudsen all'interno della camera TOF realizzata ai Laboratori Nazionali di Legnaro. Verranno quindi illustrate le soluzioni tecniche adottate per quanto riguarda la linea di alimentazione elettrica e verrà descritto il sistema progettato per garantire un corretto posizionamento e centraggio della cella stessa. Sarà poi discussa dettagliatamente la simulazione termica effettuata con il codice di calcolo agli elementi finiti ANSYS® al fine di valutare la resistenza dei materiali scelti in fase di progettazione nelle condizioni più critiche di utilizzo e la necessità di disporre di un sistema di raffreddamento per la camera TOF.

**Capitolo 5:** Nel precedente capitolo sono state messe in evidenza, tramite le analisi FE effettuate, delle problematiche riguardanti le temperature raggiunte in esercizio da alcuni componenti del sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen. Nella prima parte del capitolo si esporrà la soluzione tecnica proposta ed il sistema progettato, proseguendo poi con delle analisi FE per valutare gli eventuali miglioramenti ottenuti. La collimazione ristretta è tecnica sviluppata per eliminare il contributo di "flussi parassiti" che si aggiungono al flusso molecolare vero e proprio prodotto dalla cella. In questo capitolo saranno dunque esposte le fasi di progettazione del sistema di collimazione e del suo supporto. Verranno quindi esposti i risultati delle analisi termiche agli elementi finiti svolte per valutare la temperatura sui componenti e quindi l'adeguatezza o meno della scelta dei materiali effettuata nella fase di design.

**Capitolo 6:** Il principale obiettivo dell'apparato in fase di sviluppo sarà quello di testare l'efficienza di ionizzazione dei laser risonanti. Conoscendo la forma del cono di effusione dato dall'evaporazione del campione dalla cella di Knudsen, il volume di azione del fascio laser focalizzato, le proprietà del laser, la tensione e la configurazione del sistema di estrazione e la velocità delle particelle, è possibile determinare il numero di atomi teoricamente ionizzati. Rapportando questo valore alla corrente del fascio di ioni letta dal sistema di diagnostica posto nella parte terminale del condotto a tempo di volo è possibile quindi stimare l'efficienza di ionizzazione del laser utilizzato. Dunque risulta di fondamentale importanza la conoscenza della forma del cono di effusione. In questo capitolo si descriveranno i test sperimentali di effusione condotti per determinare la forma del cono di effusione e si confronteranno tali risultati con quelli ottenuti numericamente al calcolatore utilizzando il software MOLFLOW®.

# Capitolo 1

## Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro: produzione ed utilizzo di fasci di ioni esotici

### 1.1 - Introduzione

Le proprietà della materia sono strettamente influenzate dalle caratteristiche degli atomi che la costituiscono, dalle loro interazioni e dalla loro disposizione nello spazio. Il livello atomico quindi costituisce la base fondamentale per poter studiare e comprendere la materia. In particolare la massa dell'atomo si concentra per lo più nel nucleo (circa il 99,9% del totale), di conseguenza è quest'ultimo che ne determina le caratteristiche principali e l'elemento di appartenenza. Il nucleo è costituito da particelle, genericamente dette nucleoni, tra le quali si possono distinguere i protoni e i neutroni. Tali particelle sono di massa molto simile tra loro (circa  $1,67 \cdot 10^{-24}$  g), la differenza risiede nel fatto che i protoni sono dotati di carica elettrica positiva ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C), mentre i neutroni sono elettricamente neutri [1]. 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.

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 del 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 studio delle proprietà dei nuclei è detto fisica nucleare.

I nuclei stabili (non radioattivi) in genere possiedono un egual numero di protoni e di neutroni [1], dal momento che la forza attrattiva tra neutroni e protoni è leggermente più intensa di quella tra nucleoni dello stesso tipo. Tuttavia per numeri di massa atomica superiore al 40 le forze elettrostatiche diventano più significative, spostando quindi la stabilità degli atomi verso quelli con numero di neutroni più elevato rispetto ai protoni. Infatti, l'aggiunta di un maggior numero di particelle neutre non alimenta l'azione della repulsione elettrostatica ma consente di aumentare solamente l'interazione nucleare. Tuttavia la presenza della forza coulombiana limita superiormente la presenza di atomi superpesanti. Infatti con l'aumento della massa dell'atomo si manifesta necessariamente un aumento delle sue dimensioni e quindi delle distanze tra i nucleoni. Questo si traduce in una perdita di efficacia dell'interazione nucleare forte, che è un'azione a corto raggio, rendendo quindi il nucleo instabile. Tali informazioni sono rappresentate dalla carta dei nuclidi (Fig. 1.1).

La carta dei nuclidi individua gli isotopi in base al loro numero di neutroni e di protoni. In ordinata sono posti il numero di protoni (Z), mentre l'asse delle ascisse rappresenta il numero di neutroni (N). In nero sono indicati i nuclei stabili, e come già enunciato, si osserva che a bassi numeri di massa i nuclei stabili sono distribuiti pressoché lungo una retta inclinata di  $45^\circ$  ( $Z=N$ ). I nuclei con eccesso o difetto di neutroni (chiamati rispettivamente *proton-rich* e *neutron-rich*) sono distanti dalla valle di stabilità e decadono con emissione di particelle o radiazioni elettromagnetiche a seconda della loro natura.

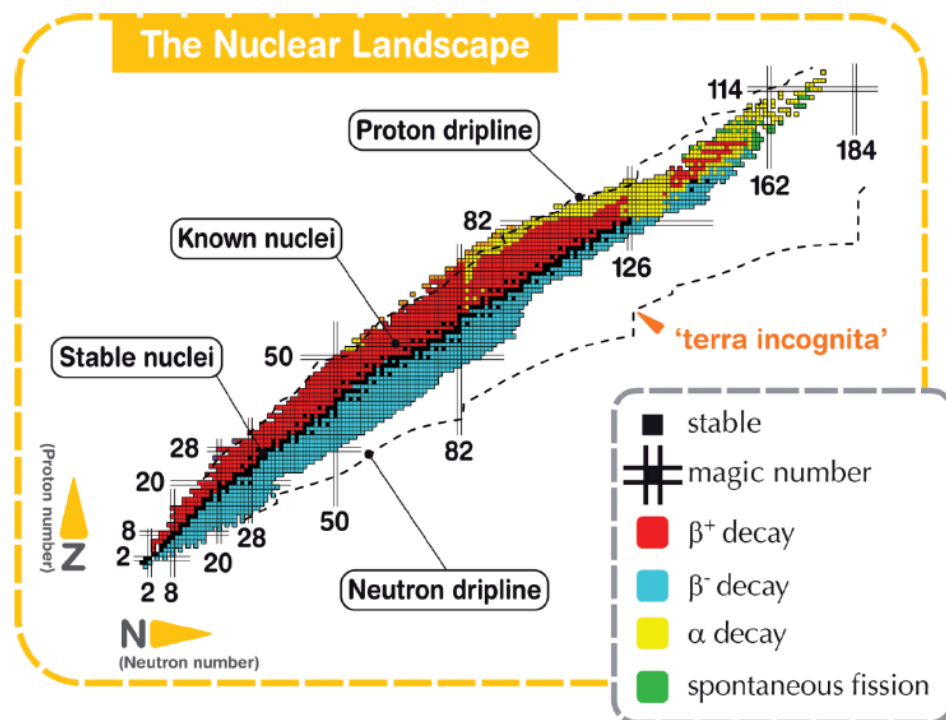


Fig. 1.1 Carta dei nuclidi [2].

Esistono quattro possibili tipologie di decadimenti nucleari [1]:

- Decadimento alfa: Tipico di atomi con  $Z > 83$ , avviene per mezzo dell'emissione di una particella  $\alpha$ . Tali particelle equivalgono ad un nucleo di  ${}^4\text{He}$  (2 protoni e 2 neutroni), pertanto il risultato è la diminuzione sia del numero di massa  $A$ , che del numero atomico  $Z$  secondo lo schema:  

$$Z_D = Z - 2$$

$$A_D = A - 4$$
Dove  $Z_D$  e  $A_D$  sono rispettivamente il numero atomico e il numero di massa dopo il decadimento.
- Decadimento beta, che si può manifestare secondo due schemi di reazione:  

$$n \rightarrow p^+ + \beta^- + \bar{\nu}$$

$$p^+ \rightarrow n + \beta^+ + \nu$$
Nel primo caso si ha il decadimento  $\beta^-$ , caratteristico dei nuclidi rappresentati in blu in Fig. 1.1, cioè isotopi con un eccesso di neutroni e quindi al di sotto della valle di stabilità. L'emissione di particelle  $\beta^-$  comporta la perdita dei neutroni in eccesso, e quindi la tendenza ad avvicinarsi alla valle di stabilità. Il decadimento consiste nella trasformazione di un neutrone in un protone, accompagnato dalla perdita di una particella  $\beta^-$  (elettrone) e di un antineutrino in modo da garantire il bilanciamento della reazione sia per la carica che per la massa.  
Il secondo schema di reazione invece è chiamato decadimento  $\beta^+$  ed è tipico dei nuclei con eccesso di protoni e quindi al di sopra della valle di stabilità (in rosso in Fig. 1.1). Tali nuclidi tendono a trasformare i protoni in neutroni per riacquisire stabilità, con emissione di un positrone ( $\beta^+$ ) e di un neutrino.
- Fissione spontanea: avviene in alcuni nuclei molto pesanti (in verde in Fig. 1.1) e consiste nella loro spontanea suddivisione in due diversi atomi. Ad esempio l'isotopo  ${}^{252}_{98}\text{Cf}$  dà luogo spontaneamente alla reazione  ${}^{252}_{98}\text{Cf} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{108}_{44}\text{Ru} + {}^1_0\text{n} + Q$ , in cui  $Q$  è l'energia liberata nel processo.
- Emissione di raggi  $\gamma$ : è in genere una forma di decadimento successiva o contemporanea ad una di quelle elencate in precedenza in quanto consiste solamente nell'emissione di radiazioni elettromagnetiche e non provoca alcuna variazione a livello delle specie atomiche interessate. Tale fenomeno è imputabile al fatto che i nuclei neoformati, chiamati nuclei figli, sono caratterizzati spesso da uno stato di eccitazione che provoca l'emissione di radiazione elettromagnetica ad alta frequenza.

Attualmente sono state studiate le proprietà nucleari di circa 3600 nuclei, che possono essere prodotti con più o meno facilità nelle diverse *facility* nel mondo. I nuclei radioattivi sono chiamati esotici e in base a stime calcolate secondo modelli teorici, si ritiene che possano essere fino a 6000. Tali nuclei si trovano all'interno delle *driplines*, indicate in Fig. 1.1, linee che delimitano il campo di esistenza di possibili nuclei e oltre le quali l'instabilità sarebbe tale da impedirne l'esistenza. Sono ancora molti i nuclei incogniti all'interno di questo campo, soprattutto nella regione dei nuclei *neutron-rich*, cioè al di sotto della valle di stabilità.

La carta dei nuclidi (Fig. 1.1) fornisce inoltre alcune indicazioni su particolari numeri di protoni o neutroni, detti numeri magici. Tali numeri corrispondono a configurazioni nucleari (numero di nucleoni) che rendono il nucleo particolarmente stabile. Numeri magici sono ad esempio 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Nuclei che hanno sia il numero di protoni che il numero di neutroni uguale ad uno dei numeri magici sono ancora più stabili e sono detti nuclei doppiamente magici. I nuclei doppiamente magici presenti in natura sono quattro e sono:  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{208}\text{Pb}$ .

Lo studio dei nuclei instabili ha aperto nuovi campi di ricerca in fisica nucleare e ha portato ad importanti applicazioni in fisica dello stato solido, astrofisica ed infine in medicina nucleare grazie allo studio e alla produzione di radionuclidi per la terapia e la diagnosi.

## 1.2 - Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro

SPES (*Selective Production of Exotic Species*) è un progetto multidisciplinare il cui principale obiettivo è quello di creare un apparato sperimentale in grado di produrre fasci di ioni radioattivi, chiamati RIB (*Radioactive Ion Beam*), per studi di fisica nucleare fondamentale e per lo studio di nuclei atomici instabili. Tali nuclei non sono presenti naturalmente, ma sono prodotti durante le fasi conclusive della vita delle stelle, dalle quali tutti gli elementi sono generati.

Al giorno d'oggi la maggior parte delle conoscenze a proposito delle proprietà nucleari deriva dallo studio dei nuclei localizzati nella valle di stabilità o da nuclei con una carenza di neutroni. Si ritiene che lo studio di nuclei atomici con un largo eccesso di neutroni o protoni possa consentire la scoperta di nuove proprietà della struttura nucleare.

Sono state previste quattro fasi per il progetto:

- SPES- $\alpha$ : questa fase prevede l'acquisizione, l'installazione e la messa in opera di un ciclotrone ad alte prestazioni con un'alta corrente in uscita ( $\sim 0.7$  mA) e ad alta energia (fino a 70 MeV<sup>1</sup>), oltre all'infrastruttura per l'acceleratore e alle aree sperimentali. Il ciclotrone sarà provvisto di due porte di uscita per consentire la realizzazione della doppia missione del laboratorio: la ricerca di base e le applicazioni tecnologiche. Uno dei due fasci sarà dedicato alla *facility* di fisica nucleare, per la produzione di ioni ricchi di neutroni per collisione di protoni su un *target* di UC<sub>x</sub>, il secondo sarà dedicato a studi di fisica applicata;
- SPES- $\beta$ : prevede l'accelerazione di specie *neutron-rich* verso adatti *target*. Nelle collisioni verranno prodotti nuclei nuovi, con un largo eccesso di neutroni, simili a quelli generati nelle fasi terminali della vita delle stelle e che non sono presenti sulla Terra, a causa della loro brevissima vita. La ricerca in questo ambito rappresenta una nuova frontiera della fisica per estendere la conoscenza di nuclei in condizioni estreme e per fornire informazioni di base nello studio dell'evoluzione stellare;
- SPES- $\gamma$ : questa fase riguarda la produzione di radionuclidi di interesse medico mediante l'uso del ciclotrone SPES- $\alpha$ . L'obiettivo è la produzione di radiofarmaci innovativi (come quelli basati su Sr-82/Rb-82 e Ga-68/Ge-68) e di radionuclidi convenzionali con nuovi approcci basati sull'uso dell'acceleratore;

---

<sup>1</sup> In fisica l'elettronvolt (simbolo eV) è un'unità di misura dell'energia, molto usata in ambito atomico e subatomico. Viene definito come l'energia guadagnata (o persa) dalla carica elettrica di un singolo elettrone, quando viene mosso nel vuoto tra due punti di una regione in cui ha sede un potenziale elettrostatico, tra i quali vi è una differenza di potenziale pari a 1 V.

- SPES- $\delta$ : prevede lo sviluppo di un'intensa sorgente neutronica, dal ciclotrone e/o da un acceleratore lineare ad alta intensità basato sulla *radio-frequency quadrupole technology* (RFQ). Applicazioni della sorgente neutronica si estendono dall'astrofisica nucleare, alla caratterizzazione dei rifiuti nucleari o a trattamenti sperimentali di tumori.

### 1.3 - La produzione di fasci di ioni radioattivi (SPES- $\beta$ )

La produzione di fasci di ioni radioattivi richiede la costruzione di apparati, detti *facility*, capaci di produrre RIB di elevata purezza, intensità ed energia. In Europa e nel resto del mondo vi sono numerose *facilities* operanti per la produzione di fasci radioattivi; la maggior parte di esse sono basate sulla tecnica ISOL [3]. La tecnica ISOL (*Isotope Separation On-Line*) consiste nella separazione degli isotopi in linea. *Facility* di questa tipologia sono generalmente composte da (Fig. 1.2):

- l'acceleratore primario;
- il complesso *target*-sistema di estrazione e ionizzazione;
- il *front end*;
- i separatori di massa ed isobari;
- il post acceleratore.

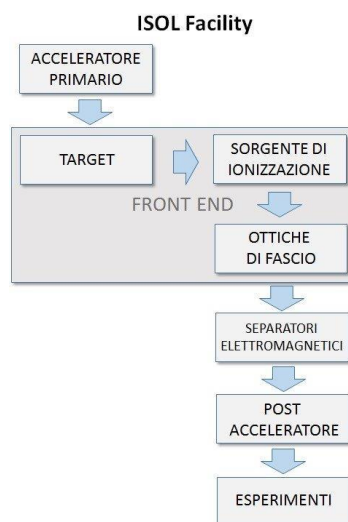


Fig. 1.2 Schema di una facility di tipo ISOL.

L'acceleratore primario è studiato per fornire un fascio di particelle della voluta energia che viene quindi fatto collidere su un bersaglio (*target*) di materiale fissile. In quest'ultimo, a seguito di reazioni nucleari di vario tipo (fissione, spallazione, frammentazione, ecc.), si ha la generazione di isotopi radioattivi. I radioisotopi così prodotti possono uscire dal target ed essere ionizzati; grazie alla carica acquisita possono quindi essere estratti ed accelerati con una differenza di potenziale, formando un fascio di particelle radioattive (RIB). Il primo stadio di accelerazione avviene nel *front end* in cui il fascio viene opportunamente focalizzato e successivamente separato in massa tramite dei separatori elettromagnetici. L'azione di tali separatori permette di ottenere un fascio chimicamente ed isobaricamente puro. Infine il fascio è accelerato dal post-acceleratore al livello di energia richiesto dal particolare esperimento.

L'intensità del fascio radioattivo prodotto è usualmente descritta dall'eq. 1.1:

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

dove:

- $\sigma$  è la sezione d'urto per le reazioni nucleari, ossia la probabilità che avvenga una certa reazione nucleare;
- $\Phi$  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;
- $\varepsilon_3$  è l'efficienza del processo di estrazione e trasporto.

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; infatti all'aumentare del livello termico, la velocità di diffusione delle particelle manifesta un incremento. Ciò risulta importante soprattutto per atomi radioattivi a breve emivita, in quanto un rapido rilascio evita una perdita di questi atomi per decadimento. Per questo motivo il sistema deve essere mantenuto alla maggior 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 *facility* complementari, definite di *intermedia generazione*, fondamentali per arrivare alla costruzione di un'unica grande *facility* europea di tipo ISOL, chiamata EURISOL [2]. Data la portata di tale progetto, sono coinvolti nell'iniziativa i principali laboratori nucleari europei con l'obiettivo dello studio e della progettazione di una struttura per la produzione di fasci di ioni radioattivi di qualità significativamente superiore a quella attualmente disponibile. In tale direzione sono orientati anche i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), presso i quali è in corso la costruzione di una *facility* ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici: il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*) [4]. Tale progetto è coordinato a livello nazionale da INFN, Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Padova e a livello internazionale prevede strette collaborazioni con i laboratori del CERN (Svizzera) e di Oak Ridge (USA).

#### 1.4 - Configurazione della *facility*

La *facility* è principalmente dedicata alla produzione di radioisotopi *neutron-rich* con masse da 80 a 160 una a seguito di fissione di  $^{238}\text{U}$  con una resa massima di  $10^{13}$  fissioni/s; la fissione è resa possibile dal bombardamento con un fascio protonico a 40 MeV, detto fascio primario, di un adeguato *target* costituito da sette dischi in carburo di uranio ( $\text{UC}_x$ ). 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 radioprotezione. In Fig. 1.3 viene mostrata una schematica rappresentazione della *facility*.

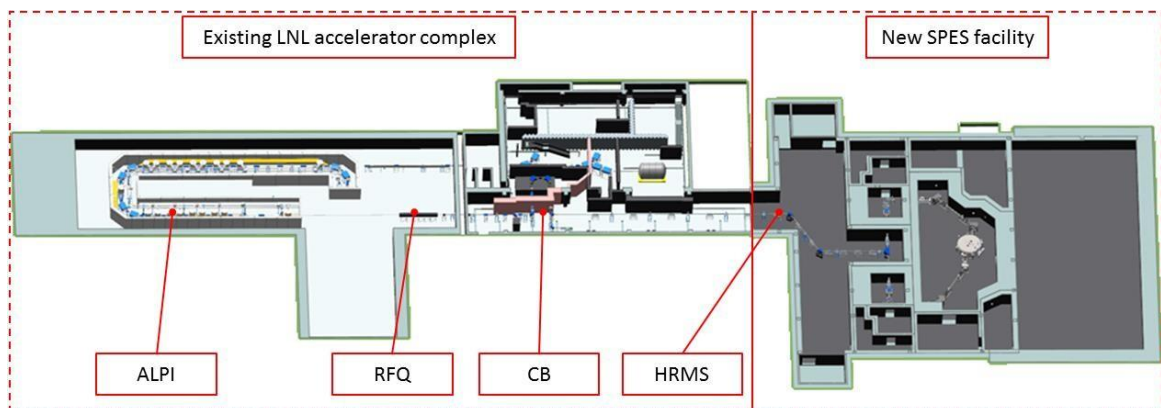


Fig. 1.3 Layout del progetto SPES.

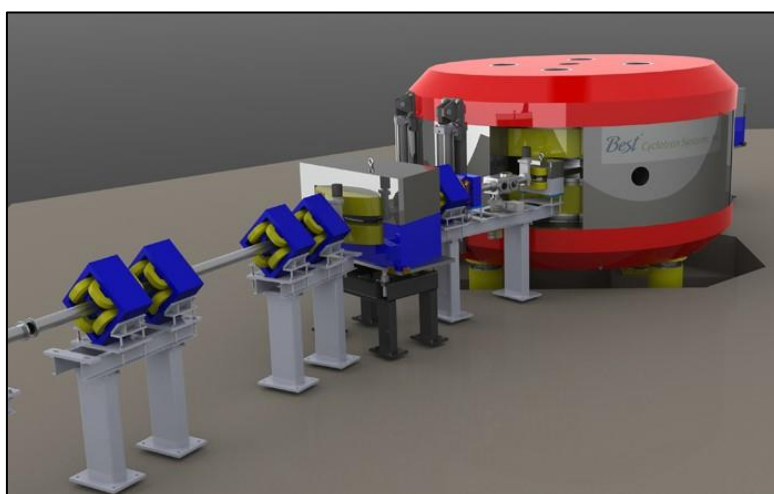


**Fig. 1.4** Collocazione dell'edificio SPES all'interno dei Laboratori Nazionali di Legnaro.

Vengono di seguito descritti i principali elementi che compongono la *facility*.

#### 1.4.1 - L'acceleratore primario

L'acceleratore primario ha la funzione di produrre un fascio protonico in grado di colpire il *target* di carburo di uranio in cui avviene la reazione di fissione nucleare. L'acceleratore utilizzato per la *facility* SPES è un ciclotrone. 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. Il mercato offre oggi la possibilità di produrre, con la tecnologia del ciclotrone, fasci di intensità molto vicina alle richieste del progetto SPES. Il ciclotrone scelto per il progetto SPES è il BEST 70p, sviluppato dalla Best Cyclotron e mostrato in Fig. 1.5, il quale è in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti fino a 70 MeV ed aventi una corrente massima di 750  $\mu$ A.



**Fig. 1.5** Il ciclotrone BEST 70p.





Fig. 1.6 Fasi di installazione del ciclotrone nell'edificio SPES. Maggio 2015.

#### 1.4.2 - Il target di produzione e il sistema di estrazione e di ionizzazione

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 dell'acqua per le elevate potenze in gioco (vedi Fig. 1.3). 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 pressioni dell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar), condizione necessaria per aumentare il cammino libero medio delle particelle radioattive prodotte.

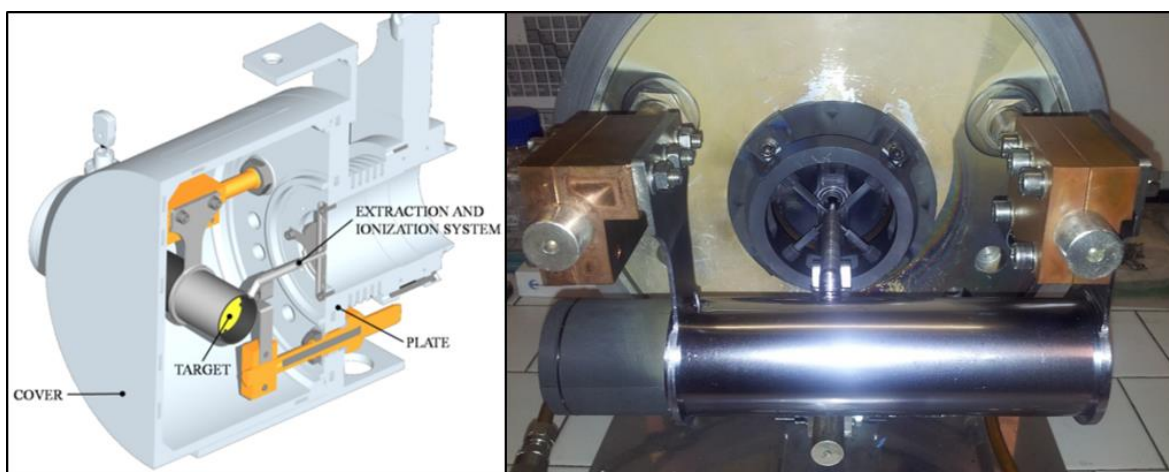


Fig. 1.7 Rappresentazione della camera target del progetto SPES.

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 una scatola (*box*), un tubo cavo di grafite, avente un diametro esterno e una lunghezza di 49 e 200 mm rispettivamente (vedi Fig. 1.8). Il fascio di protoni, prima di impattare contro i dischi, attraversa una finestra in grafite molto sottile per non attenuare l'intensità del fascio, ma di fondamentale importanza poiché consente di schermare la zona attiva e di evitare un eccessivo raffreddamento del materiale fissile in corrispondenza dell'ingresso del fascio. Dopo aver investito la finestra di grafite e i dischi di  $UC_x$ , il fascio primario va a impattare su tre *dumper* e sul fondo scatola (*box base*); questi elementi provvedono sia all'assorbimento definitivo del fascio, per evitare l'attivazione della camera esterna, sia ad evitare la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del target.

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 consente di evitare improvvisi

sbalzi di temperatura molto pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi. Il riscaldatore (*heater*) è composto da un tubo molto sottile saldato ai bordi a due ali direttamente collegate a morsetti in rame; attraverso i morsetti è possibile far dissipare 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. Il materiale scelto per il riscaldatore è il tantalio, altamente resistente alla corrosione, in grado di condurre energia elettrica e termica e di raggiungere temperature molto elevate [5].

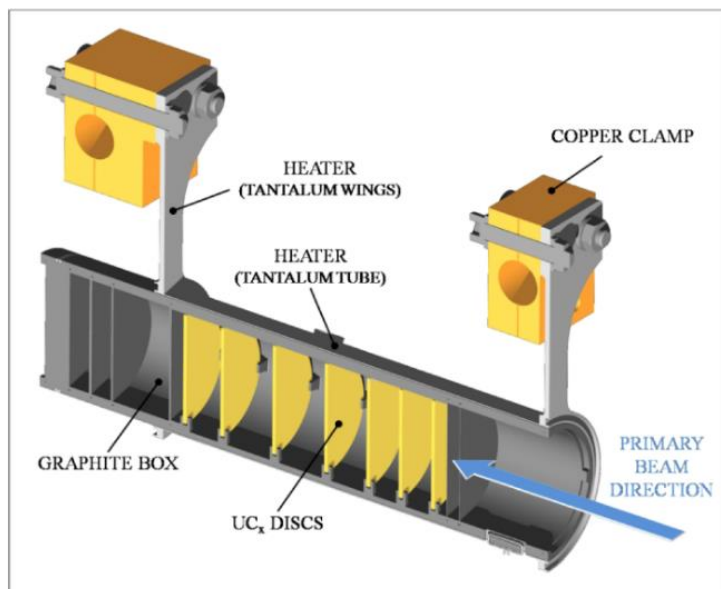


Fig. 1.8 Il target SPES.

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 la linea di trasferimento (*transfer line*), attraverso la quale gli isotopi in uscita dal target vengono indirizzati verso la sorgente di ionizzazione (*ion source*) dove sono ionizzati positivamente (ioni 1+). Nell'attuale configurazione la *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 Fig. 1.11). Come accade per il riscaldatore, anche il sistema di trasferimento e ionizzazione viene riscaldato mediante dissipazione di potenza per effetto Joule; in questo modo la temperatura della sorgente arriva fino ai 2200 °C.

A seconda del potenziale di ionizzazione dell'elemento possono essere utilizzati diversi metodi di ionizzazione. Il potenziale di ionizzazione è rappresentato dall'energia necessaria per portare un elettrone della sfera di valenza ad una distanza infinita dall'atomo. Metalli alcalini e alcalino-terrosi hanno bassi potenziali di ionizzazione per cui una energia relativamente bassa sarà richiesta per ottenere la loro ionizzazione. In questo caso si può optare per l'uso di una sorgente di ionizzazione superficiale (SIS – *Surface Ion Source*), descritta in seguito più dettagliatamente. Altri tipi di sorgenti utilizzabili nel *front end* SPES sono la sorgente di ionizzazione al plasma (PIS – *Plasma Ion Source*), in grado di ionizzare elementi con alto potenziale di ionizzazione, ma senza selettività e la sorgente di ionizzazione laser (LIS – *Laser Ion Source*) in grado di ionizzare selettivamente elementi con medio potenziale di ionizzazione. In Fig. 1.9 vengono visualizzati gli elementi e il metodo di ionizzazione preferibile per ciascuno. Gli elementi di transizione da  $Z = 40$  a  $Z = 46$  sono prodotti nel target, ma non estratti per la loro bassa volatilità (refrattari). In sono invece illustrati i radionuclidi che verranno prodotti nel progetto SPES, dove la legenda si riferisce al numero di particelle prodotte per secondo.

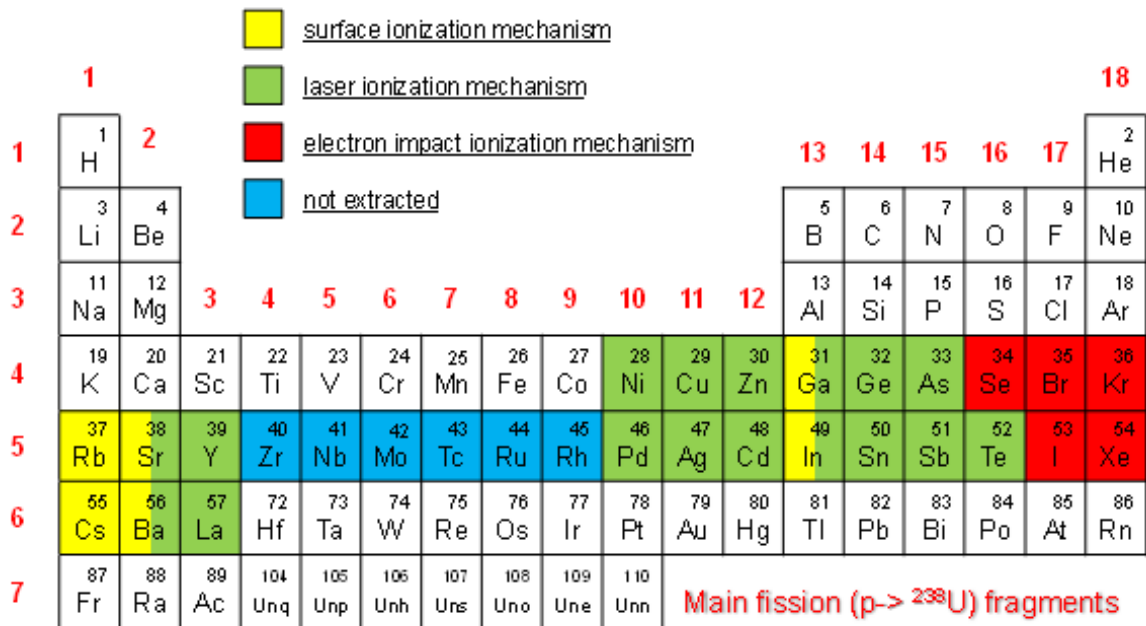


Fig. 1.9 Tavola periodica rappresentante i principali elementi prodotti dalla fissione dei dischi in carburo di uranio e i rispettivi metodi di ionizzazione preferenziali.

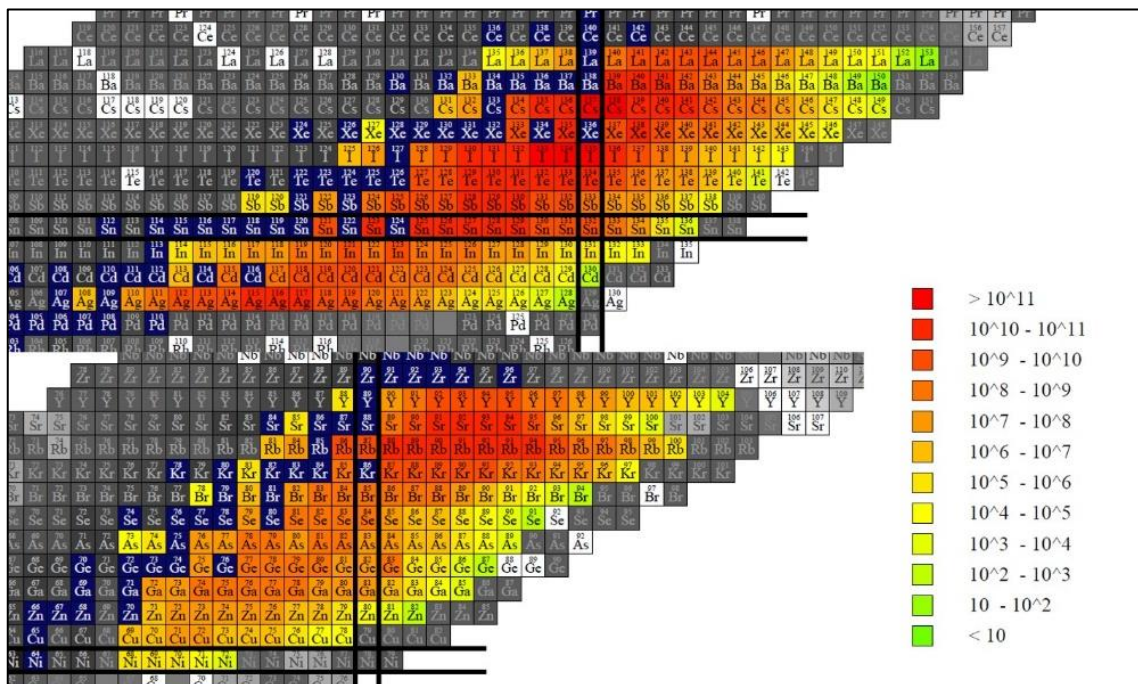


Fig. 1.10 Radionuclidi che produrrà il progetto SPES. La legenda si riferisce al numero di particelle prodotte per secondo.

La camera *target* è collegata al *front end* e tra i due componenti è presente una differenza di potenziale ( $V_{camera} - V_{front-end}$ ) pari a 40 kV. Per questo è necessario, al fine di evitare il contatto diretto, interporre un isolante elettrico. 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 realizzato in lega di titanio ( $Ti_6Al_4V$ ) e visibile in Fig. 1.11. Il fascio di ioni radioattivi verrà, dopo il passaggio attraverso i separatori elettromagnetici ed il post acceleratore, inviato alle sale sperimentali.

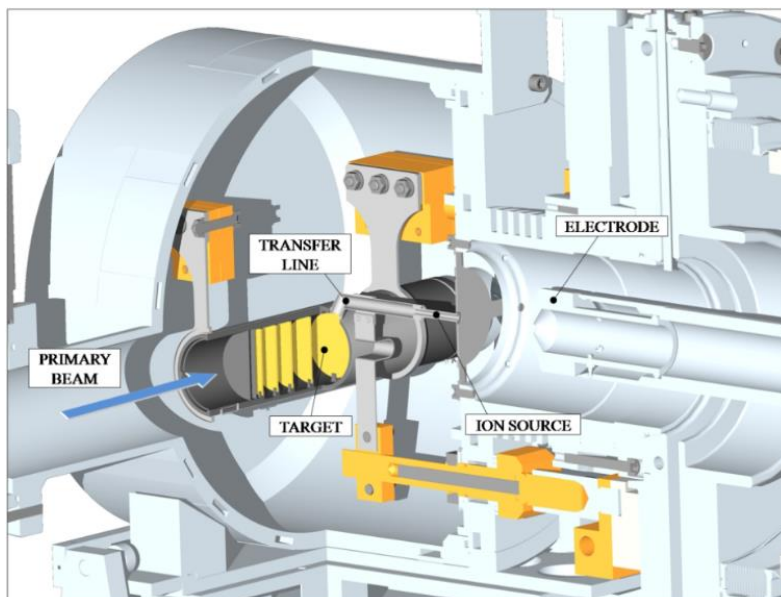


Fig. 1.11 Rappresentazione del sistema di estrazione e ionizzazione del progetto SPES.

### 1.4.3 - Sorgenti di ionizzazione

Di seguito sono elencati le tipologie di sorgenti di ionizzazione che verranno utilizzate nell'ambito del progetto SPES. Il principi fisici della ionizzazione laser e l'architettura della rispettiva sorgente verranno poi approfonditi in dettaglio nel Capitolo 2.

#### **Surface Ion Source (SIS)**

In questo tipo di sorgente di ionizzazione, l'impatto degli isotopi radioattivi provenienti dal target sulla superficie interna della sorgente causa la ionizzazione. Tale procedimento 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. In questo caso si riescono a produrre con elevata efficienza ioni positivi per elementi con potenziale di ionizzazione inferiore alla funzione di lavoro del renio, pari a circa 5 eV. L'elevata temperatura a cui si trova la sorgente di ionizzazione permette di avere un processo di ionizzazione efficiente e selettivo ma soltanto per gli elementi del primo e del secondo gruppo. E' proprio questo lo svantaggio principale del metodo.

La sorgente di ionizzazione superficiale (ST\_SIS), detta anche sorgente di ionizzazione ad hot cavity, è il macro-componente dove ha luogo la trasformazione degli isotopi estratti in ioni positivi attraverso l'asportazione di uno degli elettroni posti sull'ultimo livello atomico. Per ottenere un processo di ionizzazione efficiente è necessario che la sorgente sia mantenuta ad una temperatura sufficientemente elevata. Questo è ottenuto attraverso il riscaldamento per effetto Joule dovuto alla corrente fornita alla sorgente per mezzo della linea di trasferimento (350 A) ottenendo così il livello desiderato di temperatura pari a 2000 °C.

Il macro-componente sorgente di ionizzazione superficiale è composto da due sotto-assiemi(Fig. 1.12):

- lo ionizzatore (ST\_SIS\_01)
- il sistema di allineamento (ST\_SIS\_02)

Lo ionizzatore (ST\_SIS\_01) costituisce la parte a cui è addebitata la principale funzione di ionizzare gli isotopi estratti nel target. Questo processo ha luogo in particolare nel componente indicato come hot cavity, un oggetto in renio (o eventualmente tantalio) di forma tubolare, di lunghezza 33 mm, diametro esterno 5.1 mm e diametro interno 2.8 mm. La hot cavity è sostenuta sul piatto della camera da vuoto per mezzo di un opportuno supporto in tantalio, mentre uno schermo quadrilobato è posto tra il piatto e il supporto per occludere parzialmente l'apertura verso il canale radioattivo. Questi ultimi due componenti hanno anche la funzione di scaricare sul piatto la corrente elettrica di riscaldamento della sorgente. Infine la parte terminale della hot cavity è protetta da uno schermo tubolare in tantalio, di diametro 10.5 mm, spessore 0.3 mm e lunghezza 10 mm, che ha la funzione di evitare un'eccessiva dispersione del

calore sotto forma di radiazione termica con conseguente abbassamento della temperatura della sorgente.

Completa infine il macro-componente sorgente di ionizzazione superficiale il sistema di allineamento della sorgente (ST\_SIS\_02) che ha la funzione di garantire l'allineamento dello ionizzatore anche ad alte temperature. Questo è di vitale importanza se si utilizza anche il sistema di ionizzazione al laser, in cui una hot cavity eccessivamente deformata può compromettere seriamente l'efficienza del processo di ionizzazione.

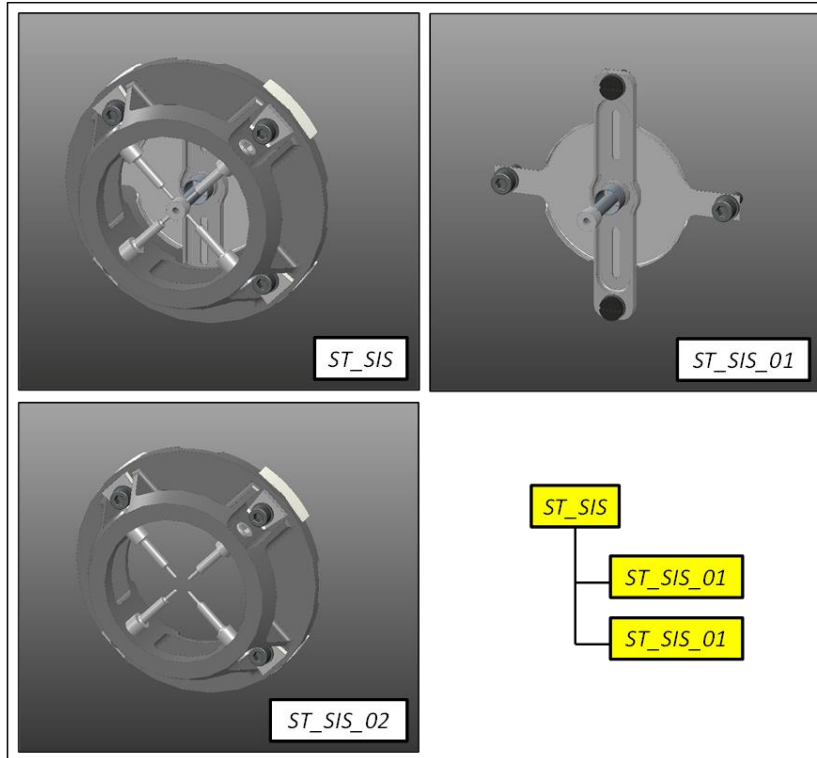


Fig. 1.12 Rappresentazione della sorgente di ionizzazione superficiale (ST\_SIS) e dei suoi principali sottoassiemi)

In ogni caso si devono predisporre dei separatori elettromagnetici in grado di selezionare in base alla massa gli isotopi che si vogliono nel fascio. Nonostante questa operazione, la purezza del fascio non sarà comunque garantita perché ci possono comunque essere isotopi di diverse specie isobari, aventi cioè lo stesso numero di massa  $A$  ma diverso numero atomico  $Z$  (esempio il  $^{132}\text{Cs}$  e lo  $^{132}\text{Sn}$ ). Per dividere tali elementi sono necessari separatori isobari, che sono dispositivi molto complicati, costosi e poco affidabili, che comportano inoltre notevole una notevole riduzione dell'intensità del fascio.

#### **Resonant Ionization Laser Ion Source (RILIS)**

Il metodo RILIS è, ad oggi, il più potente strumento per la produzione di fasci di ioni radioattivi per le facility di tipo ISOL, in quanto permette un processo di ionizzazione selettiva e garantisce la soppressione di contaminazioni indesiderate a livello della sorgente di ionizzazione. Il la sorgente di ionizzazione laser utilizza un tipo di architettura identica a quella della sorgente di ionizzazione superficiale (SIS), con la differenza che, in questo caso, un laser viene proiettato all'interno della sorgente come illustrato in Fig. 1.13.

Tale laser è composto dalla sovrapposizione di più raggi (due o tre a seconda dell'elemento chimico da ionizzare) aventi lunghezze d'onda e quindi frequenze differenti, corrispondenti a diversi valori energetici dei fotoni emessi. Esso irradia gli isotopi e fornisce loro energia necessaria per far compiere all'elettrone più esterno dei salti quantici verso orbitali ancor più lontani dal nucleo, fino alla separazione dell'atomo. In questo modo si ha formazione di uno ione positivo  $1+$ .

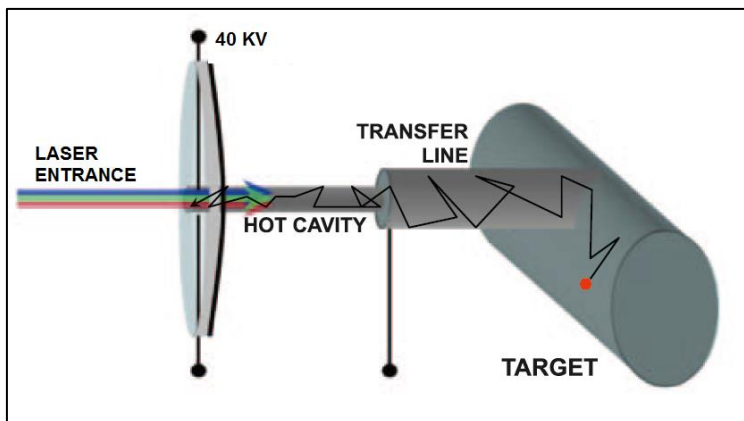


Fig. 1.13 Schema di funzionamento della RILIS [6].

La metodologia RILIS permette di ionizzare soltanto isotopi radioattivi della specie di interesse, producendo un fascio nel quale le contaminazioni sono minime. A causa dell'architettura della sorgente, tuttavia, alcuni elementi (in particolare il cesio) vengono ionizzati per strisciamento, provocando così imperfezioni che, se non opportunamente corrette o attenuate, andranno a contaminare il fascio.

**Plasma ion source (PIS)**

Questo tipo di sorgente utilizza per la ionizzazione la tecnica FEBIAD (*forced electron beam induced arc discharge*), in cui gli atomi vengono ionizzati a causa dell'impatto con elettroni accelerati per effetto termoionico. Il processo avviene in una struttura costituita da un catodo e da un anodo. Il catodo viene riscaldato grazie al passaggio di una corrente continua di 330-340 A e si porta ad alta temperatura. Questa conferisce agli elettroni un'energia superiore a quella di legame con l'atomo tanto che si verifica l'emissione di elettroni da parte del catodo in una camera che funge da anodo. All'interno di questa camera gli elettroni rilasciati dal catodo, che vengono accelerati da una differenza di potenziale tipicamente di 150V, vengono a contatto con gli atomi da ionizzare: l'impatto elettronico causa la perdita di un elettrone da parte degli atomi dell'anodo (ioni positivi) creando quindi un plasma. Nella *facility* ISOLDE del CERN viene usata una sorgente di ionizzazione al plasma di tipo FEBIAD chiamata MK5. Nell'ambito del progetto SPES un prototipo di questa sorgente è stato realizzato, testato e ottimizzato dal punto di vista elettro-termico. Questo tipo di sorgente è in grado di ionizzare qualsiasi tipo di elemento, anche se con efficienze inferiori rispetto alle tecniche laser e superficiale.

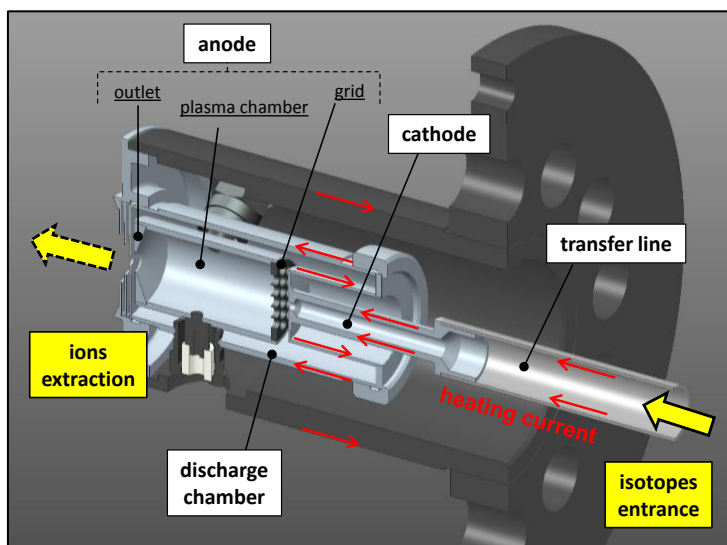
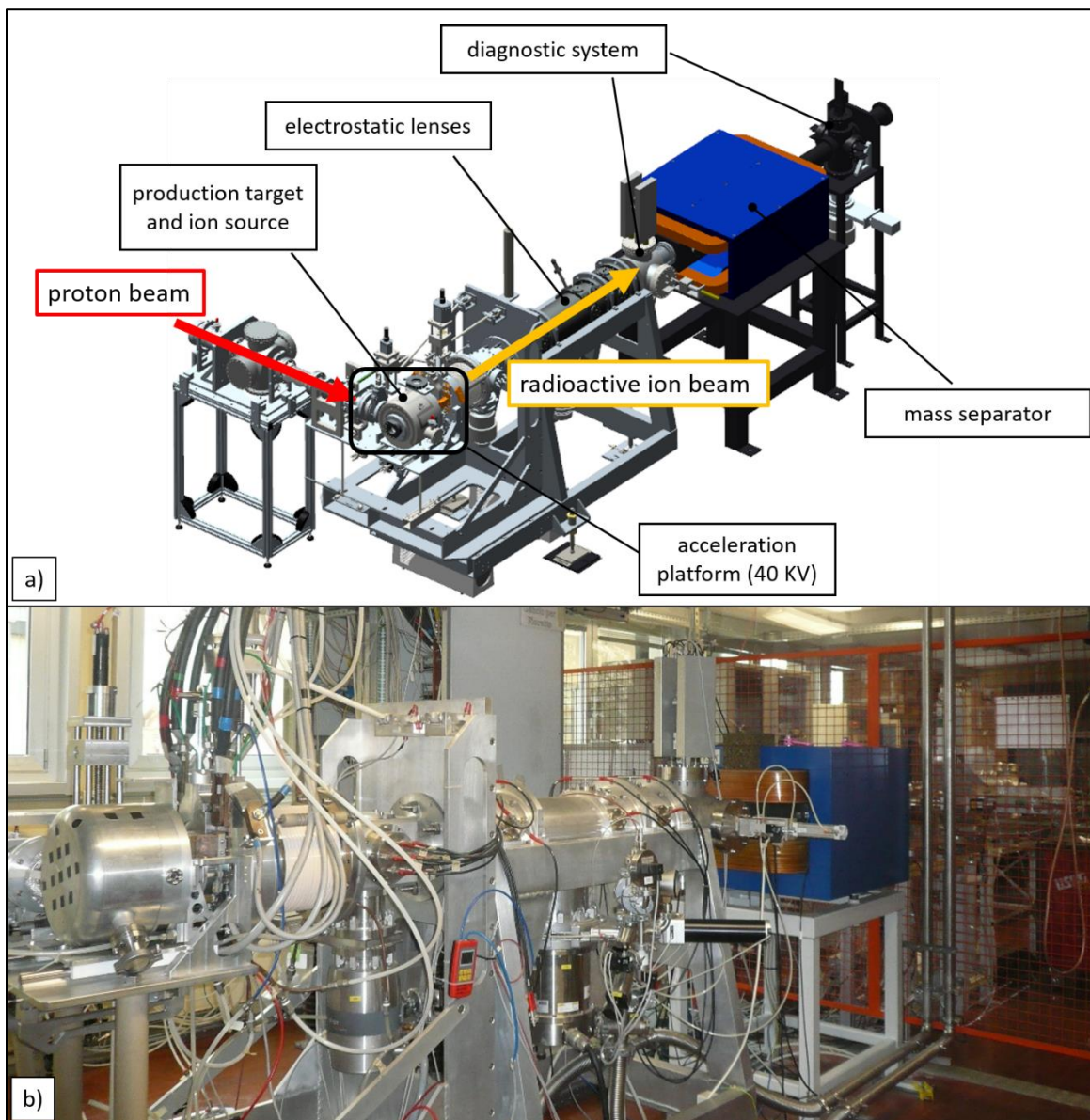


Fig. 1.14 Schema di funzionamento di una sorgente di ionizzazione di tipo FEBIAD [7].

#### 1.4.4 - Separatori magnetici e post accelerazione

Il fascio estratto dalla sorgente di ionizzazione è sottoposto ad una prima fase di purificazione nella quale, attraverso un separatore di massa (*Wien Filter*), viene intrappolata una grande quantità di contaminanti. La risoluzione di tale dispositivo ( $M/\Delta M$ , dove per  $M$  si intende la massa dell'isotopo) è pari a circa 300; si riescono così a separare in base alla massa i vari elementi. In Fig. 1.15 una rappresentazione del *front end* di SPES.



**Fig. 1.15** Il front end di SPES per la produzione di fasci di isotopi radioattivi (utilizzo on-line) **a)** e l'apparato di test realizzato per la produzione di fasci di ioni stabili (utilizzo off-line) **b)**.

Il separatore di massa è seguito da un separatore isobaro, avente una risoluzione pari a 15000, e che permette quindi di separare gli isotopi come il  $^{132}\text{Cs}$  e lo  $^{132}\text{Sn}$  tra loro isobari.

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 in un RFQ, che rappresenta il primo stadio di post accelerazione prima dell'ingresso in ALPI.



**Fig. 1.16** A sinistra, un tratto del linac ALPI. In evidenza i criostati, recipienti che contengono ed isolano termicamente le cavità superconduttive (a  $T=-269$  °C). A destra, l'interno di un criostato, con 4 cavità acceleranti su base di rame.

## 1.5 - Applicazioni 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. Nei prossimi paragrafi viene data una breve panoramica delle applicazioni nei vari ambiti di ricerca.

### 1.5.1 - Applicazioni in fisica nucleare

Sono elencate di seguito le principali applicazioni nell'ambito della fisica nucleare.

#### ***Miglioramento e verifica del modello standard***

L'attuale modello su cui si basa la fisica nucleare comprende tre delle quattro interazioni fondamentali, cioè l'interazione nucleare forte, l'elettromagnetismo e l'interazione nucleare debole (queste ultime talvolta identificate con il termine interazione elettrodebole) e descrive la funzione e le proprietà di tutte le particelle (note ed osservate) che costituiscono la materia. Sebbene tale modello abbia avuto un notevole successo l'aspetto poco soddisfacente è che è stato costruito facendo uso di alcune assunzioni ad hoc non ancora pienamente verificate. Per chiarire l'origine e confermare la validità di tali assunzioni sono stati ideati complessi esperimenti di fisica nucleare, suggeriti da convincenti basi di natura teorica. La messa in opera di tali procedure sperimentali comporterebbe l'effettuazione di misure precise sulle proprietà di decadimento di alcuni isotopi, che possono essere ricavate utilizzando come sorgente pura di ioni i fasci radioattivi prodotti nelle *facility*.

#### ***Studio della struttura di nuclei complessi***

I nucleoni (protoni e neutroni) sono a loro volta costituiti da sub-particelle dette quark. Esse esercitano un'azione fisica che va oltre i nucleoni nei quali sono confinate. Si osserva in particolare che tale interazione si manifesta in maniera diversa tra nucleoni liberi e nucleoni appartenenti allo stesso nucleo, in quanto influenzata dalla densità di protoni e neutroni associata al particolare tipo di nucleo. Attualmente non è stata ancora identificata una formula generale in grado di quantificare l'entità delle interazioni nucleari per tutti i tipi di nuclei, in quanto calcoli di natura quantomeccanica sono applicabili solamente ai nuclei più leggeri. La fisica nucleare quindi si è posta l'obiettivo di ottenere una trattazione unitaria in grado di:

- Permettere di determinare l'effettiva interazione tra le particelle nucleari
- Eliminare le incongruenze presenti nel modello corrente
- Essere applicabile anche ai nuclei esotici, ossia quelli con rapporto protoni/neutroni estremo.



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

#### **Misure della dimensione del nucleo: i nuclei halo**

Le dimensioni del nucleo sono direttamente correlate al numero di nucleoni che lo costituiscono, ovvero il numero di massa ( $A$ ). Tale correlazione è espressa dalla formula:

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (1.2)$$

dove con  $R$  è espresso il raggio del nucleo,  $A$  indica il numero di massa e  $R_0$  rappresenta una costante pari a 1.2 fermi (1 fermi =  $10^{-15}$  m).

Tuttavia in particolari condizioni, lontane dalla stabilità, si possono incontrare notevoli deviazioni dalla legge poiché le interazioni tra i nucleoni possono diventare così piccole da non garantire la formazione di un nucleo sotto forma di aggregato. Si possono quindi formare nuclei ad anello, detti nuclei "halo". Nuclei di questo tipo presentano una diversa distribuzione dei neutroni; si tratta in particolare di nuclei con sovrabbondanza di neutroni rispetto al corrispondente isotopo stabile, inoltre uno o due di questi neutroni risentono di una debole interazione con il nucleo, e vi orbitano intorno rimanendo quindi separati da esso (neutroni di valenza). Un esempio di nucleo "halo" è l'isotopo  $^{11}\text{Li}$ , il cui nucleo presenta due neutroni di valenza. In questo nuclide la dimensione media del nucleo è paragonabile a quella dell'isotopo  $^{48}\text{Ca}$ , se però si considera anche l'alone racchiuso dalle orbite dei due neutroni di valenza le dimensioni diventano confrontabili con quelle del nucleo molto più massivo dell'isotopo  $^{208}\text{Pb}$  (Fig. 1.17).

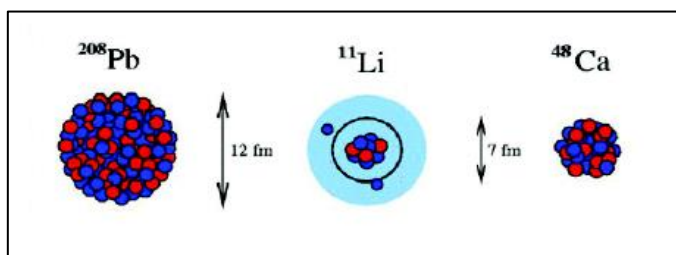


Fig. 1.17 Paragone tra la dimensione del nucleo di  $^{11}\text{Li}$  e quella di altri nuclei più massivi.

Il nucleo  $^{11}\text{Li}$  è un particolare sistema a tre corpi (i due neutroni ed il core), infatti rappresenta un esempio naturale di sistema borromeico. In topologia si definisce borromeico un sistema costituito da tre anelli tra loro legati inscindibilmente in maniera tale che tuttavia la soppressione di uno comporta la separazione degli altri due. I nuclei ad anello sono detti anche borromeici perché infatti se il costituente di uno degli anelli viene in qualche modo rimosso, l'intero sistema diviene immediatamente instabile e i due anelli rimanenti si separano e si allontanano facilmente.

Attualmente è possibile determinare la distribuzione dei protoni con esperimenti di spettroscopia atomica, utilizzando fasci radioattivi di bassa energia e luce laser collineata. Se si cerca invece di determinare la distribuzione di tutti i nucleoni è necessario disporre di fasci ad alta energia, come quelli prodotti nelle *facility*.

#### **Produzione di elementi superpesanti**

In natura si ritrovano all'incirca 90 elementi, dall'idrogeno all'uranio. Grazie a reazioni di fusione nucleare negli ultimi anni è stato possibile sintetizzare elementi con elevato numero di massa estendendo il numero dei costituenti della tavola periodica fino ad elementi con numero atomico pari a 112, prospettando una futura estensione a 116. In particolare partendo da osservazioni preliminari si ritiene che questi elementi detti superpesanti, in cui la repulsione coulombiana assume valori elevati, riescano a formarsi intorno alla cosiddetta isola di stabilità, una configurazione formata da 114 protoni e 184 neutroni che sembra garantire la stabilità del nucleo. Le tecnologie più recenti consentono la disponibilità di fasci intensi, costituiti da nuclei instabili ricchi di neutroni (n-rich). Se questi vengono accoppiati a target stabili, anch'essi ricchi di neutroni, potrebbero crearsi le condizioni adatte per approfondire tale fenomeno e aprire definitivamente la strada ad uno studio più accurato di questa realtà.

### 1.5.2 - Applicazioni nella fisica dello stato solido

Nel 1920 è stata ideata la tecnica del *Radio Tracer Diffusion*, che consiste nell'impiantare in un sistema solido dei nuclei radioattivi e studiarne il decadimento, rilevando le particelle e le radiazioni gamma che emettono. È possibile rilevare anche il segnale di pochissimi atomi, pertanto questa tecnica risulta particolarmente utile e diffusa per lo studio dei processi di diffusione all'interno dei sistemi solidi.

Il sistema ospitante può essere drogato con radioisotopi sonda sia per diffusione mediante reazione nucleare, sia per impianto ionico. La scelta dello specifico isotopo radioattivo da utilizzare nello specifico esperimento viene effettuata in base sia alle caratteristiche chimico-fisiche sia alle proprietà nucleari di quest'ultimo.

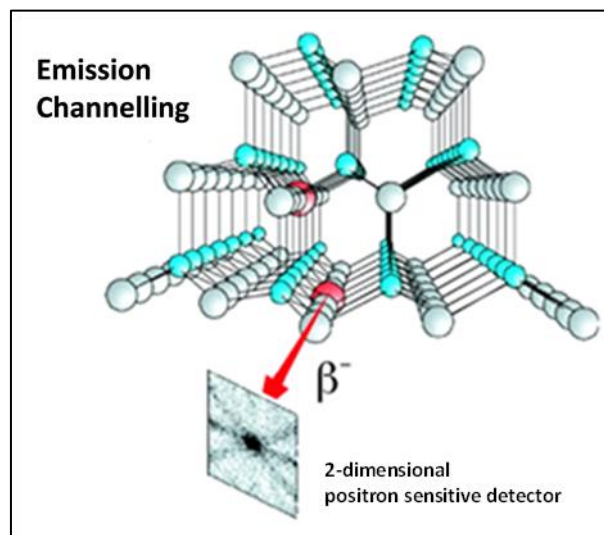
L'utilizzo della tecnica *Radio Tracer Diffusion* consente di:

- Osservare, tramite i prodotti del decadimento le interazioni tra l'atomo sonda e la struttura del reticolo cristallino che lo circonda
- Ricavare informazioni riguardanti il campo elettrico e magnetico all'interno del reticolo cristallino
- Studiare i processi diffusivi e le interazioni tra gli atomi sonda
- Evidenziare la presenza, la distribuzione e la tipologia dei difetti nel reticolo cristallino

#### **Drogaggio dei semiconduttori**

Per poter sviluppare semiconduttori di piccole dimensioni è necessario poter avere il miglior controllo possibile sui difetti che governano tali proprietà, cioè sia sulle caratteristiche intrinseche (vacanze, difetti interstiziali) sia su quelle estrinseche (droganti, impurità atomiche) del reticolo cristallino. Per questo motivo sia la ricerca di base, sia quella applicata stanno concentrando i propri sforzi nello studio dei difetti e dell'attivazione elettrica dei droganti in diversi tipi di semiconduttori.

Analogamente agli isotopi droganti stabili, anche quelli radioattivi possono alterare le proprietà elettriche ed ottiche dei semiconduttori nei quali vengono inseriti. Queste caratteristiche sono influenzate dalle loro proprietà chimiche e dalla posizione in cui vengono inseriti nel reticolo. Oltre alla tipologia di semiconduttore le loro proprietà ottiche ed elettroniche sono sensibilmente influenzate anche dalle dimensioni. È stato dimostrato infatti che nel caso i conduttori particolarmente piccoli tali proprietà possono essere alterate in maniera significativa se vi è un difetto con concentrazione inferiore a  $10^{12}$  atomi/cm<sup>3</sup>. Per avere quindi un controllo affidabile delle prestazioni di semiconduttori di questo tipo è indispensabile poter disporre di tecniche sperimentali con elevata sensibilità sia dal punto di vista chimico, sia da quello della concentrazione dei difetti.



**Fig. 1.18** Emission channelling degli elettroni emessi da atomi radioattivi situati in una riga atomica del reticolo.

La tecnica diffusa da decenni per la rilevazione delle impurità è stata il *channeling* (Fig. 1.18): tale procedura consiste nell'indirizzare un fascio di ioni attraverso le righe atomiche dei cristalli 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 subisce un notevole miglioramento se all'interno del reticolo cristallino sono impiantate impurità radioattive che emettono particelle cariche (*emission channeling*). Misurando l'emissione lungo direzioni diverse è possibile determinare la posizione nel reticolo cristallino dell'atomo emittente con un'accuratezza di pochi decimi di Å.

### 1.5.3 - Applicazioni in medicina nucleare

I fasci di ioni radioattivi possono avere interessanti applicazioni mediche sia nel campo della diagnosi sia nel campo del trattamento di patologie tumorali. Di seguito sono illustrate le principali applicazioni in campo medico che attualmente sono state prese in considerazione.

#### **La tomografia ad emissione positronica (PET)**

Prima di trattare quest'altra applicazione è bene introdurre alcune definizioni:

- Si dice antimateria la materia costituita dalle antiparticelle: esse hanno massa uguale a quella delle corrispondenti particelle della materia ordinaria, ma caratteristiche opposte.
- Viene chiamata positrone (o anche antielettrone) l'antiparticella corrispondente all'elettrone, avente quindi carica +1. Quando un positrone viene associato ad un elettrone la loro carica si annulla e la loro massa viene convertita in energia sotto forma di due fononi ad altissima energia, nella banda dei raggi gamma. I positroni possono essere generati dal decadimento radioattivo con emissione di positroni o dall'interazione con la materia di fotoni con energia superiore a 1.022 MeV.

L'antimateria è generalmente utilizzata nello studio delle interazioni tra le particelle elementari, tuttavia presenta anche un'importante applicazione tecnologica: la Tomografia ad emissione Positronica (PET-Positron Emission Tomography). Si tratta di una tecnica di medicina nucleare e diagnostica medica che sfrutta l'emissione positronica per monitorare il funzionamento degli organi interni dei pazienti creando mappe tridimensionali ad alta risoluzione della parte del corpo che si vuole osservare.

La procedura PET prevede di iniziare in genere con l'iniezione per via endovenosa di alcuni isotopi traccianti a vita media breve, legati ad una molecola metabolicamente attiva (generalmente uno zucchero). Trascorso un certo periodo di tempo nel quale la molecola contenente il tracciante ha avuto modo di diffondersi nel corpo e legarsi alle cellule con una certa concentrazione nei vari tessuti da esaminare, il soggetto viene posizionato all'interno dello scanner.

L'isotopo di vita media breve decade emettendo un positrone. Dopo un percorso breve, di al massimo pochi millimetri il positrone si annichila con un elettrone, emettendo due fotoni con energia paragonabile a quella della radiazione gamma. I fotoni sono essi lungo una stessa retta ma con direzione opposte (sfasate quindi di 180° tra loro) e vengono poi rilevati dal dispositivo di scansione mediante particolari tubi fotomoltiplicatori. Il principio fondamentale su cui si basa l'efficacia della tecnica è la rilevazione simultanea di coppie di fotoni. Coppie di fotoni che non arrivano al rivelatore in un intervallo di tempo sufficientemente ristretto (pochi nanosecondi) tra loro non vengono presi in considerazione. Misurando la posizione in cui ciascun fotone colpisce il rivelatore (ciascuna coppia identifica una retta) è possibile determinare la posizione del corpo da cui sono stati emessi (teoricamente due coppie di fotoni identificano due rette tra loro incidenti nel punto di emissione), permettendo quindi di monitorare l'attività degli organi osservati. Lo scanner utilizza l'emissione di fotoni per determinare la densità di isotopo nei tessuti analizzati. La mappa risultante rappresenta i tessuti in cui la molecola tracciante si è concentrata maggiormente e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare o in radiologia al fine di effettuare una diagnosi e stabilire il trattamento adeguato per l'eventuale patologia o anomalia riscontrata. Molto spesso i risultati ottenuti dalla Tomografia ad Emissione di Positroni sono integrati e confrontati con gli esiti della Risonanza Magnetica Nucleare, ottenendo così una mappatura completa dei tessuti analizzati, comprendente informazioni sia morfologiche ed anatomiche, sia metaboliche.

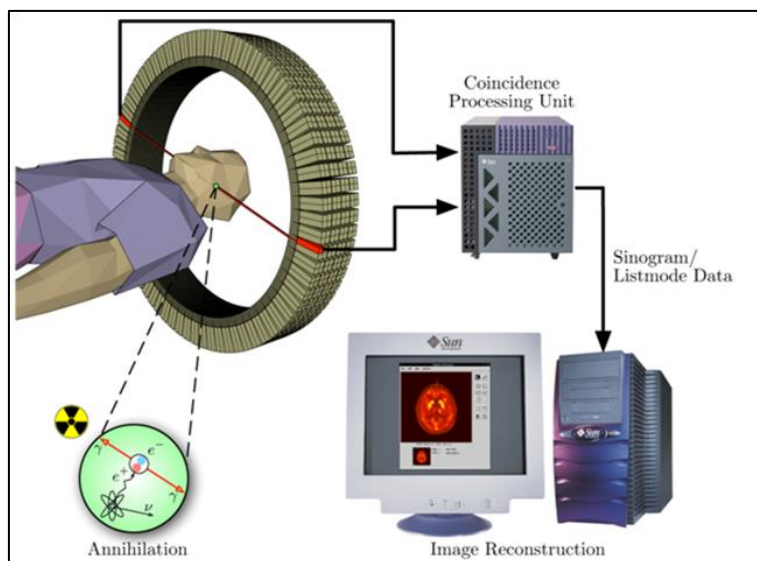


Fig. 1.19 La tecnica di analisi PET.

In ogni caso mentre diagnosi effettuate con i metodi di scansione come la RMN e la TAC permettono di identificare alterazioni morfologiche e anatomiche dei tessuti organici, le scansioni PET sono in grado di mostrare eventuali variazioni a livello biologico molecolare con l'utilizzo di marcatori che presentano diversa velocità di assorbimento a seconda del tessuto interessato. Questo tipo di alterazioni in genere precedono quelle morfologiche, pertanto permettono di diagnosticare con maggiore anticipo eventuali anomalie.

Con una scansione PET si può inoltre determinare con una certa precisione il cambio di afflusso sanguigno nei vari tessuti attraverso la determinazione di concentrazione dell'emissione positronica. I radioisotopi più utilizzati nella scansione PET sono isotopi a breve tempo di dimezzamento, come  $^{11}\text{C}$  (~20 min),  $^{13}\text{N}$  (~10 min),  $^{15}\text{O}$  (~2 min),  $^{18}\text{F}$  (~110 min). Per via del loro basso tempo di dimezzamento i radioisotopi devono essere prodotti in prossimità dello scansionatore PET.

### La produzione di radiofarmaci

Nell'ambito del progetto SPES è in fase di studio la possibilità di produzione di radioisotopi utili per applicazioni di medicina nucleare. In tale ambito la ricerca è molto viva e nell'ottica di una collaborazione tra i laboratori di fisica nucleare e gli ospedali, si stanno studiando i possibili radiofarmaci producibili. Saranno prodotti soprattutto radioisotopi *neutron-rich β-emitters*, dalle applicazioni in campo terapeutico molto promettenti. Ciò che rende questo studio significativo è la possibilità di produrre radiofarmaci ad altissima purezza, privi di contaminanti. Attualmente è stata condotta con successo una sperimentazione pilota con  $^{89}\text{Sr}$ , uno dei radioisotopi più promettenti, per la verifica della realizzabilità del progetto [8].

### 1.5.4 - Applicazioni in astrofisica

L'astrofisica nucleare è fondamentale per la comprensione delle strutture, dell'evoluzione, delle dinamiche e della composizione dell'universo e dei suoi costituenti.

Nelle stelle avvengono reazioni nucleari che liberano grandi quantità di energia e che coinvolgono sia nuclei stabili sia nuclei instabili. Tali reazioni possono essere costanti nel tempo, permettendo quindi alla stella di continuare a brillare per bilioni di anni prima di esaurire il carburante nucleare, oppure liberare un'enorme quantità di energia in un unico evento esplosivo distruggendo di fatto la stella in pochi minuti o secondi.

Nelle differenti fasi della vita di una stella vengono sintetizzati nuovi elementi chimici, sia attraverso reazioni di nucleosintesi che seguono strettamente la valle di stabilità, sia attraverso processi non ancora identificati dal momento che si svolgono in un territorio sconosciuto.

Per sviluppare un modello che descriva il processo di nucleosintesi è necessario valutare le rese delle reazioni nucleari dei principali cicli astrofisici e le caratteristiche di decadimento di nuclei tuttora scon-

sciuti. 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 *facility* per la produzione di fasci radioattivi risulterà di fondamentale importanza per la comprensione della sintesi elementare nell'Universo.

## **1.6 - 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 *facility* 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.



# Capitolo 2

## La ionizzazione laser e l'apparato *Time of Flight* del progetto SPES

### 2.1 - Introduzione

La ionizzazione laser mediante tecnica RILIS (Resonant Laser Ion Source) è fondamentale per le facility di tipo ISOL, grazie all'elevata efficienza di ionizzazione ottenibile e grazie alla sua eccellente selettività. Per studiare in modo completo il fenomeno di ionizzazione utilizzando laser risonanti (RLI) e le prestazioni ottenibili, presso i LNL è in fase di sviluppo un sistema di spettrometria di massa a tempo di volo (*Time of Flight, TOF*). Per testare il rendimento dei fasci laser che verranno utilizzati in futuro per la ionizzazione selettiva dei radioisotopi fuoriuscenti dal target, è necessario accoppiarle un dispositivo in grado di garantire una produzione ed una effusione controllata di atomi della specie desiderata: la cella di Knudsen.

In questo capitolo verrà quindi affrontata preliminarmente la teoria della ionizzazione, focalizzandosi poi sulla ionizzazione laser mediante tecnica RILIS. Verranno poi illustrate la spettrometria di massa a tempo di volo, e la camera TOF a disposizione dei LNL. Infine sarà spiegato cos'è una cella di Knudsen, quali sono i vincoli progettuali da rispettare, e verrà presentato il prototipo realizzato ai LNL.

### 2.2 - La teoria della ionizzazione

Quando uno o più elettroni vengono rimossi o aggiunti da un atomo avviene il processo di ionizzazione. Questo processo può manifestarsi anche a causa di assorbimento di radiazioni, come nel caso dei brillamenti solari. Gli atomi che hanno un numero di elettroni minore del numero atomico rimangono carichi positivamente e prendono il nome di cationi mentre quelli che hanno un numero di elettroni maggiore del numero atomico rimangono carichi negativamente e prendono il nome di anioni. L'energia di ionizzazione viene definita come l'energia necessaria per allontanare a distanza infinita dal nucleo l'elettrone ad esso meno fortemente legato (cioè quello più esterno e 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 ed  $E_{ion}$  è chiamata appunto energia (o potenziale) di prima ionizzazione. Quest'ultima corrisponde, in valore assoluto, all'energia di legame di tale elettrone nell'atomo dell'elemento considerato: essa varia a seconda della specie atomica e si esprime in genere in eV, se si fa riferimento ad un singolo atomo, oppure in kJ o in kcal, se si fa riferimento ad una mole di atomi. Essendo in genere possibile strappare più di un elettrone da un atomo, le energie relative all'allontanamento degli elettroni successivi sono chiamate rispettivamente energia di seconda ionizzazione,

di terza, ecc. In mancanza di tale precisazione, si fa riferimento al processo di prima ionizzazione. 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. "Normalmente" un atomo ha una carica elettrica complessiva pari a zero: nel suo nucleo vi saranno un certo numero di protoni e neutroni circondati da elettroni. Il numero di elettroni sarà uguale a quello dei protoni. In certe circostanze, tuttavia, uno o più elettroni possono venire strappati via dall'atomo; questo fenomeno è detto ionizzazione. Occorre una certa energia per provocare questa separazione; ciò può avvenire se l'atomo assorbe un fotone altamente energetico (per esempio, nell'ultravioletto o con energia ancora maggiore), oppure facendo collidere l'atomo con un altro atomo o con un elettrone o con uno ione in un gas molto caldo. Alla fine, però, l'atomo e il suo elettrone perduto tenderanno a ricombinarsi e, quando ciò avviene, viene emesso un fotone.

Volendo indagare sulla dipendenza dell'energia di prima ionizzazione di un elemento dal suo numero atomico, è noto che, considerando la tavola periodica, lungo un periodo da sinistra verso destra, c'è un suo aumento, anche se non regolare. Esso è dovuto all'aumento della carica nucleare efficace (carica di cui realmente risente un elettrone in un atomo polielettronico), 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. Si osservano quindi valori elevati dell'energia di ionizzazione per i gas nobili, mentre valori più bassi si hanno per i metalli alcalini. Nella figura seguente viene indicato il valore dell'energia di ionizzazione dei diversi elementi chimici in funzione del loro numero atomico.

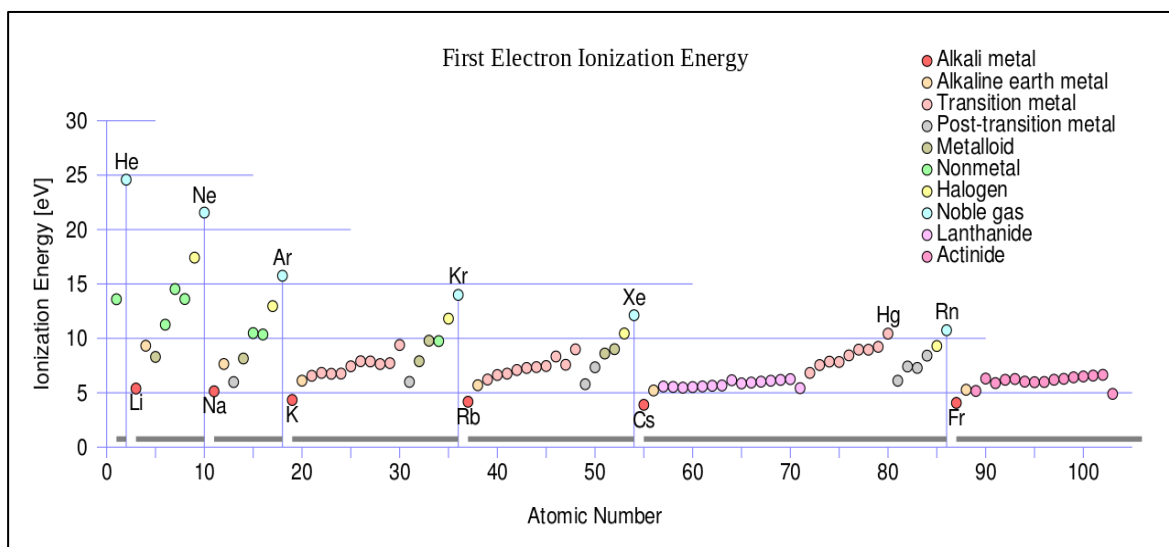


Fig. 2.1 Energia di prima ionizzazione al variare del numero atomico.

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 sono di entità modesta, analogamente a quanto accade per i raggi atomici, e con un andamento alquanto irregolare.

### 2.2.1 - L'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 eV se ci si riferisce ad un solo atomo, oppure in kJ o kcal se si considera invece una mole di atomi. 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.

### 2.2.2 - L'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 elettro-negativi. 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 fa 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 elettro-negativo 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 elettro-negativi 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 elettro-negativi sono gli alogeni e gli calcogeni a basso peso atomico, mentre i meno elettro-negativi (o, equivalentemente, i più elettropositivi) sono i metalli alcalini ed alcalino-terrosi ad alto peso atomico.

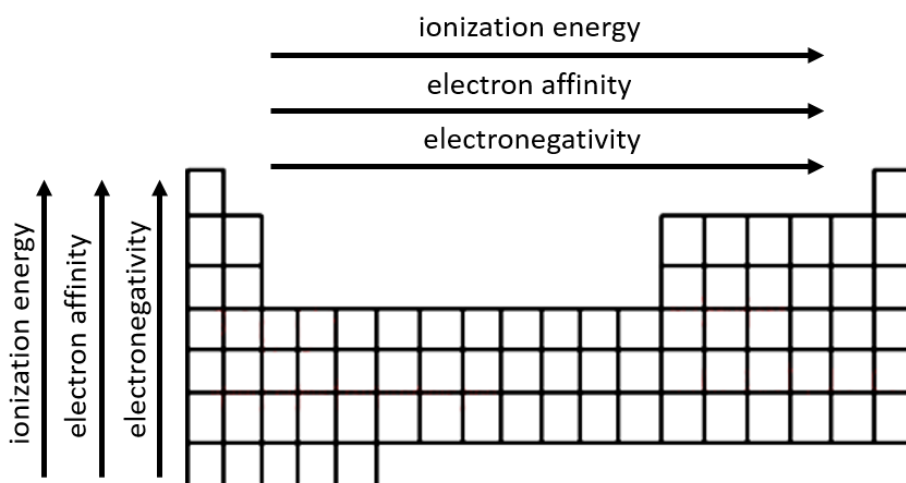


Fig. 2.2 Andamento delle proprietà chimiche lungo la tavola periodica

### 2.3 - La ionizzazione laser mediante la tecnica RILIS (*Resonant Laser Ion Source*)

[6]

Questa tecnica si rivela fondamentale per le *facility* di tipo ISOL grazie all'elevata efficienza di ionizzazione ottenibile e alla sua eccellente selettività. I laser utilizzati sono caratterizzati dalla sovrapposizione di più raggi (due o tre a seconda dell'elemento da ionizzare) aventi lunghezze d'onda differenti, corrispondenti a diversi valori energetici.

L'energia di un fotone monocromatico è data dalla relazione di Planck:

$$E = hf \tag{2.2}$$

dove  $h$  è la costante di Planck ed  $f$  è la frequenza d'onda.

Il laser viene proiettato all'interno di un determinato volume di interazione (solitamente costituito dalla *hot-cavity*, come mostrato in Fig. 1.13). Nel meccanismo di ionizzazione RILIS (vedi Fig. 2.3) le lunghezze d'onda dei laser sono tarate con precisione in modo che l'energia dei fotoni permetta 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. Questo schema mostra come l'elettrone di valenza sia portato inizialmente a vari livelli di eccitazione e infine al *continuum*, o a stati altamente eccitati, detti di Rydberg o, infine, a uno stato di autoionizzazione. Queste due ultime tecniche, quando possibili, sono da preferirsi in quanto permettono di ottenere una maggiore efficienza. In Fig. 2.4 sono rappresentati schematicamente i processi di fotoeccitazione e fotoionizzazione.

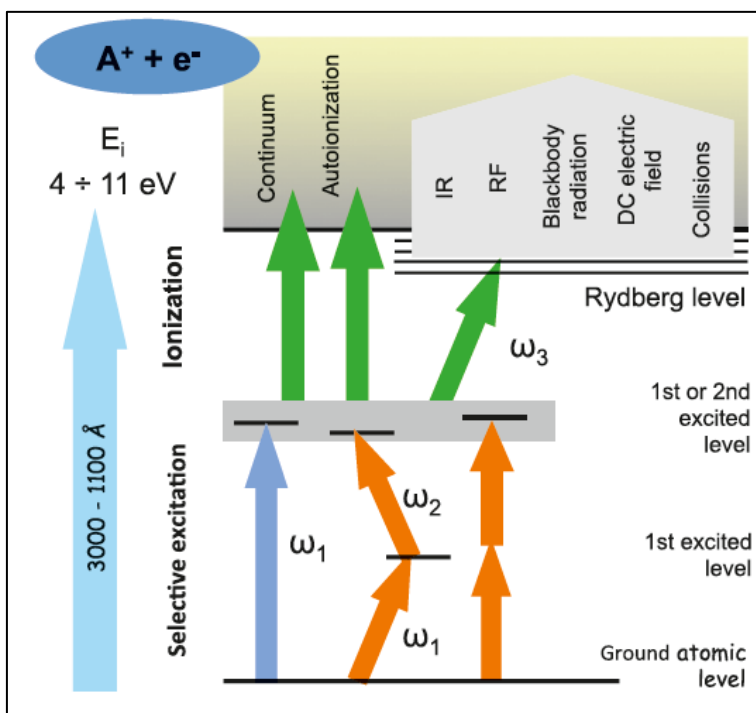


Fig. 2.3 Schema di funzionamento della tecnica RILIS.

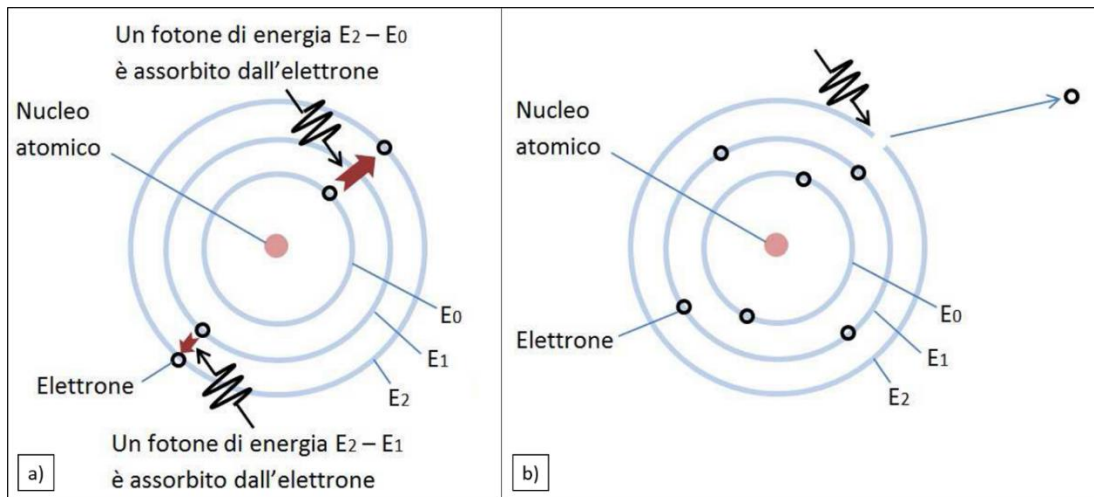


Fig. 2.4 Processi di fotoeccitazione a) e fotoionizzazione b) di un atomo.

La tecnica RILIS si rivela particolarmente vantaggiosa per gli elementi aventi un potenziale di ionizzazione né troppo alto né troppo basso. Se si considerano infatti i metalli alcalini, aventi un basso potenziale di ionizzazione, è noto che essi possono essere ionizzati in modo molto efficiente e selettivo tramite la tecnica di ionizzazione superficiale. Al contrario, gli elementi alogeni, aventi un alto potenziale di ionizzazione, possiedono una struttura atomica tale da rendere impossibile la ionizzazione mediante laser. In questo caso l'unica opzione risulta essere la tecnica di ionizzazione per bombardamento elettronico. In ogni caso la maggior parte degli elementi di interesse è compresa tra le due situazioni appena descritte (e situate agli estremi della tavola periodica, come mostrato in Fig. 1.9). In questi casi le sorgenti di ionizzazione laser si rivelano essere la soluzione ottimale.

### 2.3.1 - Il problema dei contaminanti ionizzati superficialmente per sorgenti RILIS

Per sorgenti RILIS con architettura a *hot-cavity*, la ionizzazione superficiale, sempre presente, può dar luogo a dei contaminanti isobari, aventi cioè la stessa massa degli isotopi di interesse e quindi più difficili da separare. Si ha quindi che, per i molti isotopi che possono essere ionizzati mediante la RILIS, la purezza del fascio radioattivo generato può essere più o meno compromessa in funzione dell'ammontare della produzione di radioisotopi a basso potenziale di ionizzazione che vengono ionizzati in modo molto efficiente superficialmente. In questi casi, la purezza del fascio potrebbe risultare compromessa e, per evitare ciò, risulta necessario prendere delle accurate precauzioni, descritte di seguito.

#### i - Riduzione dell'efficienza di ionizzazione superficiale [6]

La resa di ionizzazione superficiale può essere diminuita essenzialmente in due modi: abbassando la temperatura della *hot-cavity* o scegliendo un materiale per la sua costruzione con una più bassa funzione di lavoro  $\Phi$ . Il primo metodo risulta irrealizzabile: come più volte detto, infatti, le alte temperature in gioco si rivelano necessarie per minimizzare i tempi di effusione e evitare la condensazione dei radioisotopi prodotti. D'altro canto, la scelta del materiale che costituisce la *hot-cavity* si può rivelare una scelta migliore. Presso il CERN sono stati effettuati dei test *off-line* al fine di verificare la fattibilità della soluzione realizzando la *hot-cavity* in diversi materiali (GdB<sub>6</sub>, riscaldata indirettamente e W con rivestimento in BaO+SrO [9]). È stata registrata un'importante riduzione della ionizzazione superficiale con delle modeste perdite in termini di efficienza di ionizzazione laser. In test effettuati *on-line*, tuttavia, non è stato ottenuto lo stesso risultato: la causa di ciò è stata attribuita alla formazione di ioni già all'interno del *target* e della *transfer line* [9].

#### ii - Separazione spaziale degli ioni prodotti superficialmente e tramite laser [6]

Se il processo di ionizzazione laser ha luogo fuori dalla *hot-cavity*, è possibile respingere gli ioni prodotti superficialmente posizionando dopo l'uscita della cavità un opportuno elettrodo, caricato positivamente rispetto ad essa. Dopo di esso si può quindi in questo modo creare una zona con l'assenza di isotopi

ionizzati superficialmente. Ovviamente è necessaria una progettazione accurata del sistema in quanto c'è il rischio di diminuire l'efficienza della ionizzazione laser stessa, considerando che la sovrapposizione geometrica del laser con gli isotopi uscenti dalla *hot-cavity* si sposta dalle condizioni ottimali (ovvero del laser che occupa tutta la cavità).

**iii - Separazione temporale degli ioni prodotti superficialmente e tramite laser [6]**

Questo metodo può essere implementato sfruttando la struttura temporale del laser pulsante ed utilizzando un *beam-gate* sincronizzato con la pulsazione del laser. La tecnica appena descritta prende il nome di ToFLIS.

**iv - Inversione della polarità del circuito della sorgente di ionizzazione [10] [11]**

Questa tecnica sfrutta il potenziale elettrostatico che si genera all'interno di *hot-cavity* e *transfer line* grazie alla caduta di potenziale dovuta alla resistenza del circuito riscaldante. In condizioni di polarità normale (potenziale elettrico decrescente verso l'uscita della sorgente di ionizzazione) uno ione verrà spinto verso l'elettrodo estrattore. In caso di polarità invertita (potenziale elettrico crescente verso l'uscita della sorgente di ionizzazione) invece, uno ione verrà estratto solo se si trova nella parte terminale della cavità, in cui penetra il campo elettrico generato dall'elettrodo estrattore. Le dimensioni di questa zona dipendono ovviamente dal diametro della *hot-cavity*, dal potenziale di estrazione e dalla distanza dell'elettrodo estrattore. È possibile quindi respingere verso il *target* gli ioni prodotti prima di essa (supponendoli quasi totalmente formati tramite ionizzazione superficiale) mediante l'inversione della polarità del circuito riscaldante. Tuttavia, il volume di interazione del fascio laser con la zona in cui penetra il campo elettrico generato dall'elettrodo estrattore potrebbe non risultare sufficiente, portando a basse efficienze di ionizzazione laser. Per evitare ciò è possibile prevedere una configurazione leggermente diversa, come mostrato in Fig. 2.5.

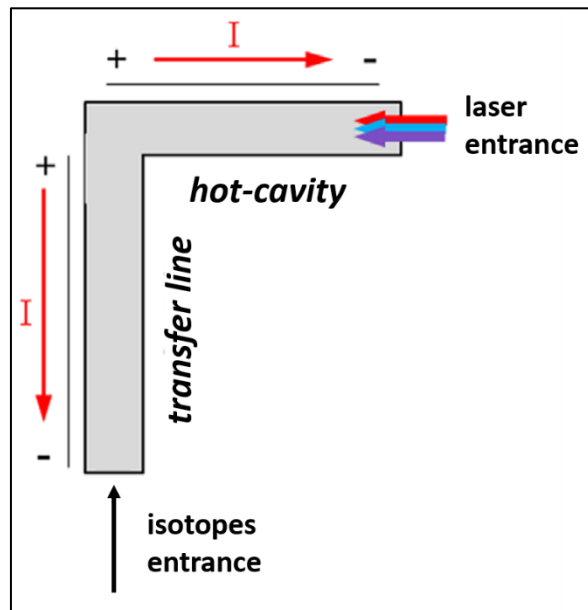


Fig. 2.5 Inversione della polarità della corrente riscaldante nella transfer line.

Con questa configurazione, in cui solo la *hot-cavity* è polarizzata direttamente, si ha un aumento del volume di estrazione degli isotopi ionizzati mediante la tecnica RILIS. Si ha anche tuttavia una più modesta soppressione degli isotopi ionizzati superficialmente: verrebbero infatti respinti verso il *target* solo gli ioni prodotti prima della *hot-cavity*.

## 2.4 - Introduzione alla camera TOF

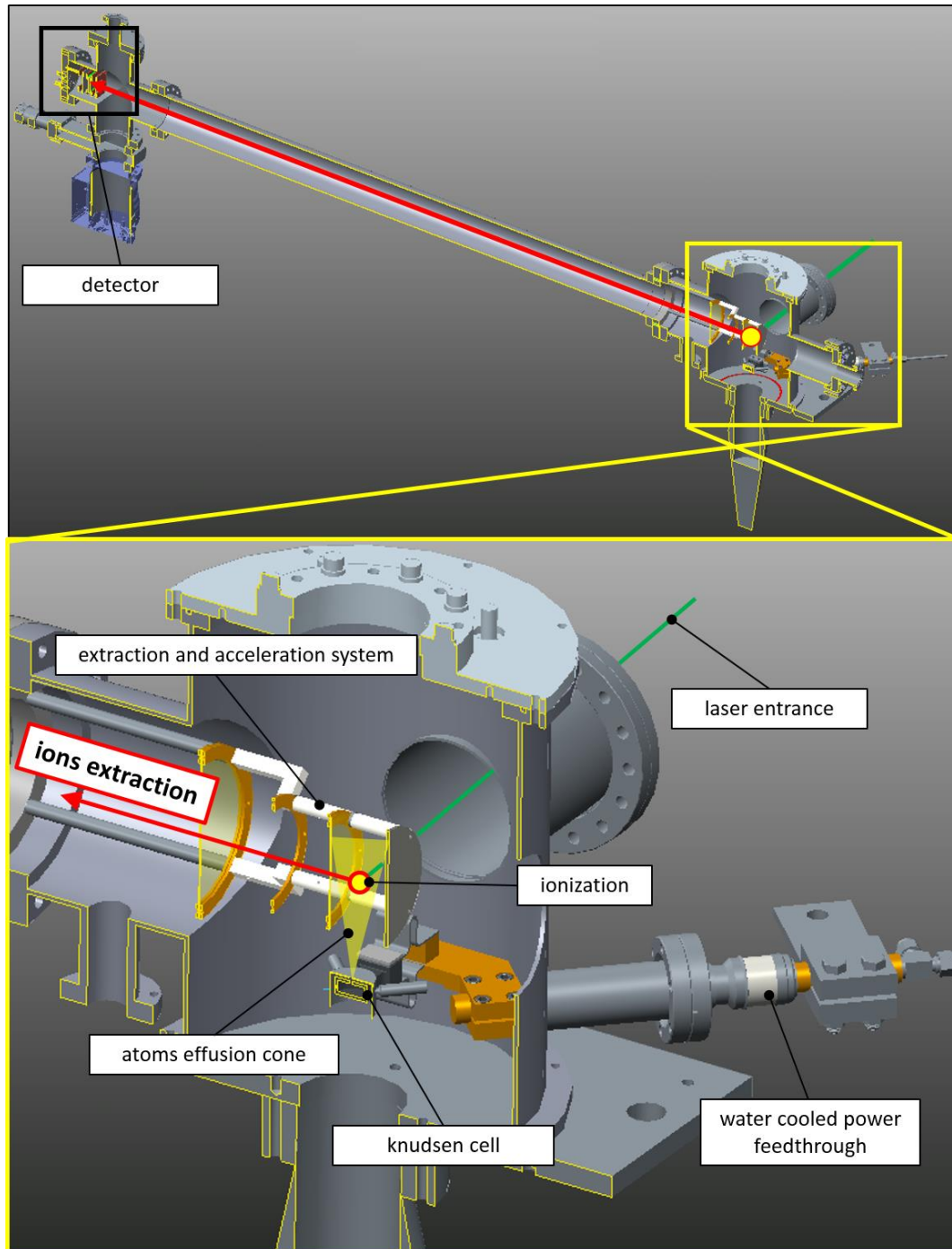
Al fine di studiare in modo completo le prestazioni della sorgente di ionizzazione laser è necessario poter caratterizzare in dettaglio il fenomeno di ionizzazione utilizzando laser risonanti (RLI). A tal proposito, presso i LNL, è in via di sviluppo un sistema di spettrometria di massa a tempo di volo (*Time of Flight*, TOF), che servirà per testare il rendimento dei fasci laser che verranno utilizzati in futuro per la ionizzazione selettiva dei radioisotopi fuoriuscenti dal target.

La spettrometria di massa a tempo di volo (TOFMS, *time-of-flight mass spectrometry*) è un tipo di spettrometria di massa, legato alla misura del tempo di volo, in cui gli ioni da analizzare vengono accelerati da un campo elettrico di intensità nota. L'accelerazione degli ioni all'interno del tubo di deriva avviene a energia cinetica costante e le loro velocità variano in modo inversamente proporzionale alla massa: ne consegue che gli ioni più leggeri raggiungono prima il detector. Viene quindi misurato il tempo che occorre alla particella per raggiungere un rivelatore ad una distanza conosciuta. Dato che la velocità dello ione dipende dal rapporto massa/carica (le particelle più pesanti raggiungono velocità più basse), da questo tempo e dai parametri sperimentali noti si può calcolare il rapporto massa/carica dello ione. Al fine di rendere più agevole la successiva trattazione si consideri la Fig. 2.6 dove è rappresentato schematicamente il funzionamento della camera TOF. Dalla figura è possibile notare come una sorgente di atomi (rappresentata in questo caso da una cella di Knudsen) generi un cono di effusione in cui va ad impattare il laser ionizzante, caratterizzato dalla sovrapposizione di più raggi aventi lunghezze d'onda differenti, come esposto nel paragrafo precedente.

Gli atomi ionizzati sono estratti ed accelerati dagli elettrodi schematizzati con A, B, C e D in Fig. 2.7, ognuno dei quali caratterizzato da un certo potenziale elettrostatico, che individuano 3 zone con diverse funzioni:

- zona di generazione/estrazione: è compresa tra gli elettrodi A e B e al suo interno vengono estratti gli ioni;
- zona di accelerazione: è compresa tra gli elettrodi B e C ed ha la funzione di fornire agli ioni un'energia cinetica pari all'energia potenziale dovuta alla differenza di tensione  $V_B - V_C$  ai suoi capi;
- zona di volo a potenziale costante: in questo tratto gli ioni non subiscono ulteriori accelerazioni e proseguono il loro percorso verso il collettore a velocità costante. Da questo segue la necessità che la struttura ospitante il quarto elettrodo D formi con esso una struttura chiusa al fine di assumere lo stesso potenziale C:  $V_c$ .

Gli elettrodi B e C sono costituiti da griglie in quanto devono permettere il passaggio agli ioni mentre l'ultimo elettrodo funge da collettore per gli ioni. Gli ioni verranno infine rilevati mediante il rivelatore a tempo di volo posto in fondo al condotto ed infine analizzati.



**Fig. 2.6** Schema di funzionamento della camera TOF attualmente in via di sviluppo presso i LNL.

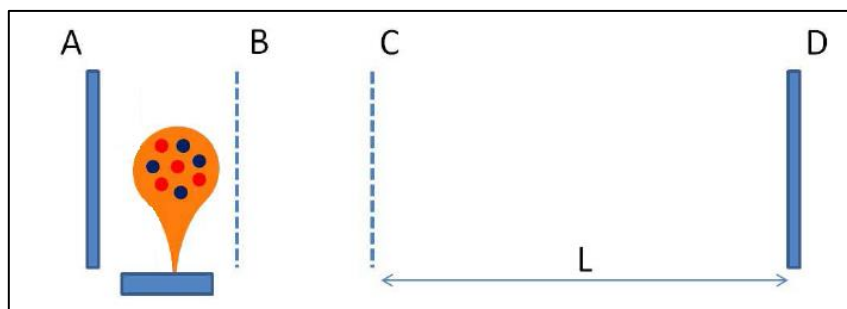


Fig. 2.7 Schema della struttura di estrazione e accelerazione utilizzata per il tempo di volo.

Lo spettro risultante riporta in ascissa il rapporto massa su carica degli ioni analizzati e in ordinata l'intensità di corrente ad esso correlata e si caratterizza per la presenza di picchi molto definiti relativi ai diversi ioni prodotti. Un esempio viene riportato in Fig. 2.8.

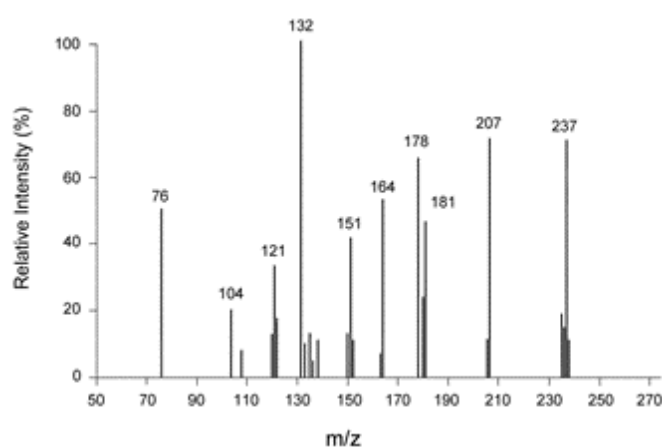


Fig. 2.8 Esempio di uno spettro risultante

Per la sua interpretazione è opportuno considerare che ogni sostanza si ionizza e si frammenta secondo regole ben precise che dipendono dalla struttura della molecola, dai legami chimici in essa presenti e dall'energia di ionizzazione. Di fatto, gli spettri di moltissime specie chimiche sono noti e univocamente identificati per ogni sostanza. In genere molecole più complesse danno luogo a spettri più complessi. Quindi, dallo spettro è possibile identificare le specie gassose analizzate assegnando i picchi dei diversi ioni ai loro precursori neutri. Per l'assegnazione occorre tener conto delle seguenti regole (Miller e Armatys, 2013):

1. le intensità di corrente di ioni diversi derivati dalla stessa molecola hanno una dipendenza dalla temperatura molto simile tra loro;
2. l'energia per la ionizzazione semplice delle molecole è generalmente inferiore a quella necessaria per la frammentazione degli stessi precursori neutri;
3. la forma della curva dell'efficienza di ionizzazione (sezione d'urto in funzione dell'energia di ionizzazione) può fornire informazioni sul processo di frammentazione;
4. gli ioni provenienti da frammentazione possiedono una quantità di energia cinetica addizionale agli ioni formati per semplice ionizzazione;
5. specie chimiche omologhe hanno simili processi di frammentazione.

In generale si consideri che il tipo di sorgente e la sua energia di ionizzazione influenzano in modo determinante il processo di ionizzazione e frammentazione. In particolare, sorgenti a bassa energia riducono il processo di frammentazione semplificando lo spettro risultante ma allo stesso tempo diminuiscono la sensibilità dello strumento.

Al fine di aumentare il cammino libero medio degli ioni stabili generati, il sistema è ovviamente mantenuto in condizioni di alto vuoto, con pressioni dell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar.

Nell'apparato attualmente costruito (Fig. 2.9) gli atomi da ionizzare sono messi a disposizione da un sistema di ablazione laser, in cui un fascio laser ablativo viene introdotto nella camera attraverso la *viewport* superiore, focalizzato e fatto interagire con un *target* costituito dal materiale di interesse, con la conseguente produzione di una piuma di plasma che si espande ortogonalmente alla superficie del *target*.

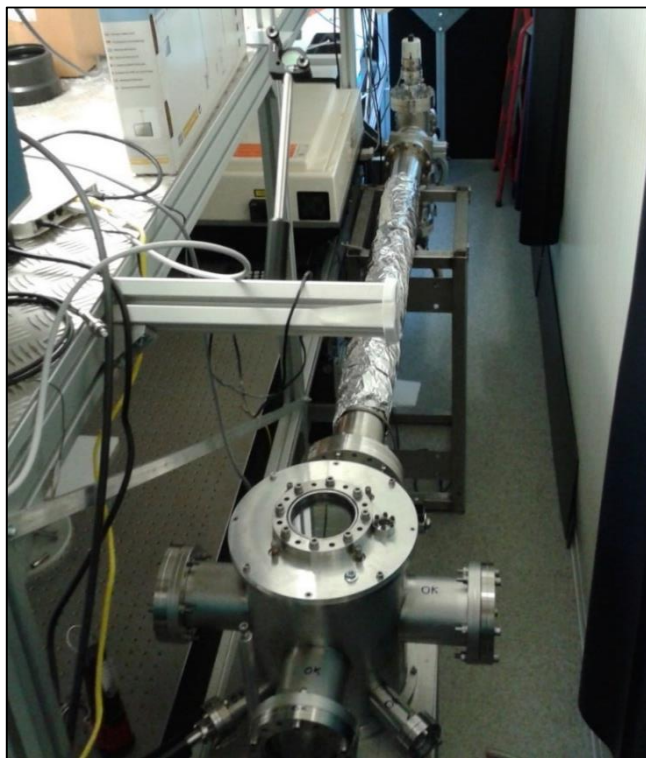


Fig. 2.9 Rappresentazione della camera TOF realizzata presso i LNL.

Uno dei futuri obiettivi dell'apparato in fase di sviluppo sarà quello di testare l'efficienza di ionizzazione dei laser risonanti e, a tal fine, è necessario un sistema che permetta di conoscere con precisione la forma e la distribuzione degli atomi messi a disposizione per la ionizzazione. Sarà quindi possibile in questo modo stimare, considerando il volume di interazione del fascio laser, il numero di atomi teoricamente ionizzabili. Rapportando quest'ultimo valore con il numero di ioni rilevati dal sistema di diagnostica posto alla fine del condotto a tempo di volo si potrà quindi calcolare l'efficienza di ionizzazione del laser. Il sistema ad ablazione laser, attualmente utilizzato, non potrà tuttavia assolvere questa funzione in quanto non permette di determinare il numero e la distribuzione degli atomi vaporizzati. Come già detto, il dispositivo scelto per mettere a disposizione gli atomi da ionizzare sarà invece una cella di Knudsen, descritta nel paragrafo seguente.

## 2.5 - La cella di Knudsen

La cella di Knudsen è un dispositivo nato dagli studi sulla cinetica dei gas del fisico danese Martin H. C. Knudsen effettuati nei primi anni del 1900. Egli fu il primo a dimostrare teoricamente e sperimentalmente il comportamento dei gas a bassa pressione teorizzando il flusso in regime molecolare e aprendo la strada agli studi sulla "scienza e tecnologia del vuoto". Le sue teorie si applicano a gas aventi pressioni basse e temperature elevate: in questo caso il loro comportamento è spiegabile ricorrendo alla cinetica dei gas ideali. Nello specifico, il flusso molecolare si verifica quando il gas è così rarefatto che gli urti delle particelle con le pareti del contenitore sono predominanti rispetto agli urti reciproci tra di esse



[12] e, quindi, il libero cammino medio delle molecole è comparabile con le dimensioni del contenitore [13].

Knudsen ottenne ciò depositando una certa massa di materiale solido o liquido all'interno di una camera sigillata dotata solo di una piccola apertura. La camera viene riscaldata e mantenuta ad una certa temperatura per il tempo necessario al raggiungimento dell'equilibrio termodinamico tra la fase condensata ed il vapore per la temperatura di interesse. Così, una quantità del gas formatosi effonde attraverso il foro presente e può essere campionata fuori dalla cella. Essendo in regime molecolare, è maggiormente probabile che le particelle escano dall'orifizio direttamente dopo essersi distaccate dal campione, o a seguito di urti con le pareti della cella o la superficie del campione stesso, come si osserva da Fig. 2.10. La quantità di molecole effuse deve essere trascurabile rispetto a quelle presenti all'interno della cella per non modificarne sostanzialmente l'equilibrio, ma al contempo è rappresentativa delle condizioni di temperatura e pressione raggiunte dal gas all'interno.

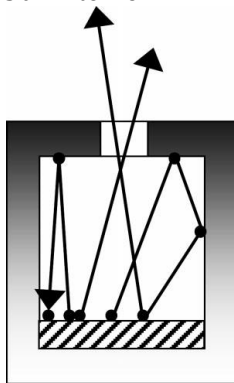


Fig. 2.10 Cella di Knudsen

La frazione di vapore fuoriuscito presenta una precisa distribuzione angolare dell'intensità del flusso di molecole. Essa è calcolabile con una legge cosinusoidale rispetto alla direzione normale alla superficie di uscita: ciò indica che l'intensità del flusso è maggiore vicino all'asse del foro [14]. Questa distribuzione può essere ricavata applicando le leggi della cinetica dei gas ideali nel caso di un foro praticato idealmente in una superficie sottilissima. Così, a partire da essa è possibile determinare il numero totale di molecole effuse nel tempo  $dn(i)/dt$  (mol/s) della specie  $i$ -ma con la relazione di Herz - Knudsen:

$$\frac{dn(i)}{dt} = \frac{p \cdot s}{\sqrt{2\pi \cdot PM(i) \cdot RT}} \quad (2.3)$$

Nell'equazione precedente  $p$  (Pa) è la pressione all'interno della cella,  $s$  (m<sup>2</sup>) la superficie del foro,  $PM(i)$  (g/mol) il peso molecolare della specie effusa e  $R$  (J/mol·K) la costante dei gas ideali. Per fori reali la distribuzione è correlata anche alla geometria dell'orifizio tramite l'introduzione di un opportuno coefficiente ( $C$ , *Clausing coefficient*) dipendente da essa. Questo fattore viene ottenuto dall'integrazione del flusso molecolare su tutta la distribuzione angolare che si ha tenendo conto della geometria reale. Esso viene moltiplicato all'espressione (6.1) per ottenere l'effettivo  $dn/dt$ .

Inizialmente l'analisi del materiale in fase gas veniva effettuata misurando la quantità di materiale effuso tramite appositi bersagli (*target*) di condensazione o, più tardi, misurando la perdita in peso. Nel 1948 Ionov, per primo, accoppiò la cella di Knudsen con uno spettrometro di massa gettando le basi per un nuovo tipo di tecnologia (*KEMS: Knudsen Effusion Mass Spectrometry*) che permise di studiare qualitativamente e quantitativamente la termodinamica di molte sostanze. Ad oggi la *KEMS* è una tecnica diffusa per il calcolo delle attività specifiche, della tensione di vapore dei materiali e più in generale per lo studio dei loro equilibri termodinamici. I materiali studiati fino ad oggi sono i più vari: metalli, leghe, ossidi, carburi, fullereni e molti altri [15]. In seguito, la *KEMS* venne ulteriormente riadattata per lo studio della cinetica di reazioni in fase omogenea e non tramite l'impiego di gas reattivi con il campione [13].

## 2.6 - Knudsen Effusion Mass Spectrometry (KEMS)

La tecnologia KEMS si basa sull'accoppiamento tra una cella di Knudsen e uno spettrometro di massa che viene così utilizzato per l'analisi del gas di effusione.

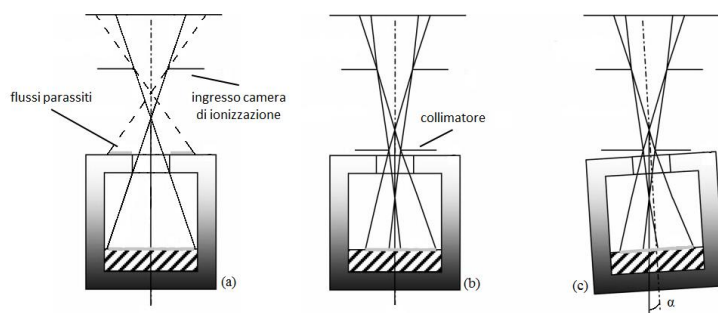
L'avvento dello spettrometro presentò numerosi vantaggi tra i quali la possibilità di lavorare in continuo evitando lunghe interruzioni per la pesatura del campione o per l'esame del target di condensazione. Oltre a ciò, da un'analisi accurata degli spettri risultanti fu possibile calcolare una serie di variabili termodinamiche decisamente utili: in particolare la pressione parziale delle specie in fase gas, ma anche entalpie ed entropie di vaporizzazione e altre ancora [15].

Inoltre, lo spettrometro è uno strumento molto flessibile poiché può operare in intervalli molto ampi di temperatura e di pressione all'interno della cella consentendo ampie potenzialità di misura. La temperatura, infatti, può anche superare i 2000 °C, mentre, nel caso della pressione, il limite superiore è dovuto alla geometria del foro (si veda il §6.4), mentre quello inferiore alla sensibilità dello strumento, tipicamente attorno a 10-11 bar [14].

Recentemente sono state introdotti dispositivi KEMS a celle di Knudsen multiple, aventi, cioè, più celle in grado di contenere campioni diversi e collegate ad uno spettrometro tramite un sistema di movimentazione meccanica. In questo modo è possibile riscaldare e analizzare contemporaneamente più campioni, effettuando utili confronti, eventualmente anche con uno standard.

Lo svantaggio è rappresentato dai maggiori costi legati alla movimentazione e ad una serie di accorgimenti necessari per evitare problemi di contaminazione incrociata tra i campioni. Infatti, questi dispositivi permettono l'analisi di campioni diversi solo se sono provvisti di sistemi di collimazione che impediscano la miscelazione dei flussi differenti in entrata alla camera di ionizzazione. In tal modo la misura può essere effettuata su un campione per volta.

Per quanto riguarda la struttura di una KEMS la cella si identifica con la camera di introduzione del campione e può essere collegata a quella di ionizzazione tramite alcuni accorgimenti. Solitamente si interpone un separatore raffreddato che protegge la sorgente dal riscaldamento eccessivo e dalla formazione di depositi condensati sulle pareti fungendo da "trappola" per i flussi parassiti di cui si tratterà in seguito. Attualmente si utilizzano sistemi che operano selezionando una frazione ulteriore del gas effuso dalla cella tramite un diaframma forato e la collimano verso la camera di ionizzazione dello spettrometro. Questa tecnologia, che prende il nome di "collimazione ristretta" (restricted collimation), si è sviluppata per eliminare il contributo di "flussi parassiti" che si aggiungono al flusso molecolare vero e proprio prodotto dalla cella. Altrimenti, l'angolo solido del vapore in ingresso alla camera di ionizzazione sarebbe da due a cinque volte più ampio rispetto a quello di uscita del gas [14]. Ciò è dovuto all'aggiunta di molecole che ri-vaporizzano dopo aver condensato sulle pareti calde della cella o che diffondono all'esterno attraverso queste ultime e poi vaporizzano, come si può osservare in Fig. 2.11.



**Fig. 2.11** Accoppiamento tra la cella di Knudsen e la camera di ionizzazione di uno spettrometro (a) senza collimazione ristretta, (b) con collimazione ristretta e (c) con angolo di sfasamento  $\alpha$  rispetto all'asse del collimatore (Heyrman et al., 2004)

Si pensò che una soluzione al problema fosse aumentare il diametro dell'orifizio ma si osservò al contempo un aumento dei flussi parassiti. Così, con la collimazione ristretta si giunse a selezionare solo un piccolo angolo solido del vapore effuso tramite un apposito foro praticato nel separatore raffreddato posto sopra la cella e avente diametro minore rispetto al suo orifizio. In questo modo, tutte le molecole che giungono alla sorgente provengono direttamente dalla superficie del campione o da urti reciproci

tra di esse. In particolare, a parità di diametro del collimatore l'angolo solido del vapore ionizzato è costante e non dipende dalle dimensioni della cella né dalla sua posizione relativa rispetto al separatore a patto che quest'ultimo rimanga entro il diametro dell'orifizio della cella (Fig. 2.11).

Le esigenze di accoppiamento e collimazione tra i componenti rendono necessaria l'integrazione di un opportuno sistema di posizionamento X-Y della cella comandato elettronicamente. Ciò è ancor più indispensabile per celle di Knudsen multiple per poter rendere riproducibile la posizione relativa tra la cella in cui si effettua la misura e lo spettrometro. Per la progettazione, il controllo e le prove di posizionamento di questi sistemi si rimanda a testi più specialistici [14].

### 2.6.1 - Calcolo della pressione parziale, calibrazione e background

Per il calcolo della pressione parziale si applica la legge di Beer-Lambert per l'assorbimento di elettroni da parte di un gas diluito [15]:

$$p(i) = \frac{kT \sum I(j, i)}{\sigma(i)} \quad (2.4)$$

$\sum I(j, i)$  (A) è pari alla somma delle correnti ioniche j-me generate a partire dalla particella i-ma,  $\sigma(i)$  (cm<sup>2</sup>) è la sezione d'urto di ionizzazione delle molecole e  $k$  (Pa·cm<sup>2</sup>/K·A) è la costante di calibrazione della pressione.

Questa costante è specifica di ogni strumento, dipende da molti fattori tra cui la geometria della cella e la sorgente di ionizzazione e la sua individuazione permette di tarare lo strumento. In realtà tale variabile non può essere costante per ogni misura a meno che non si riescano a mantenere sempre le stesse condizioni. A questo scopo il valore di vuoto dovrebbe essere sempre lo stesso, la camera rigidamente fissata e provvista di una valvola di isolamento tra la cella e la camera di ionizzazione che permetta di mantenere in funzione la sorgente durante il cambio di campione. Infine, anche la quantità di gas analizzato dovrebbe rimanere costante. Attualmente esistono tre metodi che aggirano il problema posto permettendo di calcolare questa costante e verranno brevemente descritti in seguito [15].

Il primo consiste nell'analisi di uno standard, cioè di una sostanza di pressione parziale nota; solitamente si impiegano dei metalli puri. Con questo criterio, tuttavia, è necessario assicurare che le analisi dello standard e dei campioni successivi vengano effettuate esattamente nelle stesse condizioni di misura in modo che il flusso molecolare sia lo stesso. Inoltre per il calcolo di  $k$  è necessario conoscere il valore di  $\sigma(i)$  che si può ritrovare in letteratura da dimostrazioni teoriche o ricavare empiricamente.

Il secondo metodo prevede di calcolare  $k$  a partire dalla perdita in peso  $dm(i)/dt$  (g/s) che il specie i-ma subisce durante la vaporizzazione e che può essere misurata al termine del riscaldamento. Perciò il valore di  $k$  si determina con la seguente formula:

$$k = \frac{\sigma(i)}{\sum I(j, i)} \frac{1}{T s C} \sqrt{\frac{2\pi RT}{PM(i)}} \frac{dm(i)}{dt} \quad (2.5)$$

Infine l'ultimo ed il meno comune dei metodi permette di determinare  $k$  a partire da un noto equilibrio di dissociazione dimero/monomero dell'elemento  $A$  in fase gas. Conoscendo il valore della costante di equilibrio  $K$ , riportata nella (2.7), è possibile ricavare la costante di calibrazione  $k$  (2.8).

$$2A(g) = A_2(g) \quad (2.6)$$

$$K = \frac{[p(A)/p^0]^2}{[p(A_2)/p^0]} \quad (2.7)$$

$$k = K \frac{1}{T} \frac{\sigma(A)^2 I(A_2)}{\sigma(A_2) I(A)^2} \quad (2.8)$$

In realtà, questo approccio ha un utilizzo limitato perché si può applicare solo a sistemi molto specifici e a causa della scarsa accuratezza raggiunta nella determinazione della costante  $K$ .

Il problema della calibrazione dello strumento è stato più recentemente superato con l'implemento di celle di Knudsen multiple dotate di uno standard permanente grazie a cui il valore della variabile  $k$  può essere costantemente aggiornato. Di contro, tuttavia, queste celle richiedono una progettazione più oculata per assicurare che le condizioni di misura, come il volume di materiale analizzato e l'energia di ionizzazione, siano le stesse per ogni cella al fine di poter effettuare un valido confronto.

Infine dopo aver calibrato lo strumento e prima del suo utilizzo è necessaria l'operazione di sottrazione del *background*. Ciò consente di eliminare il rumore di fondo presente negli spettri che è dovuto alla ionizzazione di gas residui, i quali permangono in frazioni molto piccole all'interno della camera di ionizzazione malgrado l'alto vuoto. A tale scopo si posiziona una piastra trasversale (*shutter*) al di sopra del foro della cella in modo da impedire che il flusso di gas vaporizzato raggiunga la camera di ionizzazione e si misura lo spettro dato dai soli gas residui, che verrà poi sottratto a tutti gli spettri risultanti dalle misure successive. L'energia del fascio elettronico eventualmente può essere calibrata per limitare la frammentazione dei gas di *background* e quindi il numero di picchi ad essi correlati [16].

## 2.7 - Elementi di progettazione di una cella di Knudsen

Nella progettazione di una cella di Knudsen occorre tener conto di una serie di fattori che ne influenzano in modo decisivo il funzionamento.

In primo luogo bisogna scegliere accuratamente il materiale con il quale costruire la cella. Questo deve essere chimicamente inerte nei confronti dei materiali depositati, oltretutto deve assicurare proprietà meccaniche soddisfacenti alle temperature di utilizzo della cella. Attualmente vengono impiegati preferenzialmente ceramici, come allumina, zirconia e nitruro di boro, o leghe metalliche ricche di elementi alto fondenti come W, Mo e altri e per questo motivo denominate "refrattarie" [15]. Infine, la selezione del materiale può dipendere dal sistema riscaldante scelto e dalle sue proprietà termiche. Infatti, nel caso di riscaldamento per effetto Joule la camera deve coincidere con un crogiolo elettricamente conduttivo, con resistività minore possibile. Un secondo fattore decisivo è costituito dalla geometria della cella poiché influenza in modo diretto l'equilibrio raggiungibile all'interno della camera e quindi le misure termodinamiche da esso ricavabili. Infatti uno studio accurato della geometria è necessario per assicurare condizioni di pressione e temperatura costanti le quali vengono modificate rispettivamente dall'effusione del gas e dal calore trasmesso.

Come già detto, la quantità di gas fuoriuscito deve essere molto piccola sia per garantire che il gas si trovi in regime molecolare, sia per poter considerare nullo il gradiente esistente tra la cella e l'esterno mantenendo perciò inalterato l'equilibrio termodinamico. Knudsen trovò che questa condizione si verificava quando il rapporto tra il libero cammino medio delle molecole ed il diametro dell'orifizio era maggiore di dieci. Ciò comporta che la cella lavori in condizioni di vuoto, talvolta anche spinto. Ad esempio, la pressione massima per un foro di 1 mm di diametro è di circa  $10^{-4}$  bar oppure per una cella di volume pari a circa  $1 \text{ cm}^3$  il diametro dell'orifizio è compreso tra 1 e 2 mm. Più in generale si può dire che l'area del foro deve essere almeno cento volte minore rispetto alla superficie del materiale deposto nella camera in modo che non ne venga inficiato l'equilibrio [16].

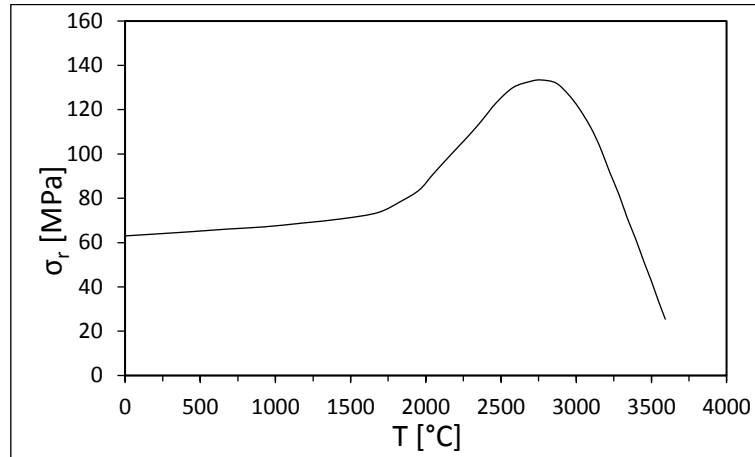
Invece, per quanto riguarda la temperatura è chiaro come la geometria influenzi sia la massima temperatura raggiungibile, sia la distribuzione di temperatura all'interno della cella. Quest'ultima dovrebbe essere il più possibile costante lungo le superfici interne, poiché la presenza di punti "freddi" potrebbe favorire la condensazione degli atomi evaporati dal campione inserito all'interno della cella. Risulta quindi evidente come, per massimizzare il controllo sul processo di effusione delle particelle, sia necessaria una progettazione oculata e supportata da modellazione agli elementi finiti.

## 2.8 - La cella di Knudsen progettata ai LNL

[17]

Il materiale scelto per la costruzione della cella è la grafite, questo per le sua inerzia chimica, la sua eccellente resistenza alle alte temperature e all'ottima lavorabilità alle macchine utensili. In particolare si è scelto di usare la grafite EDM-3®, prodotta da POCOGRAPHITE. Essa, se paragonata con altre grafiti di tipo convenzionale, esibisce delle caratteristiche termo-strutturali eccellenti. Tali proprietà sono date dalla ridottissima presenza di impurità e dalla piccolissima dimensione media di grano (pari a  $4 \mu\text{m}$ ,

contro i  $20 \div 25 \mu\text{m}$  di una grafite convenzionale). Ciò si ripercuote particolarmente sulla resistenza meccanica che, come per ogni materiale a comportamento fragile, è molto sensibile ai difetti e alle imperfezioni del materiale: la struttura particolarmente fine permette quindi di ottenere una tensione di rottura fino a due volte superiore rispetto ad una grafite convenzionale. In **Fig. 2.12** è rappresentato l'andamento della tensione di rottura del materiale in funzione della temperatura.

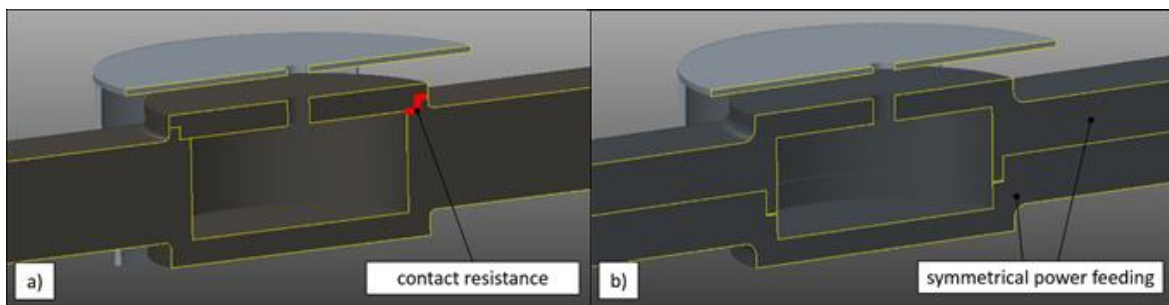


**Fig. 2.12** Andamento della tensione di rottura della grafite EDM-3® al variare della temperatura [18].

Per contro, rispetto ad un tipo di grafite convenzionale, l'EDM-3® esibisce un peggior comportamento allo shock termico ed un maggior coefficiente di dilatazione termica. Le proprietà del materiale sono descritte in modo estensivo in ref. [18].

Per il riscaldamento della cella si è scelto di sfruttare le caratteristiche di conducibilità elettrica della grafite, optando quindi per un riscaldamento modo diretto mediante effetto Joule.

Il principale obiettivo di progettazione è quello di realizzare una cella sulle cui pareti interne la temperatura sia il più uniforme possibile, onde evitare la condensazione dei vapori sulle zone "fredde". L'interno della cella deve essere ovviamente accessibile, al fine di poter depositare il campione dell'elemento di interesse. Si consideri ora la Fig. 2.13, dove sono rappresentate le soluzioni considerate per la geometria principale della cella.

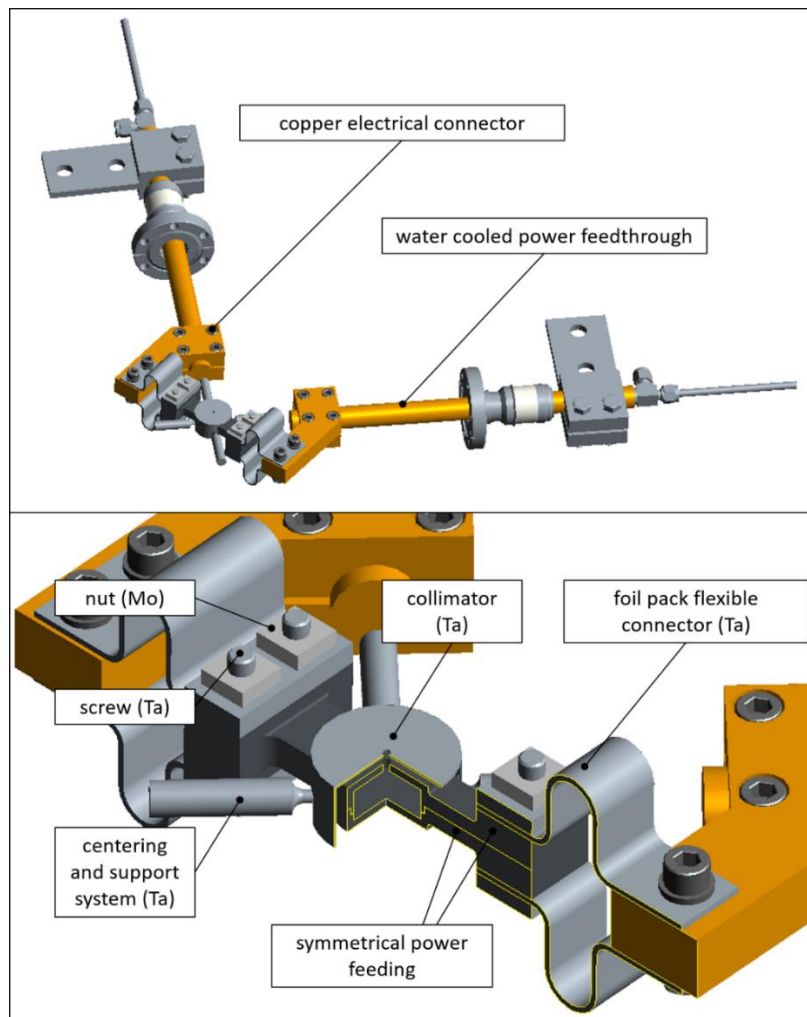


**Fig. 2.13** Architetture considerate per la realizzazione della cella. In entrambe le soluzioni è possibile notare il collimatore in tantalio distanziato di 2 mm dalla parte superiore della cella.

La soluzione di tipo convenzionale, esposta in Fig. 2.13a, presenta il principale svantaggio non possedere un'alimentazione simmetrica, a causa delle connessioni elettriche per contatto nel tappo della cella. La resistenza elettrica di contatto tra il corpo della cella e il tappo farà sì che una minor quantità di corrente passi attraverso il tappo stesso (che preferirà quindi attraversare il corpo della cella), con un suo conseguente minor riscaldamento per effetto Joule. Il tappo, rimanendo più freddo, potrebbe quindi far condensare sulla sua superficie la specie evaporata dal fondo della cella. Anche dal punto di vista dell'analisi e ottimizzazione mediante software FE questa soluzione si rivelerebbe svantaggiosa: si avrebbe infatti l'impossibilità di conoscere il reale stato elettro-termico all'interno del tappo della cella, in quanto la

resistenza elettrica e termica di contatto, seppur implementabile nel modello numerico, è di difficile determinazione. Inoltre, durante il riscaldamento, l'eventuale differenza di temperatura tra tappo e corpo della cella porterebbe a deformazioni non omogenee con conseguente peggioramento del contatto elettrico. La soluzione scelta (Fig. 2.13b) prevede invece un'alimentazione completamente simmetrica del circuito riscaldante. Ciò significa che, in linea teorica, non dovrebbero esserci differenze di distribuzione termica dovute ad un attraversamento non uniforme della corrente elettrica tra le due metà della cella. Si può notare inoltre la presenza di un gradino, realizzato al fine di non permettere la fuoriuscita degli atomi vaporizzati nel caso in cui le dilatazioni termiche portino ad una separazione delle due metà della cella.

La cella di Knudsen deve essere alloggiata all'interno della camera TOF. Al fine di ridurre lo stato di compressione generato dalle dilatazioni termiche si è scelto di utilizzare un tipo di connessione elettrica flessibile, mediante l'utilizzo di fogli di tantalio di spessore 0,1 mm opportunamente impaccati. Il risultato è rappresentato in dettaglio in Fig. 2.14.



**Fig. 2.14** Rappresentazione della nuova configurazione di alimentazione e supporto.

È possibile notare che anche in questo caso si sia mantenuta simmetrica l'alimentazione elettrica della cella. I quattro connettori elettrici sono realizzati da un pacco di 15 fogli in tantalio di spessore 0,1 mm. È stato inoltre previsto un sistema di supporto e centraggio della cella, realizzato con dei perni di tantalio di diametro 8 mm la cui parte finale, di diametro 2,8 mm, va ad inserirsi in delle sedi circolari di diametro 3 mm realizzate nella cella. La progettazione di tale sistema di supporto sarà affrontata nel Capitolo 4. Le due metà della cella sono serrate mediante un collegamento bullonato M6, con viti in tantalio e dadi in molibdeno. La scelta di utilizzare materiali diversi tra vite e dado è stata effettuata per evitare il loro incollaggio: materiali uguali, infatti, tenderebbero maggiormente a saldarsi tra di loro grazie ai processi

diffusivi favoriti dalle alte temperature. I fori passanti nella grafite sono realizzati di diametro pari a 8 mm, al fine di evitare il contatto elettrico tra la grafite e le viti, che potrebbe portare ad un eccessivo riscaldamento di queste ultime.

Vale la pena di sottolineare inoltre che in nuovo design del sistema può consentire, senza alcuna modifica della geometria della cella, anche un test di caratterizzazione termica nell'apparato di prova per le alte temperature descritto nel Capitolo 3.

La cella di Knudsen realizzata ai LNL è infine rappresentata in Fig. 2.15:

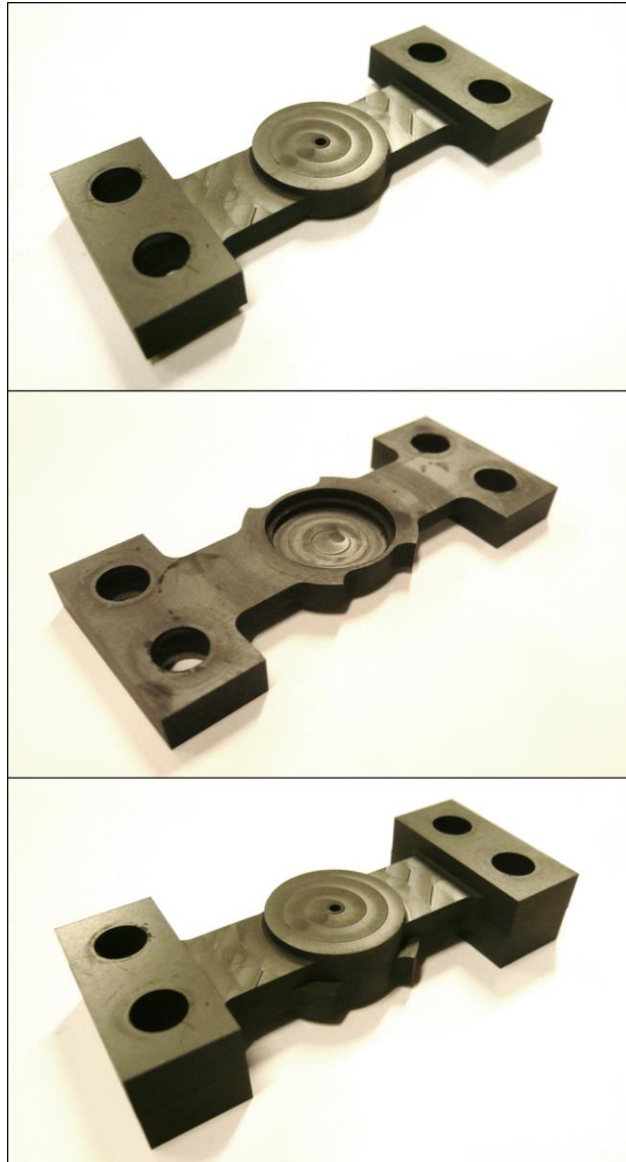


Fig. 2.15 Cella di Knudsen realizzata

## 2.9 - Conclusioni

In questo capitolo si è preliminarmente trattata la teoria della ionizzazione, approfondendo poi la ionizzazione laser mediante tecnica RILIS. Si sono poi illustrate la spettrometria di massa a tempo di volo, e la camera TOF a disposizione dei LNL. Infine è stata introdotta la cella di Knudsen, che sarà l'oggetto di questa tesi, illustrando quali sono i vincoli progettuali da rispettare e presentando il prototipo realizzato ai LNL.

Questo lavoro di tesi sarà così strutturato:

- test di caratterizzazione termica, sia per la validazione del modello numerico che per la verifica delle caratteristiche del materiale;
- progetto di dettaglio il sistema di supporto e centraggio della cella, prevedendo delle regolazioni sia in altezza che nel piano, al fine di ottenere il suo corretto posizionamento;
- progetto del sistema di supporto e movimentazione del collimatore in tantalio;
- analisi numeriche termiche dell'intera camera, al fine di analizzare la temperatura raggiunta da ogni componente, permettendo quindi un'oculata scelta dei materiali;
- test di effusione e valutazione della dimensione del cono di effusione stesso.



# Capitolo 3

## Analisi elettro-termica del prototipo della cella di Knudsen e validazione del modello numerico

Nel capitolo precedente sono state presentate in dettaglio la camera TOF, la Knudsen Cell Mass Spectrometry e la cella di Knudsen progettata e realizzata presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

La trattazione seguente è incentrata sull'elaborazione di un modello agli elementi finiti in grado di rappresentare le condizioni di esercizio della cella di Knudsen assemblata all'interno di una camera muletto adibita a prove termiche ad alta temperatura. L'obiettivo principale dello studio è quello di valutare la distribuzione di temperatura in corrispondenza delle pareti interne della cella stessa: infatti, come specificato nel precedente capitolo, al fine di ottenere una buona efficienza del processo di effusione, tale temperatura deve essere il più uniforme possibile.

Verranno quindi preliminarmente esposte le basi teoriche per la costruzione del modello, proseguendo poi con la sua definizione ed implementazione tramite il codice di calcolo agli elementi finiti ANSYS®.

La seconda parte del capitolo presenta la descrizione dell'apparato di prova utilizzato al fine di validare il modello FEM, gli strumenti di misura scelti e la procedura di misurazione messa a punto.

Infine si procede con un confronto tra i dati numerici ottenuti al calcolatore e quelli rilevati sperimentalmente.

### 3.1 - Basi teoriche per la costruzione del modello

Di seguito sono introdotte le basi teoriche necessarie alla costruzione del modello agli elementi finiti. L'obiettivo della simulazione è valutare la temperatura della cella assemblata all'interno della camera da vuoto per prove sperimentali e pertanto ciò che è sostanzialmente richiesto è la risoluzione di un problema termico. La generazione di calore interno avviene tramite dei puntali in rame per mezzo dell'effetto Joule, pertanto al problema termico è strettamente correlato un problema elettrico. È importante inoltre sottolineare che, essendo le proprietà elettriche dipendenti dalla temperatura, è necessario un procedimento iterativo: ciò significa che i risultati del problema elettrico, che forniscono una variabile in input del problema termico, saranno ricalcolati sulla base delle soluzioni del problema termico, fino a convergenza.

#### 3.1.1 - Il problema termico

In fase di operazione la cella di Knudsen è mantenuta in stato di alto vuoto (circa  $10^{-6}$  mbar). Ne consegue che, nel volume isolato dalla camera da vuoto, il meccanismo di scambio termico per convezione non può aver luogo, poiché è totalmente assente un fluido in grado di trasmettere il calore, che si propaga quindi attraverso i meccanismi di conduzione e irraggiamento. La conduzione, avvenendo esclusiva-

mente in presenza di un mezzo solido, nel singolo componente ha luogo dove vi è continuità del materiale mentre, nel caso di componenti diversi, avviene attraverso il contatto tra le superfici; l'irraggiamento invece ha luogo tra superfici non a contatto.

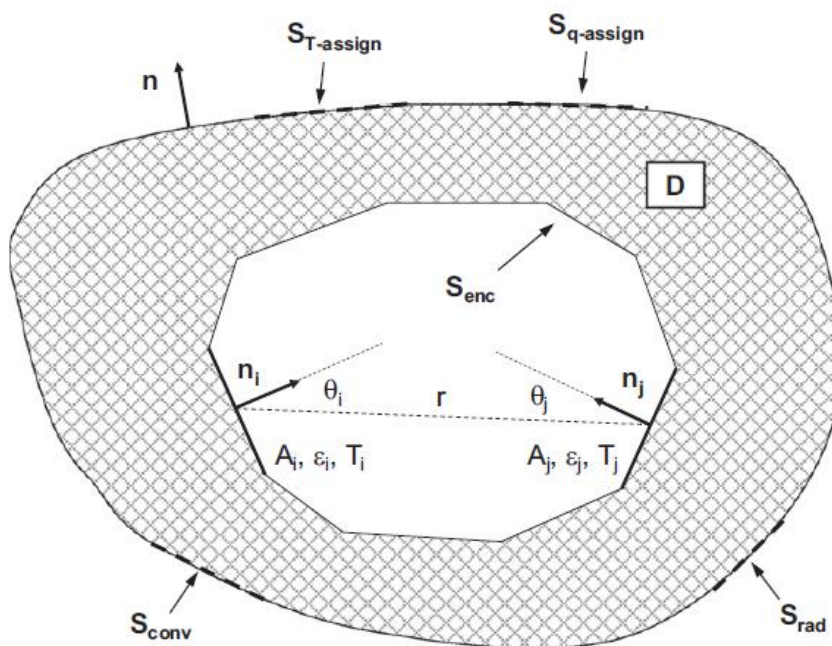
I problemi con fenomeni di conduzione e irraggiamento accoppiati sono risolti, generalmente, con metodi sequenziali che si basano su equazioni iterative sulla diffusione del calore e sulla radiazione termica. La soluzione del problema di diffusione termica costituisce le condizioni al contorno per la radiazione termica, mentre i risultati delle equazioni che determinano i flussi termici irraggiati forniscono le condizioni iniziali per la conduzione nella successiva iterazione. In Fig. 3.1 è rappresentato schematicamente il fenomeno dello scambio termico descritto: la conduzione ha luogo attraverso la regione solida indicata con  $D$ , mentre l'irraggiamento riguarda le superfici che formano l'enclosure (insieme di superfici tra cui può aver luogo lo scambio termico per radiazione) indicata con  $S_{enc}$ . Il meccanismo di scambio termico per conduzione è descritto nella sua forma generale dall'equazione (3.1), scritta in coordinate cartesiane.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right) + h = \delta c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

In tale equazione la funzione  $T(x,y,z,t)$  esprime il campo di temperatura in funzione della posizione cartesiana  $(x,y,z)$  e del tempo  $(t)$ , il parametro  $k$  esprime la conducibilità termica del materiale,  $\delta$  la densità,  $c$  il calore specifico ed in fine  $h$  la generazione volumetrica interna di calore. Al fine di ottenere una soluzione valida è necessario definire sia le condizioni iniziali sia quelle al contorno.

Le condizioni iniziali fissano il campo di temperatura dell'intero volume solido  $D$  al tempo iniziale (3.2).

$$T(x, y, z, 0) = T_i(x, y, z) \quad \forall (x, y, z) \in D \quad (3.2)$$



**Fig. 3.1** rappresentazione schematica di un problema di scambio termico attraverso meccanismi di conduzione e irraggiamento accoppiati

Le condizioni al contorno descrivono invece lo status della superficie  $S$  che confina il volume  $D$  e possono essere generalmente espresse nella forma indicata nelle relazioni (3.3), (3.4), (3.5).

$$T(x, y, z, t) = T_{assign}(x, y, z, t) \quad \forall (x, y, z) \in S_{T-assign} \quad (3.3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = q_{assign} + q_{conv} + q_{rad} \quad \forall (x, y, z) \in (S_{q-assign} \cup S_{conv} \cup S_{rad}) \quad (3.4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = q_{enc} \quad \forall (x, y, z) \in S_{enc} \quad (3.5)$$

L'espressione (3.3) rappresenta eventuali vincoli espliciti di temperatura, la (3.4) e la (3.5) sono state scritte in relazione alla normale  $n$  alla superficie  $S$  (dove  $S = S_{T\text{-assign}} \cup S_{q\text{-assign}} \cup S_{\text{conv}} \cup S_{\text{rad}} \cup S_{\text{enc}}$ ). I termini  $q_{\text{assign}}$ ,  $q_{\text{conv}}$ ,  $q_{\text{rad}}$ ,  $q_{\text{enc}}$  assumono valori positivi quando il flusso termico ha direzione concorde alla normale  $n$ . Tra questi  $q_{\text{conv}}$  e  $q_{\text{rad}}$  indicano rispettivamente i flussi termici scambiati verso l'ambiente esterno attraverso i meccanismi di convezione e radiazione nelle porzioni di superficie  $S_{\text{conv}}$  e  $S_{\text{rad}}$ . Tali flussi sono esprimibili mediante le relazioni (3.6) e (3.7)

$$q_{\text{conv}} = \alpha(T - T_c) \quad (3.6)$$

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_r^4) \quad (3.7)$$

Nell'equazione (3.6)  $\alpha$  indica il coefficiente di scambio termico convettivo mentre  $T_c$  indica la temperatura del fluido che circonda la superficie dove ha luogo il fenomeno di scambio termico. Nella (3.7) invece  $\varepsilon$  è l'emissività emisferica totale della superficie supposta grigia,  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann, e  $T_r$  rappresenta la temperatura ambientale oppure la temperatura di una superficie isoterma molto più grande di  $S$  che la racchiude completamente.

Le condizioni al contorno sulle superfici  $A_i$  che appartengono all'enclosure  $S_{\text{enc}}$  sono fissate dall'equazione (3.5) nella quale  $q_{\text{enc}}$  rappresenta il calore irradiato attraverso la superficie  $A_i$ . Dal momento che all'interno dell'enclosure  $S_{\text{enc}}$  si suppone sia stato effettuato il vuoto è evidente che la (3.5) rappresenta lo scambio termico totale non essendo possibile il meccanismo della convezione data l'assenza di un fluido in grado di trasmettere il calore. Si ricava inoltre che in fase di equilibrio termico il calore trasmesso per radiazione è uguale al flusso termico conduttivo attraverso la superficie  $S_{\text{enc}}$  all'interno del volume  $D$ .

La soluzione del problema radiativo, come ad esempio il calcolo di  $q_{\text{enc}}$ , è ottenuta considerando l'espressione (3.8) nella quale si assume che le  $N$  aree coinvolte nello scambio radiativo siano grigie e diffuse e che inoltre siano interessate da un campo di temperatura e un flusso termico uscente uniforme.

$$\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{j-i} \left( \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \right] q_{\text{enc},i} = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{j-i}) \sigma T_i^4 \quad (3.8)$$

In tale formulazione il simbolo  $\delta_{ji}$  rappresenta l'operatore delta di Kronecker (pari a 1 se  $i=j$ , altrimenti 0),  $\varepsilon_i$  è l'emissività emisferica totale della superficie  $i$ ,  $F_{j-i}$  rappresenta il fattore di vista tra la superficie  $j$  e la superficie  $i$ ,  $q_{\text{enc},i}$  è il flusso termico netto scambiato per radiazione dall'area  $i$ ,  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann, e  $T_i$  rappresenta la temperatura assoluta (in K) della superficie  $i$ . Il fattore di vista  $F_{j-i}$  indica la frazione di energia radiante che, uscente dalla superficie  $j$ , impatta direttamente la superficie  $i$ . È espresso dalla relazione (3.9).

$$F_{j-i} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos\theta_j \cos\theta_i}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (3.9)$$

Le quantità geometriche espresse nella (3.9) fanno riferimento alla figura 3.1.

### 3.1.2 - Il problema elettrico

Come già indicato il problema elettrico è complementare al problema termico in quanto fornisce il carico termico derivante dal riscaldamento per effetto Joule. Il campo di densità di corrente elettrica  $\mathbf{j}(x,y,z)$  dipende dal gradiente del potenziale  $V(x,y,z)$ , come indicato nell'equazione di Ohm (3.10).

$$\mathbf{j} = -\frac{1}{\rho(T)} \nabla V \quad (3.10)$$

Con  $\rho$  si intende la resistività del materiale che è funzione della temperatura.

In condizioni stazionarie inoltre, dal momento che le condizioni per la validità del teorema della continuità di  $\mathbf{j}$  sono verificate, è possibile scrivere la relazione (3.11).

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (3.11)$$

In accordo con quanto enunciato riguardo all'effetto Joule, è possibile scrivere una relazione tra il calore dissipato per unità di volume del materiale e il campo di corrente  $\mathbf{j}$  (3.12).

$$h = -\nabla V \cdot \mathbf{j} \quad (3.12)$$

Il simbolo “ $\cdot$ ” identifica il prodotto scalare tra due vettori.

### 3.2 - Il modello geometrico

L'obiettivo principale è quello di studiare la distribuzione di temperatura in corrispondenza delle pareti interne della cella di Knudsen.

A tal fine, considerando la geometria reale del sistema in questione, rappresentata in Fig. 3.2, è stato necessario costruire un modello geometrico semplificato che riproducesse le caratteristiche di interesse, trascurando quelle non significative per lo scopo dell'analisi.

Tali semplificazioni hanno lo scopo di agevolare la costruzione del modello andando a ridurne sensibilmente la complessità, ciò si traduce inoltre in una notevole riduzione dei tempi di calcolo richiesti per la sua risoluzione.

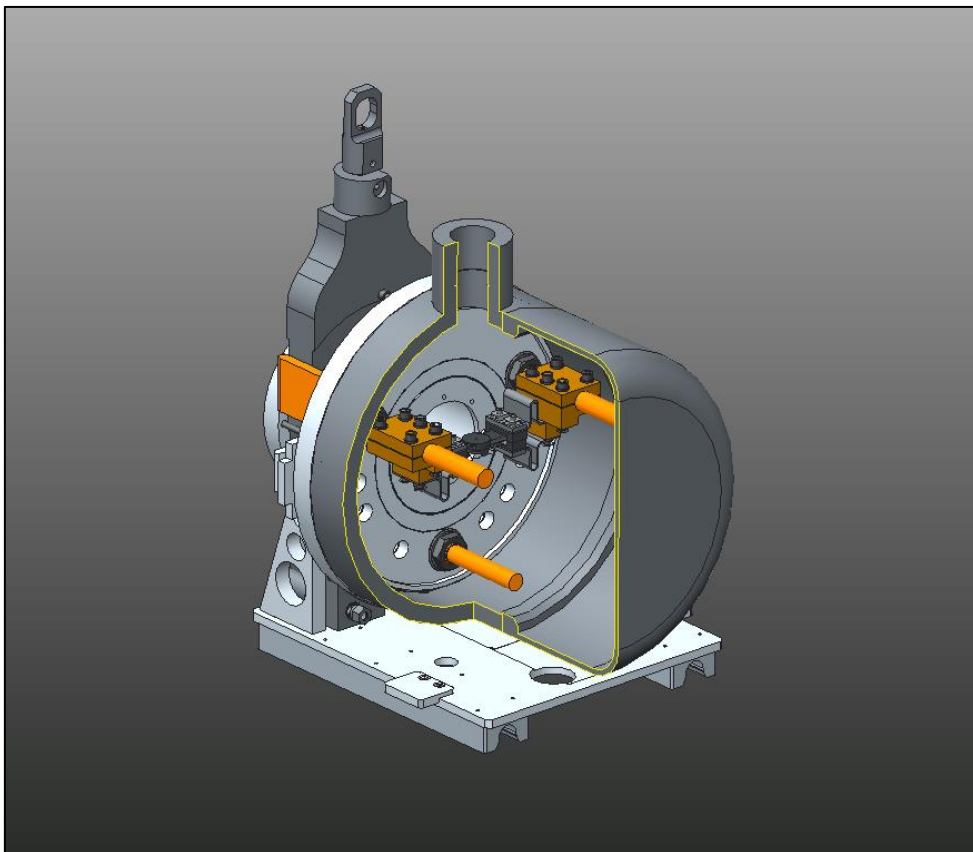


Fig. 3.2 Modello geometrico reale

Per prima cosa sono stati rimossi il piatto posteriore della camera ed il suo coperchio in quanto si è considerata trascurabile la loro influenza per il problema di scambio termico radiativo. La ragione di ciò è facilmente intuibile osservando l'eq. 3.7: tra due corpi, lo scambio termico per radiazione è funzione della differenza tra le quarte potenze delle rispettive temperature e perciò il piatto della camera ed il

rispettivo coperchio (che essendo raffreddati hanno temperature intorno ai 25°C) influiscono solamente in minima parte sulla temperatura della cella di Knudsen.

Le giunzioni bullonate dei connettori in rame sono state poi rimosse in quanto non avrebbero influenzato in maniera significativa il risultato della simulazione.

Si sono invece implementate, al fine stimare la temperatura massima raggiunta in esercizio, le viti di chiusura delle due metà della cella. Il risultato finale è rappresentato in Fig. 3.3.

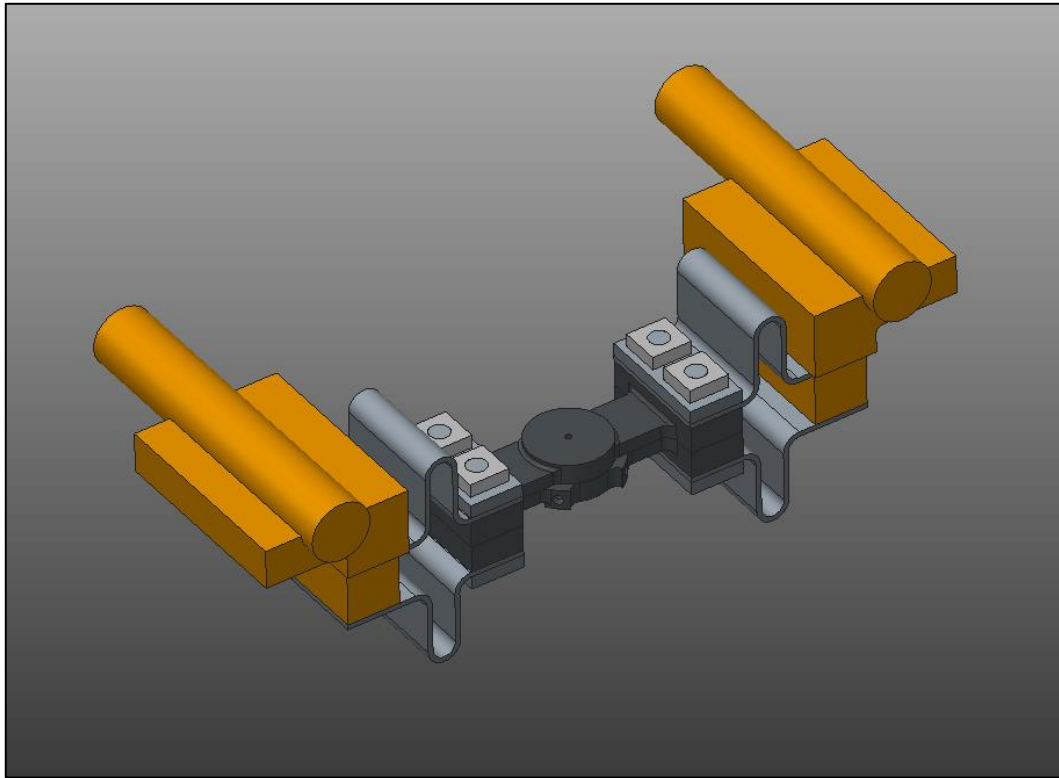


Fig. 3.3 Geometria semplificata

### 3.3 - Il modello FEM

Per un particolare problema fisico, in generale, non si dispone di una trattazione analitica in grado di fornire la soluzione esatta al problema e l'unica possibilità è l'utilizzo dei metodi numerici, ed in particolare del metodo degli Elementi Finiti (FEM, Finite Element Method) che è stato adoperato per effettuare la simulazione in questione. Come evidenziato precedentemente, considerando che l'intero sistema è tenuto in alto vuoto, si ha che gli unici meccanismi di scambio che governano il problema termico sono l'irraggiamento e la conduzione. Il metodo agli elementi finiti, implementato nel codice ANSYS®, permette di risolvere in modo approssimato dei sistemi di equazioni differenziali alle derivate parziali. L'approccio si basa sulla discretizzazione del dominio di integrazione: la geometria viene semplificata in una rete di elementi detta *mesh* e ogni suo elemento ha dei punti caratteristici, detti nodi, utilizzati per calcolare la soluzione del problema. Il problema della conduzione viene risolto con il motore degli elementi finiti, mentre il problema della radiazione con il metodo ANSYS® *Radiosity Solver*. La soluzione del problema radiativo permette di determinare le temperature  $T_i$  delle superfici dell'*enclosure*, un sistema di  $N$  equazioni esplicite permette di trasportare il flusso netto di calore  $q_{enc,i}$  ad ogni superficie per essere applicato come condizione al contorno per il problema conduttivo. In altre parole il flusso di calore irradiato risultante dal problema della radiazione genera le condizioni al contorno per il problema di conduzione termica la cui soluzione è la distribuzione superficiale di temperatura a sua volta reindirizzata come condizione al contorno per il problema della radiazione termica. Nel caso in esame il campo elettrico e quello termico sono accoppiati: il problema elettrico viene risolto ponendo un vincolo di potenziale nullo su alcune superfici e forzando una corrente elettrica su altre. Per la risoluzione del pro-

blema numerico si è utilizzato l'elemento *SOLID226*, rappresentato nelle diverse configurazioni geometriche disponibili in Fig. 3.4, che permette l'accoppiamento dei gradi di libertà temperatura e potenziale elettrico, mentre le rispettive forze generalizzate sono il flusso di calore e l'intensità di corrente elettrica. Data la complessità della geometria, si è optato per un tipo di meshatura *free*, scegliendo quindi la configurazione tetraedrica a 10 nodi.

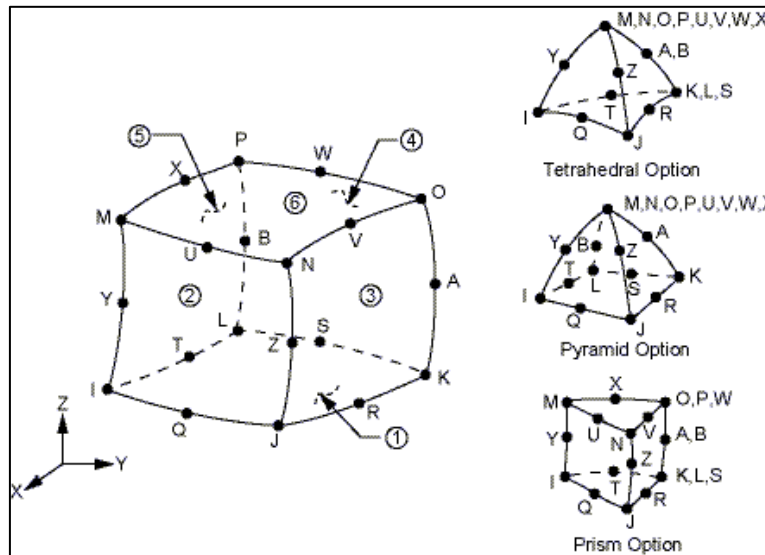


Fig. 3.4 Elemento *SOLID226* nelle sue varie configurazioni

Tramite apposite *macro* APDL, vengono assegnate le proprietà dei materiali, quali ad esempio resistività, emissività, calore specifico, ecc.

Si assume, dato che il modello considera i vari componenti in contatto perfetto, che la resistenza termica di contatto influenzi solo localmente i valori di temperatura. In seguito si potrà notare come essa modifichi il valore di differenza di potenziale ai capi del modello, al variare della corrente di attraversamento, di una quantità pressoché costante.

Di seguito, facendo riferimento alla Fig. 3.6, è illustrata la definizione di carichi e vincoli sui gradi di libertà che si è effettuata:

- è stato imposto un vincolo di temperatura pari a 25 °C sulle superfici interne raffreddate dei puntali di alimentazione della cella;
- è stata imposta la corrente entrante desiderata ai nodi della sezione trasversale di ingresso di uno dei puntali di alimentazione della sorgente imponendo sulla sezione trasversale di ingresso del secondo puntale un vincolo di potenziale nullo;
- per il calcolo del calore scambiato per irraggiamento tra tutte le superfici (eccetto quelle dei componenti in rame, che essendo raffreddati sono a bassa temperatura) e l'ambiente circostante (caratterizzato da una temperatura uniforme pari a 25°C) è stata creata una unica *enclosure*;

Per quanto riguarda l'applicazione dei carichi elettrici, essendo necessario determinare la temperatura della cella in corrispondenza di diversi valori di corrente di alimentazione, si è definito il carico come un vettore funzione del tempo tramite il comando APDL seguente:

```
*DIM,I_LINE,TABLE,19,1,1,TIME
```

Tale vettore è definito assegnando, in corrispondenza di un certo intervallo di tempo, il valore di corrente desiderato, andando così a definire dei *substeps* la cui durata deve essere sufficientemente lunga al fine di ottenere la soluzione a regime per ogni livello di corrente imposto (Fig. 3.5). Il tempo totale di analisi è dunque definito come il prodotto delle variazioni di corrente per la durata dei singoli *substep*.

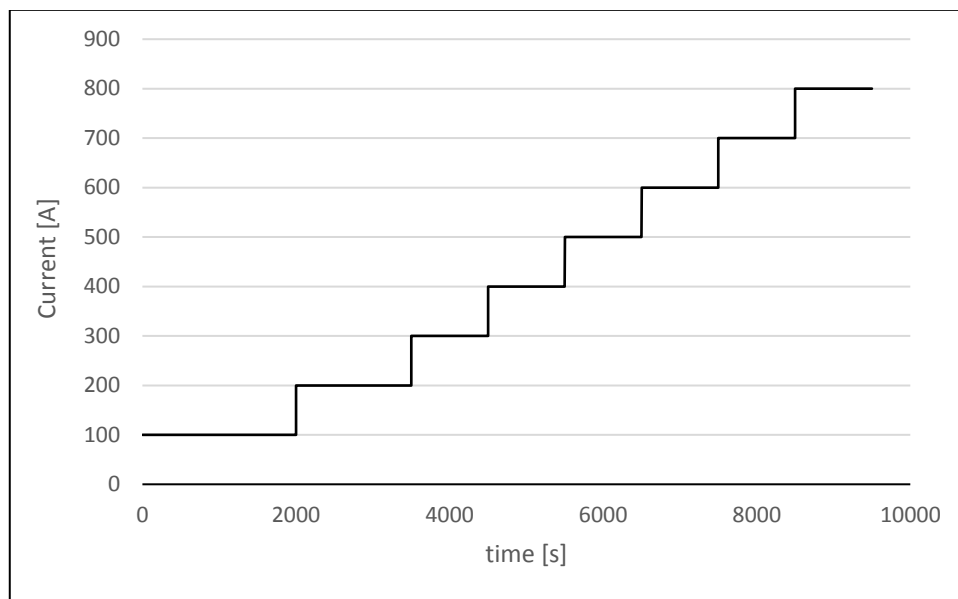


Fig. 3.5 Rampa di carico

L'analisi di convergenza della *mesh*, ovvero lo studio dell'influenza della dimensione degli elementi sul risultato finale in termini di temperatura, non è stata affrontata poichè già oggetto di precedenti lavori di tesi [17].

In Fig. 3.6 è rappresentato il modello FEM.

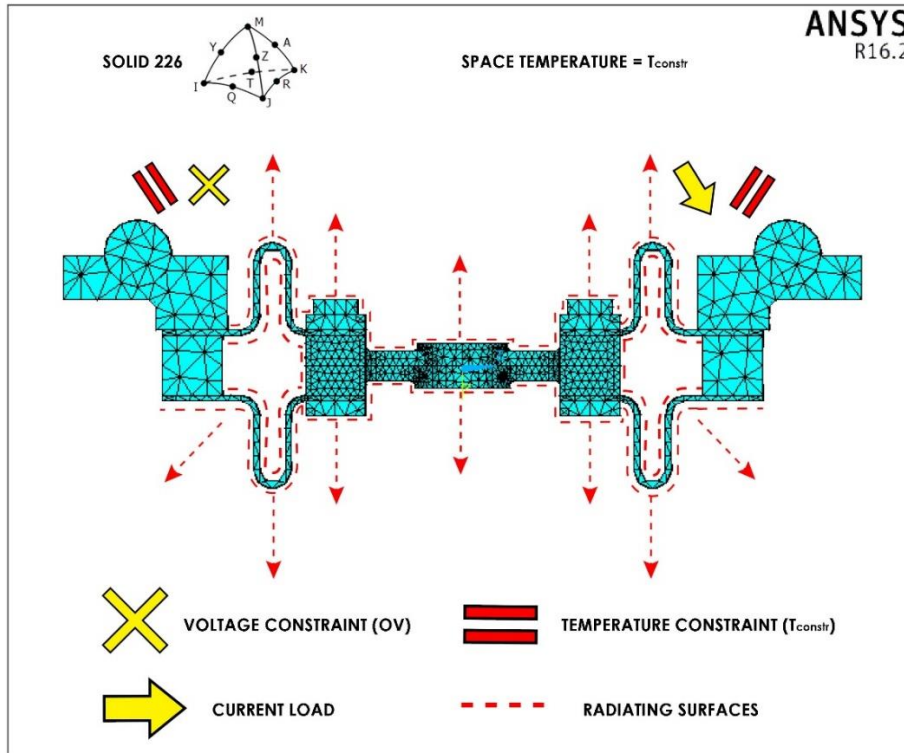
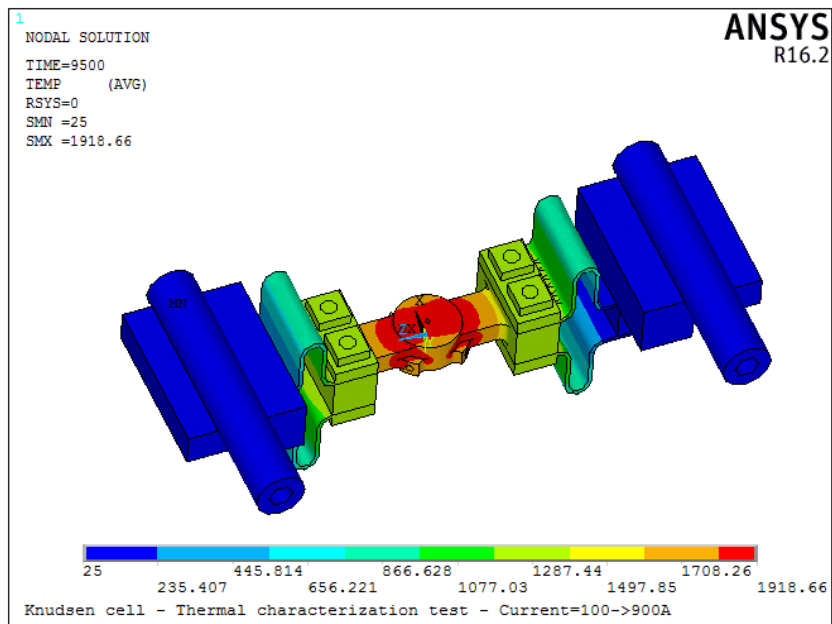


Fig. 3.6 Rappresentazione del modello FEM

Risultati numerici

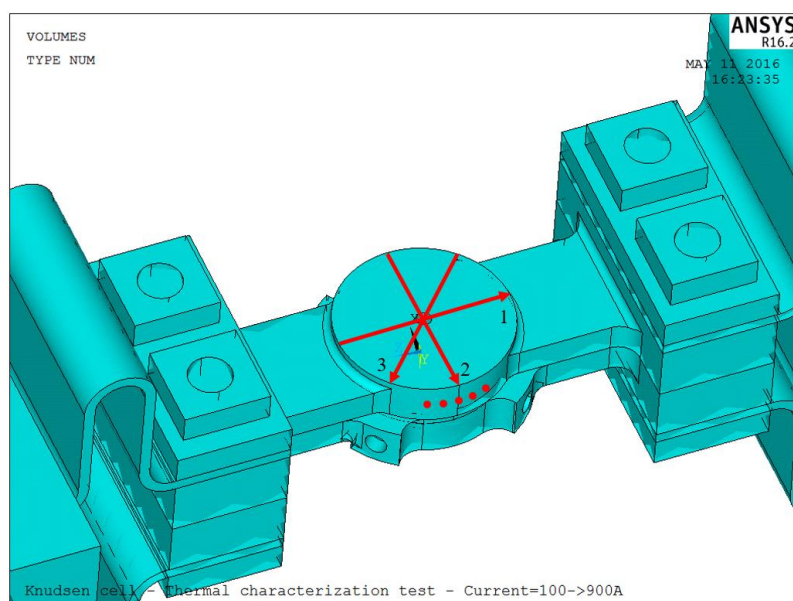
In Fig. 3.7 è mostrato il risultato qualitativo dell'analisi FE per una corrente di alimentazione pari ad 800 A.



**Fig. 3.7** Rappresentazione della temperatura raggiunta dalla cella di Knudsen per una corrente di alimentazione pari a 800 A. Le temperature sono espresse in gradi centigradi

Uno dei principali vincoli progettuali è dato dalla necessità di avere una temperatura delle pareti interne della cella il più uniforme possibile. Data l'impossibilità di effettuare una misura diretta di tali temperature si farà riferimento a quelle in corrispondenza delle superfici esterne della cella stessa, valutabili quantitativamente. Si suppone dunque che, una volta validato il modello FE sulla superficie esterna, i risultati numerici riguardanti la superficie interna siano rappresentativi del reale stato termico all'interno della cella di Knudsen.

A tal fine si è dunque diagrammato in ANSYS® l'andamento delle temperature lungo le *path* evidenziate in Fig. 3.8, scelte a seguito di una valutazione della visibilità garantita delle viewport installate sulla camera di prova, che sarà descritta dettagliatamente nel prossimo paragrafo.



**Fig. 3.8** Rappresentazione delle path scelte



I risultati numerici di distribuzione di temperatura lungo le path evidenziate e di differenza di potenziale in corrispondenza delle sezioni trasversali di ingresso dei puntali sono evidenziate in Fig. 3.9, Fig. 3.10, Fig. 3.11, Fig. 3.12,

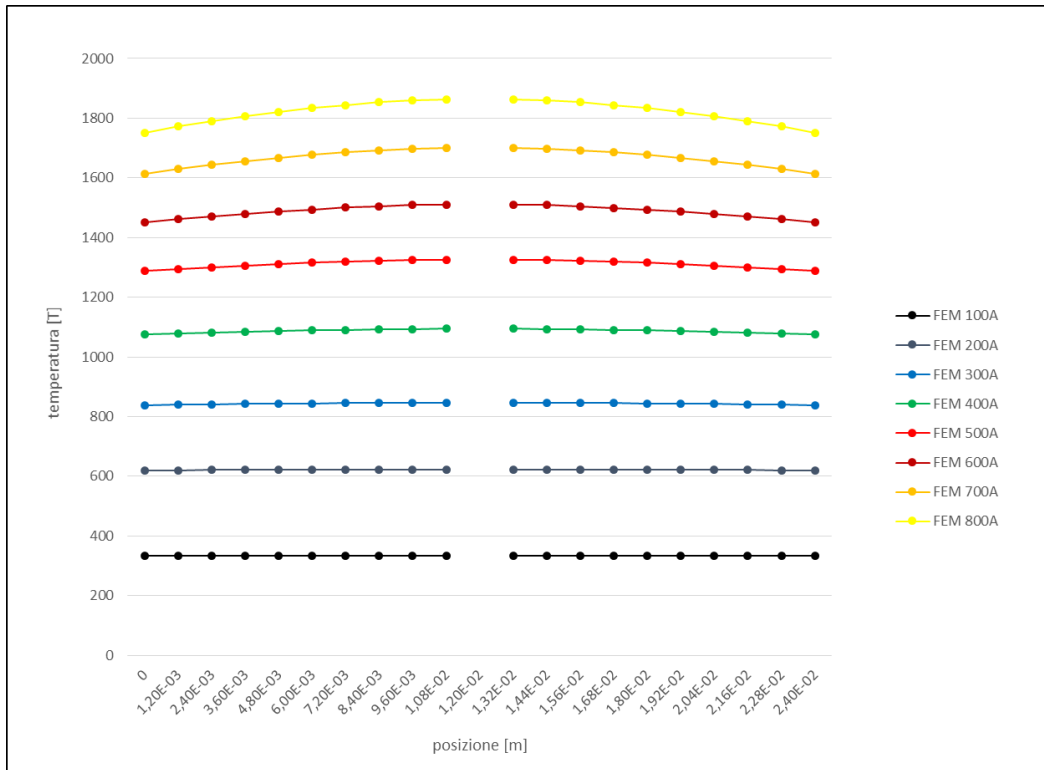


Fig. 3.9 Risultati numerici di temperatura lungo la PATH 1

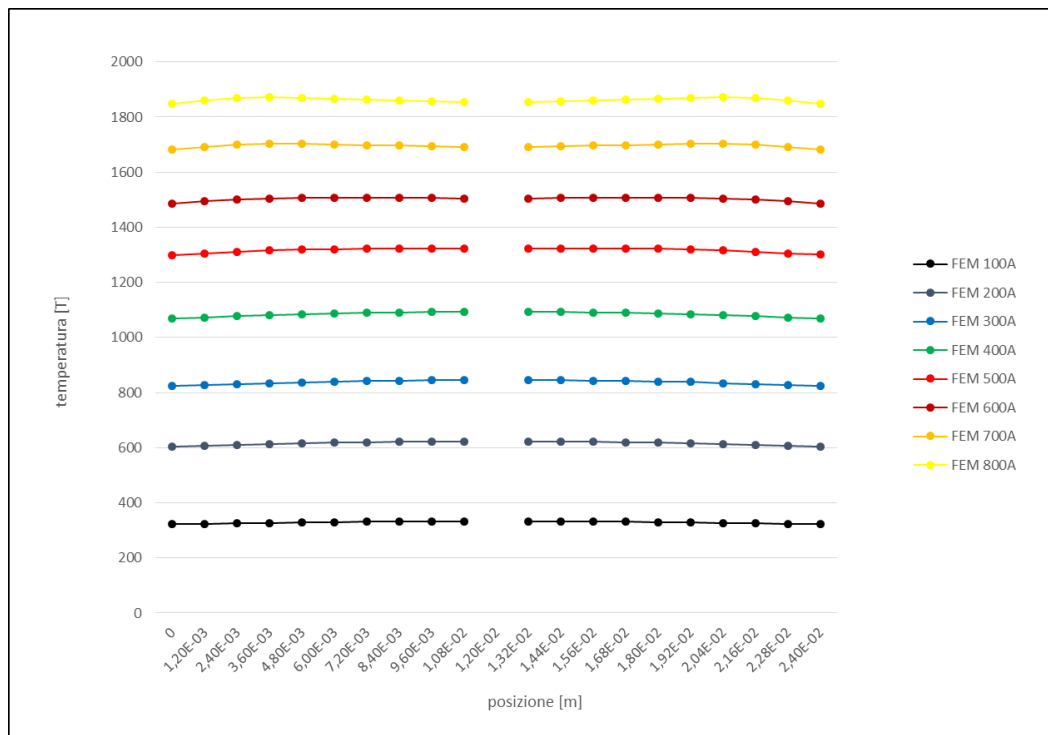


Fig. 3.10 Risultati numerici di temperatura lungo la PATH 2

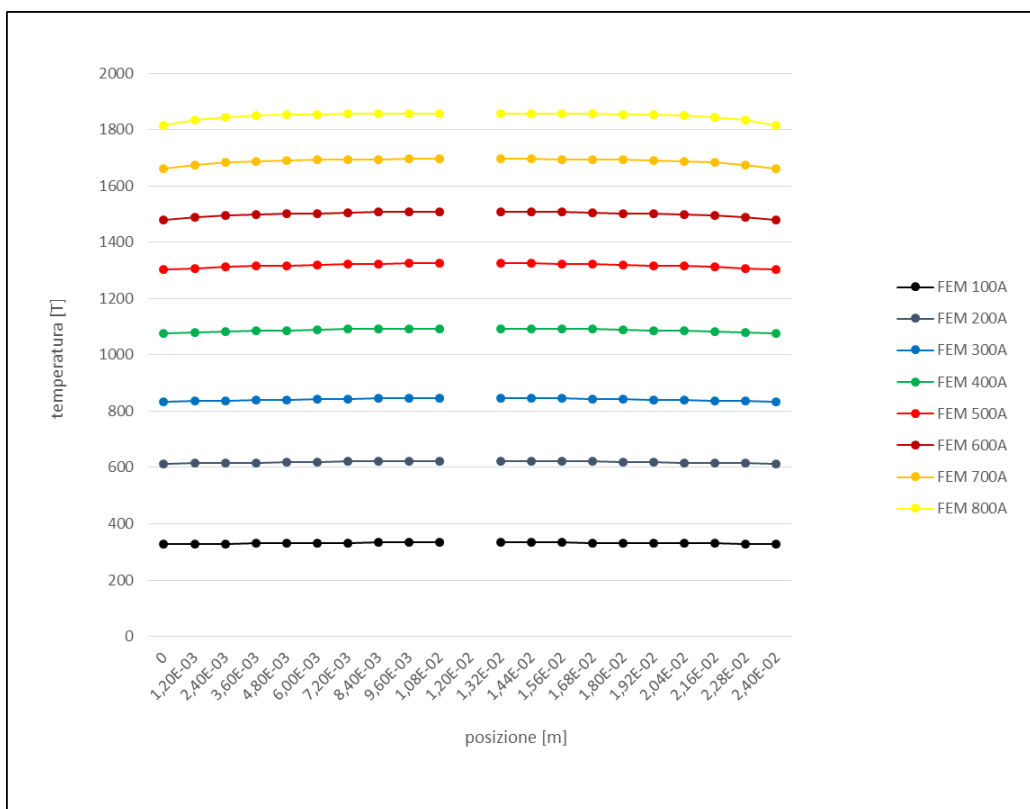


Fig. 3.11 Risultati numerici di temperatura lungo la PATH 3

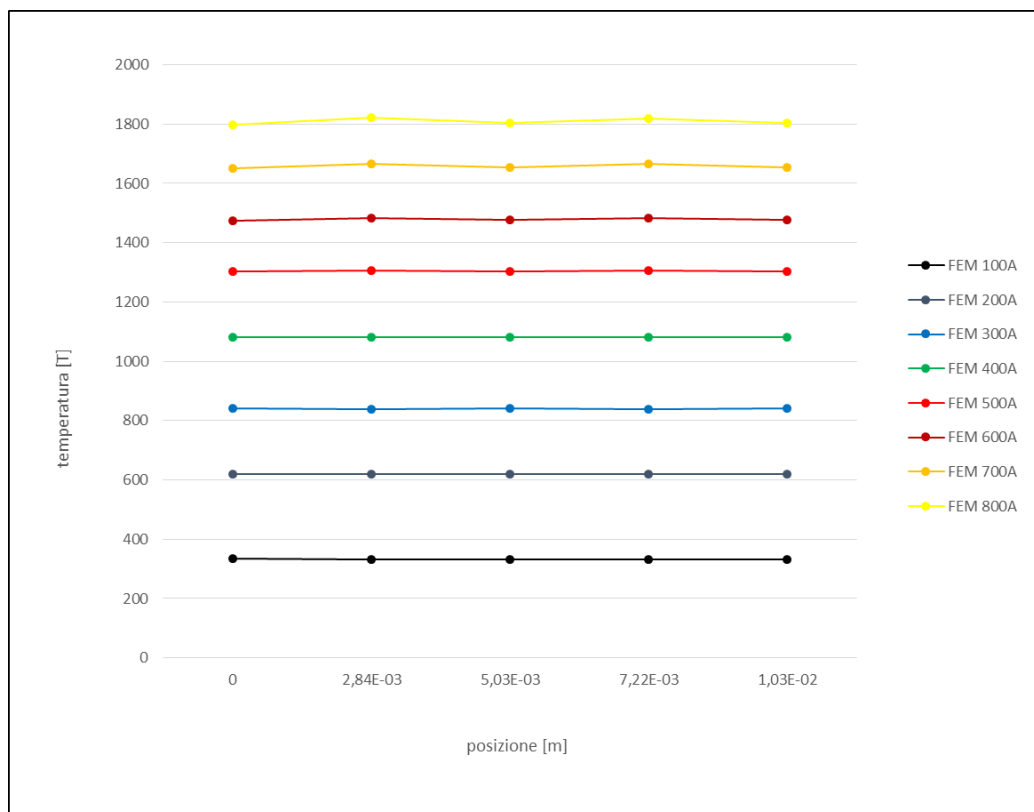


Fig. 3.12 Risultati numerici di temperatura lungo la PATH 4

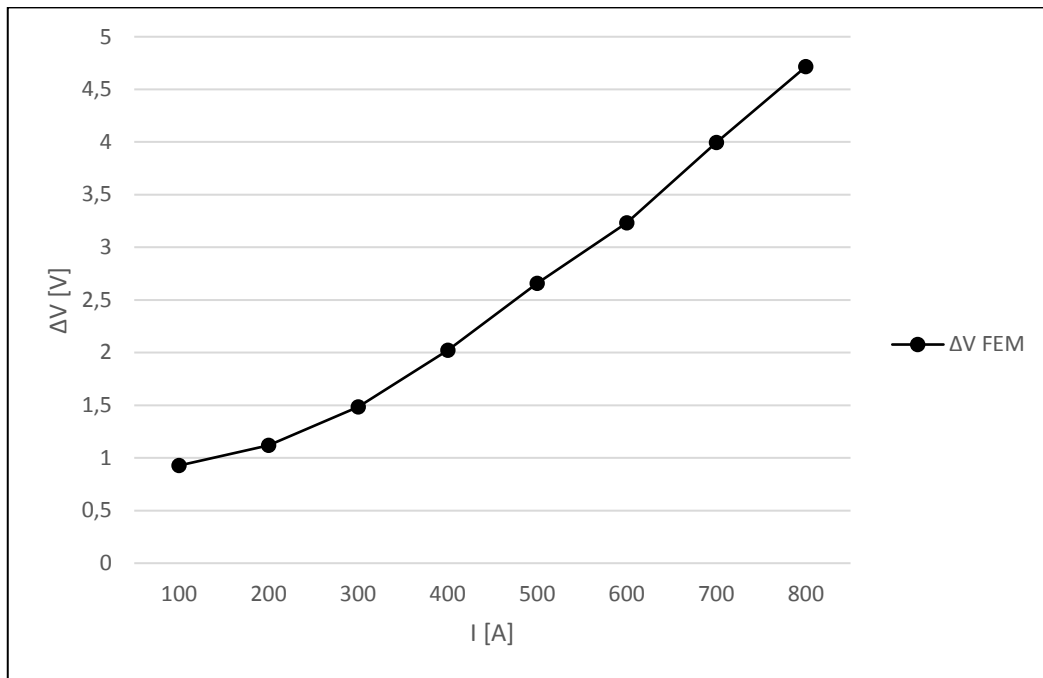
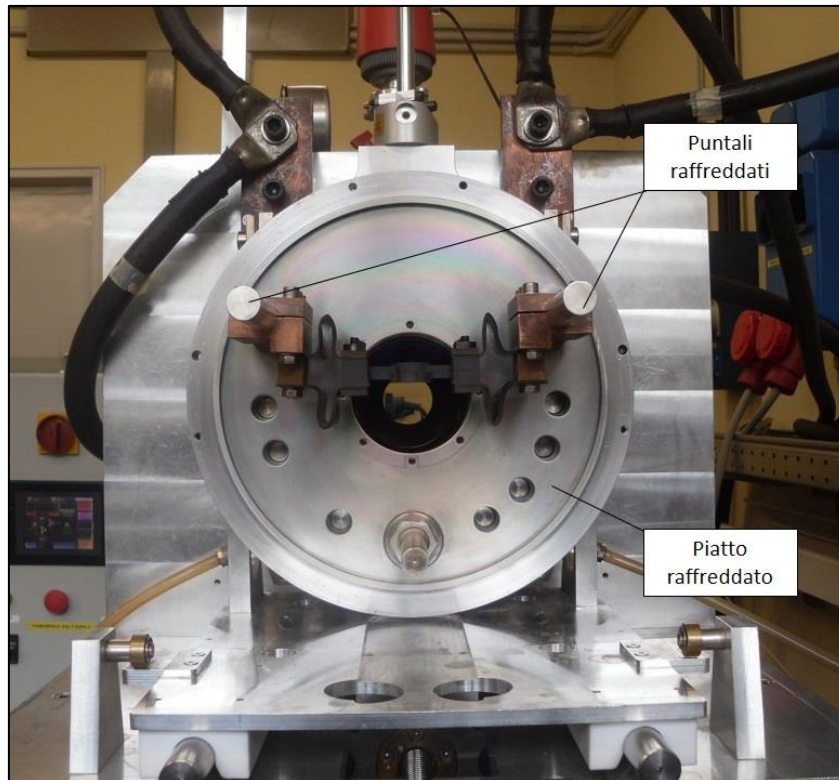


Fig. 3.13 Risultati numerici di potenziale ai puntali di alimentazione

Dai grafici analizzati si può notare come la temperatura calcolata numericamente risulti essere molto uniforme alle basse temperature, presentando delle curve quasi rettilinee, mentre all'aumentare delle temperature vi si ha una tendenza alla divergenza, presentando delle curve dotate di una sempre maggiore concavità verso il basso.

### 3.4 - Test sperimentali

Per eseguire i test sperimentali si è utilizzato un apposito impianto dedicato alle prove ad alta temperatura. La cella di Knudsen è agganciata tramite due morsetti in rame a due puntali (anch'essi in rame) internamente raffreddati ad acqua, ed è posta ad una opportuna distanza dal piatto della camera al fine di garantire una buona visibilità dalla viewport della transizione per effettuare le misure (Fig. 3.14). Alla transizione è poi affiancato il tappo della camera, dotato di canaline di raffreddamento. Il sistema è poi mantenuto in vuoto grazie ad una pompa rotativa e ad una pompa turbomolecolare raffreddata tramite una ventola, che consentono di arrivare a valori nell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar, mentre un alimentatore dedicato ( $P_{\max} = 10$  KV,  $I_{\max} = 1000$  A,  $\Delta V_{\max} = 10$  V) fornisce la potenza elettrica necessaria al riscaldamento per effetto joule della cella. Il controllo ed il monitoraggio di tutto l'apparato sono affidati infine ad un PLC dotato di uno schermo touch screen.



**Fig. 3.14** Cella di Knudsen assemblata all'interno della camera per prove ad alte temperature

Per misurare la temperatura si sono utilizzati diversi strumenti, in funzione del loro campo di utilizzo. Per effettuare misure nel range da 600°C a 1000°C si sono adoperati due pirometri a infrarossi per basse temperature (aventi portata minima pari a 600°C e portata massima di 1200°C), mentre per temperature superiori si sono impiegati due pirometri ad infrarossi per alte temperature, il cui intervallo di utilizzo va dai 1000°C ai 3000°C. I pirometri sono stati posizionati in corrispondenza delle *viewport* in Kodial®, un particolare tipo di vetro trasparente alle radiazioni infrarosse e nel campo del visibile, e si è proceduto andando a rilevare la temperatura sulla superficie della cella in diversi punti, seguendo le path definite precedentemente. L'apparato sperimentale è rappresentato in Fig. 3.15 mentre i punti di misura sono evidenziati in Fig. 3.16.

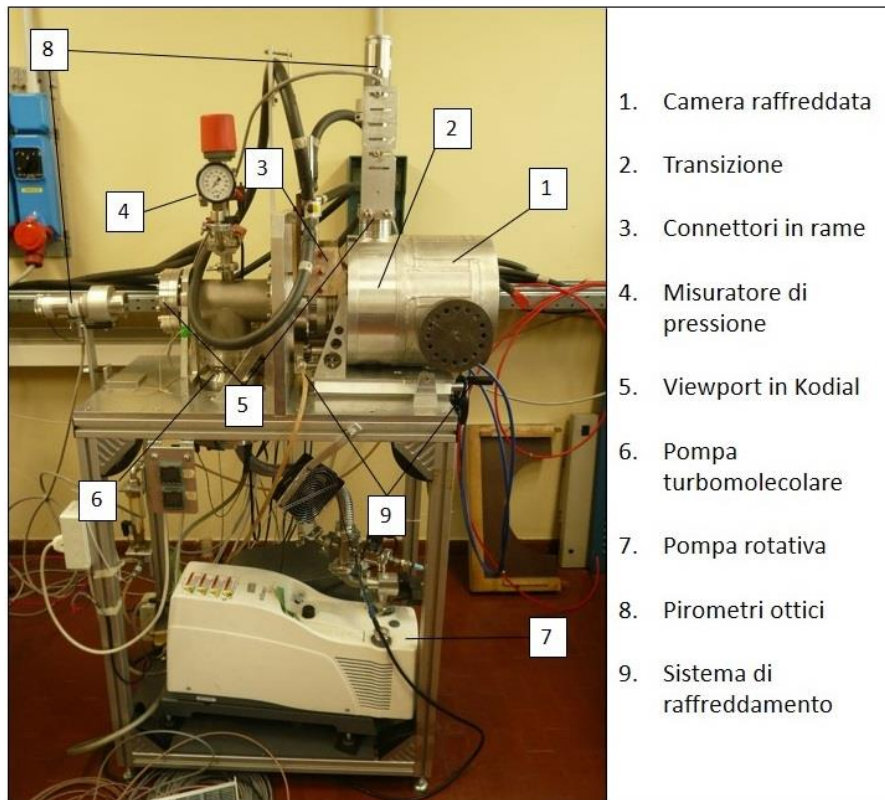


Fig. 3.15 Apparato sperimentale

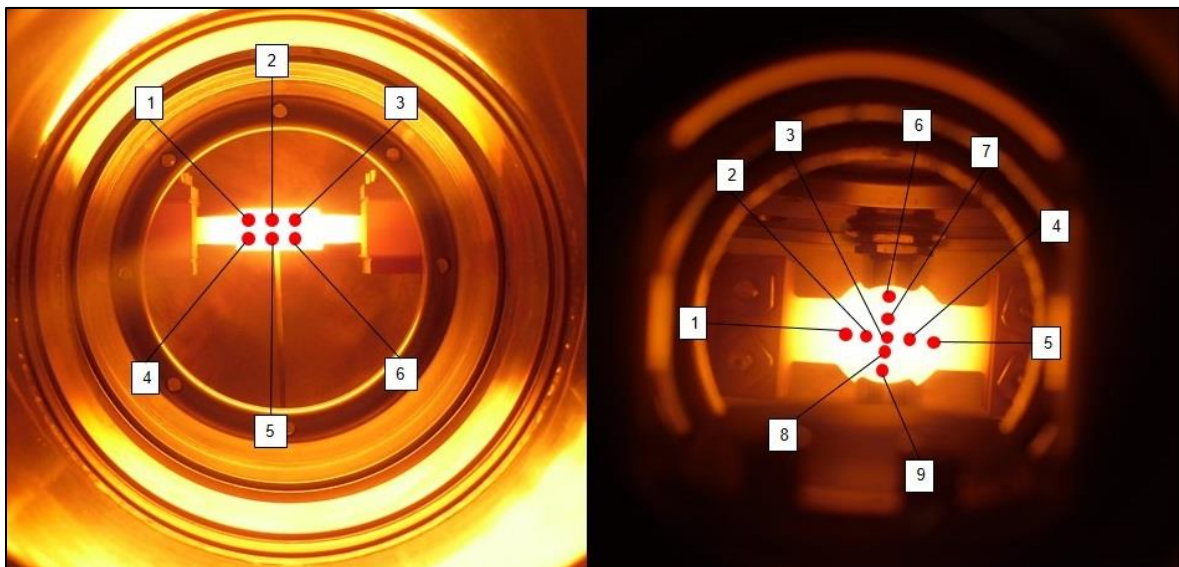


Fig. 3.16 Punti di rilevazione sperimentale

Nel caso di temperature al di sotto dei 600°C, non potendo utilizzare i pirometri per basse temperature, la rilevazione dei dati sperimentali è avvenuta per mezzo di una termocamera IRISYS 4030 che, rilevando le radiazioni nel campo dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico, compie misure correlate con l'emissione di queste radiazioni. E' stato pertanto necessario sostituire la finestra in Kodial® con una finestra in seleniuro di zinco (ZnSe), un materiale dotato di una grande ampiezza di trasmissione (da 0.6  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$ ) avente un basso assorbimento a lunghezze d'onda infrarosse. La finestra in ZnSe utilizzata ha uno spessore di 5mm e la sua trasmissività è pari a circa 0.73 (Fig. 3.17). Il software della termocamera richiede di impostare la temperatura dell'ambiente in cui si trova l'oggetto considerato (si

è impostata a 25°C) e di inserire un valore di emissività, che sarà dunque dato dal prodotto dell'emissività della grafite (0.8A) per il valore di trasmittività della finestra in seleniuro di zinco.

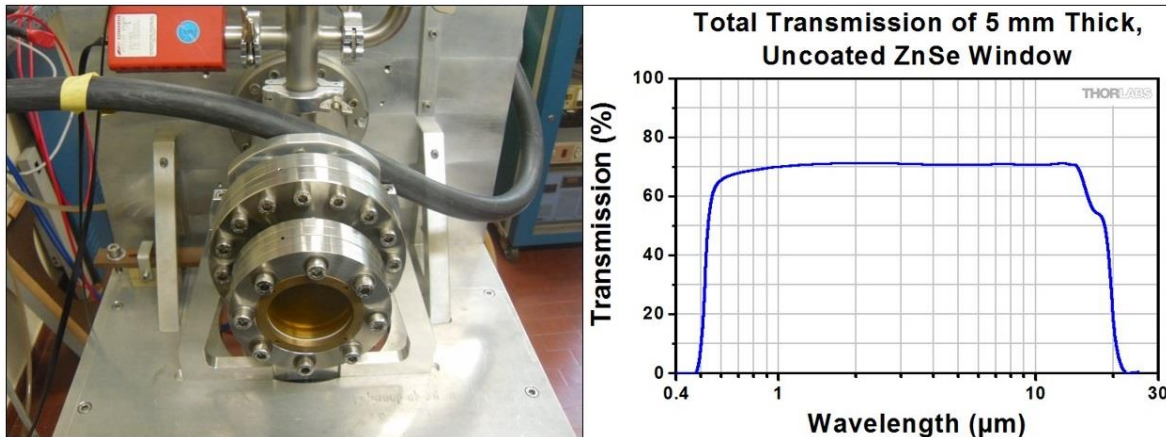


Fig. 3.17 Viewport in ZnSe e valori di trasmittività

La termocamera IRISYS 4030 ha un campo di utilizzo che va dai -20°C ai 250°C, ma nella modalità *High Temp* può effettuare misure nel range tra 200°C e 900°C grazie all'utilizzo di un apposito filtro. Le immagini acquisite dalla termocamera vengono poi analizzate tramite un software proprietario per pc, che consente tramite dei cursori di andare a conoscere la temperatura nei punti di interesse (Fig. 3.18).

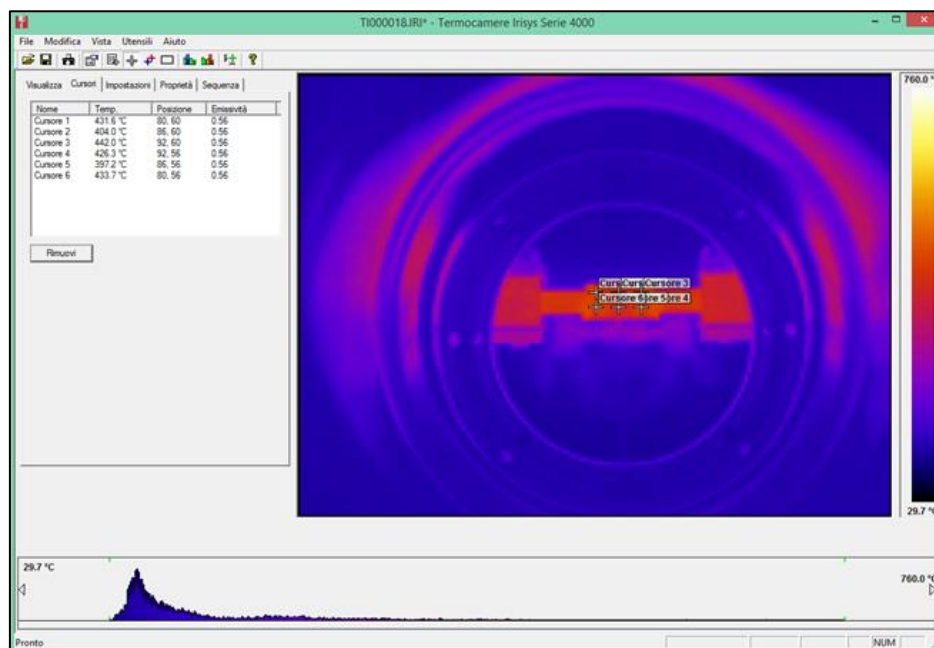


Fig. 3.18 Immagine acquisita dalla termocamera analizzata tramite il software proprietario per pc

Per quanto riguarda le misure di caduta di potenziale si è utilizzato un multimetro digitale, andando a rilevare la differenza di potenziale tra i connettori di alimentazione in rame. Vengono in questo modo considerati anche dei tratti di circuito non implementati nel modello FE che, tuttavia, avendo sezioni di passaggio ampie rispetto a quelle della cella di Knudsen, si ritiene siano associati ad un aumento di caduta di potenziale trascurabile.

Con i pirometri sono state effettuate 3 acquisizioni per punto di misura a partire da 300 A fino a 800 A ogni 100 A, andando ad effettuare due cicli di riscaldamento e due di raffreddamento e raccogliendo dati per le due fasi di salita e per una sola fase di discesa della corrente. Sia per quanto riguarda il riscaldamento che per il raffreddamento si è proceduto andando rispettivamente a somministrare e togliere 20

A al minuto, stazionando poi al valore di corrente in corrispondenza del quale effettuare la misurazione per 10 minuti.

La stessa procedura è stata seguita anche per le acquisizioni sperimentali effettuate con la termocamera, variando la corrente di 5 A ogni 30 secondi, andando in questo modo a rilevare la temperatura per i seguenti valori di corrente: 10 A, 20 A, 30 A, 40 A, 50 A, 60 A, 70 A, 80 A, 90 A, 100 A, 125 A, 150 A, 175 A, 200 A, 250 A, 300 A.

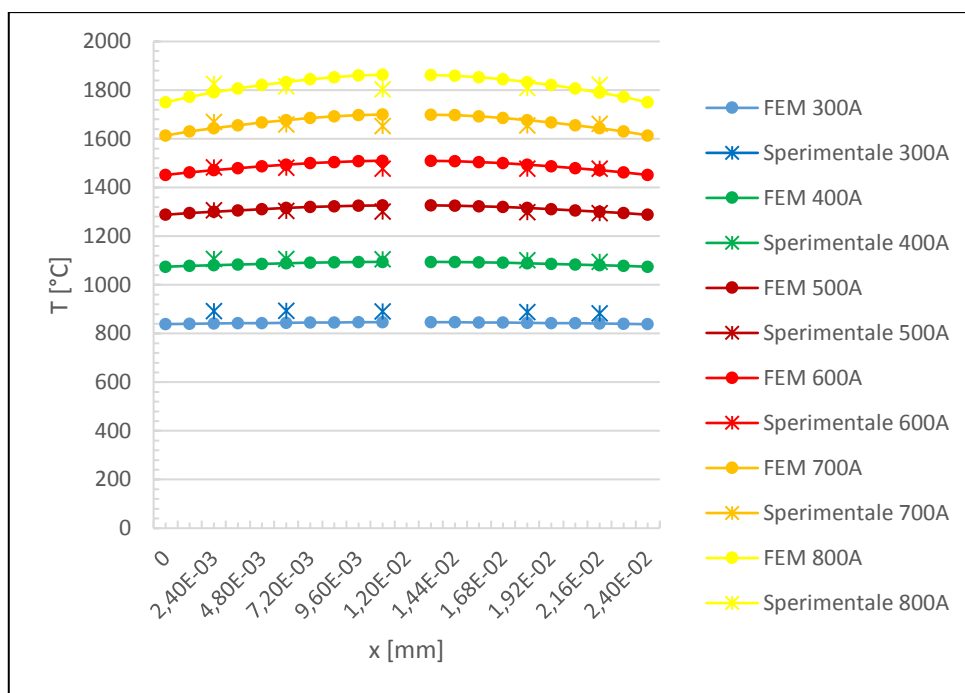
I dati ottenuti sono esposti e discussi nel paragrafo successivo.

### 3.5 - Confronto tra risultati numerici e sperimentali

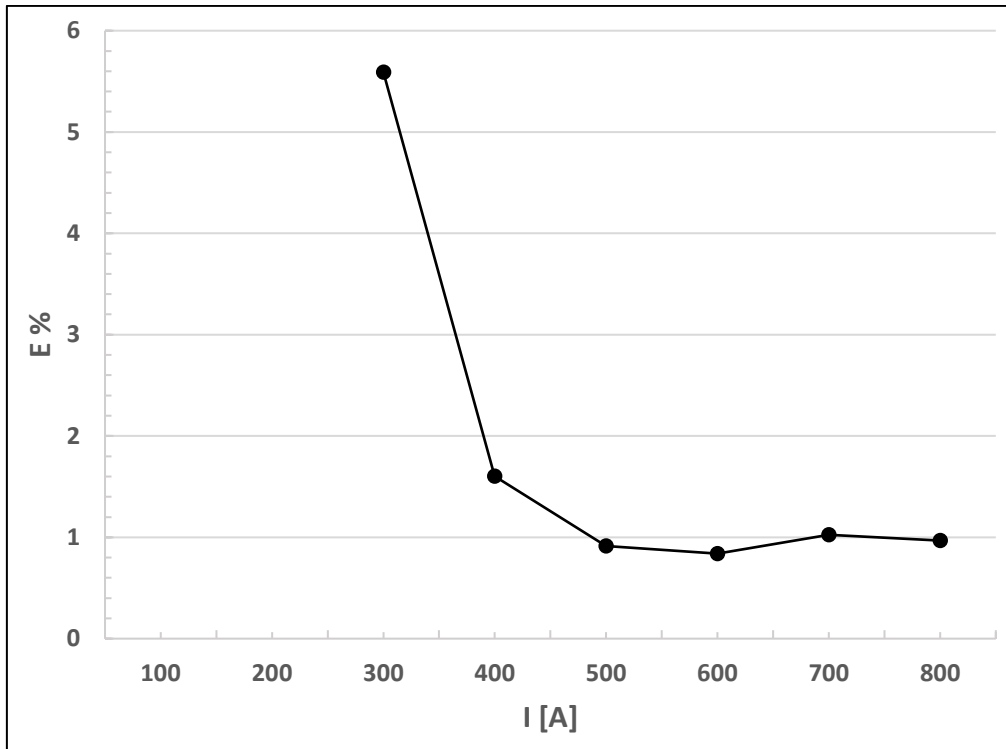
In Fig. 3.19 è illustrato il confronto tra risultati numerici e sperimentali della distribuzione di temperatura lungo la prima path. I dati ottenuti si possono ritenere congruenti, avendo un errore massimo in termini percentuali pari al 5.7% in corrispondenza del punto di misurazione 1 (con riferimento alla Fig. 3.16) per una corrente di alimentazione di 300 A, come si può osservare dalla Fig. 3.20.

La Fig. 3.21 mostra invece il confronto tra valori numerici e valori sperimentali ottenuti lungo la seconda path scelta. Anche in questo caso si ha un'ottima congruenza dei valori e, facendo riferimento alla Fig. 3.22, l'errore massimo percentuale è pari al 6,43% e si ha nel punto di misurazione 6 (rif. Fig. 3.16) sempre per un valore di corrente pari a 300 A.

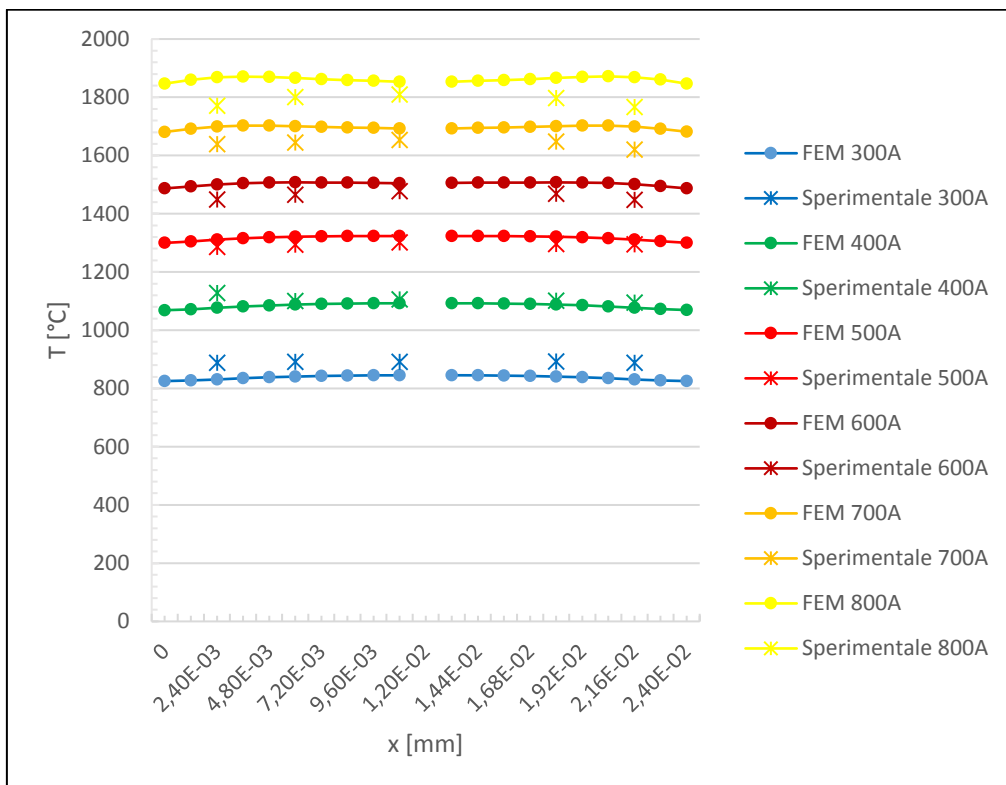
Infine la Fig. 3.23 confronta i valori ottenuti dal codice di calcolo e quelli misurati sperimentalmente lungo la path numero 4. Si ha sempre ottima congruenza tra i valori sebbene in questo caso il massimo errore percentuale risulti essere del 12.5% per 100 A di corrente (Fig. 3.24), dunque circa doppio a quelli precedentemente trovati.



**Fig. 3.19** Confronto tra le distribuzioni di temperatura ottenute numericamente e sperimentalmente lungo la PATH 1



**Fig. 3.20** Errore percentuale tra le temperature ottenute numericamente e sperimentalmente lungo la PATH 1



**Fig. 3.21** Confronto tra le distribuzioni di temperatura ottenute numericamente e sperimentalmente lungo la PATH 2



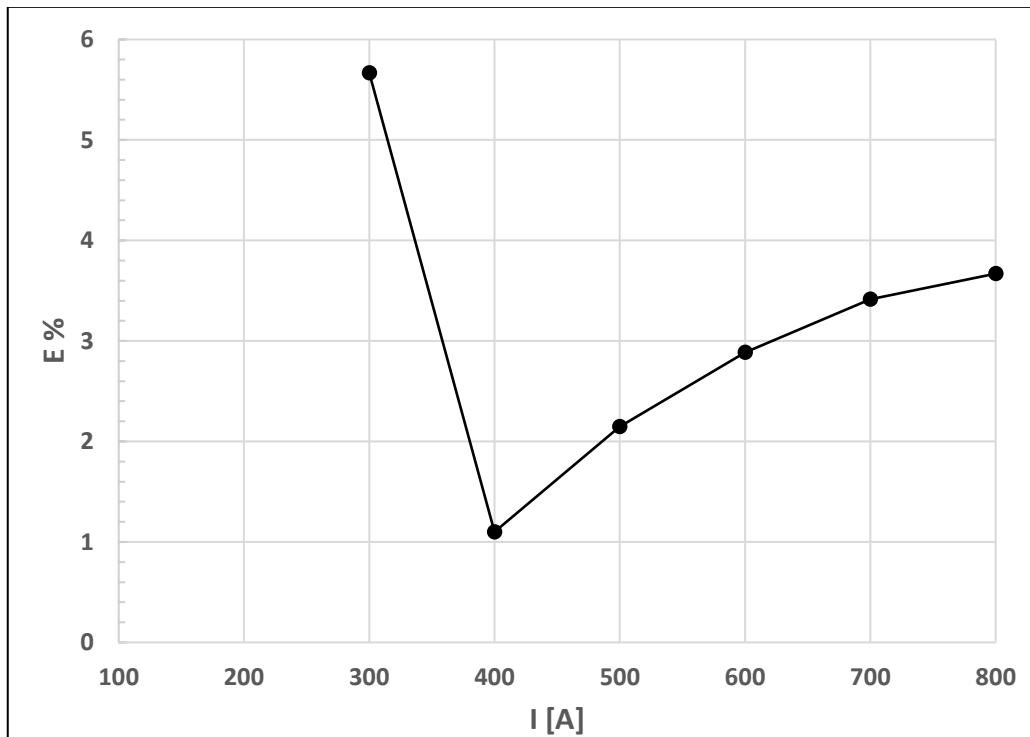


Fig. 3.22 Errore percentuale tra le temperature ottenute numericamente e sperimentalmente lungo la PATH 2

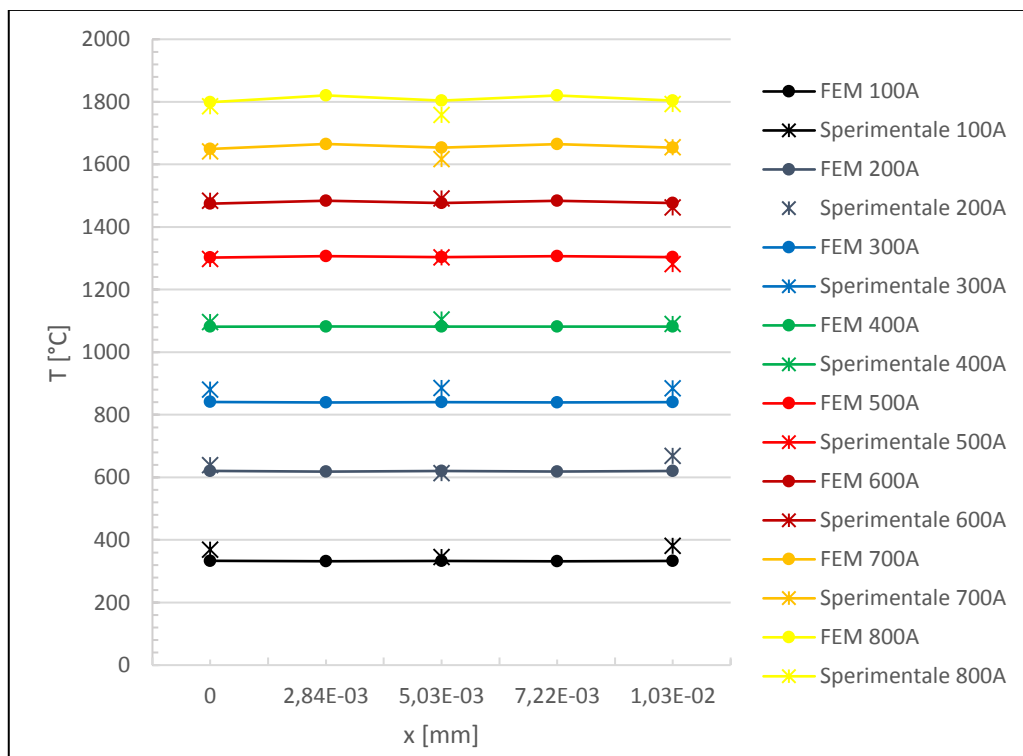
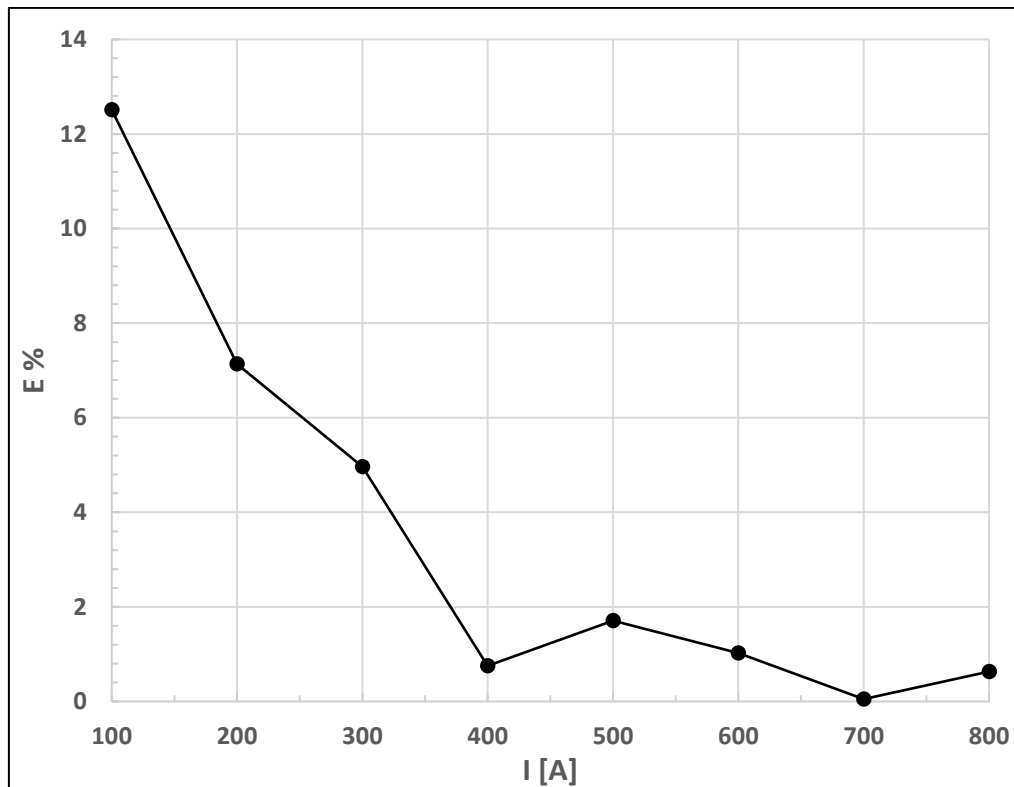


Fig. 3.23 Confronto tra le distribuzioni di temperatura ottenute numericamente e sperimentalmente lungo la PATH 4



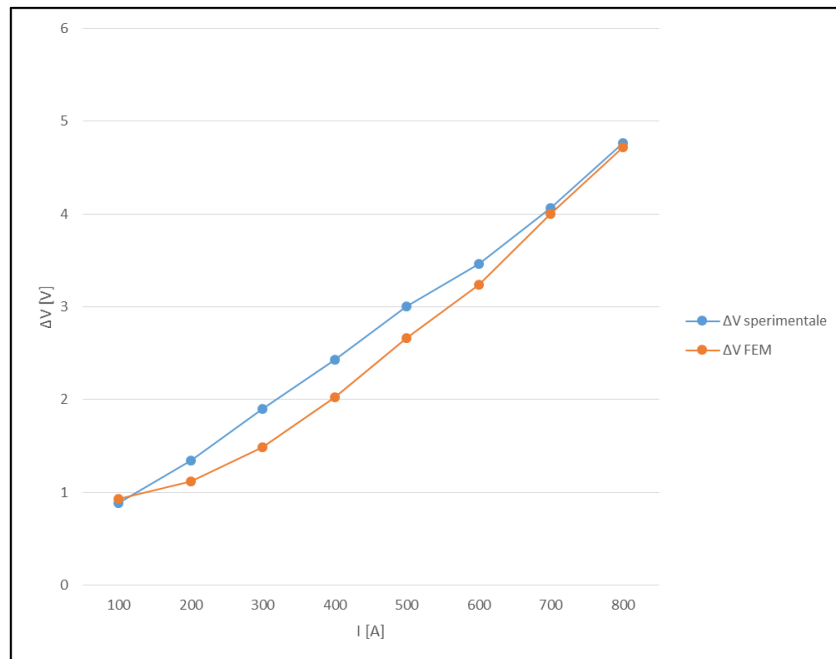
**Fig. 3.24** Errore percentuale tra le temperature ottenute numericamente e sperimentalmente lungo la PATH 4

Osservando attentamente i grafici di confronto tra le distribuzioni di temperatura ottenute lungo le varie path, si può notare come la temperatura calcolata numericamente risulti essere molto uniforme alle basse temperature, presentando delle curve quasi rettilinee, mentre all'aumentare delle temperature vi si una tendenza alla divergenza, ottenendo infatti delle curve dotate di una sempre maggiore concavità verso il basso.

Analogamente, l'andamento delle temperature misurate sperimentalmente è molto uniforme alle basse temperature presentando una sempre maggiore divergenza al loro aumentare. La concavità di tali curve è però rivolta verso l'alto.

I valori misurati con il voltmetro e quelli ottenuti numericamente sono invece messi a confronto nel grafico in Fig. 3.25.

La differenza di valori ottenuta può essere spiegata principalmente in due modi. Innanzitutto la misurazione mediante voltmetro non è avvenuta direttamente ai capi dai puntali di alimentazione, ma tra i morsetti di alimentazione della camera stessa: il modello non tiene dunque conto di un tratto di circuito elettrico che sicuramente influisce sulla caduta di potenziale. Inoltre, nel modello FE si è considerato perfetto il contatto tra i vari componenti, andando pertanto a trascurare la resistenza elettrica di contatto e quindi la caduta di potenziale ad essa associata.



**Fig. 3.25** Confronto tra la differenza di potenziale ottenuta numericamente ai capi dei puntali di alimentazione della cella di Knudsen e quella misurata sui connettori elettrici esterni alla camera per diversi valori di corrente.

Si può poi notare come la differenza massima tra risultati numerici e sperimentali si abbia in corrispondenza dei valori di corrente più bassi tra quelli considerati, ovvero 100 A e 300A. A tali amperaggi le temperature in gioco sono basse mentre, per valori di corrente superiori, essendo maggiore la temperatura del sistema, si ha una maggiore adesione dei componenti e quindi un migliore contatto tra di essi. Ciò si traduce in una riduzione della resistenza elettrica di contatto e pertanto in un minore errore percentuale tra dati numerici e sperimentali di temperatura.

### 3.6 - Conclusioni

In questo capitolo, mediante analisi numeriche e sperimentali, si è analizzata la distribuzione di temperatura della cella di Knudsen e la differenza di potenziale ai capi dei puntali di alimentazione. Dopo una breve introduzione sulle basi teoriche, si è costruito appositamente un modello geometrico semplificato e, successivamente, si sono effettuate delle analisi FE utilizzando il codice ANSYS®. Per validare sperimentalmente tale modello si sono effettuati dei test sperimentali in un impianto dedicato alle prove termiche ad alte temperature andando a misurare i valori di interesse per diversi valori di corrente (100÷800 A), tramite un voltmetro digitale, una termocamera, un pirometro ad infrarossi per basse temperature ed uno per alte temperature. Infine si sono confrontati i valori numerici ottenuti con quelli sperimentali.

Le misure di temperatura hanno evidenziato un elevato grado di concordanza con i risultati ottenuti numericamente, mostrando un errore massimo percentuale del 12%, mentre, per quanto riguarda le misure di potenziale, l'errore massimo percentuale riscontrato è del 21,8%. Questa differenza nei valori ottenuti è da imputarsi principalmente all'approssimazione effettuata nel modello numerico, nel quale il contatto tra le superfici è stato considerato perfetto.

Il modello numerico si ritiene validato e può essere utilizzato per valutare le condizioni di funzionamento della cella di Knudsen e come base per i suoi sviluppi futuri.



# Capitolo 4

## Progettazione ed ottimizzazione termica della camera Time of Flight

### 4.1 - Introduzione

La tecnologia KEMS (Knudsen Cell Mass Spectrometry), introdotta in precedenza nel CAP.2, si basa sull'accoppiamento tra una cella di Knudsen e uno spettrometro di massa che viene così utilizzato per l'analisi del gas di effusione.

Nel seguente capitolo si affronteranno dunque le scelte progettuali effettuate per poter installare la cella di Knudsen all'interno della camera TOF realizzata ai Laboratori Nazionali di Legnaro.

Verranno quindi illustrate le soluzioni tecniche adottate per quanto riguarda la linea di alimentazione elettrica e verrà descritto il sistema progettato per garantire un corretto posizionamento e centraggio della cella stessa. Sarà poi discussa dettagliatamente la simulazione termica effettuata con il codice di calcolo agli elementi finiti ANSYS® al fine di valutare la resistenza dei materiali scelti in fase di progettazione nelle condizioni più critiche di utilizzo e la necessità di disporre di un sistema di raffreddamento per la camera TOF.

### 4.2 - Progettazione della camera TOF

La camera TOF presente ai LNL è rappresentata in Fig. 2.9. La cella di Knudsen deve essere inserita all'interno della camera a croce, che dunque sarà oggetto di studio approfondito poiché definisce importanti vincoli di progettazione.

La camera croce è dotata di un diametro interno di 245mm, è realizzata in acciaio inossidabile ed è sprovvista di sistema di raffreddamento. Ai quattro lati della camera vi sono, posti alla medesima altezza rispetto al fondo della camera (157,5mm), dei tubi di diametro 97,3mm e lunghezza 115mm ai quali sono poi fissati, tramite 3 flange CF100, delle viewport in Kodial®, che consentono il passaggio dei raggi laser usati per ionizzare gli atomi. Una quarta flangia CF130 collega la camera al tubo di deriva percorso dagli ioni con moto rettilineo uniforme, alla fine del quale è situato il detector (rif. CAP.2).

Al di sotto dei 4 tubi, orientati a 45 gradi rispetto ad essi e posti ad una distanza di 57,5mm dal fondo della camera, vi sono altri due tubi, lunghi 80mm, che terminano con delle flange CF40.

Sul fondo della camera attualmente vi è, infine, un foro di aspirazione di diametro 75mm per una pompa turbomolecolare Adixen ATH300 capace di una portata di 215l/s (He). Tuttavia potrebbe essere necessario in futuro disporre di un diametro maggiore al fine di poter adottare, qualora necessario, una pompa turbomolecolare più potente.

#### 4.2.1 - Scelte costruttive per la linea di potenza elettrica

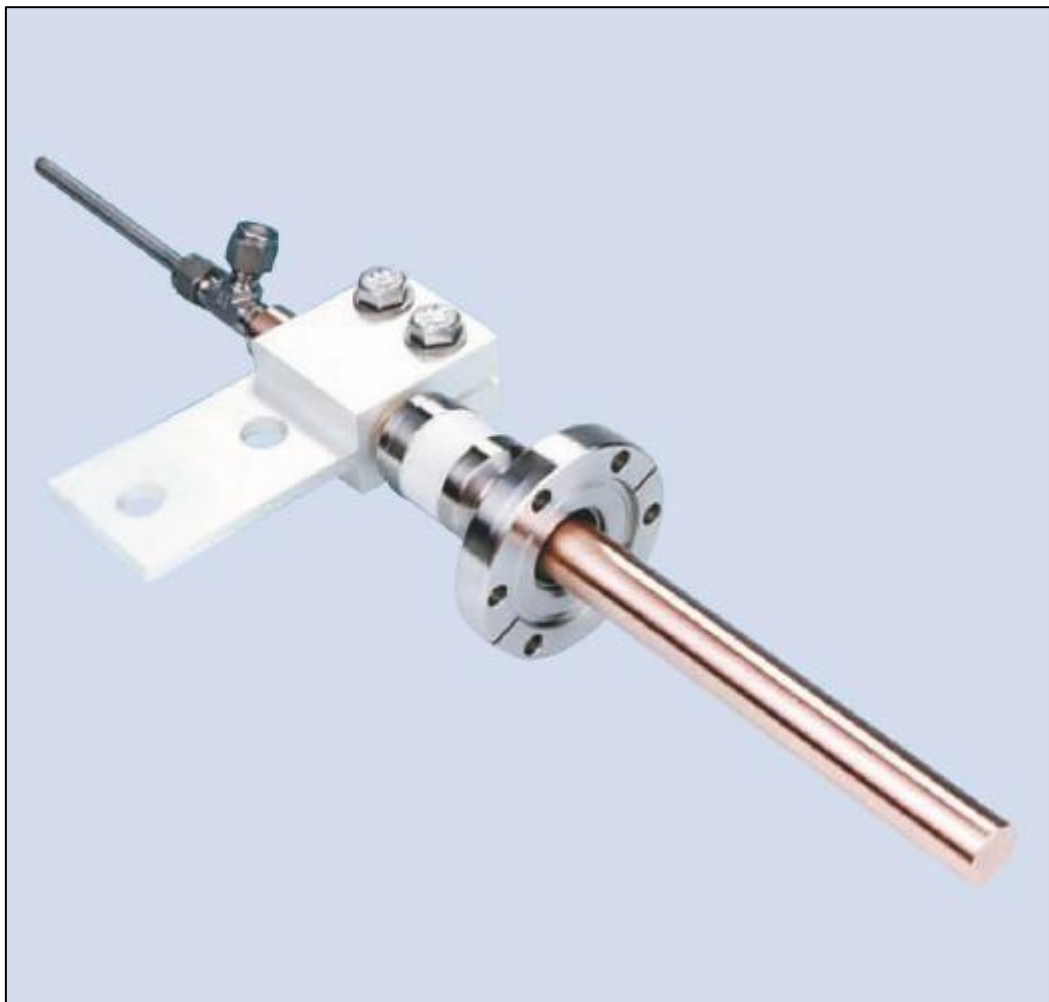
Il sistema di alimentazione della cella di Knudsen deve consentire che essa raggiunga in esercizio i 2000°C. Tale temperatura viene raggiunta, come evidenziato nel capitolo precedente, in corrispondenza di una corrente superiore agli 800 A e una differenza di potenziale pari a 4.76V. I puntali di alimentazione, per supportare queste condizioni di esercizio, dovranno pertanto essere dotati di un sistema di raffreddamento. Molto importante è inoltre il corretto posizionamento di questi connettori: la cella di Knudsen, ad essi agganciata, deve essere posizionata al centro della camera ed alla giusta distanza dalle viewport, attraverso le quali passano i laser ionizzanti.

Si è scelto di sfruttare le due flange CF 40 inclinate a 45 gradi descritte nel precedente paragrafo, essendo posizionate ad un'adeguata distanza rispetto alle viewport e per eliminare eventuali problemi di accessibilità nelle fasi di montaggio e smontaggio del sistema di alimentazione.

La scelta è ricaduta sul modello VHC1000-C40 serie UHV (Fig. 4.1), prodotto dalla MDC Vacuum LLC, dotato di puntali in rame raffreddati internamente ad acqua e di un sistema standard di assemblaggio tramite una flange da vuoto CF 40, realizzate in AISI 304SS, con un campo di utilizzo compreso tra i -100°C e i 450°C.

Tale modello può supportare fino a 3000V in corrente continua, 1000 A di corrente massima, possiede un sistema di isolamento elettrico realizzato in allumina e può essere spinto fino a  $10^{-10}$  mbar.

In Fig. 4.2 è rappresentato il sistema di alimentazione scelto assemblato assieme alla cella di Knudsen all'interno della camera TOF.



**Fig. 4.1** Puntali di alimentazione VHC1000-C40 serie UHV raffreddati ad acqua

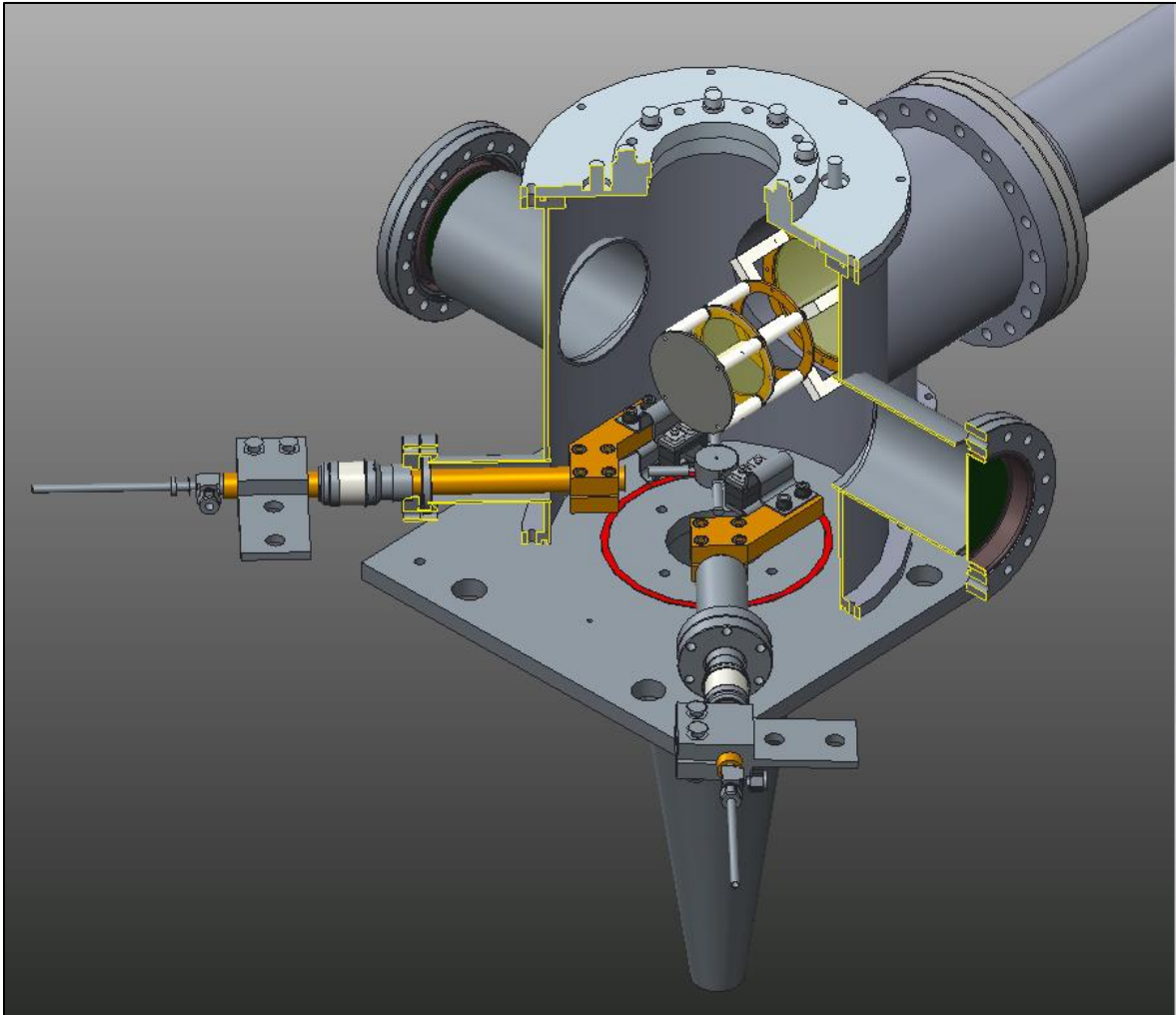


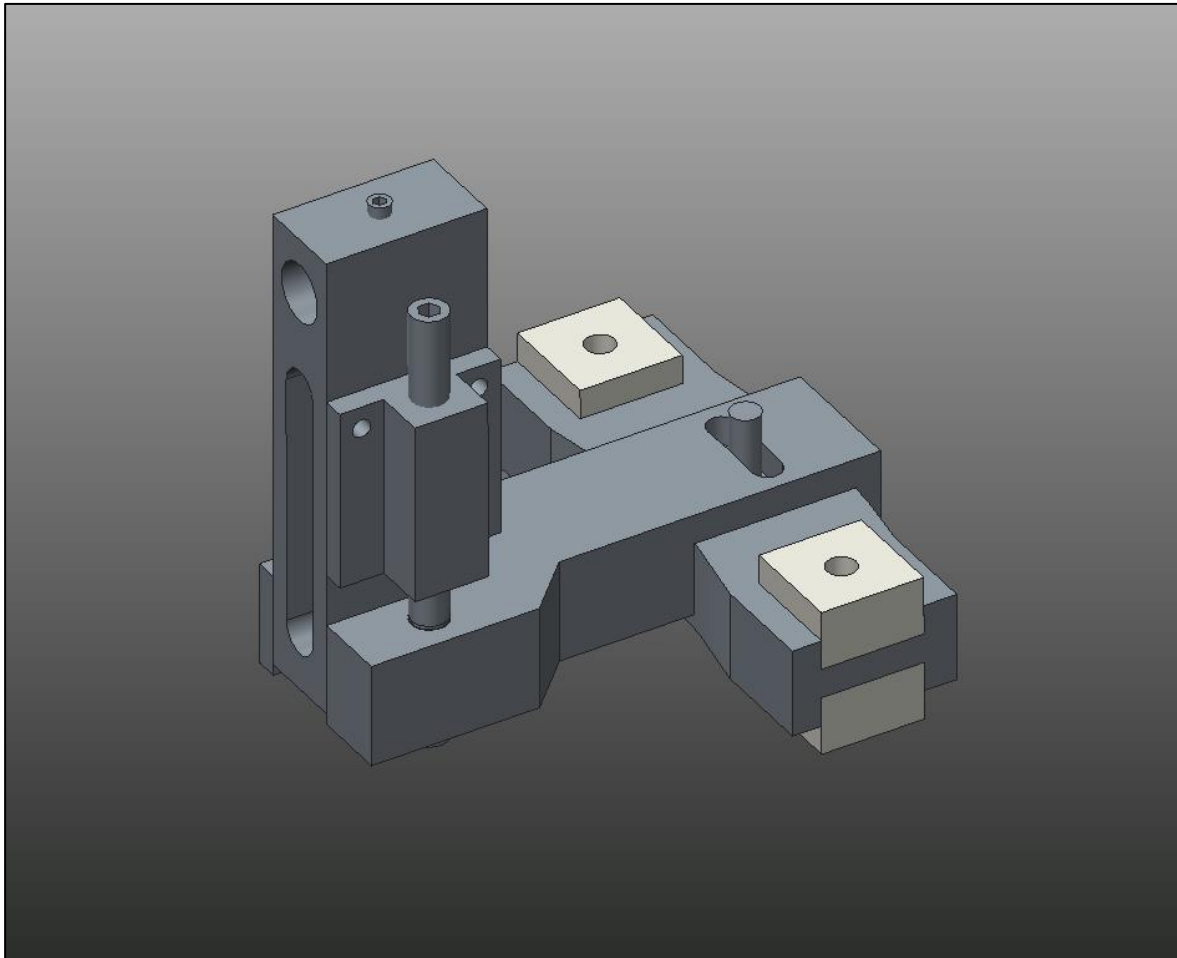
Fig. 4.2 Cella di Knudsen assemblata all'interno della camera TOF

#### 4.2.2 - Scelte costruttive per il sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen

La cella di Knudsen deve poter essere posizionata con precisione all'interno della camera TOF, e durante la fase di esercizio tale posizione deve essere mantenuta: è stato pertanto necessario provvedere alla progettazione di un apposito sistema di supporto.

Tale dispositivo deve essere dotato di 3 gradi di libertà, al fine di garantire una regolazione di posizione in altezza e sul piano di giacenza della cella stessa, e deve essere isolato dalla camera, per ragioni di sicurezza. E' poi fondamentale che il supporto sia in grado di resistere alle condizioni di esercizio più critiche, che si hanno quando la cella in grafite viene portata ad una temperatura di circa 2000°C. Il ridotto spazio disponibile all'interno della camera TOF rende opportuno un *design for assembly*, in modo tale da garantire un'adeguata accessibilità da parte dell'operatore sia in fase di installazione che in fase di regolazione, evitando quindi di dover smontare ogni volta il sistema di alimentazione.

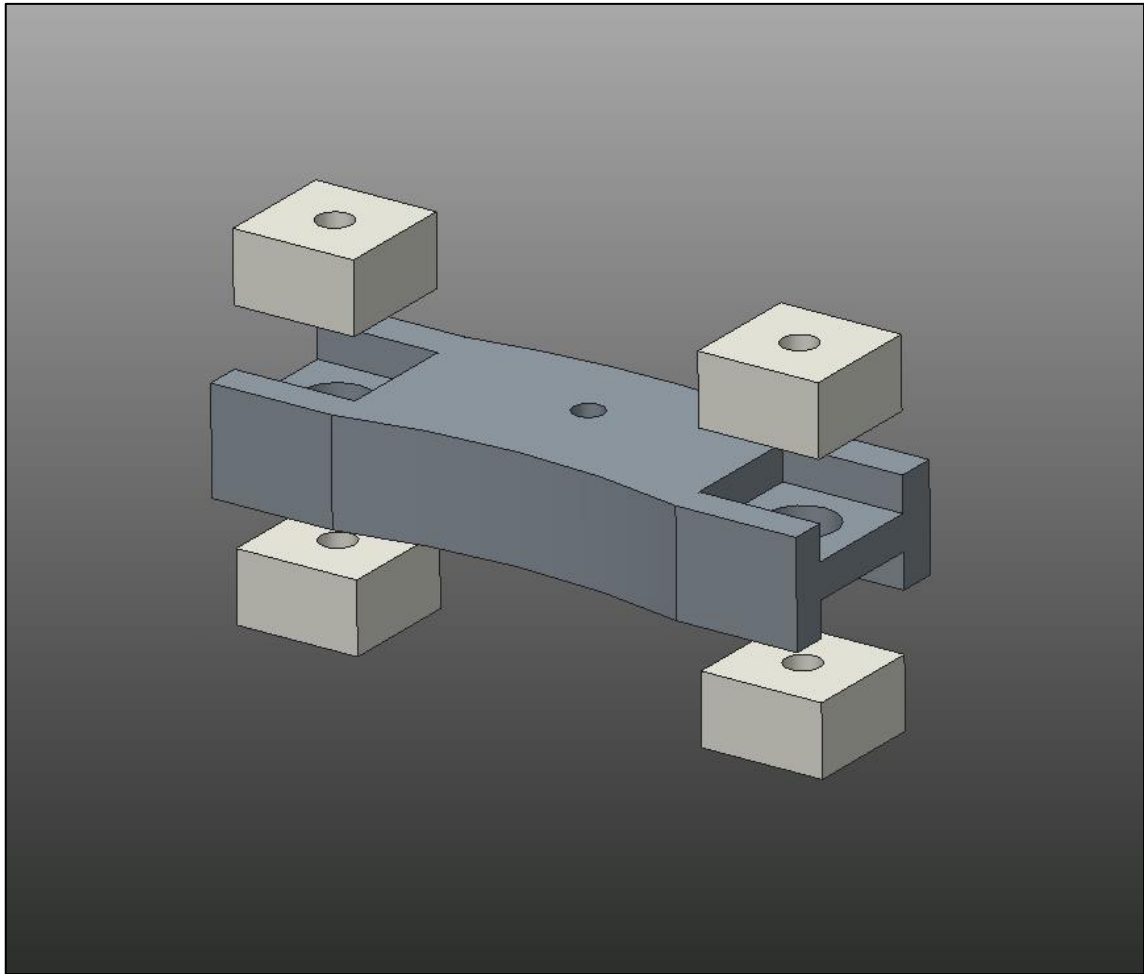
Il sistema di supporto e centraggio progettato sfrutta i puntali in tantalio da 8mm di diametro (Fig. 2.14) descritti precedentemente nel CAP. 2, ed è rappresentato in Fig. 4.3.



**Fig. 4.3** Sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen

Come si può osservare, il supporto ha come base un componente in AISI 316L caratterizzato da una zona centrale curva larga 22mm ed alta 12 mm, con raggio di curvatura pari a 96 mm, dotata al centro di un foro filettato M4, che funge da guida consentendo in questo modo una regolazione in direzione radiale. Agli estremi sono invece presenti 4 alloggi per gli isolatori in Macor, realizzati tramite degli scassi e dotati anche essi di un foro centrale di diametro 8 mm. Gli isolatori sono realizzati in Macor poiché è un materiale ceramico con ottime proprietà di isolamento elettrico e capace di resistere alle alte temperature (può essere usato anche fino ad 800°C), e sono fondamentalmente dei blocchetti quadrati di lato 14 mm e spessore 8 mm con al centro un foro di diametro pari a 4 mm, coassiale a quello in corrispondenza degli alloggi per gli isolatori stessi descritti in precedenza. La differenza fra i diametri fa in modo che le due viti che fissano il supporto alla base della camera TOF siano a contatto esclusivamente con i blocchetti in Macor, garantendo in questo modo l'isolamento elettrico. Il sistema di isolamento è rappresentato più dettagliatamente in Fig. 4.4.





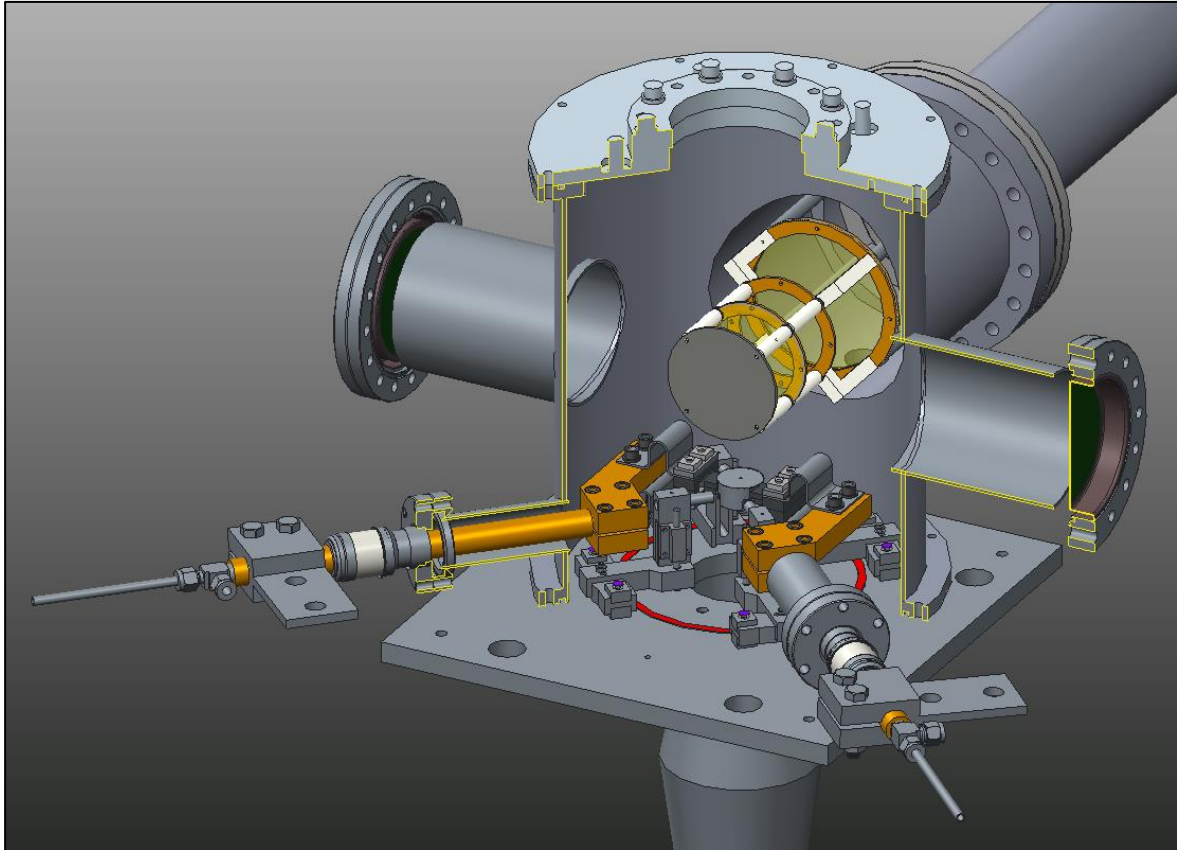
**Fig. 4.4** Dettaglio del sistema di isolamento dei supporti della cella di Knudsen

Si ha poi un componente orizzontale, anch'esso realizzato in AISI 316L, lungo 74 mm ed alto 14 mm, dotato di una apposita scanalatura che segue il profilo guida a sviluppo radiale del componente precedentemente introdotto, e di un'asola, anch'essa a sviluppo radiale, necessaria per consentirne il fissaggio e la regolazione di posizione tramite una vite M4. Questo componente possiede poi a sua volta una guida verticale ed un foro di diametro 5 mm.

Il supporto è poi costituito da un componente verticale in AISI 316L, posizionato nella guida presente nel componente radiale, dotato di un foro di diametro 8 mm nel quale vengono inseriti i puntali in tantalio introdotti nel CAP. 2. Un grano consente poi la regolazione in posizione di questi puntali ed il loro fissaggio, evitando in questo modo di dover filettare il tantalio, che è un'operazione complessa e difficoltosa. Su tale pezzo è stato poi previsto un alleggerimento centrale e lateralmente sono stati introdotti dei fori per il montaggio di un componente ulteriore, sempre in AISI 316L, caratterizzato da un foro filettato M5.

Il sistema di regolazione verticale è realizzato tramite una vite M5 in AISI 316L lunga 60 mm e filettata solo nella parte superiore. L'ultimo tratto, lungo 17 mm, non è filettato e presenta due sedi per anelli seger, opportunamente distanziate, in modo tale da poter garantire un corretto montaggio e mantenimento in posizione della vite nell'apposito foro del componente orizzontale. Dunque la vite è libera di ruotare attorno al proprio asse e questa rotazione è trasformata in un moto rettilineo del componente verticale, che può quindi essere in questo modo regolato in altezza.

In Fig. 4.5 è illustrato il sistema di supporto e centraggio installato all'interno della camera TOF.



**Fig. 4.5** Cella di Knudsen, sistema di alimentazione e sistema di supporto e centraggio assemblati all'interno della camera TOF

### 4.3 - Il modello geometrico per l'analisi FE

L'analisi FE ha come obiettivo principale lo studio della distribuzione di temperatura all'interno della camera TOF per analizzare la resistenza dei materiali scelti in fase di progettazione nelle condizioni più critiche di esercizio e per valutare la necessità o meno di dotare la camera di un sistema di raffreddamento. Per le basi teoriche si può fare riferimento al CAP. 3.

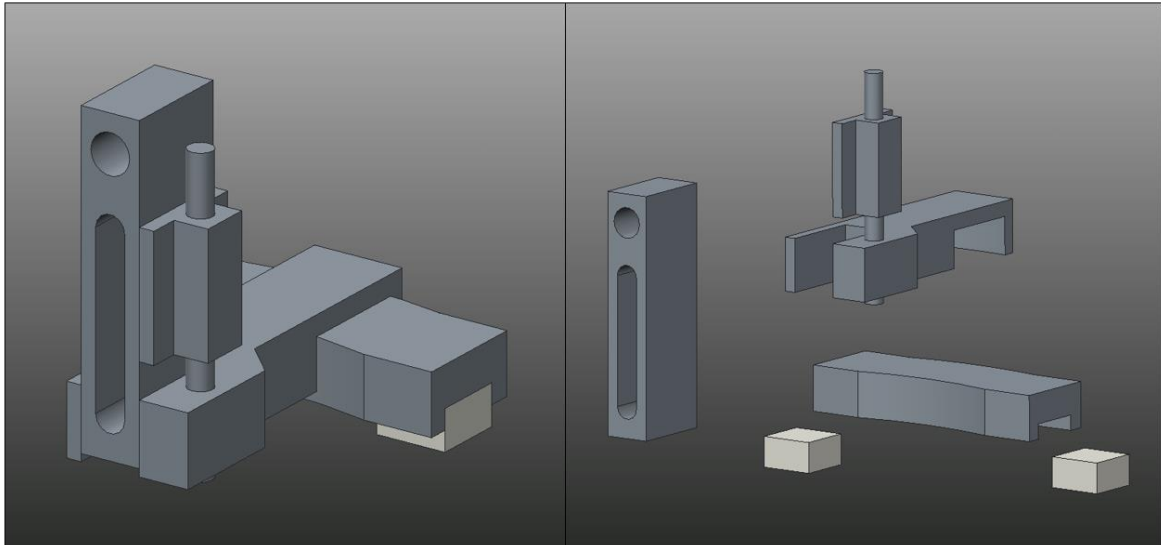
Come per l'analisi FE della cella di Knudsen assemblata all'interno della camera muletto, anche in questo caso si è reso necessario passare dal modello CAD completo, rappresentato in Fig. 4.5, ad un modello semplificato, che riproduca le caratteristiche di interesse trascurando invece quelle non significative ai fini dell'analisi: ciò contribuisce a semplificare notevolmente il modello numerico e a ridurre i tempi di calcolo.

Per prima cosa si è proceduto eliminando il detector, il tubo di deriva e le 6 flange presenti sulla camera croce, andando di fatto a rappresentarla come un cilindro. Si sono mantenuti invece il coperchio della camera TOF e la base sulla quale poggia. Quest'ultima tuttavia è stata modellata come un piatto semplice andando ad eliminare dall'assieme la pompa turbomolecolare.

Questa semplificazione è molto spinta ma non dovrebbe influire pesantemente sul risultato dell'analisi, poiché il meccanismo di scambio termico dominante è l'irraggiamento. Inoltre in questo modo ci si pone in vantaggio di sicurezza, andando ad ottenere come risultati valori che saranno maggiori rispetto a quelli che si otterrebbero considerando il tubo di deriva, i tubi flangiati e la pompa turbomolecolare.

Per quanto riguarda il sistema di supporto e centraggio della cella, si sono mantenuti solo gli isolatori in Macor a contatto con la base della camera, mentre quelli superiori sono stati eliminati. Sono poi state eliminate tutte quelle features come viti, grani ed asole che non sarebbero state significative ai fini

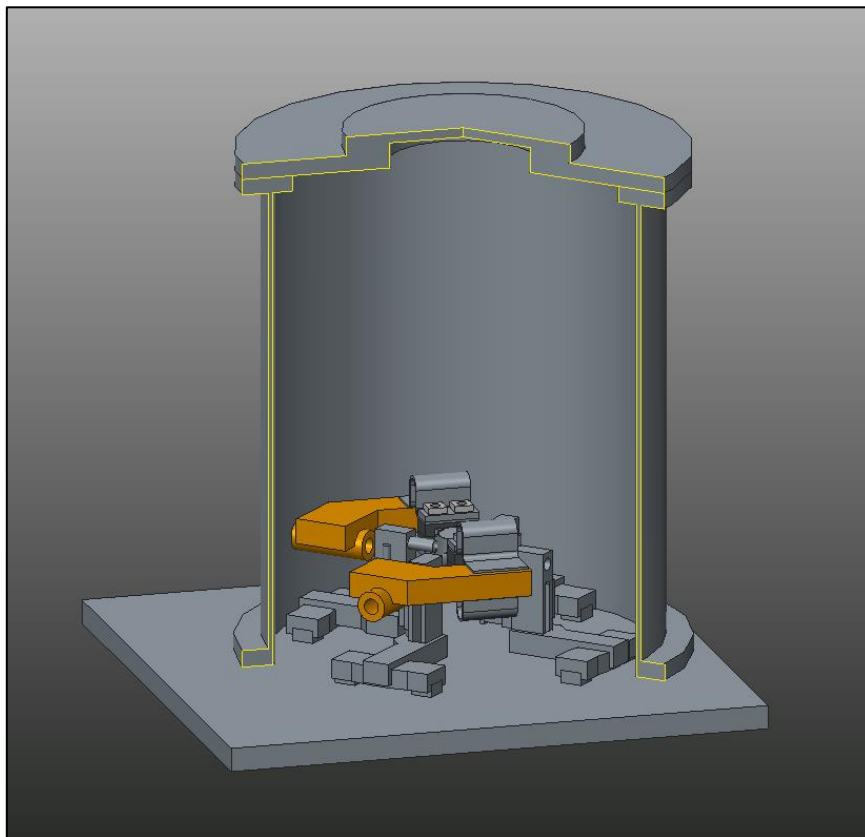
dell'analisi. Il componente orizzontale del supporto, la vite M5 con le sedi per i seger ed il componente avvitato lateralmente a quello verticale (al quale si fissano i puntali in tantalio) sono stati modellati come un'unica parte. Il sistema di supporto così semplificato è rappresentato in Fig. 4.6.



**Fig. 4.6** Sistema di supporto e centraggio semplificato per effettuare le analisi FEM

Le semplificazioni adottate per la cella di Knudsen riguardano esclusivamente le giunzioni bullonate in corrispondenza dei connettori, che sono state rimosse.

Il modello CAD semplificato per l'analisi FE dell'intera camera TOF è rappresentato in Fig. 4.7.



**Fig. 4.7** CAD semplificato della cella di Knudsen assemblata nella camera TOF

#### 4.4 - Il modello FE

L'obiettivo di questa analisi FE è conoscere la distribuzione di temperatura nella camera TOF nelle varie condizioni di esercizio, ovvero per vari valori di corrente di alimentazione della cella di Knudsen, con particolare attenzione per quelle più critiche.

L'intero sistema, come spiegato nel secondo capitolo, è mantenuto in stato di alto vuoto (circa  $10^{-6}$  mbar) tramite una pompa rotativa ed una pompa turbomolecolare. Dunque i meccanismi di scambio termico che sono presenti all'interno della camera TOF sono l'irraggiamento e la conduzione, mentre si ha convezione naturale solo tra le pareti esterne della camera e l'ambiente circostante. Inoltre, come per la simulazione descritta nel CAP. 3, anche in questo caso il campo elettrico e quello termico risultano essere accoppiati. Pertanto, i risultati del problema elettrico, che forniscono una variabile di input del problema termico, saranno ricalcolati sulla base delle soluzioni del problema termico stesso, fino a convergenza. Le superfici dei componenti contenuti nella camera e quelle interne della camera stessa, che scambiano per irraggiamento e conduzione, sono state raggruppate, al fine di ottimizzare i tempi di calcolo dei fattori di vista, in diverse enclosures. In questo modo, per ciascuna enclosure, dopo che le superfici sono state discretizzate in areole elementari, il software genererà una matrice contenenti fattori di vista per ogni singolo elemento area in relazione a tutti gli altri presenti nella stessa enclosure. È evidente che generare una serie di matrici di dimensioni inferiori comporta uno sforzo computazionale minore, tuttavia la distinzione delle enclosures non deve comportare un'alterazione a livello del risultato finale.

Il modello considera inoltre perfetto il contatto tra i vari componenti.

Facendo riferimento alla Fig. 4.8 e alla Fig. 4.9, si illustrano di seguito i carichi ed i vincoli definiti sui gradi di libertà:

- è stato imposto un vincolo di temperatura (25°C) sulle superfici interne raffreddate dei puntali di alimentazione della cella;
- è stata imposta la corrente entrante desiderata ai nodi della sezione trasversale di ingresso di uno dei puntali di alimentazione della sorgente imponendo sulla sezione trasversale di ingresso del secondo puntale un vincolo di potenziale nullo;
- per il calcolo del calore scambiato per irraggiamento tra le superfici dei componenti all'interno della camera e le pareti interne della camera TOF stessa è stata creata un'unica enclosure;
- sulla superficie esterna della camera è stato imposto un vincolo di scambio termico convettivo. Nell'ipotesi che la temperatura esterna della camera non raggiunga valori molto elevati si ritiene totalmente trascurabile lo scambio termico per irraggiamento verso l'esterno rispetto al flusso termico convettivo. In particolare è stato ragionevolmente supposto che il sistema sia posto in un ambiente climatizzato in cui la temperatura media dell'aria sia circa pari a 25 °C, è stato quindi stimato un coefficiente di scambio termico per convezione naturale  $\alpha$  pari a 10 W/m<sup>2</sup>°C.

Si è usato l'elemento *SOLID226* (Fig. 3.4) per i connettori in rame ed in tantalio, per i dadi in Macor, le viti e le piastrine in tantalio e per le due metà in grafite della cella di Knudsen. Questo elemento, infatti, permette di accoppiare i gdl di temperatura e potenziale elettrico, le cui rispettive forze generalizzate sono il flusso di calore e l'intensità di corrente elettrica.

Per tutti gli altri componenti, invece, si è utilizzato l'elemento *SOLID87* (Fig. 4.10), molto adatto per mesh irregolari di parti complesse. L'elemento ha un solo grado di libertà, la temperatura, per ciascun nodo, ed è applicabile ad analisi termiche tridimensionali sia *static* che *transient*.

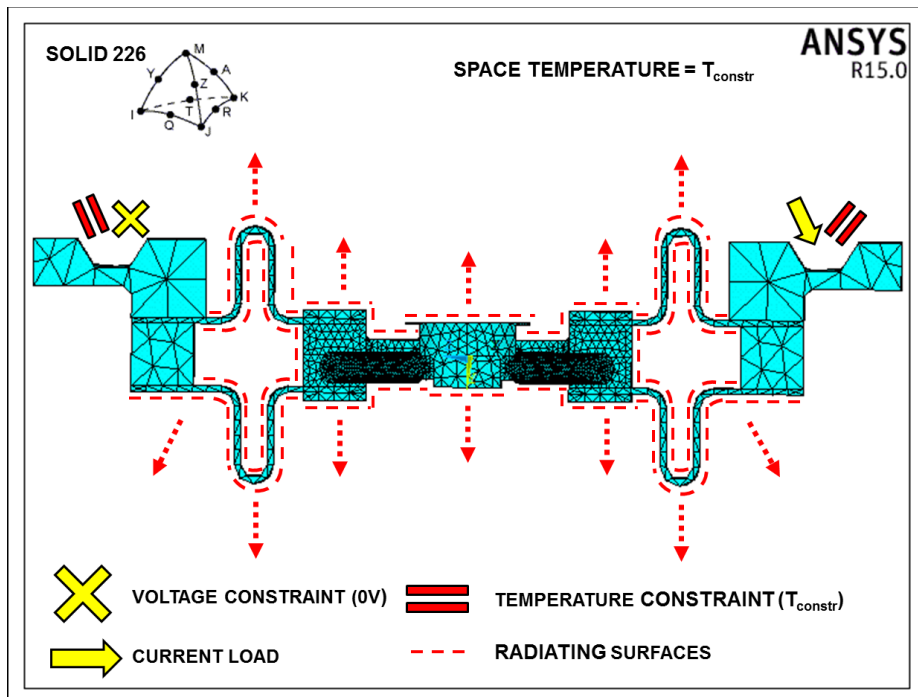


Fig. 4.8 Rappresentazione del modello FEM della cella di Knudsen e del sistema di alimentazione

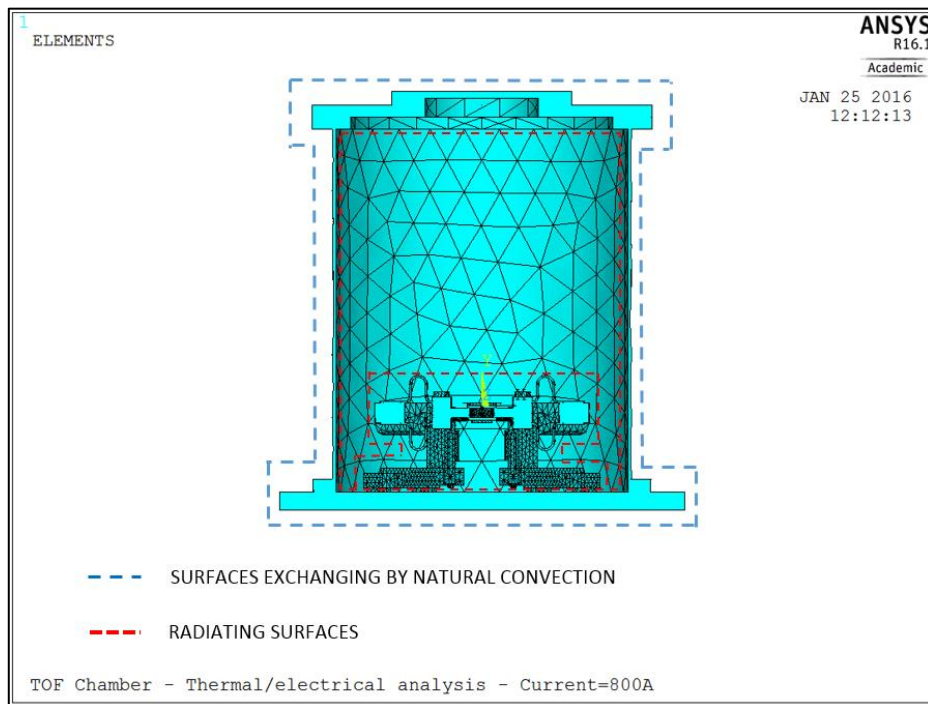


Fig. 4.9 Rappresentazione del modello FEM della camera TOF comprensiva di cella di Knudsen e sistema di supporto e centraggio della cella stessa

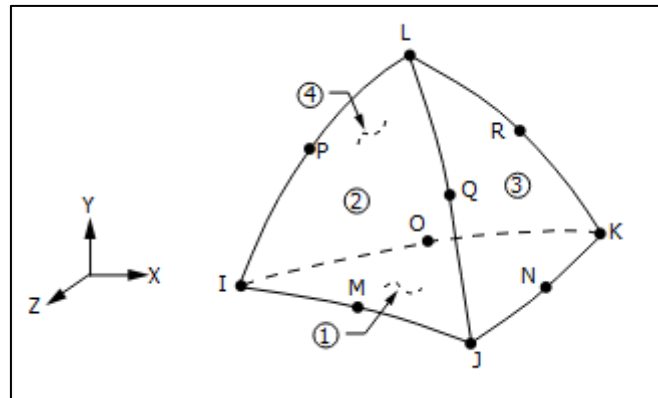


Fig. 4.10 Elemento SOLID87

Data la complessità della geometria si è scelto di procedere con una meshatura free, con configurazione tetraedrica a 10 nodi per gli elementi solid226; l'analisi della convergenza e la definizione della mesh saranno trattate nel paragrafo successivo.

Per questa analisi, sebbene sia necessario determinare la distribuzione di temperatura all'interno della camera TOF in corrispondenza dei medesimi valori di corrente rappresentati dalla rampa di carico in Fig. 3.5, si è preferito non definire il carico stesso come un vettore funzione del tempo ed effettuare una suddivisione in substep, poiché un primo tentativo svolto ha rivelato una eccessiva dimensione del file dei risultati (.rst) ed sua difficile gestione in fase di elaborazione dati. Si è dunque scelto, dato l'elevato grado di complessità dell'analisi, di effettuare un'analisi per ciascun valore di corrente: in questo modo il file dei risultati ottenuto al termine di ciascuna simulazione è decisamente più leggero e il *postprocessing* risulta più agevole.

#### 4.5 - Analisi della convergenza e definizione della mesh

Una volta definito il modello FE, risulta di fondamentale importanza condurre un'analisi di convergenza. L'obiettivo è quello ottenere una soluzione il più possibile vicina alla convergenza, cercando di ottimizzare i tempi di calcolo richiesti che rappresentano il principale collo di bottiglia data la vastità e complessità del sistema.

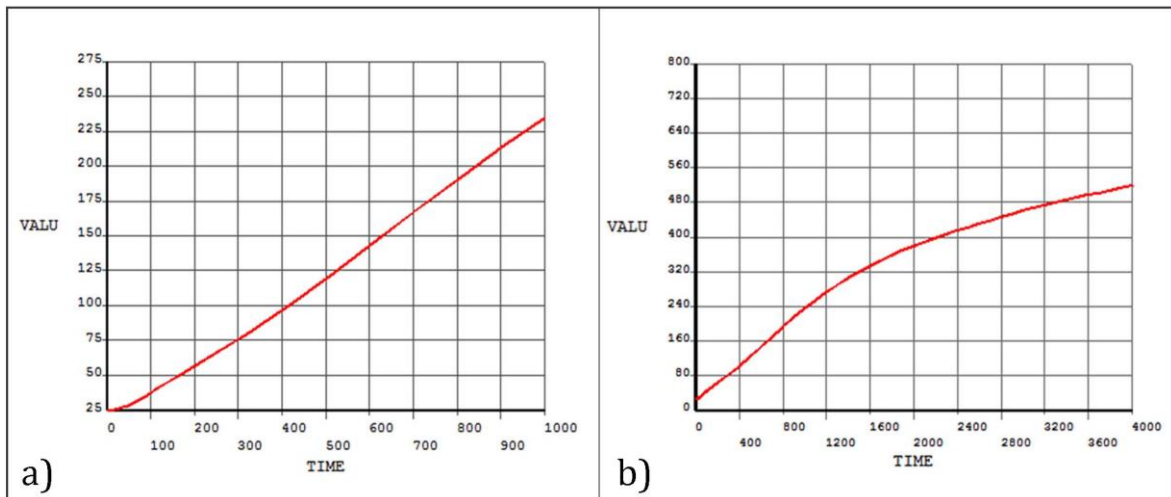
Nelle analisi di tipo *TRANSIENT*, nelle quali si ha una dipendenza dei parametri dal tempo, la convergenza dipende da due variabili: il grado di infittimento della mesh e il tempo fisico dell'analisi impostato. Si è deciso di partire con un'analisi ad 800 A al fine di studiare subito le condizioni più critiche di esercizio, impostando una mesh preliminare caratterizzata da 544044 nodi.

Date le elevate dimensioni del modello, si è riscontrata una difficoltà nell'arrivare a convergenza nei punti più distanti dalla cella di Knudsen, come ad esempio il coperchio della camera TOF e i componenti alla base del sistema di supporto e centraggio della cella stessa: il tempo fisico da impostare risultava essere troppo elevato e questo si ripercuoteva sulla durata della simulazione, che diventava eccessiva.

In Fig. 4.11 è messo a confronto l'andamento di temperatura ottenuto da due differenti analisi condotte utilizzando la medesima mesh ma impostando diversi valori di tempo. La temperatura è stata valutata in corrispondenza dello stesso nodo, appartenente al componente costituente la guida radiale di uno dei quattro supporti della cella.

Come si può notare la temperatura ha una pendenza molto elevata per un tempo pari a 1000 secondi (Fig. 4.11 a) e non si raggiunge la stazionarietà neppure impostando un tempo di 4000 secondi (Fig. 4.11 b).

Analisi successive hanno evidenziato come la temperatura vada a convergenza in tutti i componenti della camera TOF settando un valore del tempo di 10000 secondi, andando pertanto ad avere tempi di calcolo estremamente lunghi esclusivamente per raggiungere il plateau nelle curve di temperatura, senza dunque considerare ulteriori aumenti della durata dovuti all'eventuale necessità di dover infittire la mesh.

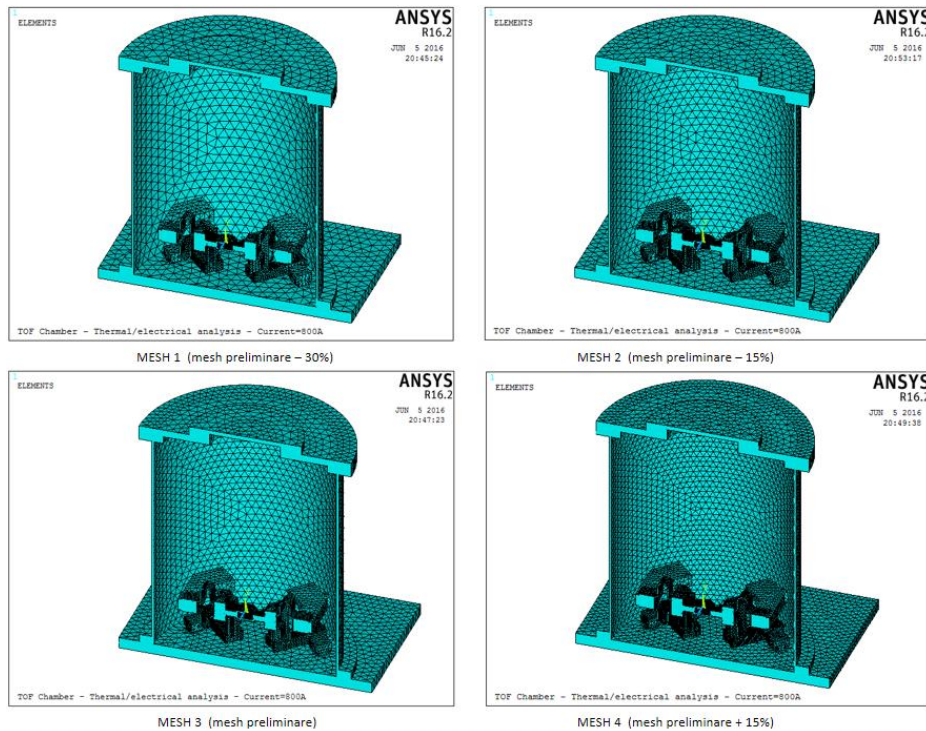


**Fig. 4.11** (a) Andamento della temperatura per un'analisi transient con tempo impostato a 1000 secondi. (b) Andamento della temperatura per un'analisi transient con tempo impostato a 4000 secondi. Il confronto è effettuato prendendo in considerazione lo stesso nodo del componente alla base del sistema si supporto e centraggio.

Si è dunque optato per effettuare delle analisi *STATIC*, ovvero svincolandosi in questa maniera dalla dipendenza della convergenza dal tempo ed andando a studiarla solo in relazione al grado di infittimento della mesh. Utilizzando la medesima mesh preliminare, inoltre, si è riscontrata una diminuzione sostanziale dei tempi di calcolo rispetto alla simulazione condotta imponendo 10000 secondi.

Per quanto riguarda dunque l'analisi di convergenza si è partiti prendendo a riferimento la mesh fino ad ora considerata e si è variata la dimensione degli elementi incrementandola rispettivamente del 30%, del 15% e dello 0% (mesh preliminare), ed infine infittendola del 15%, considerando dunque un totale di 4 diverse mesh. A causa dell'elevato tempo computazionale richiesto per risolvere l'analisi con la mesh più fitta (oltre 4 giorni), non si è ritenuto opportuno procedere con percentuali di riduzione della dimensione degli elementi maggiori.

In Fig. 4.12 sono riportate le quattro differenti mesh adottate, dalle quali è possibile apprezzare il differente grado di infittimento.



**Fig. 4.12** Rappresentazione delle differenti mesh utilizzate per l'analisi di convergenza della camera TOF  
 L'analisi di convergenza è stata effettuata tenendo in considerazione il valore di temperatura in corrispondenza di alcuni keypoints selezionati, in modo tale da confrontare le temperature sempre nello stesso punto. La Tabella 4-1 elenca i componenti presi in considerazione per l'analisi, i relativi Keypoints analizzati in ANSYS® e la numerazione assegnatagli.

Componente e numerazione	Keypoint in ANSYS®
1) Schermo in tantalio	995
2) Parte superiore KC	1366
3) Parte inferiore KC	686
4) Morsetto di rame	1173
5) Piastra in tantalio superiore	919
6) Piastra in tantalio inferiore	1101
7) Vite in tantalio	781
8) Dado in molibdeno	720
9) Connettore in tantalio superiore	1061
10) Connettore in tantalio inferiore	1033
11) Componente verticale	1349
12) Componente orizzontale	520
13) Guida radiale	349
14) Piastra in allumina	202
15) Puntale in tantalio	656
16) Tappo	1323
17) Parete	98
18) Base	69

**Tabella 4-1** Tabella dei componenti e dei relativi keypoints scelti per l'analisi di convergenza

In Fig. 4.13 sono poi raffigurati i Keypoints scelti per i componenti della cella di Knudsen, in Fig. 4.14 quelli relativi ai supporti per il centraggio e la regolazione in posizione della cella stessa mentre, in Fig. 4.15, quelli appartenenti alla camera TOF.



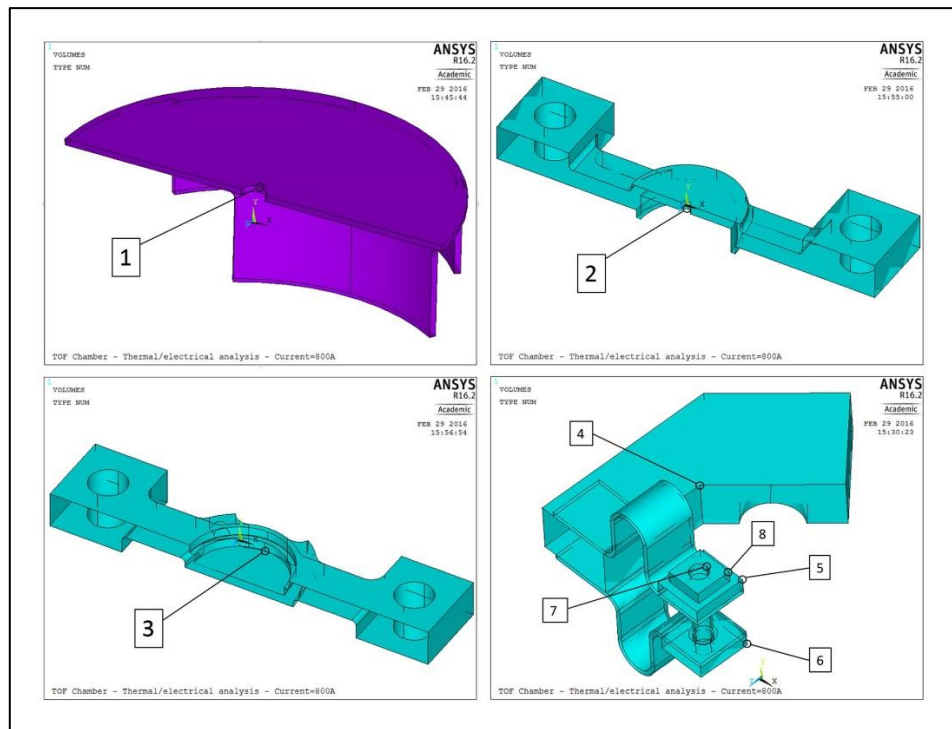


Fig. 4.13 Keypoints considerati appartenenti alla cella di Knudsen

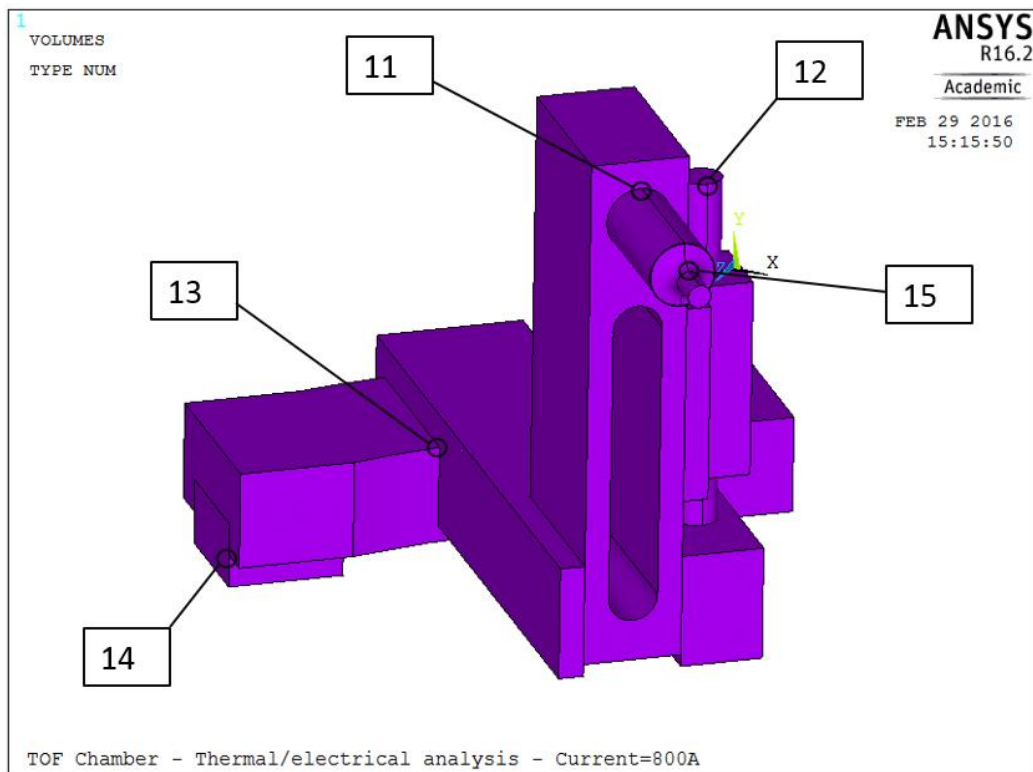


Fig. 4.14 Keypoints considerati appartenenti al sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen

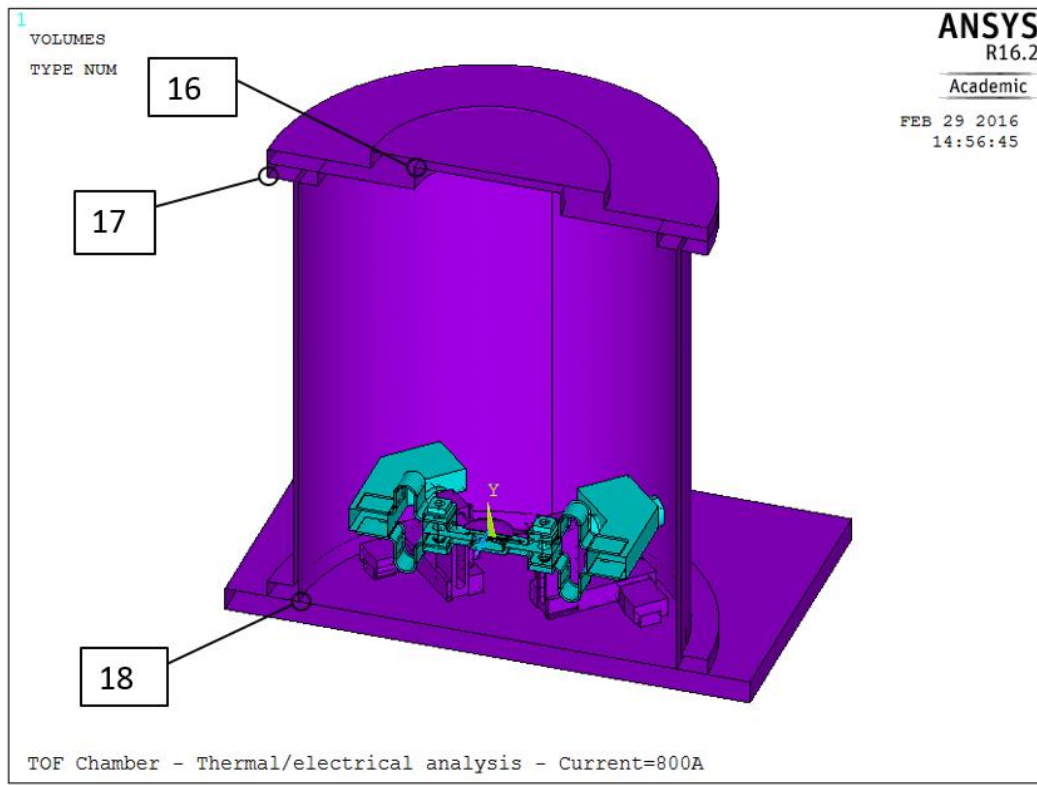


Fig. 4.15 Keypoints considerati appartenenti alla camera TOF

In Tabella 4-2 sono riportate le temperature in corrispondenza dei Keypoints prima evidenziati, in relazione alla dimensione media degli elementi utilizzati per tale componente.

Percentuale di variazione rispetto alla mesh preliminare		E <sub>size</sub> + 30%		E <sub>size</sub> + 15%	
Componente	Tipo di elemento	Mesh 1		Mesh 2	
		E <sub>size</sub>	T <sub>max</sub>	E <sub>size</sub>	T <sub>max</sub>
<b>Cella di Knudsen</b>					
Schermo in tantalio	SOLID 87	0,0026	1720,98	0,0023	1700,2
Parte superiore KC	SOLID 226	0,0013	2208,88	0,00115	2190,59
Parte inferiore KC	SOLID 226	0,0013	2040,21	0,00115	2026,95
Morsetto di rame	SOLID 226	0,0078	52,4147	0,0069	52,605
Piastra in tantalio superiore	SOLID 226	0,0039	1342,57	0,00345	1335,91
Piastra in tantalio inferiore	SOLID 226	0,0039	1353,08	0,00345	1346,08
Vite in tantalio	SOLID 226	0,0039	1349,28	0,00345	1342,62
Dado in molibdeno	SOLID 226	0,0039	1358,41	0,00345	1351,68
Connettore in tantalio superiore	SOLID 226	0,0039	1050,56	0,00345	1043,33
Connettore in tantalio inferiore	SOLID 226	0,0039	1294,76	0,00345	1288,18
<b>Supporto cella di Knudsen</b>					
Componente verticale	SOLID 87	0,0039	941,106	0,00345	904,26
Componente orizzontale	SOLID 87	0,00325	867,727	0,002875	854,266
Guida radiale	SOLID 87	0,0052	696,881	0,0046	681,918

Piastra in allumina	SOLID 87	0,0052	643,341	0,0046	626,507
Puntale in tantalio	SOLID 87	0,0013	1011,45	0,00115	992,786
Camera					
Tappo	SOLID 87	0,013	540,607	0,0115	522,951
Parete	SOLID 87	0,013	500,464	0,0115	483,861
Base	SOLID 87	0,013	542,456	0,0115	526,013

Percentuale di variazione rispetto alla mesh preliminare		E <sub>size</sub> + 0%		E <sub>size</sub> - 15%	
Componente	Tipo di elemento	Mesh 3		Mesh 4	
		E <sub>size</sub>	T <sub>max</sub>	E <sub>size</sub>	T <sub>max</sub>
Cella di Knudsen					
Schermo in tantalio	SOLID 87	0,002	1678,96	0,0017	1684,12
Parte superiore KC	SOLID 226	0,001	2171,13	0,00085	2175,94
Parte inferiore KC	SOLID 226	0,001	2011,91	0,00085	2015,31
Morsetto di rame	SOLID 226	0,006	51,251	0,0051	51,252
Piastra in tantalio superiore	SOLID 226	0,003	1329,97	0,00255	1331,88
Piastra in tantalio inferiore	SOLID 226	0,003	1340,03	0,00255	1341,99
Vite in tantalio	SOLID 226	0,003	1336,8	0,00255	1338,81
Dado in molibdeno	SOLID 226	0,003	1345,87	0,00255	1347,75
Connettore in tantalio superiore	SOLID 226	0,003	1038,99	0,00255	1039,43
Connettore in tantalio inferiore	SOLID 226	0,003	1282,5	0,00255	1284,58
Supporto cella di Knudsen					
Componente verticale	SOLID 87	0,003	889,89	0,00255	893,124
Componente orizzontale	SOLID 87	0,0025	841,559	0,002125	844,164
Guida radiale	SOLID 87	0,004	667,519	0,0034	670,166
Piastra in allumina	SOLID 87	0,004	610,934	0,0034	613,442
Puntale in tantalio	SOLID 87	0,001	972,845	0,00085	977,65
Camera					
Tappo	SOLID 87	0,01	506,794	0,0085	509,041
Parete	SOLID 87	0,01	468,651	0,0085	470,738
Base	SOLID 87	0,01	511,354	0,0085	513,429

**Tabella 4-2** Temperature in corrispondenza dei Keypoints selezionati per le diverse mesh utilizzate

Per valutare la convergenza, si è assunto un rischio di sottostima dei valori locali di temperatura in corrispondenza dei keypoints selezionati pari al 3%, rispetto a quelli ottenuti utilizzando la mesh più fitta (MESH 4).

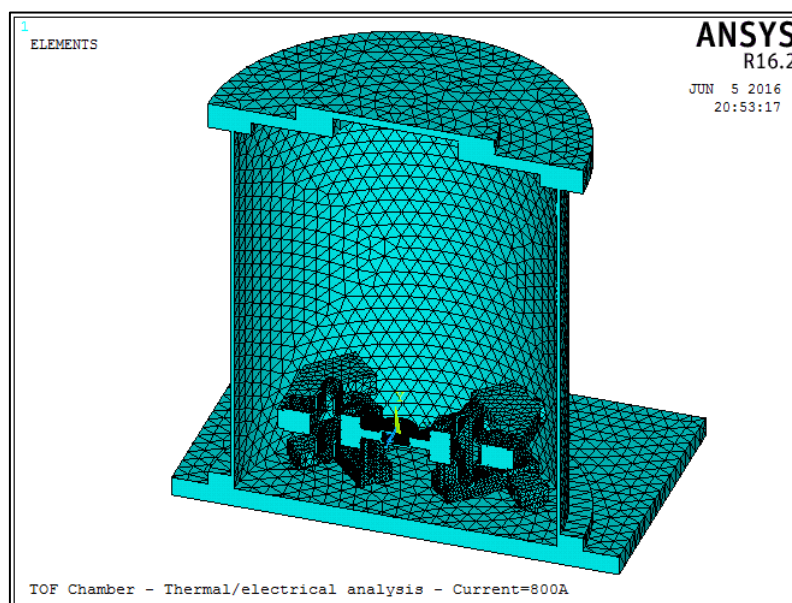
Si è dunque ottenuto che la mesh più rada utilizzabile, e quindi meno dispendiosa in termini di tempi computazionali, è la MESH 2, ovvero quella ottenuta aumentando le dimensioni medie degli elementi della mesh preliminare del 15%.

Infatti, osservando la Tabella 4-3, si può notare come l'errore percentuale in termini di temperatura sia sempre inferiore al 3% mentre, considerando la MESH 3, ovvero quella ottenuta aumentando le dimensioni medie degli elementi della mesh preliminare del 30%, si rilevano errori percentuali anche superiori al 6%.

Componente	Tipo di elemento	Errore %	
		$( T_{mesh4} - T_{mesh2}  * 100) / T_{mesh4}$	$( T_{mesh4} - T_{mesh1}  * 100) / T_{mesh4}$
Cella di Knudsen			
Schermo in tantalio	SOLID 87	1,0	2,2
Parte superiore KC	SOLID 226	0,7	1,5
Parte inferiore KC	SOLID 226	0,6	1,2
Morsetto di rame	SOLID 226	2,6	2,3
Piastra in tantalio superiore	SOLID 226	0,3	0,8
Piastra in tantalio inferiore	SOLID 226	0,3	0,8
Vite in tantalio	SOLID 226	0,3	0,8
Dado in molibdeno	SOLID 226	0,3	0,8
Connettore in tantalio superiore	SOLID 226	0,4	1,1
Connettore in tantalio inferiore	SOLID 226	0,3	0,8
Supporto cella di Knudsen			
Componente verticale	SOLID 87	1,2	5,4
Componente orizzontale	SOLID 87	1,2	2,8
Guida radiale	SOLID 87	1,8	4,0
Piastra in allumina	SOLID 87	2,1	4,9
Puntale in tantalio	SOLID 87	1,5	3,5
Camera			
Tappo	SOLID 87	2,7	6,2
Parete	SOLID 87	2,8	6,3
Base	SOLID 87	2,5	5,7

**Tabella 4-3** Errore percentuale di temperatura valutato per la MESH 1 e la MESH 2 in relazione alla mesh più fitta (MESH 4)

In definitiva, dunque, per le successive analisi verrà adoperata la MESH 2, rappresentata in Fig. 4.16, che possiede 470739 nodi rispetto ai 544044 nodi della mesh preliminare.



**Fig. 4.16** Rappresentazione della MESH 2

#### 4.6 - Risultati numerici

Effettuata l'analisi di convergenza si è così trovata la mesh con il minor numero di nodi che garantisce una sottostima massima del 3% in termini di valori di temperatura in corrispondenza dei keypoints considerati. Tale mesh verrà dunque utilizzata come base per tutte le analisi che saranno effettuate successivamente.

L'analisi effettuata ha una corrente imposta di 800 A, ovvero rappresenta la situazione più critica in cui potrà venire a trovarsi il sistema una volta messo in esercizio. Questo consente di valutare in modo opportuno sia la scelta dei materiali effettuata in fase di progettazione che la necessità di adottare nuove soluzioni tecniche.

In Fig. 4.17 è illustrato il campo di temperatura dell'intero sistema, mentre in Fig. 4.18 quello dei soli componenti costituenti la camera TOF. Osservando tale immagine, si può notare come la temperatura della camera, che è realizzata in alluminio, sia molto elevata (circa 600°C), e come il piatto alla base della camera stessa superi addirittura i 700°C. Il tappo, sebbene si scaldi meno degli altri due elementi, raggiunge quasi i 500°C. Si renderà dunque necessario implementare un sistema di raffreddamento ad acqua, come per esempio quello utilizzato per la camera muletto descritta nel precedente capitolo.

Per quanto riguarda invece il sistema di supporto progettato, in Fig. 4.19 è raffigurata la distribuzione di temperature sul componente che si scalda maggiormente, ovvero quello verticale sede dei puntali in tantalio, che raggiunge i 902°C. Tale componente è pensato in AISI 316L, e pertanto può resistere in continuità di esercizio fino ad una temperatura massima di circa 750°C. Nel prossimo capitolo si tenterà di dare una soluzione tecnica a questa problematica.

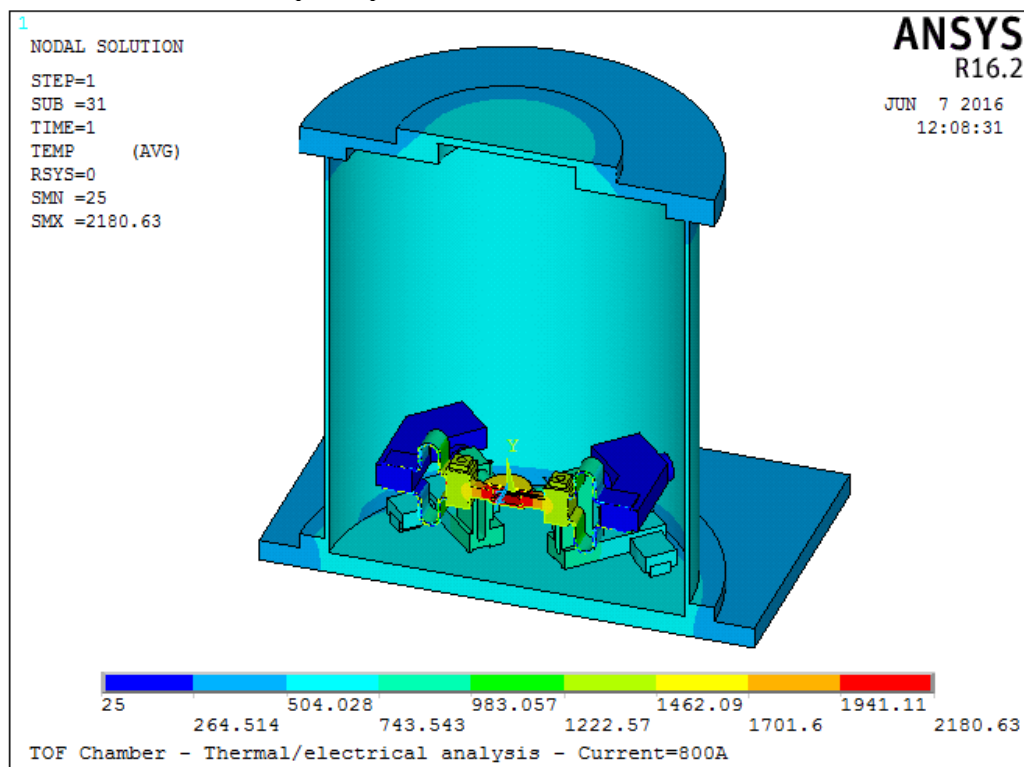
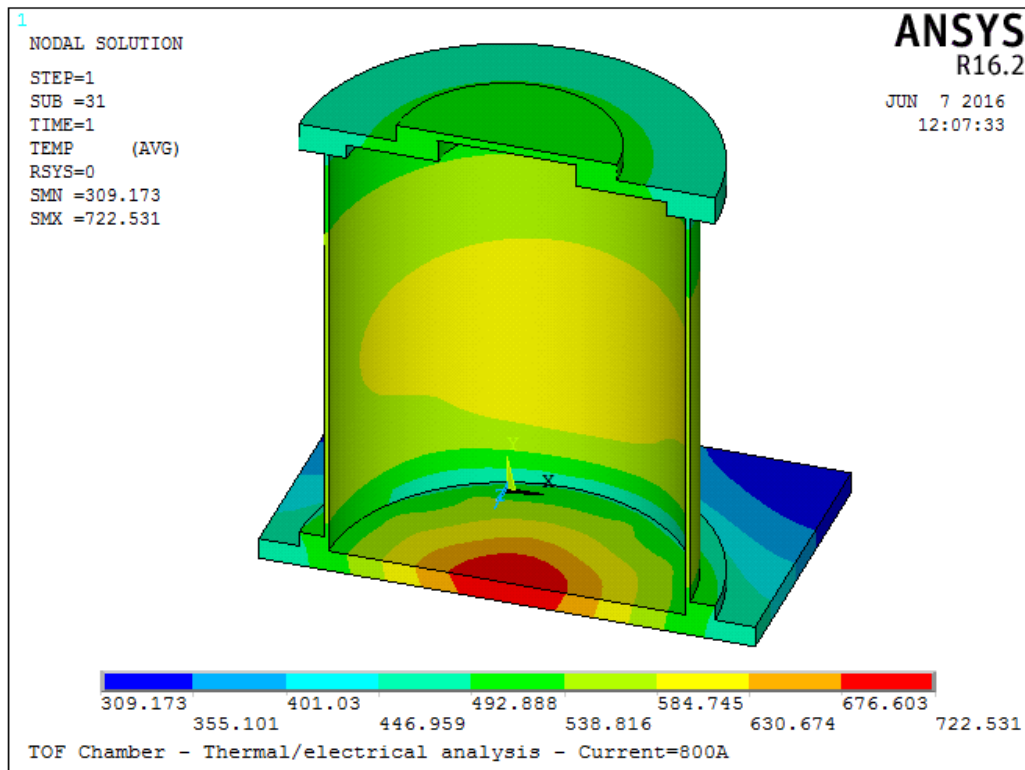
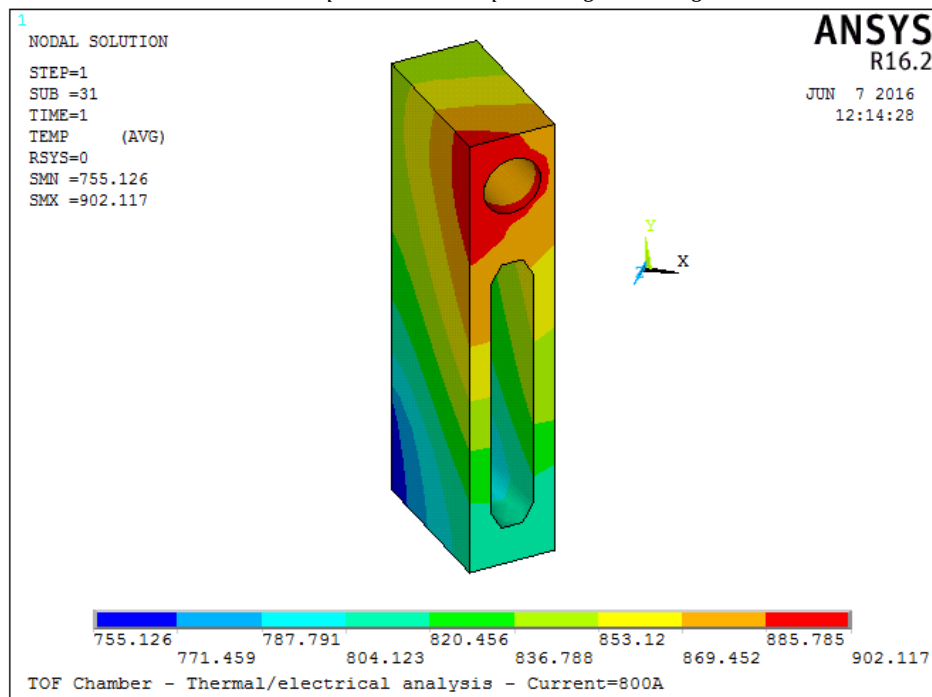


Fig. 4.17 Rappresentazione della temperatura raggiunta dal sistema per una corrente di alimentazione pari a 800 A. Le temperature sono espresse in gradi centigradi.

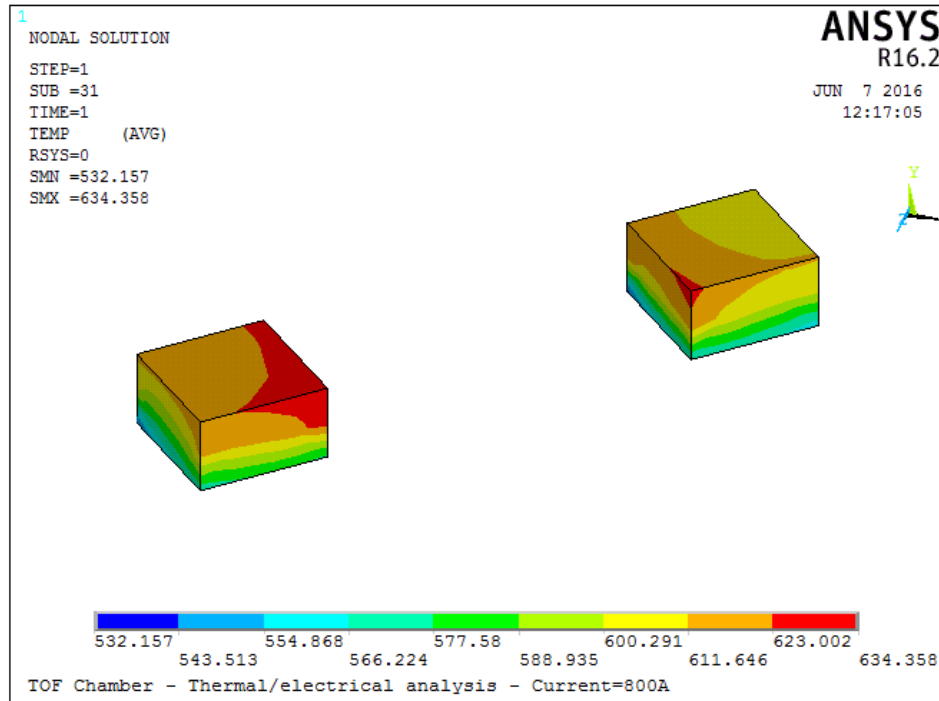


**Fig. 4.18** Rappresentazione della temperatura raggiunta dalla camera TOF per una corrente di alimentazione pari a 800 A. Le temperature sono espresse in gradi centigradi.



**Fig. 4.19** Rappresentazione della temperatura raggiunta dal componente verticale del sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen per una corrente di alimentazione pari a 800 A. Le temperature sono espresse in gradi centigradi.

Infine, in Fig. 4.20, si può osservare come la massima temperatura raggiunta dai componenti realizzati in Macor sia di 634°C, molto inferiore a quella massima di utilizzo consentita da questo materiale, compresa tra gli 800°C ed i 1000°C. Dunque gli isolatori non presentano alcun problema dal punto di vista termico.



**Fig. 4.20** Rappresentazione della temperatura raggiunta dagli isolatori in Macor per una corrente di alimentazione pari a 800 A. Le temperature sono espresse in gradi centigradi.

#### 4.7 - Conclusioni

In questo capitolo sono state esposte le fasi di progettazione del sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen, che verrà inserito assieme ad essa all'interno della camera TOF.

I supporti, costituiti da componenti in acciaio AISI 316L e MACOR, garantiscono 3 livelli di regolazione: una regolazione in altezza e poi una regolazione orizzontale ed una radiale nel piano di giacenza della cella stessa.

Al fine di mettere in luce eventuali criticità, si sono effettuate delle analisi FE utilizzando il codice ANSYS®.

Dunque, realizzato il modello, si è effettuata un'analisi di convergenza, in modo tale da cercare di ridurre i tempi di calcolo per successive analisi, che altrimenti risulterebbero molto lunghi data la complessità del sistema in esame.

La distribuzione di temperature ottenuta numericamente per una corrente di alimentazione di 800 A (condizione più critica), ha evidenziato come la temperatura raggiunta dalla camera raggiunga i 600°C, mentre il coperchio ed il piatto alla base arrivino rispettivamente ai 500°C e 700°C circa: si renderà dunque necessario implementare un sistema di raffreddamento ad acqua, come per esempio quello utilizzato per la camera muletto descritta nel precedente capitolo.

Per quanto riguarda invece il sistema di supporto progettato, gli isolatori in MACOR restano al di sotto della loro temperatura limite di esercizio. Il componente che si scalda maggiormente risulta invece essere quello verticale, che raggiunge i 902°C, superando dunque la temperatura limite di utilizzo dell'AISI 316L che è di circa 750°C.

Nel prossimo capitolo si tenterà pertanto di dare una soluzione tecnica a questa problematica.





# Capitolo 5

## Progettazione degli schermi termici e del sistema di separazione

### 5.1 - Introduzione

Nel precedente capitolo sono state messe in evidenza, tramite le analisi FE effettuate, delle problematiche riguardanti le temperature raggiunte in esercizio da alcuni componenti del sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen: si cercherà dunque in queste pagine di presentare una soluzione a tale situazione.

Pertanto nella prima parte del capitolo si esporrà la soluzione tecnica proposta ed il sistema progettato, proseguendo poi con delle analisi FE con il software ANSYS® per valutare gli eventuali miglioramenti ottenuti.

La collimazione ristretta è tecnica sviluppata per eliminare il contributo di “flussi parassiti” che si aggiungono al flusso molecolare vero e proprio prodotto dalla cella. A tal fine vengono adoperati degli appositi separatori posti sopra la cella, che consentono in questo modo di selezionare solo un piccolo angolo solido del vapore effuso tramite un apposito foro, di diametro inferiore rispetto a quello della cella stessa: in questo modo, tutte le molecole che giungono alla sorgente provengono direttamente dalla superficie del campione o da urti reciproci tra di esse.

In questo capitolo saranno dunque esposte le fasi di progettazione del sistema di collimazione e del suo supporto. Verranno quindi esposti i risultati delle analisi termiche agli elementi finiti svolte per valutare la temperatura sui componenti del supporto stesso e quindi l’adeguatezza o meno della scelta dei materiali effettuata nella fase di design.

### 5.2 - Gli schermi termici in tantalio

Nel precedente capitolo sono stati illustrati i risultati ottenuti dall’analisi FE termo-elettrica dell’intera camera TOF.

L’analisi effettuata ha una corrente imposta di 800 A, ovvero rappresenta la situazione più critica in cui potrà venire a trovarsi il sistema una volta messo in esercizio.

Osservando la Fig. 4.18, si può notare come la temperatura della camera, che è realizzata in alluminio, sia molto elevata (circa 600°C), e come il piatto alla base della camera stessa superi addirittura i 700°C. Il tappo, sebbene si scaldi meno degli altri due elementi, raggiunge quasi i 500°C. Questa situazione può essere risolta introducendo un sistema di raffreddamento ad acqua simile a quello presente nel sistema per prove ad alte temperature.

In Fig. 4.19 è raffigurata invece la distribuzione di temperature sul componente del sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen che si scalda maggiormente, ovvero quello verticale sede dei puntali

in tantalio, che raggiunge i 902°C. Tale componente è pensato in AISI 316L, e pertanto può resistere in continuità di esercizio fino ad una temperatura massima di circa 750°C.

La soluzione del problema in questo caso non è altrettanto immediata e necessita uno studio approfondito.

Essendo che in esercizio nella camera TOF viene fatto il vuoto (circa  $10^{-6}$ mbar), al suo interno il meccanismo di scambio termico per conduzione, in assenza di un fluido in grado di trasmettere il calore, sarà assente. Il calore dunque si propaga attraverso i meccanismi di conduzione e di irraggiamento.

Mentre lo scambio per conduzione ha luogo esclusivamente qualora si abbia continuità del materiale o contatto tra superfici, lo scambio per irraggiamento non necessita il contatto delle superfici.

L'irraggiamento è meccanismo prevalente nel caso di sistemi in vuoto e, pertanto, costituisce la principale causa delle elevate temperature raggiunte dal componente verticale del sistema di supporto e centraggio.

Per irraggiamento termico si intende il trasferimento di energia termica dal corpo a temperatura maggiore a quello a temperatura minore per mezzo di onde elettromagnetiche.

La quantità di energia scambiata è quindi l'entità dello scambio termico, dipende dalla natura dei corpi scaldanti, dalla loro reciproca posizione, dalla temperatura delle loro superfici e dall'eventuale assorbimento del mezzo interposto, che come evidenziato in precedenza in questo caso risulta essere assente. Dunque si è pensato di interporre degli schermi tra la cella, che raggiungendo i 2000°C è il corpo che irraggia maggiormente, ed i componenti verticali dei 4 sistemi di supporto.

Nel seguente paragrafo verranno descritti nel dettaglio gli schermi progettati e verrà illustrata l'analisi FE eseguita.

### 5.2.1 - Progettazione e definizione del modello CAD degli schermi

Gli schermi termici devono limitare il più possibile la trasmissione di calore per irraggiamento tra la cella di Knudsen, che raggiunge circa i 2000°C quando è alimentata ad 800 A, e i componenti verticali del sistema di supporto, che nell'attuale configurazione arrivano a 902°C.

Pertanto la geometria degli schermetti dovrà essere il più efficace possibile in termini di fattore di copertura, pur mantenendo una certa semplicità costruttiva, riuscendo inoltre a far fronte all'esiguo spazio a disposizione per la loro installazione.

Anche la scelta del materiale risulta essere di primaria importanza: esso deve garantire un'alta resistenza alle temperature ed una buona semplicità di lavorazione, oltre che un elevato coefficiente di riflessione e un basso coefficiente di assorbimento.

In Fig. 5.1 è rappresentato il CAD degli schermetti progettati. Gli schermetti sono realizzati a partire da un sottile foglio di Tantalio spesso solo 0,25 mm. Il Tantalio è un materiale molto resistente alla temperatura, può superare tranquillamente i 2000°C e possiede un elevato coefficiente di riflessione.

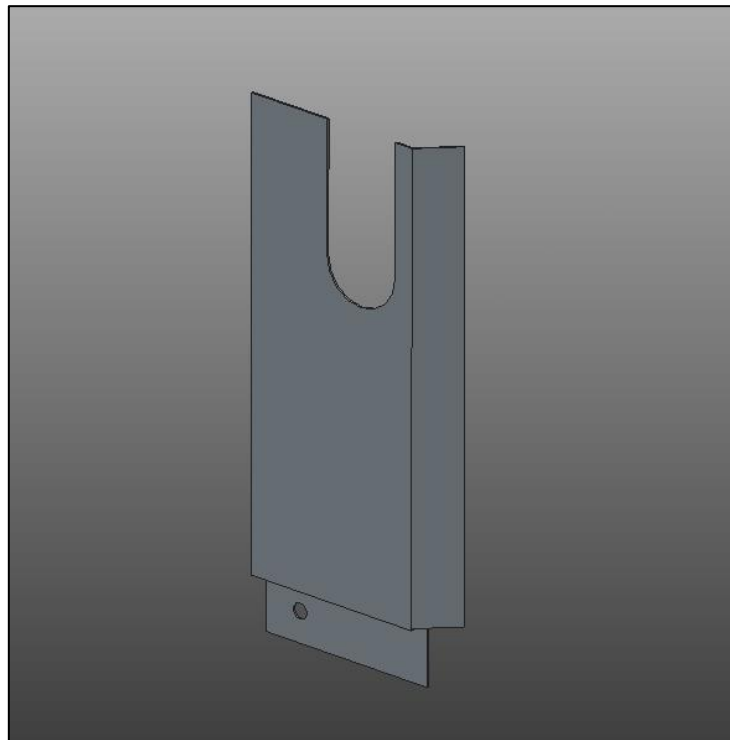
Sebbene 0,25 mm sia uno spessore esiguo, è sufficiente poiché gli schermetti in Tantalio non hanno un impiego strutturale, ma devono esclusivamente sorreggere il loro stesso peso. Essendo inoltre un materiale estremamente costoso, ciò consente un risparmio anche in termini economici.

Come si può osservare dalla figura, gli schermetti proteggono il componente verticale del sistema di supporto sia anteriormente che lateralmente, avendo infatti un prolungamento a 45° che consente di schermare termicamente anche il lato del supporto stesso, che trovandosi molto vicino alla cella in grafite è comunque esposto all'irraggiamento.

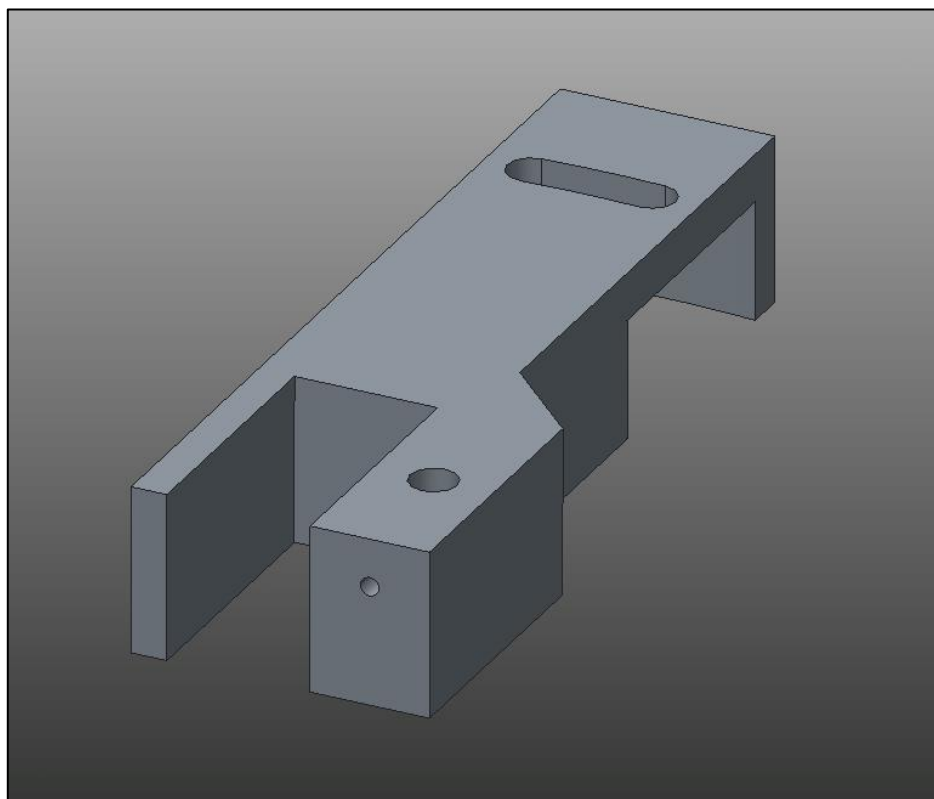
Lo schermetto è avvitato tramite una unica vite M2, ritenuta sufficiente, al componente orizzontale del sistema di supporto, e quindi nelle fasi di regolazione in altezza resta fermo rispetto al componente verticale ed al puntale in Tantalio. Si è dovuta quindi predisporre una apertura ad U, profonda 19mm e di larghezza pari a 10 mm, appena superiore agli 8 mm di diametro dei puntali in Tantalio, per consentire un'agevole regolazione verticale del sistema. Si è cercato di fare tale apertura delle dimensioni minori possibile per non ridurre eccessivamente l'efficienza della schermatura.

In Fig. 5.2 è rappresentato il componente orizzontale del sistema di supporto al quale è stato aggiunto il foro filettato M2 necessario appunto per il fissaggio dello schermetto.

Infine, osservando la Fig. 5.1, è possibile notare come si sia dotato lo schermetto di una sorta di gradino, che lo mantiene ad una distanza di circa 2,75 mm dal componente verticale: questo accorgimento ha lo scopo di privare i due componenti del contatto al fine di eliminare il meccanismo di scambio del calore per conduzione e cercare di ridurre ulteriormente la temperatura.

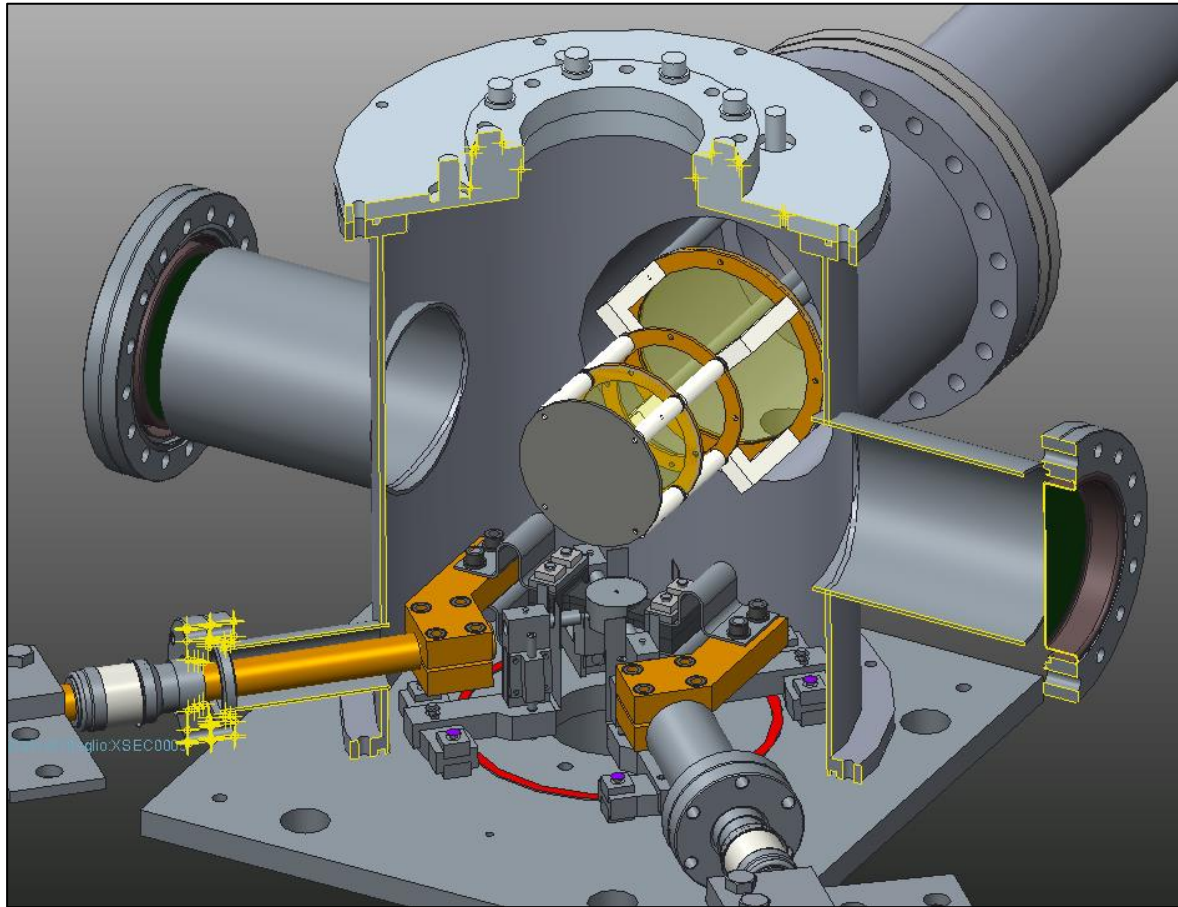


**Fig. 5.1** Schermo termico in tantalio



**Fig. 5.2** Componente orizzontale del sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen dotato di foro M2 per il montaggio dello schermo termico in tantalio

In Fig. 5.3 è rappresentata l'intera camera TOF, comprensiva di cella di Knudsen, sistema di alimentazione, sistemi di supporto e centraggio e schermetti termici in Tantalio.



**Fig. 5.3** Immagine CAD della camera TOF comprensiva di cella di Knudsen, sistema di alimentazione, sistemi di supporto e centraggio e schermetti termici in Tantalio

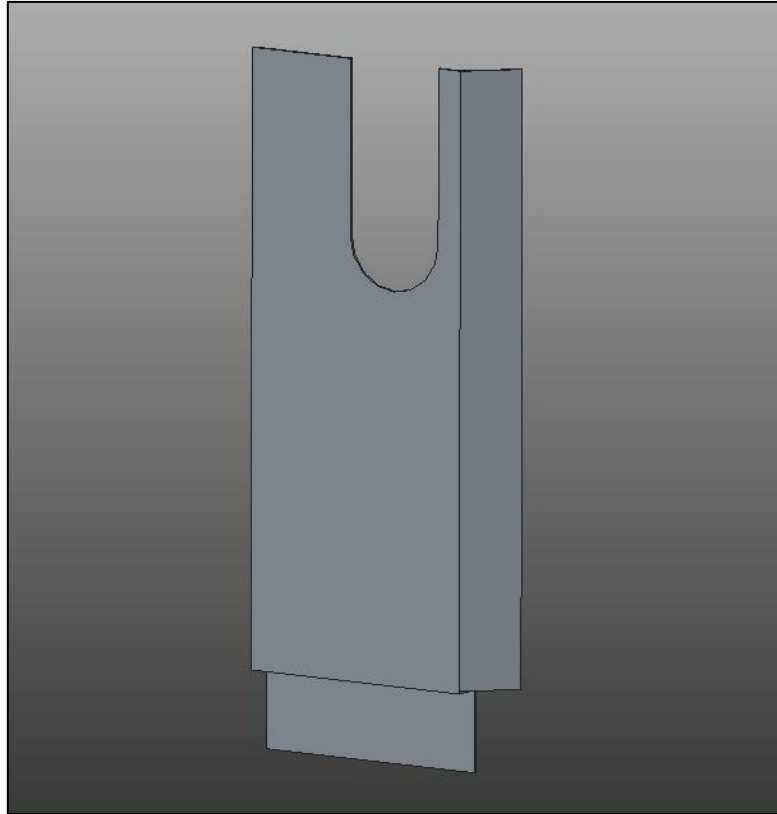
### 5.2.2 - Modello FEM e analisi dei dati numerici

Per valutare l'efficacia del sistema appena descritto si rende necessario effettuare un'analisi FE termo-elettrica, andando dunque ad esaminare la distribuzione di temperatura sul componente di interesse e confrontando la soluzione con i risultati ottenuti dalle simulazioni descritte nel precedente capitolo.

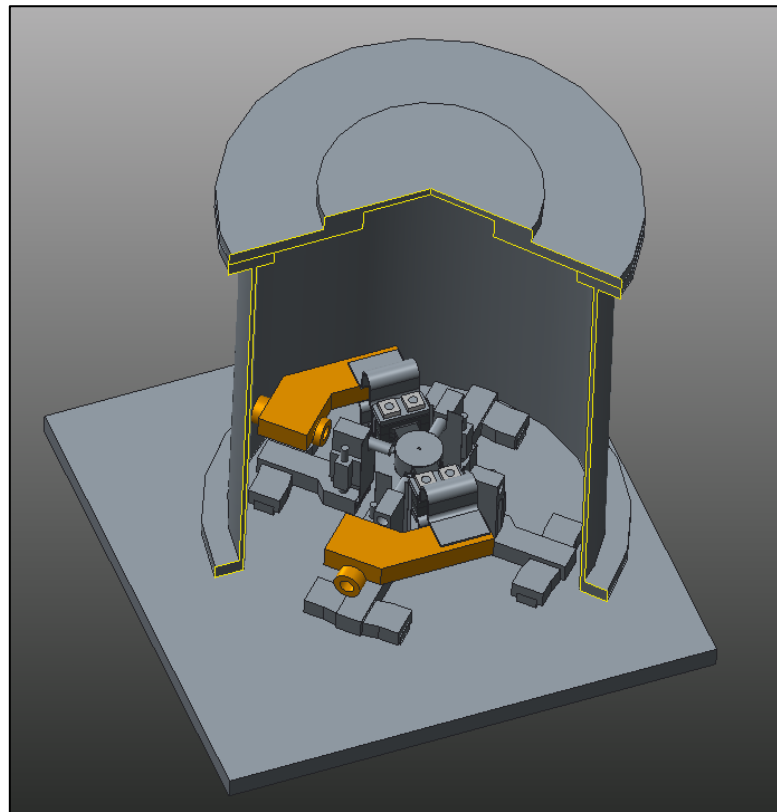
Si è dunque proceduto con la definizione del modello geometrico, considerando quello precedentemente definito nel paragrafo 4.3 e rappresentato in figura Fig. 4.7, e andando ad aggiungere gli schermetti progettati.

Le features che non influiscono sul risultato dell'analisi elettro-termica non sono state considerate: si sono pertanto trascurati i fori M2 sugli schermetti e sui componenti orizzontali del sistema di supporto e centraggio.

In Fig. 5.4 è illustrato il modello geometrico così ottenuto dello schermetto in Tantalio, mentre in Fig. 5.5 è raffigurato il modello geometrico complessivo per le analisi FE.



**Fig. 5.4** Modello semplificato degli schermi in tantalio



**Fig. 5.5** Modello semplificato dell'intera camera TOF con gli schermi termici in tantalio installati

Sostanzialmente il modello numerico è lo stesso adottato precedentemente con l'aggiunta degli schermetti termici, che sono stati raggruppati nell'enclosure contenente tutti gli elementi che scambiano per irraggiamento, ovvero i componenti all'interno della camera TOF e le pareti interne della stessa.

Per gli schermetti si è optato per una meshatura free con elementi SOLID87 (Fig. 4.10) anziché usare elementi SHELL: non si è infatti ritenuto necessario utilizzarli perché, sebbene la mesh debba essere sufficientemente fitta per via del ridotto spessore degli schermetti stessi, i tempi di calcolo restano pressoché invariati.

La mesh utilizzata per il resto dei componenti è la MESH 2, scelta nel capitolo precedente a seguito dell'analisi di convergenza.

Anche in questo caso si sono effettuate analisi di tipo STATIC, per valori di corrente da 100 A ad 800 A.

### 5.2.3 - Discussione dei risultati

Le analisi numeriche sono state effettuate per correnti da 100 A ad 800 A.

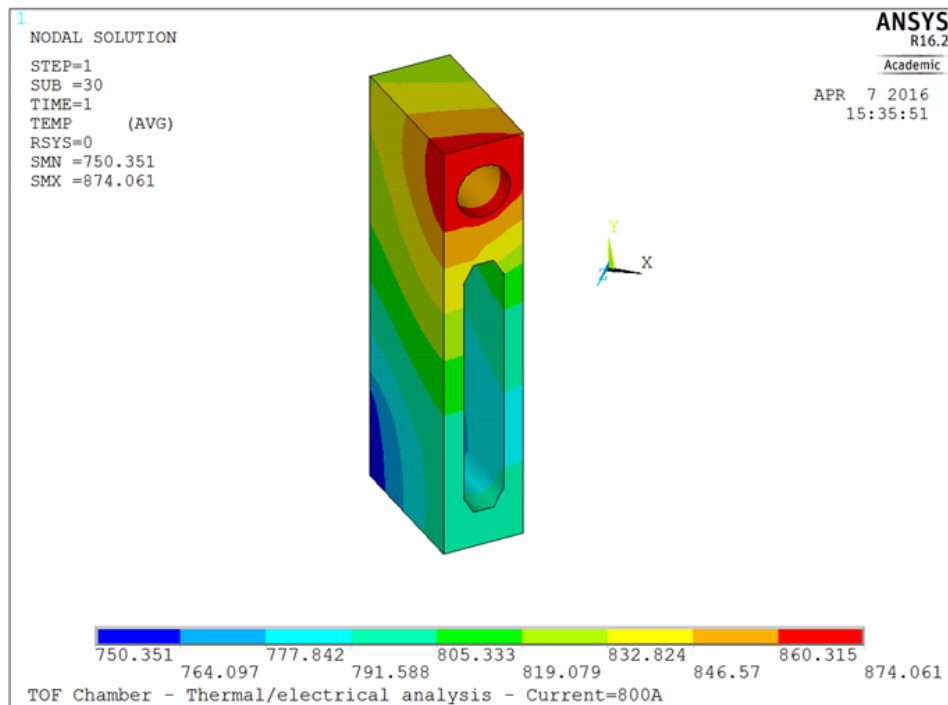
Tuttavia l'interesse cade sulle condizioni di esercizio più gravose per il sistema.

L'obiettivo è infatti valutare il miglioramento ottenuto andando ad applicare gli schermi termici in tantalio, definendo in questo modo la massima corrente applicabile senza compromettere irreversibilmente i componenti all'interno della camera TOF.

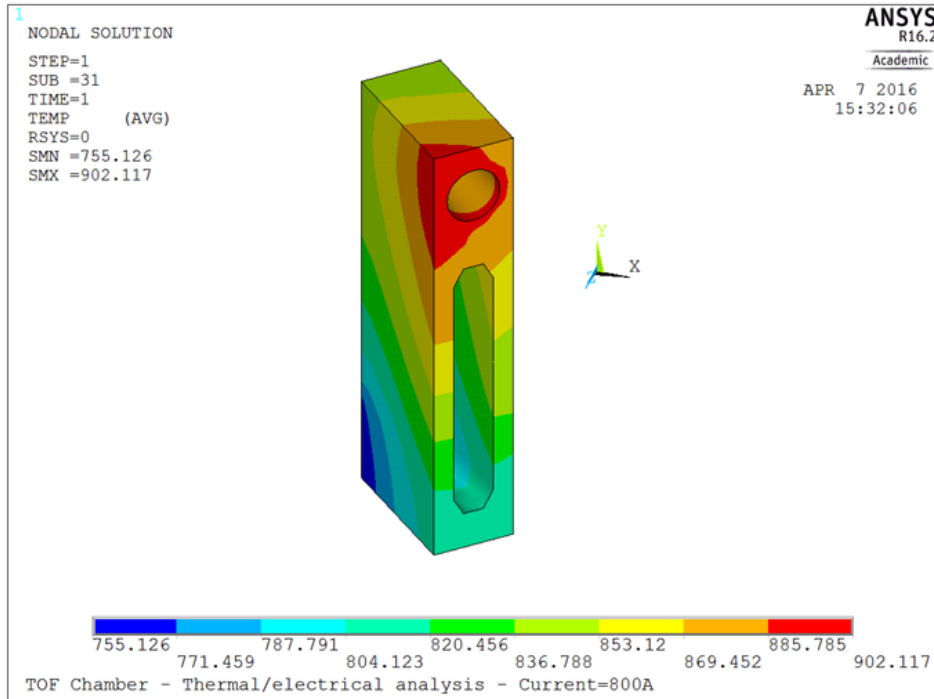
In Fig. 5.6 è rappresentata la distribuzione di temperatura sul componente verticale del sistema di supporto e centraggio della cella per una corrente di 800 A, nella configurazione con gli schermetti in tantalio.

In Fig. 5.7, invece, è rappresentata la distribuzione di temperatura sul componente verticale del sistema di supporto e centraggio della cella per una corrente di 800 A, nella configurazione senza gli schermi termici.

Confrontando le due immagini si può osservare come l'applicazione degli schermetti in tantalio porti un miglioramento che, tuttavia, risulta essere molto ridotto (si ha un abbattimento della temperatura di 30°C) ed insufficiente: l'acciaio AISI 316L che costituisce il componente in analisi raggiunge comunque una temperatura al di sopra della sua massima temperatura di esercizio.



**Fig. 5.6** Distribuzione di temperatura sul componente verticale del sistema di supporto e centraggio della cella per una corrente di 800 A, nella configurazione con gli schermetti in tantalio

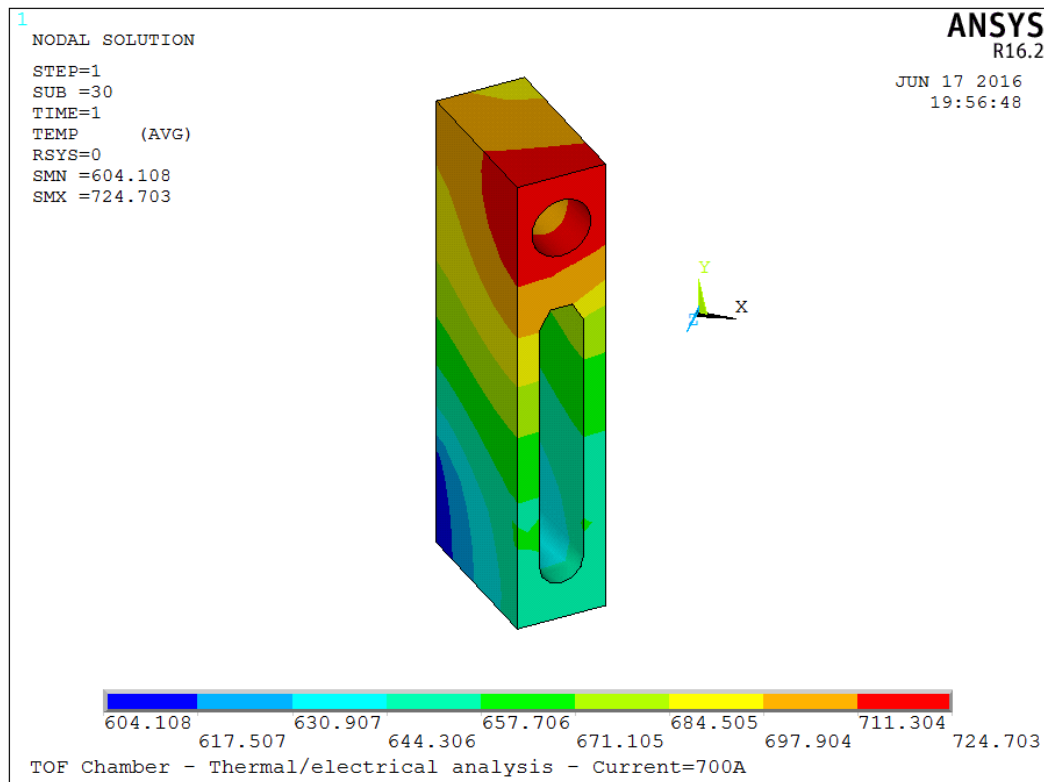


**Fig. 5.7** Distribuzione di temperatura sul componente verticale del sistema di supporto e centraggio della cella per una corrente di 800 A, nella configurazione senza gli schermi termici

In Fig. 5.8 è rappresentata la distribuzione di temperatura sul componente verticale del sistema di supporto e centraggio della cella per una corrente di 700 A, nella configurazione con gli schermetti in tantalio.

Come si può notare, alimentando la cella a 700 A non sorgono criticità riguardanti le temperature in gioco. La cella assume una temperatura di 1800°C circa, che consente comunque di svolgere la gran parte dei test sperimentali di ionizzazione in previsione.

Dunque si considererà quest'ultima come condizione limite di esercizio e non più il caso in cui si alimenti la cella ad 800 A.



**Fig. 5.8** Distribuzione di temperatura sul componente verticale del sistema di supporto e centraggio della cella per una corrente di 700 A, nella configurazione con gli schermetti in tantalio

### 5.3 - Sistema di separazione

La tecnologia KEMS si basa sull'accoppiamento tra una cella di Knudsen e uno spettrometro di massa che viene così utilizzato per l'analisi del gas di effusione.

Nella tipica struttura di una KEMS la cella, in cui è introdotto il campione e può essere collegata alla zona di ionizzazione tramite alcuni accorgimenti.

Attualmente si utilizzano sistemi che operano selezionando una frazione ulteriore del gas effuso dalla cella tramite un diaframma forato e la collimano verso la camera di ionizzazione dello spettrometro. Questa tecnologia, che prende il nome di "collimazione ristretta" (*restricted collimation*), si è sviluppata per eliminare il contributo di "flussi parassiti" che si aggiungono al flusso molecolare vero e proprio prodotto dalla cella: tali flussi parassiti sono causati da depositi di molecole che ri-vaporizzano dopo aver condensato sulle pareti calde della cella, o che diffondono all'esterno attraverso queste ultime e poi vaporizzano.

Con la collimazione ristretta seleziona solo un piccolo angolo solido del vapore effuso tramite un apposito foro praticato nel separatore posto sopra la cella e avente diametro minore rispetto al suo orifizio. In questo modo, tutte le molecole che giungono alla sorgente provengono direttamente dalla superficie del campione o da urti reciproci tra di esse. In particolare, a parità di diametro del collimatore l'angolo solido del vapore ionizzato è costante e non dipende dalle dimensioni della cella né dalla sua posizione relativa rispetto al separatore a patto che quest'ultimo rimanga entro il diametro dell'orifizio della cella (Fig. 2.11c).

Nella fase di effusione si formano alcuni ioni ancora prima dell'azione dei laser, che vengono poi accelerati dagli elettrodi estrattori e giungono al detector dopo aver percorso il tubo di deriva, andando in questo modo a falsare la misura di efficienza di ionizzazione.



Onde evitare questo problema, lo schermetto viene solitamente messo a potenziale, in modo tale da respingere questi ioni.

Sono possibili infine soluzioni a schermi multipli.

### 5.3.1 - Progettazione e definizione del modello CAD del sistema di separazione

Si è già evidenziata nel paragrafo precedente l'importanza del sistema di collimazione nella *KEMS (Knudsen Cell Mass Spectrometry)* e, dunque, si analizzeranno ora le scelte effettuate in fase di progettazione ed il modello CAD realizzato.

Per ottenere una buona collimazione ristretta, si è deciso di adoperare un sistema a doppia schermatura, più efficiente del singolo schermetto.

Il collimatore deve essere realizzato in un materiale che resista bene alle alte temperature, data la sua estrema vicinanza alla cella di Knudsen, ed il suo foro deve essere ben allineato a quello della cella stessa. Lo stesso vale per il secondo schermetto, che viene posto al di sopra di esso.

Bisogna quindi prevedere un sistema per il supporto e la regolazione in posizione di entrambi i collimatori.

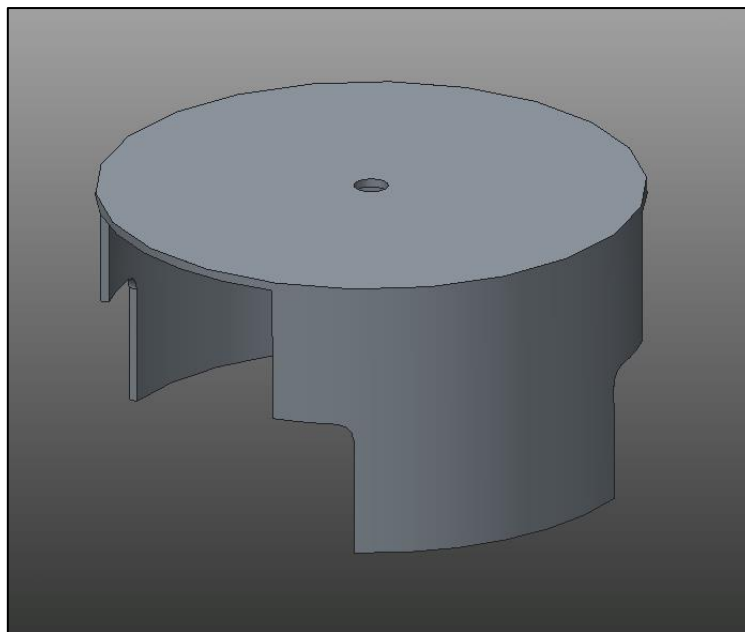
Come introdotto precedentemente, al fine di respingere gli ioni che si formano prima della ionizzazione vera e propria tramite laser compromettendo le misure di efficienza, gli schermetti devono poter essere messi a potenziale.

Infine un ulteriore vincolo progettuale è dato dai ridotti spazi disponibili all'interno della camera TOF, come si può notare osservando la Fig. 5.3.

È necessario garantire dunque un facile assemblaggio all'interno della camera e soprattutto una buona accessibilità per quanto riguarda la regolazione ed il posizionamento degli schermetti da parte dell'operatore: la regolazione deve poter avvenire dall'alto senza dover smontare altri componenti al di fuori del sistema di estrazione.

#### Schermo in Grafite

In Fig. 5.9 è presentato un primo prototipo di collimatore progettato precedentemente ai LNL [17]. Tale schermetto è in Tantalio, un materiale molto costoso e di difficile lavorazione, e possiede una geometria molto complessa di difficile realizzazione.

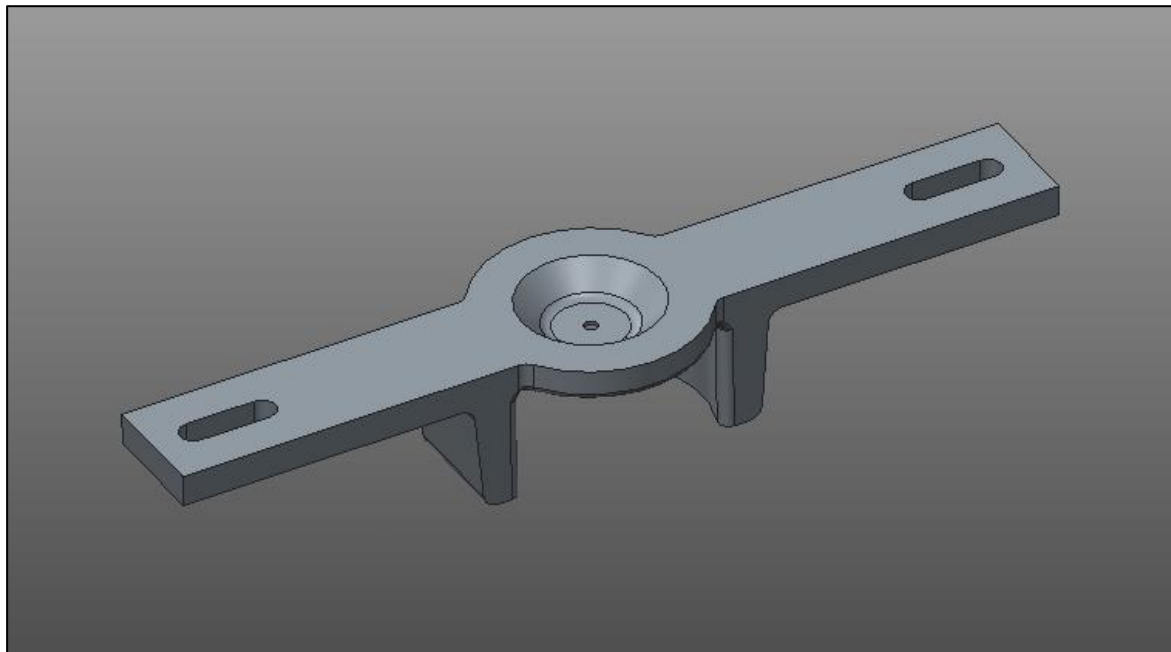


**Fig. 5.9** Prototipo di schermetto separatore in Tantalio

Si è optato quindi per una completa riprogettazione del collimatore, che è stato pensato in grafite EDM-3, la stessa utilizzata per la cella di Knudsen.

Tale materiale risulta essere decisamente più economico e di facile lavorazione del tantalio, e possiede elevate caratteristiche di resistenza alle alte temperature. Un ulteriore vantaggio dato dalla grafite EDM-3 è che essa è dotata di una rigidità molto elevata, che aumenta addirittura all'aumentare della temperatura. Ciò dovrebbe, una volta allineato il suo foro a quello della cella di Knudsen nella fase di regolazione, garantire, una volta in esercizio, un ottimo mantenimento della posizione date le ridottissime deformazioni in gioco.

Lo schermo progettato è rappresentato in Fig. 5.10.



**Fig. 5.10** Separatore in grafite

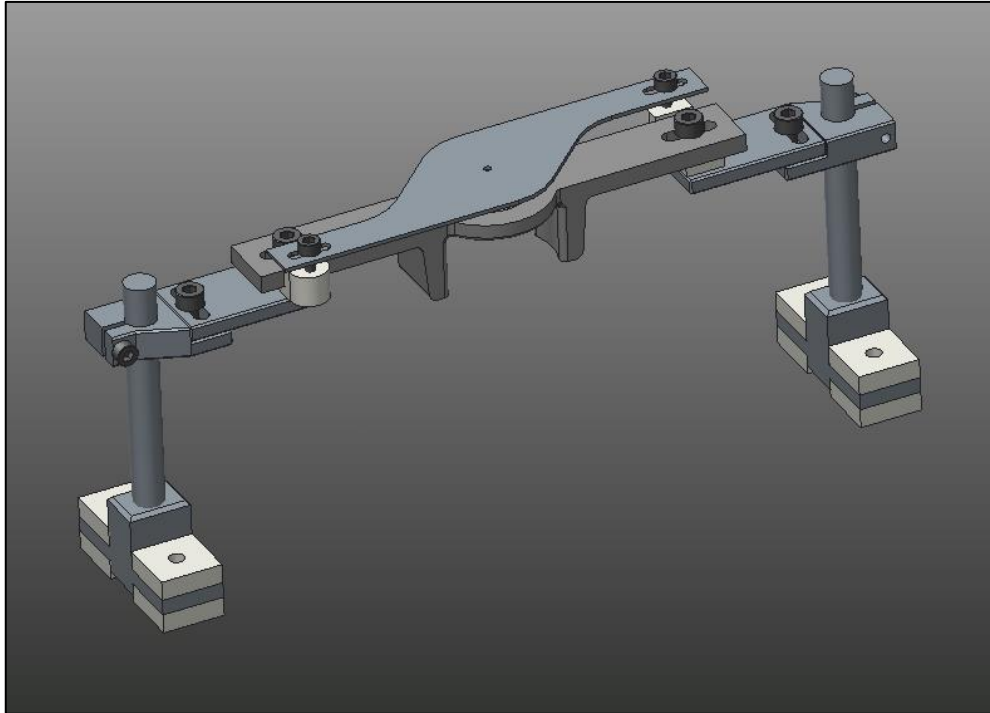
Esso è lungo 128 mm e spesso 4,5 mm per garantire una certa resistenza strutturale, essendo la grafite un materiale fragile. Centralmente possiede una geometria circolare con una sorta di collare di spessore sempre pari a 4,5 mm e con diametro esterno ed interno pari rispettivamente a 32 mm e 20 mm. Vi è poi al suo interno una zona di diametro 10 mm e spessore 0,5 mm, che si raccorda con il collare esterno tramite uno smusso da 4 mm ed un raccordo di raggio 2 mm. Al centro del disco da 10 mm appena descritto vi è il foro per la collimazione, di diametro pari a 2 mm.

Lo schermetto presenta poi due alette inferiori lunghe 16 mm, che hanno il duplice scopo di evitare una eccessiva dispersione del cono di effusione (evitando quindi di sporcare eccessivamente la camera TOF) e di schermare termicamente i componenti del sistema di supporto e regolazione del collimatore (che verrà descritto successivamente in dettaglio) più vicini alla cella.

È importante notare come si sia cercato di evitare la presenza di spigoli vivi tramite numerosi raccordi al fine di evitare intensificazioni delle tensioni, che per un materiale fragile come la grafite sarebbero problematiche.

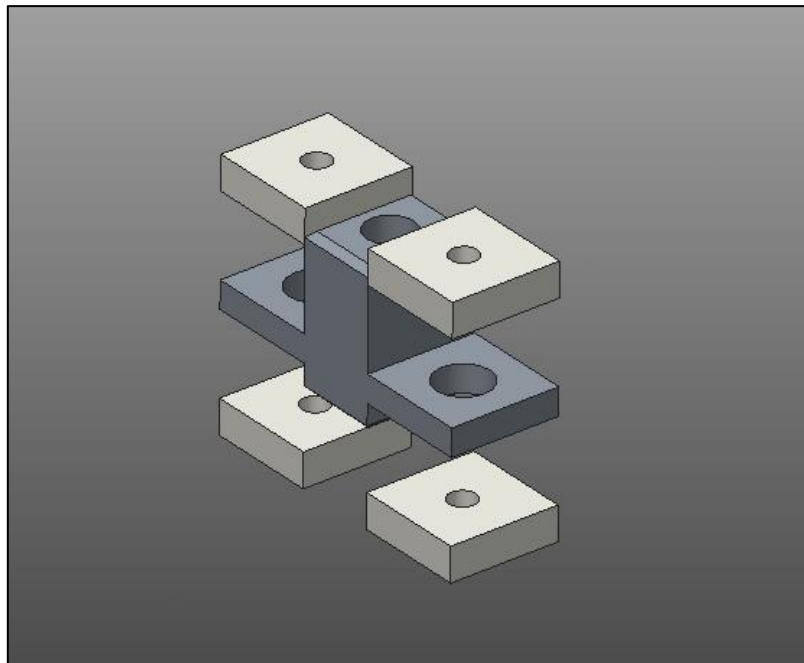
#### Sistema di supporto e regolazione del collimatore

Il sistema di supporto e regolazione del collimatore, rappresentato in Fig. 5.11, si compone di diversi elementi.



**Fig. 5.11** Sistema di separazione

Partendo dalla base abbiamo un primo componente in AISI 316L, accoppiato a dei blocchetti isolanti in MACOR (Fig. 5.12). Dall'immagine si può osservare come la tecnica di isolamento adottata sia la medesima utilizzata per il sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen: i 4 blocchetti quadrati in MACOR di lato 16 mm e spessore 5 mm possiedono un foro di diametro 4 mm, inferiore a quello del componente in acciaio, che è invece di 8 mm. In questo modo le viti in acciaio inox che fissano il supporto al piatto base della camera TOF non sono a contatto con il metallo del supporto del collimatore e quindi lo isolano elettricamente, consentendo in questo modo di poterlo mettere a potenziale.

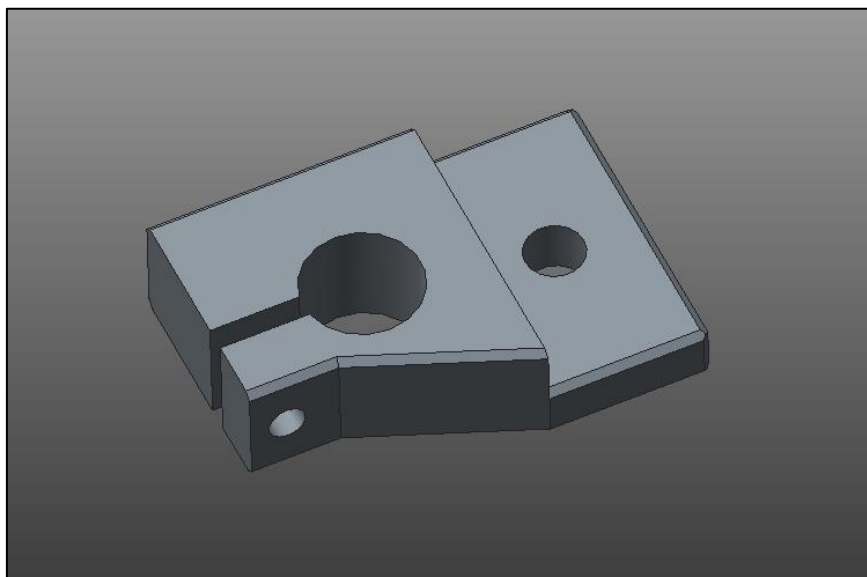


**Fig. 5.12** Vista esplosa del sistema di isolamento del sistema di supporto e regolazione del separatore

Il componente a forma di T possiede poi sulla superficie superiore un foro cieco filettato M8x1, nel quale viene avvitato un componente cilindrico in AISI 316L di diametro 8 mm, lungo 75 mm filettato nell'ultimo tratto di 15 mm anch'esso con filettatura M8x1.

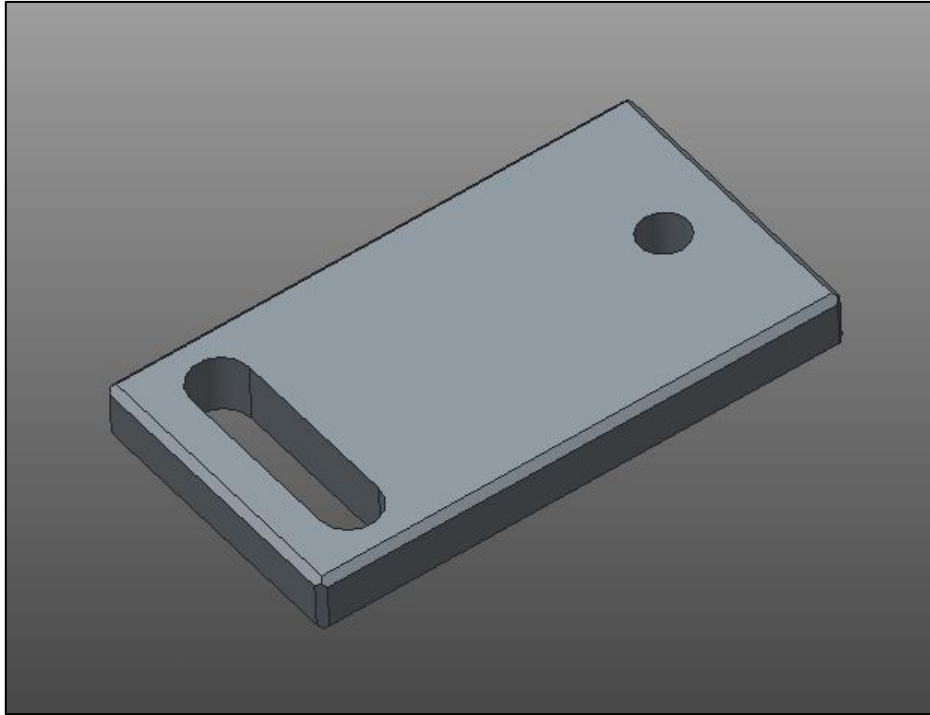
Esso costituisce una guida verticale lungo la quale un terzo componente, rappresentato in Fig. 5.13, può scorrere ed essere fissato. Tale componente è realizzato in AISI 316L e possiede un foro di diametro 8 mm che realizza l'accoppiamento con il pezzo cilindrico, ed una fessura che va dalla superficie esterna fino al foro stesso e che garantisce una maggiore deformabilità e quindi capacità di serraggio per poterlo bloccare tramite una vite M3 una volta effettuato il posizionamento del pezzo: ciò costituisce il sistema di regolazione verticale del collimatore. La regolazione verticale consente una distanza massima dalla superficie superiore della cella di Knudsen pari a 13 mm.

Il suo spessore è di 8 mm ma possiede un gradino alto 4 mm, e nella zona di spessore 8 mm vi è un foro passante M4x7: il gradino funge da guida per un altro componente regolabile in posizione che viene avvitato tramite una vite M4.



**Fig. 5.13** *Componente per la regolazione verticale del sistema di supporto e posizionamento del collimatore*

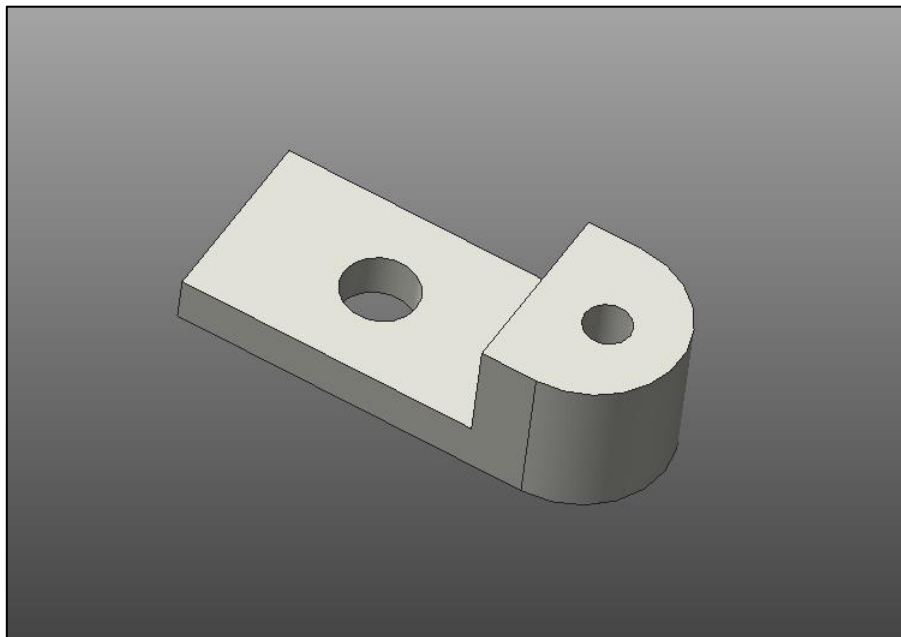
Tale pezzo è presentato in FIGURA: è costituito anch'esso di acciaio AISI 316L e permette una regolazione di 6 mm per lato lungo la direzione trasversale rispetto alla cella di Knudsen, grazie ad un'asola di diametro 3 mm. Vi è poi un foro filettato M4x7 che serve per il montaggio dello schermetto in grafite.



**Fig. 5.14** Componente per la regolazione trasversale del sistema di supporto e posizionamento del collimatore

Come si è detto in precedenza, però, si è ritenuto opportuno dotare il sistema di separazione di due schermetti isolati tra di loro in modo da poter essere messi a potenziale. Si è quindi progettato un sistema per il montaggio e l'isolamento di un ulteriore schermetto.

Tale sistema è rappresentato in Fig. 5.15: è costituito di MACOR e presenta un foro M4 centralmente. Presenta una zona di spessore ridotto (2,5 mm) nella quale è praticato il foro appena citato, che viene interposta tra il componente in AISI 316L della precedente immagine ed il separatore in grafite. Vi è poi un'altra zona che sporge esternamente e si sviluppa in altezza seguendo il profilo laterale dello schermo in grafite e superandolo in altezza di 1 mm, nella quale è praticato un foro passante M3x.5 che serve per il montaggio (e l'isolamento) del secondo schermetto.



**Fig. 5.15** Isolatore in MACOR per lo schermetto superiore in Tantalio

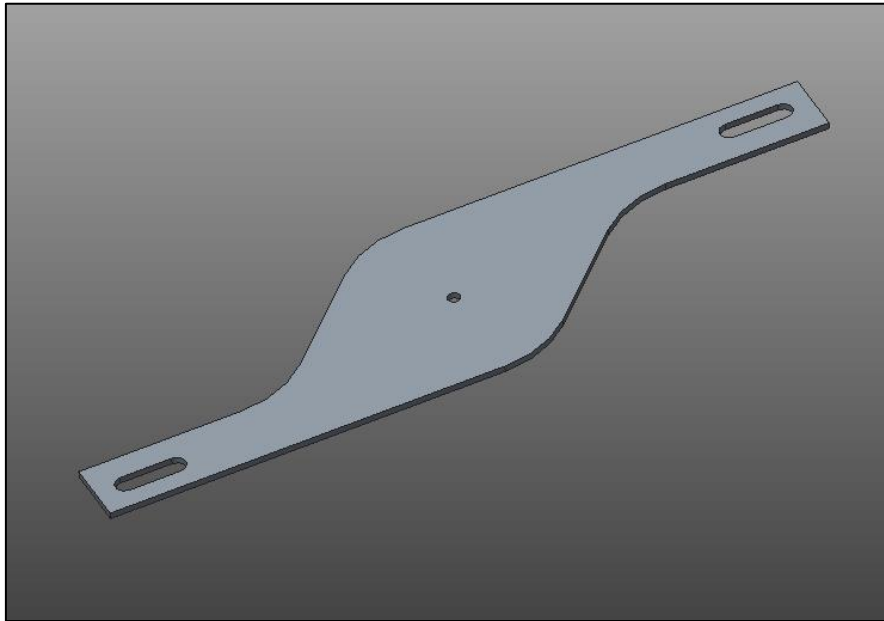
### Schermo in Tantalio

Per quanto riguarda lo schermo superiore, si è optato per realizzarlo con un sottile foglio di Tantalio dello spessore di 1 mm.

Questa scelta è stata effettuata per far fronte ad una mancanza di spazio disponibile nella camera TOF a causa della vicinanza del sistema di estrazione, che non avrebbe consentito una soluzione con doppio schermo di grafite.

Inoltre il primo separatore funge da schermo termico riducendo la temperatura sul secondo, che quindi è meno soggetto a deformazioni e resta allineato più facilmente anche ad alte temperature di esercizio.

Lo schermo, rappresentato in Fig. 5.16, viene montato ai componenti in MACOR prima descritti tramite una vite M3, e presenta due asole di diametro 3 mm che consentono una regolazione di 8 mm per lato. La geometria asimmetrica è stata utilizzata per cercare di limitare il più possibile le deformazioni e il disallineamento.



**Fig. 5.16** Schermo in tantalio

### 5.3.2 - Modello FE e analisi dei dati numerici

Il sistema di separazione progettato prevede dei componenti in acciaio AISI 316L e MACOR che, a differenza di grafite e tantalio, presentano delle temperature massime di utilizzo non molto elevate, rispettivamente pari a circa 750°C e 800÷1000°C.

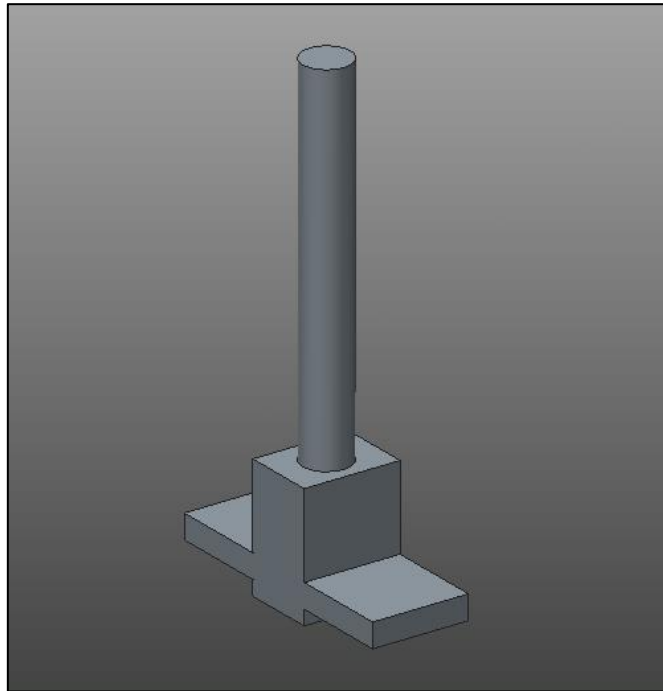
Si deve quindi effettuare un'analisi FE elettro-termica con lo scopo di valutare le temperature raggiunte da tali componenti nelle condizioni più critiche di esercizio.

Il primo passo è definire il modello geometrico. Esso sarà costituito dal modello geometrico in FIGURA descritto prima nel paragrafo 5.2.2, al quale verrà poi aggiunto, dopo averlo semplificato opportunamente, il sistema di separazione progettato.

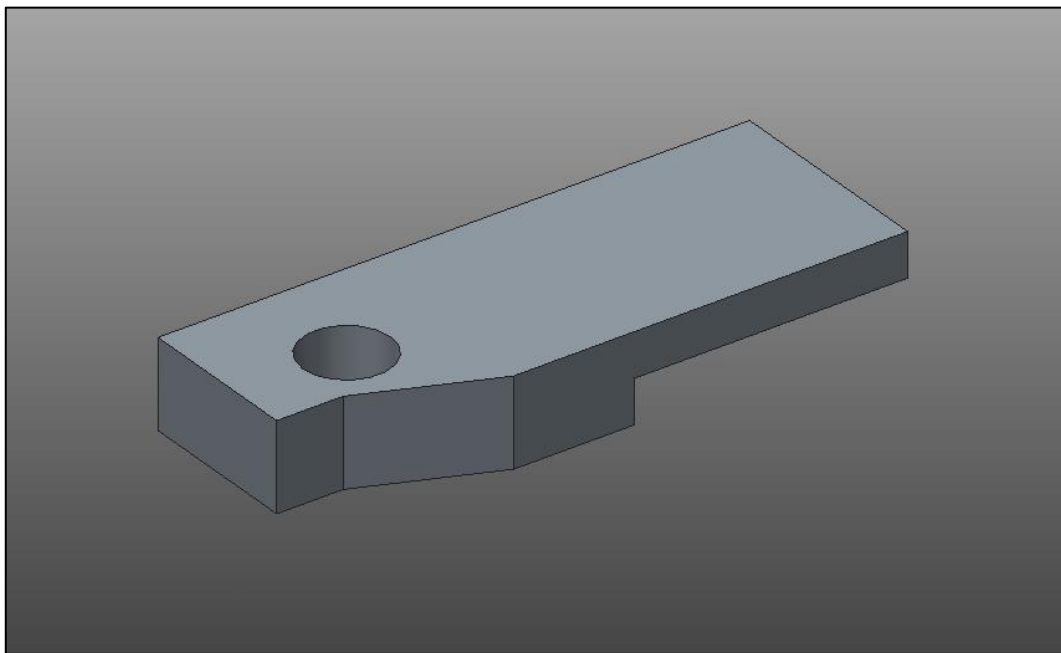
Dunque, come si è appena evidenziato, i modelli geometrici della camera TOF, della cella di Knudsen e del suo sistema di alimentazione, del sistema di supporto e centraggio e degli schermi termici sono già stati definiti e discussi in precedenza e, pertanto, ci si soffermerà ora sulla definizione del modello geometrico del sistema di separazione.

La prima semplificazione effettuata è stata la rimozione delle viti e dei fori dal modello CAD di ciascuno dei suoi componenti, dato che non sono influenti dal punto di vista dei risultati dell'analisi termoelettrica da effettuare.

Si sono poi uniti in un unico componente la base del supporto ed il componente cilindrico (Fig. 5.17). Lo stesso è stato fatto per il componente del sistema di supporto del separatore per la regolazione verticale e quello per la regolazione trasversale (Fig. 5.18).

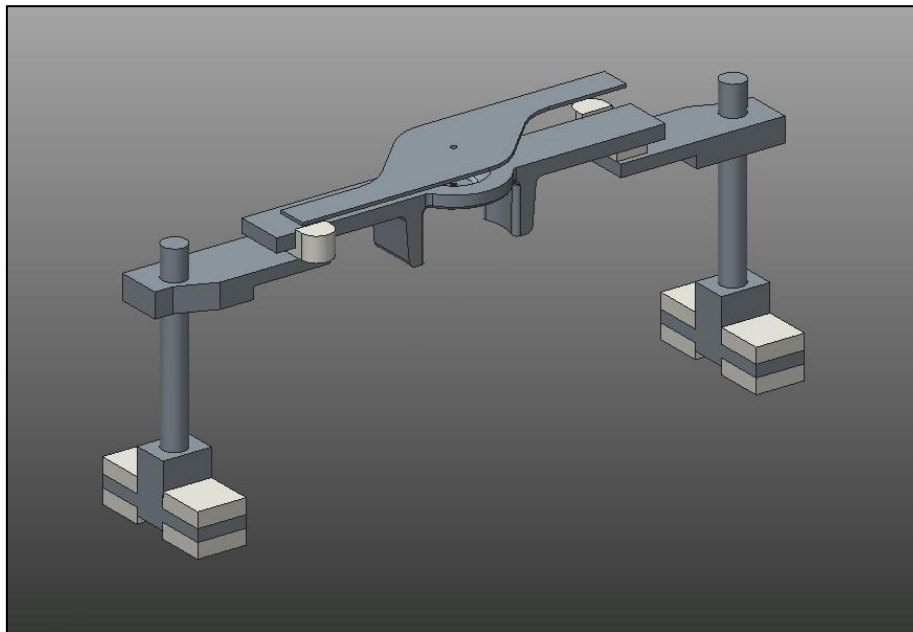


**Fig. 5.17** *Componente semplificato del sistema di separazione ottenuto dall'unione della base del supporto e del componente cilindrico*



**Fig. 5.18** *Componente semplificato per le analisi FE ottenuto dall'unione del componente per la regolazione verticale e quello per la regolazione trasversale*

La geometria semplificata del sistema di collimazione così ottenuta è rappresentata in Fig. 5.19.



**Fig. 5.19** *Modello geometrico del sistema di separazione per le analisi FE*

Il modello numerico di camera TOF, cella di Knudsen, sistema di alimentazione, sistema di supporto e centraggio e schermi termici in tantalio è il medesimo adottato nell'analisi descritta nel paragrafo 5.5.2, e quindi non verrà descritto nuovamente.

Invece, per quanto riguarda il sistema di separazione, si è optato per una meshatura FREE con elementi SOLID 87.

Si è usato tale elemento tridimensionale anche per lo schermetto superiore in tantalio, che in realtà possiede uno spessore molto ridotto: non si è ritenuto necessario adottare elementi shell perché l'incidenza in termini di riduzione dei tempi di calcolo sarebbe stata minima.

L'analisi è stata effettuata in modalità *STATIC* imponendo una corrente di alimentazione di 700 A, in concordanza con quanto affermato nel paragrafo 5.2.3.

Il modello numerico è esposto in Fig. 5.20.



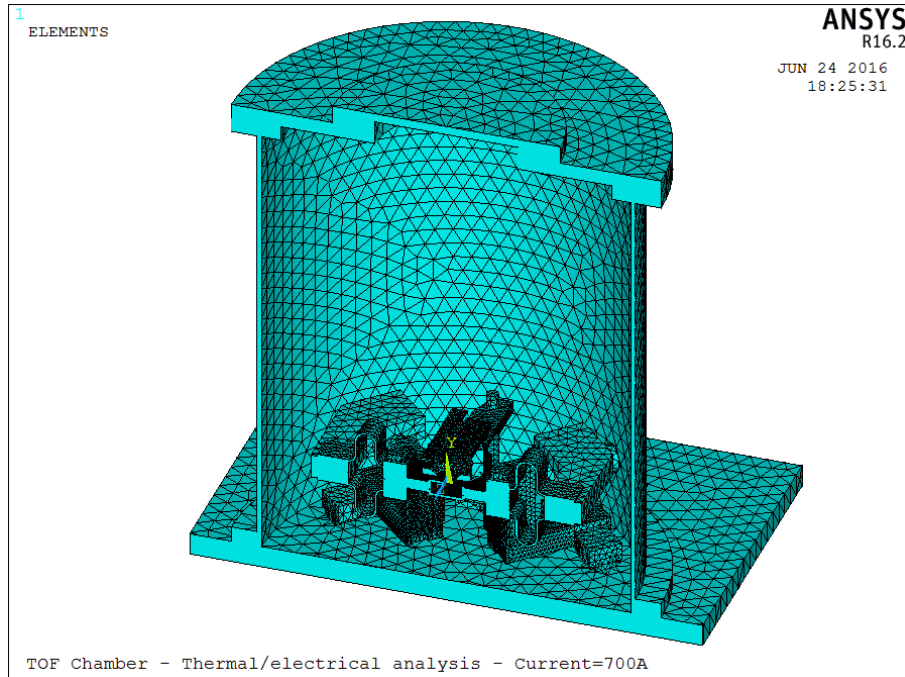


Fig. 5.20 Modello numerico della camera TOF

### 5.3.3 - Discussione dei risultati

L'analisi numerica effettuata ha lo scopo di valutare il comportamento del sistema di separazione alle condizioni più critiche di esercizio, ovvero quando la cella viene alimentata con una corrente di 700 A. Come si può notare dalla Fig. 5.21, nessun componente presenta delle criticità in termini di temperatura raggiunta.

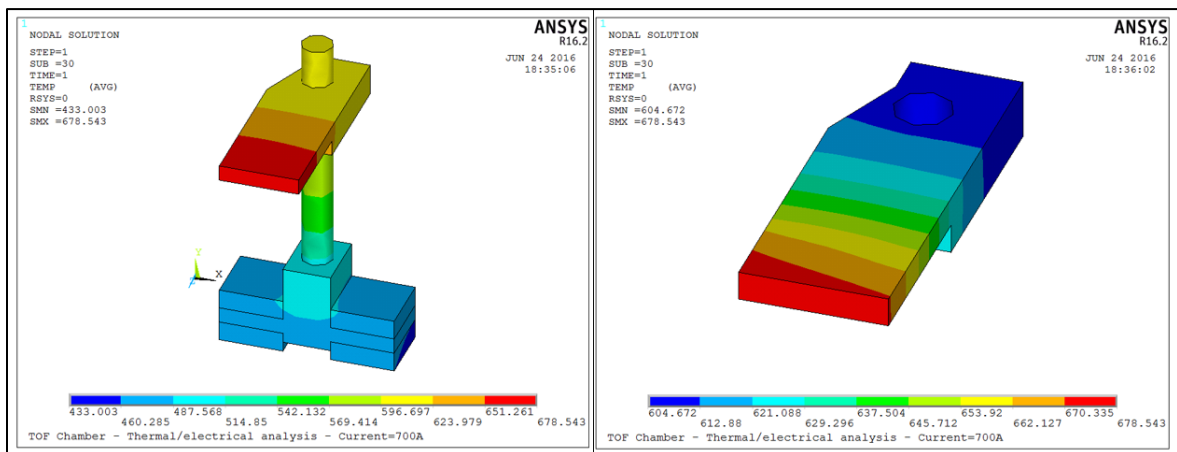


Fig. 5.21 (a) Distribuzione delle temperature sul sistema di supporto del separatore. (b) Distribuzione di temperatura sul componente più sollecitato termicamente

Inoltre, i risultati espressi in Fig. 5.22 mostrano come l'utilizzo dello schermo in grafite al posto di quello in tantalio (Fig. 5.23) aumenti ulteriormente l'uniformità della distribuzione di temperatura sulla cella di Knudsen.

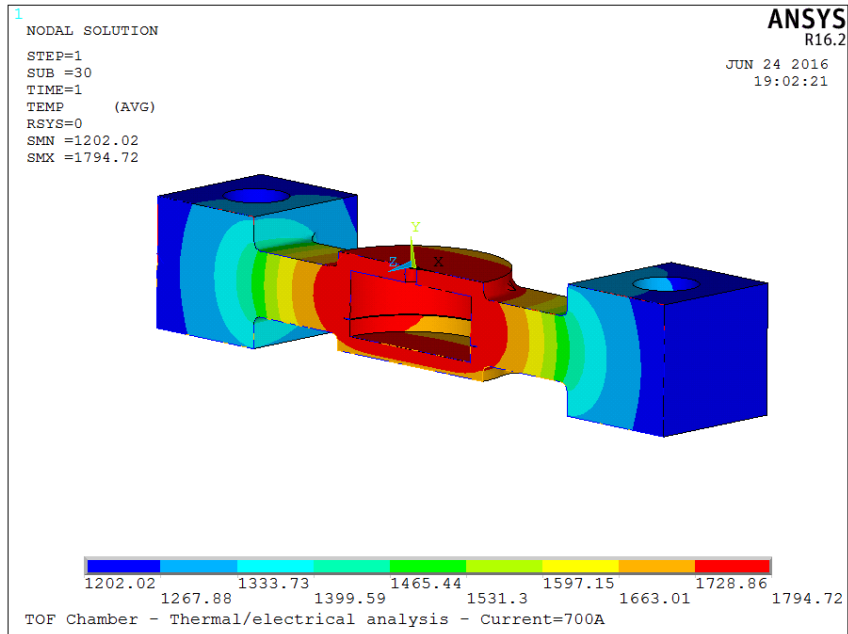


Fig. 5.22 Distribuzione di temperatura sulla cella di Knudsen nella configurazione con lo schermo in grafite

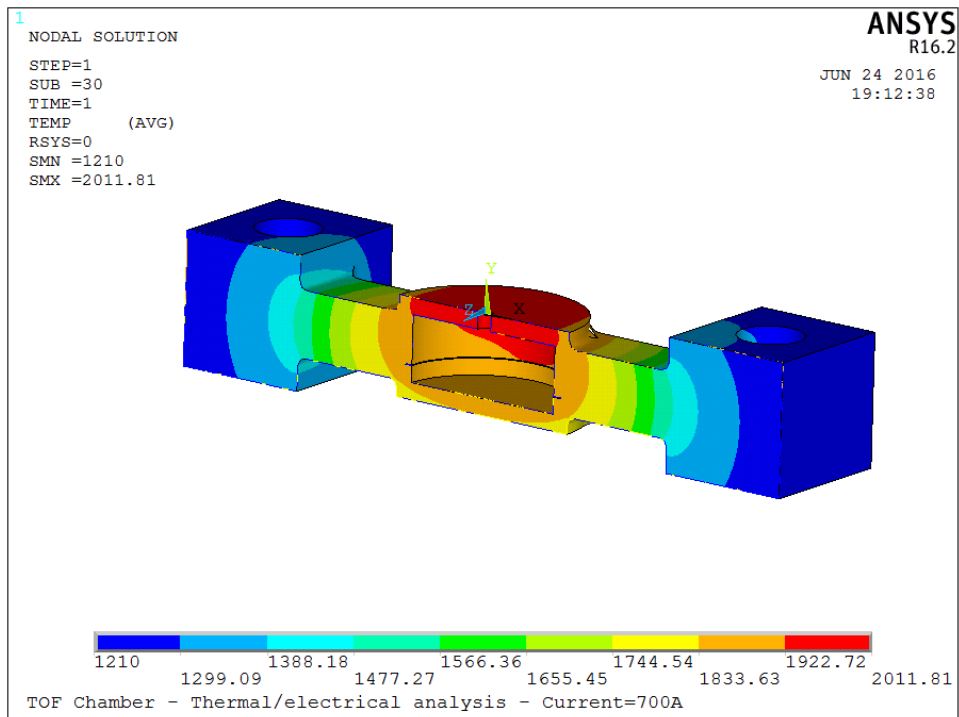


Fig. 5.23 Distribuzione di temperatura sulla cella di Knudsen nella configurazione con lo schermo in tantalio

### 5.4 - Conclusioni

In questo capitolo sono state espone le fasi di progettazione del sistema di separazione della cella di Knudsen, che verrà inserito assieme ad essa all'interno della camera TOF.

I supporti, costituiti da componenti in acciaio AISI 316L e MACOR, garantiscono 3 livelli di regolazione: una regolazione in altezza e due regolazioni laterali.

Al fine di mettere in luce eventuali criticità, si sono effettuate delle analisi FE utilizzando il codice ANSYS®.

La distribuzione di temperature ottenuta numericamente per una corrente di alimentazione di 700 A ha evidenziato come nessun componente presenta delle criticità in termini di temperatura massima raggiunta.

Inoltre, l'utilizzo dello schermo in grafite al posto di quello in tantalio aumenta ulteriormente l'uniformità della distribuzione di temperatura sulla cella di Knudsen.



# Capitolo 6

## Analisi di effusione del piombo attraverso la cella di Knudsen

### 6.1 - Introduzione

Il principale obiettivo dell'apparato in fase di sviluppo sarà quello di testare l'efficienza di ionizzazione dei laser risonanti. L'utilizzo della cella di Knudsen, come sottolineato nei precedenti capitoli, permette di conoscere con precisione la forma e la distribuzione degli atomi messi a disposizione per la ionizzazione. Sarà quindi possibile in questo modo stimare, considerando il volume di interazione del fascio laser, il numero di atomi teoricamente ionizzabili.

Conoscendo la forma del cono di effusione dato dall'evaporazione del campione dalla cella, il volume di azione del fascio laser focalizzato (corrispondente a un cilindretto di diametro 2 mm e lunghezza 10 mm), le proprietà del laser (frequenza di impulso), la tensione e la configurazione del sistema di estrazione e la velocità delle particelle è possibile determinare il numero di atomi teoricamente ionizzati. Rapportando questo valore alla corrente del fascio di ioni letta dal sistema di diagnostica posto nella parte terminale del condotto a tempo di volo è possibile stimare l'efficienza di ionizzazione del laser utilizzato. Dunque risulta di fondamentale importanza la conoscenza della forma del cono di effusione. In questo capitolo si descriveranno i test sperimentali di effusione condotti per determinare la forma del cono di effusione e si confronteranno tali risultati con quelli ottenuti numericamente al calcolatore utilizzando il software MOLFLOW®.

### 6.2 - Test sperimentali

Per studiare l'efficienza di ionizzazione è importante conoscere il volume di interazione del fascio laser per stimare il numero di atomi teoricamente ionizzabili.

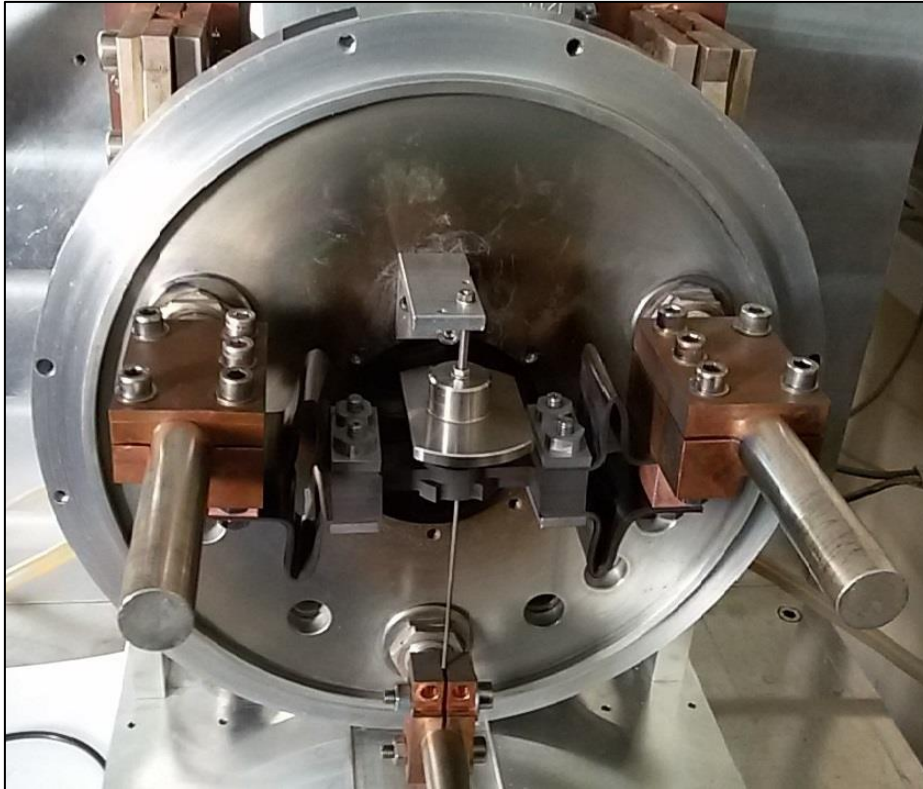
Risulta dunque di fondamentale importanza conoscere le dimensioni del cono di effusione. A tal fine si sono effettuati dei test sperimentali di effusione, che verranno ora descritti.

Le prove sono state eseguite utilizzando l'apparato sperimentale per prove ad alte temperature già descritto nel CAP. 3.

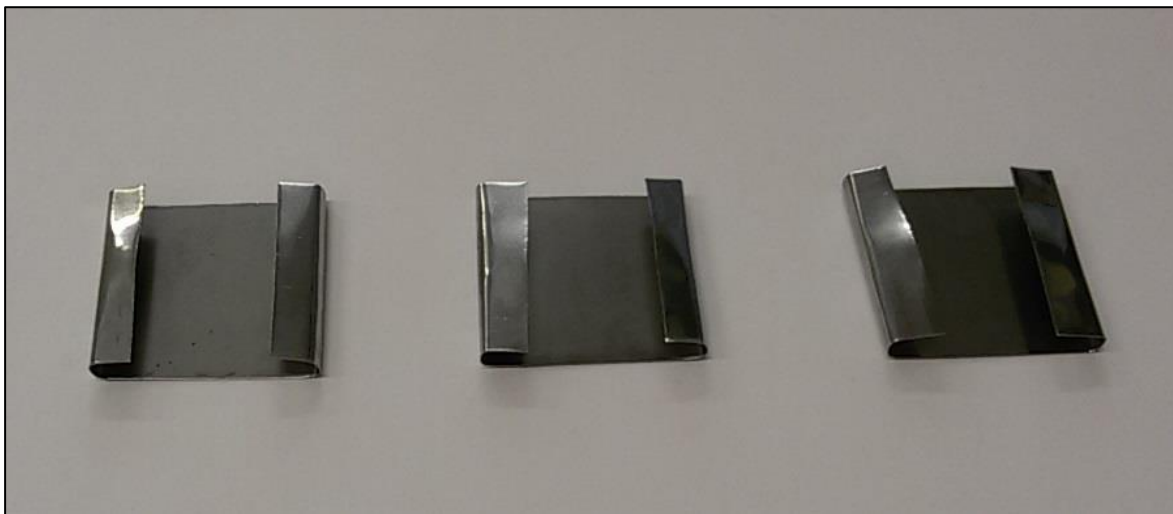
Si è poi aggiunto un sistema dotato di un componente ad L in alluminio posizionato sopra la cella di Knudsen, avvitato al piatto raffreddato della camera tramite una vite M5, e di un piatto in acciaio forato centralmente.

Il componente ad L possiede un foro filettato e ciò consente, tramite una vite M2, di assemblare ad esso il piatto in acciaio e regolare la sua distanza dalla cella. Il sistema è rappresentato in Fig. 6.1.

Sono stati poi preparati dei campioni in molibdeno sagomandoli in maniera tale da consentire il loro montaggio sul piatto in acciaio (Fig. 6.2). Il materiale effuso si depositerà sul campione che, con questa configurazione, risulta agevolmente sostituibile, in modo da poter effettuare ulteriori esperimenti senza dover smontare l'intero sistema. Si è scelto il molibdeno perché resiste alle alte temperature e consente di schermare il piatto in acciaio che potrebbe rovinarsi quando la cella viene portata a temperature elevate.



**Fig. 6.1** Sistema per i test di effusione installato nella camera muletto



**Fig. 6.2** Campioncini in molibdeno

Si è scelto poi di effettuare le prove di effusione con il piombo (Pb). Osservando il grafico in Fig. 6.3 si può notare come il piombo, per valori di pressione nell'ordine dei  $10^{-6}$  mbar (ovvero quelli presenti nella camera muletto durante i test), evapori a circa  $400^{\circ}\text{C}$ . Tale temperatura è relativamente bassa se comparata a quella di altri elementi. Ciò consente di non danneggiare il componente ad L in alluminio ed il piatto in acciaio, le cui temperature limite di utilizzo sono rispettivamente  $600^{\circ}\text{C}$  e  $750^{\circ}\text{C}$ . Dunque per le prove si è utilizzato filo di saldatura Pb93,5SnAg1,5 a disposizione dei LNL.

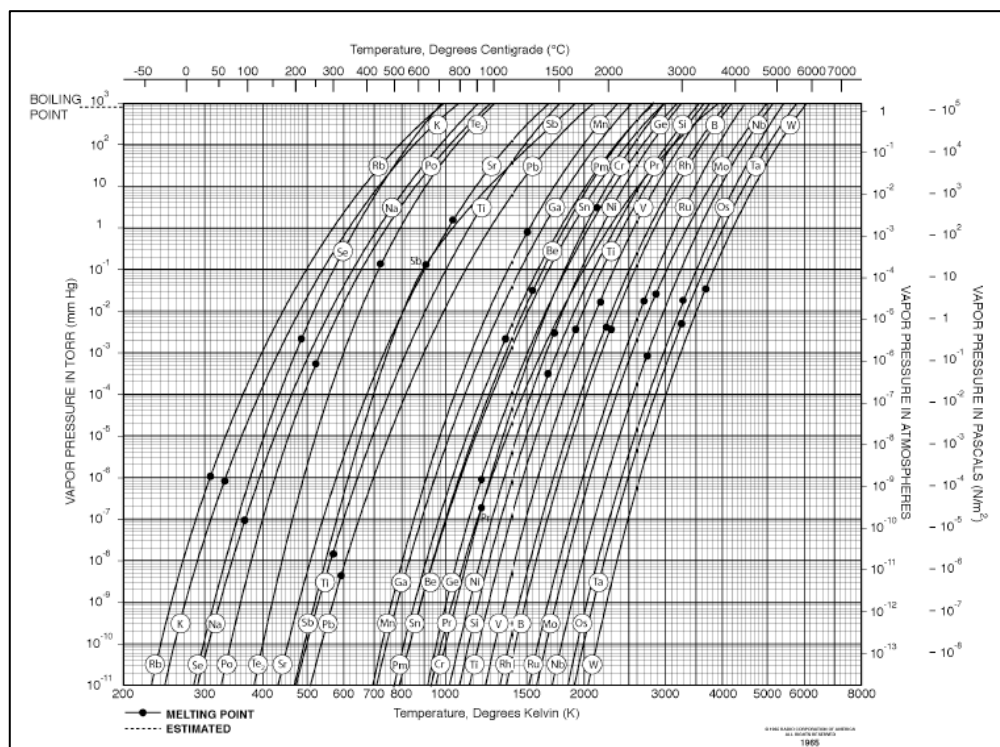


Fig. 6.3 Grafico della pressione di vapore per vari elementi

Si è deciso di effettuare tre test, posizionando il provino in molibdeno a tre diverse altezze dalla cella di Knudsen: 5 mm, 10 mm e 15 mm.

Prima di ciascuna prova si è inserito dal foro della cella di Knudsen un pezzetto lungo 8 mm di filo di saldatura Pb93,5SnAg1,5 e si è poi messo in vuoto il sistema (circa  $10^{-6}$  mbar).

Le prove sono state effettuate alimentando la cella con una corrente di 250 A per 2 ore, con rampe di salita e discesa di 20 A ogni 2 minuti.

In Fig. 6.4 è illustrato il setup per la prova a 10 mm di altezza mentre in Fig. 6.5 il relativo campione ottenuto.

I risultati sperimentali ottenuti verranno discussi in dettaglio nel seguente paragrafo.

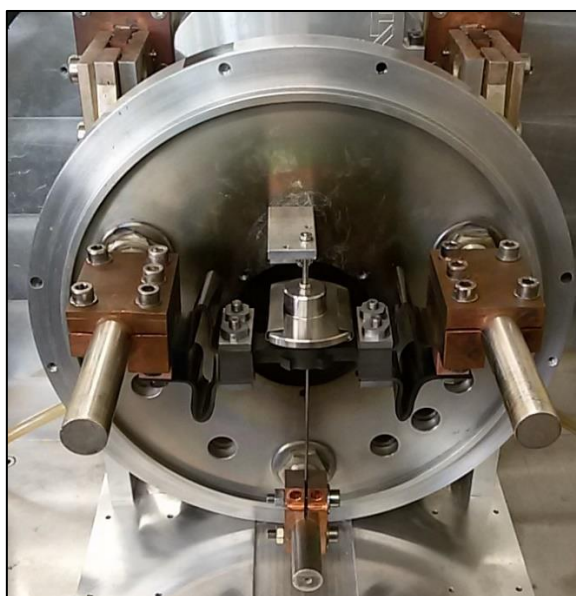
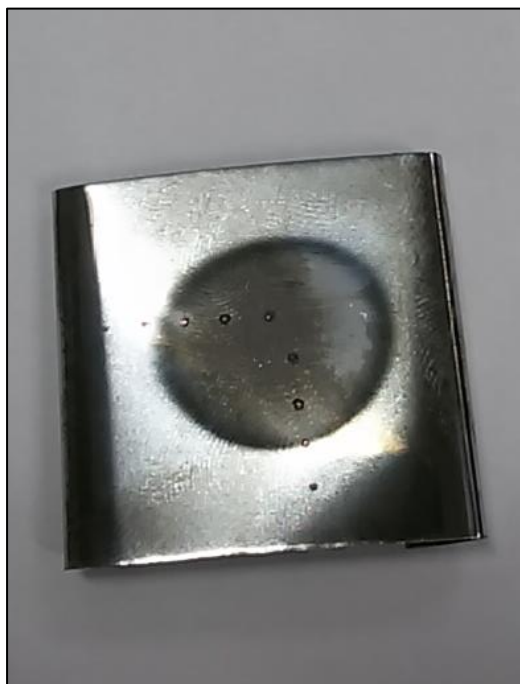


Fig. 6.4 Prova sperimentale con campione posizionato a 10 mm dalla superficie della cella di Knudsen



**Fig. 6.5** *Provino ottenuto dalla prova di effusione con campione posizionato ad una distanza di 10 mm dalla cella di Knudsen*

### **6.3 - Analisi dei campioni ottenuti al microscopio SEM**

I campioni ottenuti devono poi essere analizzati. È importante infatti capire se si sia effettivamente depositato del piombo sulla superficie dei provini in molibdeno e quale sia il diametro di tale deposito.

A tal proposito si è fatto uso della spettroscopia EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis), una metodologia non distruttiva e molto rapida che sfrutta l'emissione di raggi X generati da un fascio elettronico incidente sul campione.

#### **6.3.1 - Il microscopio SEM**

Lo strumento utilizzato per fare queste analisi è il microscopio elettronico a scansione (SEM). Esso si compone di un emettitore costituito da un filamento di tungsteno o di esaboruro di lantanio (più costoso ma dotato di un miglior rendimento energetico ed una migliore sensibilità) che, riscaldato elettricamente e portato oltre i 1000°C, funge da sorgente di elettroni per effetto termoionico.

Il fascio di elettroni così generato viene accelerato da una differenza di potenziale che può variare dai 0,3 ai 30 KV e viene deflesso da un collimatore elettromagnetico e diretto verso il piatto contenente il campione in esame.

Quando un fascio di elettroni incide su un campione gli elettroni degli strati K, L o M (in base all'energia del fascio stesso) vengono espulsi e il sistema assume configurazione ad alta energia. A seguito del rilassamento elettronico, avviene che un elettrone L o M cade in un orbitale libero dello strato K o un elettrone M torna nel guscio L occupando un orbitale vuoto; l'emissione di energia può seguire due vie: può essere emesso un fotone X alla lunghezza d'onda corrispondente, oppure può essere emesso un elettrone per effetto Auger. L'energia in questione dipende dal livello dal quale ho rimosso l'elettrone e dal livello dal quale gli elettroni "scendono" per occupare la posizione di quelli scalzati.

L'energia è indicata con la lettera E ed è accompagnata da tre pedici che indicano, nell'ordine, il livello dal quale ho scalzato l'elettrone, il livello dal quale arrivano gli elettroni (indicato la lettera greca  $\alpha$  se è quello immediatamente superiore,  $\beta$  se è il successivo, e così via) ed il sottolivello di quest'ultimo (i livelli K, L ed M hanno diversi sottolivelli energetici, indicati con numeri arabi).



Per attivare un meccanismo che richiede un'energia  $E$ , il fascio elettronico deve avere un'energia almeno pari ad  $E$ , ma è molto meglio se l'energia del fascio è  $2÷e$  volte maggiore.

Al fine di aumentare il cammino medio degli elettroni e di evitare fenomeni di diffusione dovuti ad interazioni aria-elettrone, il sistema viene mantenuto sotto vuoto, a circa  $10^{-4} ÷ 10^{-6}$  mbar.

Vi è infine un rivelatore, che può essere di due tipologie diverse:

- Rivelatore a dispersione di lunghezza d'onda (WDS): è costituito da un cristallo ricurvo detto "cerchio di Rowland", dotato di un determinato passo  $d$  del reticolo cristallino. Su tale cristallo sono disposti il campione ed il contatore di fotoni. La legge di Bragg afferma che solamente una determinata lunghezza d'onda (che può essere variata ruotando il rivelatore) può essere riflessa sul contatore.
- Rivelatore a dispersione di energia (EDS): sono i rivelatori più utilizzati e sfruttano l'interazione energetica tra i raggi X ed un opportuno materiale. È costituito da un monocristallo di silicio drogato con litio, rivestito alle due estremità con uno strato conduttivo in oro, mantenuto in alto vuoto e alla temperatura di  $-192$  °C con azoto liquido. Nei rivelatori più moderni il cristallo in silicio è stato sostituito con uno in germanio ad elevata purezza, che consente di ottenere una maggiore efficienza. Il funzionamento si basa sul fatto che l'interazione tra fotoni e cristallo produce una corrente elettrica, che viene poi amplificata.

Il microscopio che si è adoperato per le analisi ha un rivelatore di tipo EDS. Il detector è in grado di separare i conteggi in base all'energia consentendo di ottenere diagrammi come quello in Fig. 6.9.

In Fig. 6.6 è rappresentato lo schema di funzionamento di un microscopio SEM.

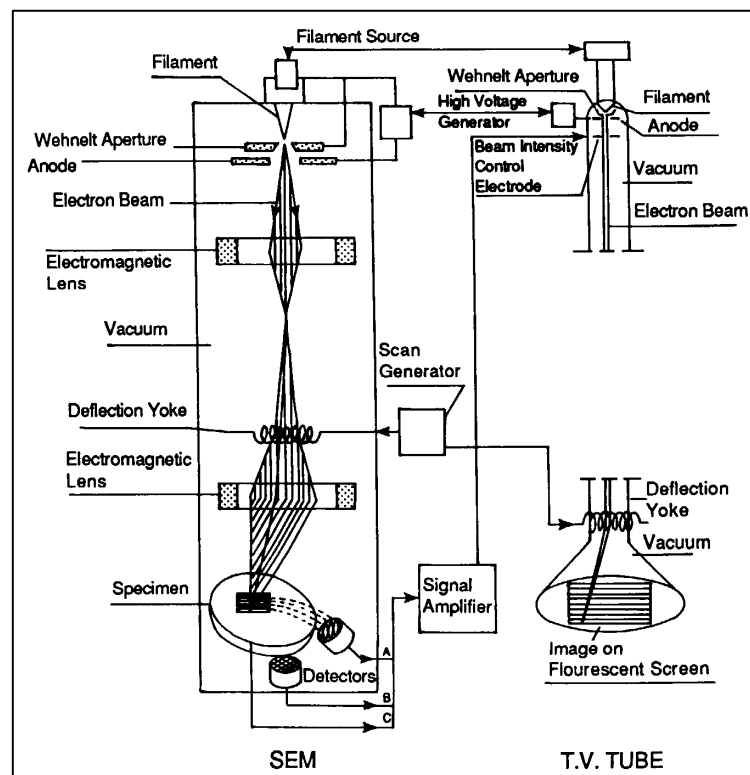


Fig. 6.6 Schema di funzionamento del microscopio elettronico a scansione (SEM)

### 6.3.2 - Risultati delle analisi sperimentali

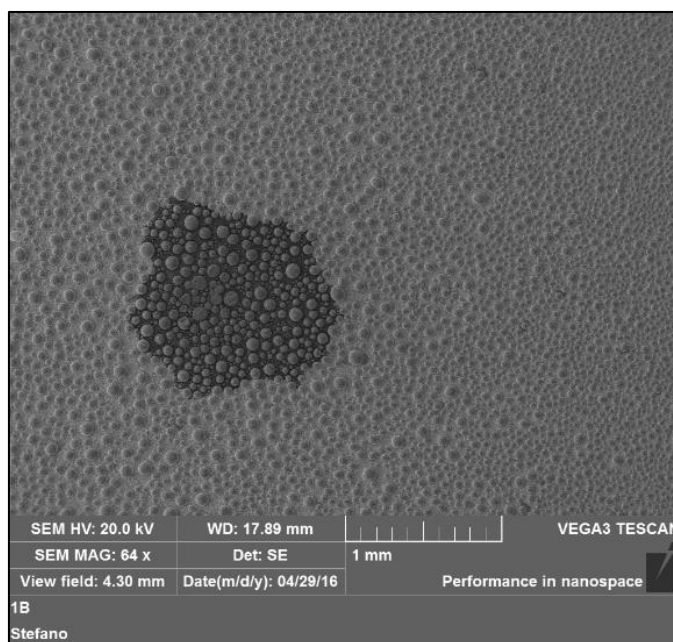
Dei tre campioni ottenuti si è effettuata l'analisi al SEM per quello posto a 10 mm di distanza dal foro della cella di Knudsen.

L'obiettivo è quello di valutare qualitativamente se si sia depositato del piombo sul provino in molibdeno e, in tal caso, stimare il diametro del deposito. Un'analisi quantitativa non è resa possibile dallo strumento adottato, che non è in grado di valutare la quantità di materiale che si è depositata. Sul campione in esame sono stati tracciati dei punti di riferimento con il pennarello lungo due direzioni perpendicolari, come in Fig. 6.7, che sono stati poi numerati in modo tale da avere dei riferimenti di posizione.

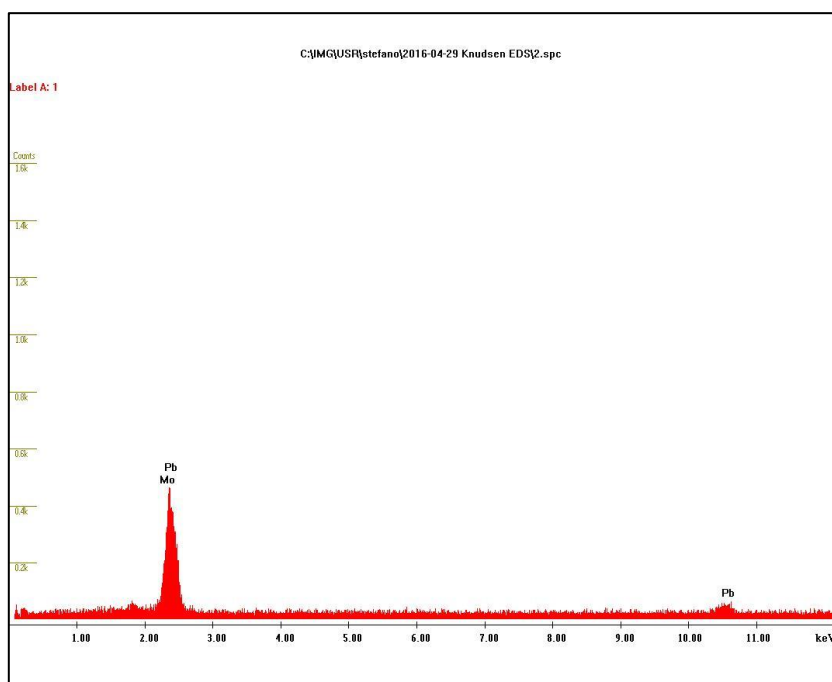


**Fig. 6.7** Riferimenti numerati sul campione posto a 10 mm di distanza dalla cella

La prima analisi è stata effettuata considerando la zona vicino al punto 2. L'immagine ottenuta al SEM utilizzando un fascio di elettroni di 20 KeV è rappresentata in Fig. 6.8, mentre il grafico ottenuto dall'EDS è mostrato in Fig. 6.9.

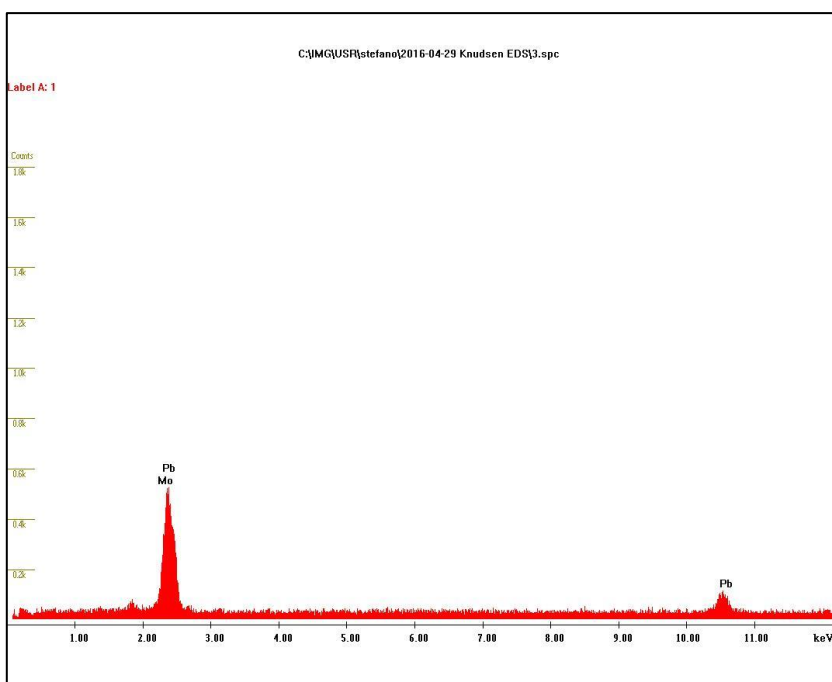


**Fig. 6.8** Immagine ottenuta al SEM della zona adiacente al riferimento numero 2



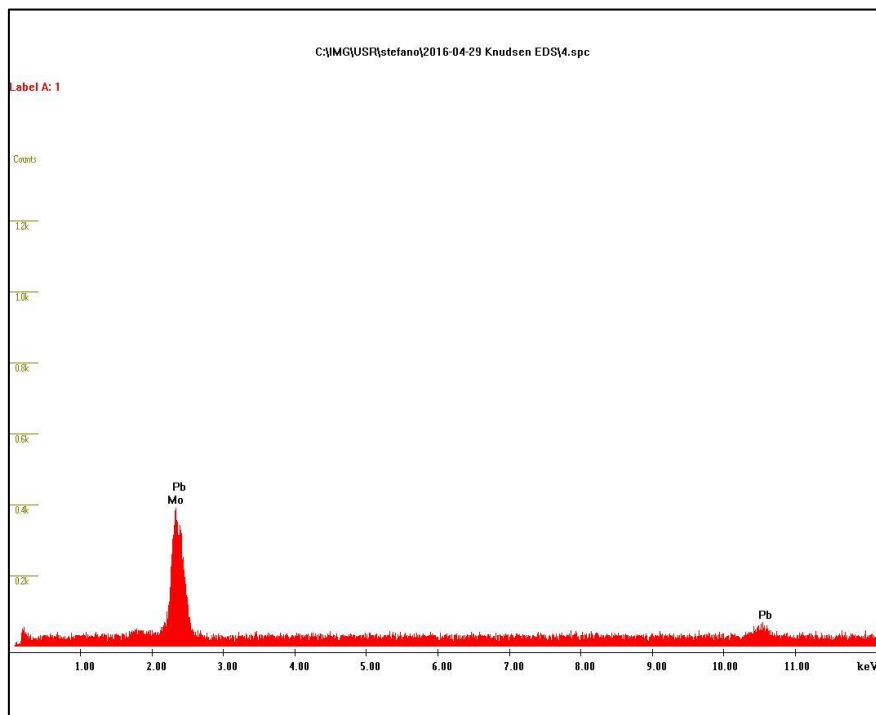
**Fig. 6.9** EDS della zona raffigurata in Fig. 6.8. L'energia del fascio di elettroni usato è di 20KeV

Come si può notare dal grafico il picco relativo al piombo ed al molibdeno sono sovrapposti. Infatti l'energia  $E_{L\alpha}$  del molibdeno e quella  $E_M$  del piombo sono molto simili, rispettivamente pari a 2,293 e 2,342. Tuttavia si può osservare come vi sia un picco minore a destra del diagramma relativo all'energia  $E_{L\alpha}$  del piombo che indica univocamente la sua presenza sulla superficie del campione. Tale picco è meglio evidenziato in Fig. 6.10, dove si è utilizzato un fascio di elettroni di 25KeV.

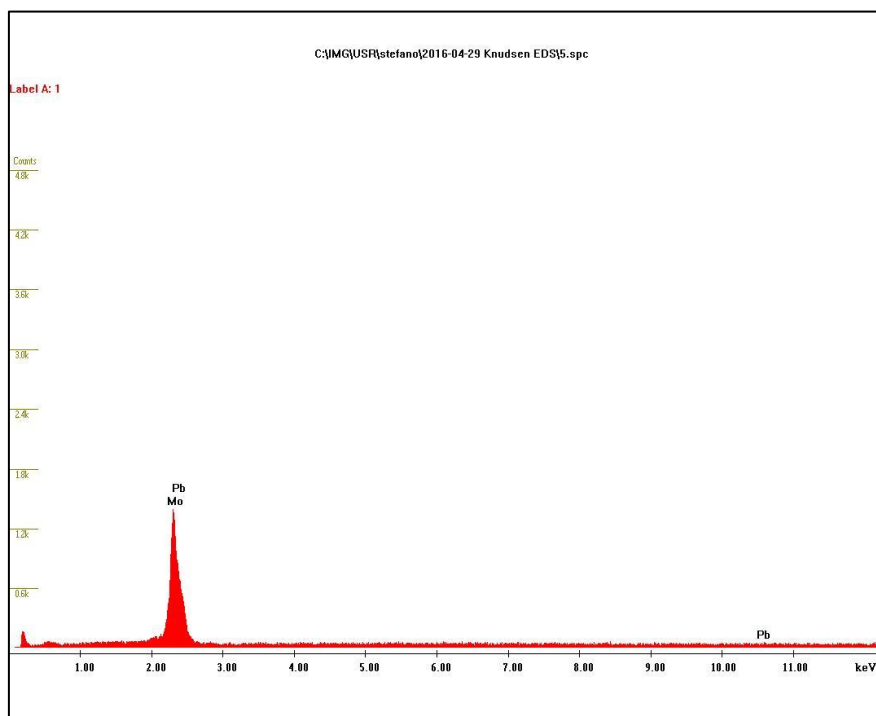


**Fig. 6.10** EDS della zona raffigurata in Fig. 6.8. L'energia del fascio di elettroni usato è di 25KeV

In Fig. 6.11 è invece rappresentato il diagramma relativo ad un'analisi effettuata con un fascio di 25KeV in corrispondenza del punto numero 7 del provino. Come si può notare vi è ancora presenza di piombo, che risulta invece assente nel punto 8 del campione (Fig. 6.12).

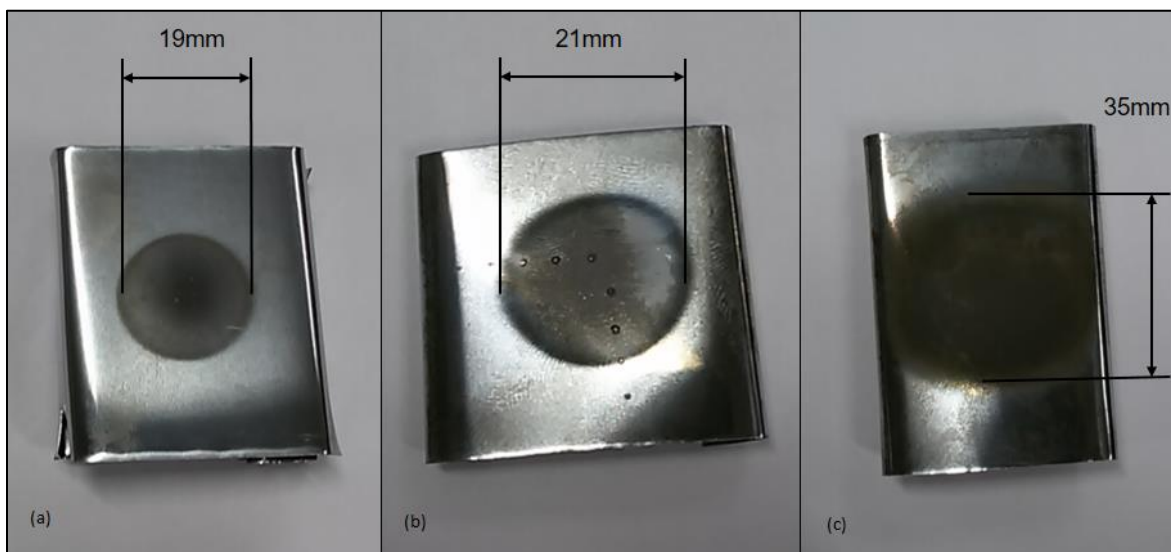


**Fig. 6.11** EDS in corrispondenza del punto di riferimento numero 7, utilizzando un fascio elettronico di 25KeV



**Fig. 6.12** EDS in corrispondenza del punto di riferimento numero 8, utilizzando un fascio elettronico di 25KeV

Questo ci consente di affermare che la presenza di piombo può essere in prima approssimazione valutata visivamente e misurata tramite un calibro. I risultati di tali misure sono esposti in Fig. 6.13.



**Fig. 6.13** (a) Dimensione del cono di effusione a 5 mm di altezza dalla cella. (b) Dimensione del cono a 10 mm di altezza. (c) Dimensione del cono di effusione a 15 mm di altezza dalla cella.

#### 6.4 - Simulazione del cono di effusione della cella di Knudsen

La distribuzione delle particelle prodotte dall'evaporazione del campione posto all'interno della cella (e quindi la forma del cono di effusione) può essere valutata numericamente utilizzando MOLFLOW®, un software di simulazione che sfrutta il metodo Monte Carlo.

MolFlow® permette di calcolare la distribuzione di pressione in un volume arbitrariamente complesso mantenuto in condizioni di alto vuoto. Il nome deriva da *molecular flow*, ovvero la condizione in cui il cammino libero medio delle particelle è di molto superiore alle dimensioni geometriche dell'apparato in cui esse urtano contro le superfici. In questo modo si possono trascurare i fenomeni di urto tra le particelle stesse, propri invece di un flusso viscoso.

##### 6.4.1 - Il metodo Monte Carlo ed il software MOLFLOW®

MOLFLOW® utilizza il Metodo Monte Carlo, un metodo che consiste nell'applicazione di procedimenti aleatori per lo studio di proprietà fisiche o di grandezze matematiche complicate.

Le sue origini risalgono alla metà degli anni 40 nell'ambito del Progetto Manhattan. Tale metodo venne formalizzato da Enrico Fermi, John von Neumann e Stanisław Marcin Ulam, mentre il nome Monte Carlo fu inventato in seguito da Nicholas Constantine Metropolis in riferimento al noto casinò situato a Monte Carlo, nel Principato di Monaco.

Esso si basa su di un algoritmo che genera una serie di numeri non correlati che seguono la distribuzione di probabilità che si suppone abbia il fenomeno da indagare. L'incorrelazione tra i numeri è assicurata da un test chi quadrato.

La simulazione Monte Carlo calcola una serie di realizzazioni possibili del fenomeno in esame ed il peso proprio della probabilità di tale evenienza, cercando di esplorare in modo denso tutto lo spazio dei parametri del fenomeno. Una volta calcolato questo campione casuale, la simulazione esegue delle misure delle grandezze di interesse su tale campione. Se il valore medio di queste misure sulle realizzazioni del sistema converge al valore vero, allora si può affermare che la simulazione Monte Carlo è ben eseguita.

In condizioni di alto vuoto, il cammino libero medio delle particelle è molto superiore alle dimensioni geometriche del sistema in esame, e quindi gli urti tra le particelle stesse sono trascurabili.

Le particelle, dunque, una volta generate, si muovono in linea retta ed urtano contro le pareti interne.

Le simulazioni Monte Carlo risultano dunque molto utili allo studio dei sistemi in alto vuoto, ed in particolare al nostro caso: le particelle vengono generate e fatte muovere lungo una direzione casuale, andando ad urtare le pareti e rimbalzando secondo la regola del coseno.

In ambiente MOLFLOW® è stato imposto un flusso di evaporazione all'interno della cella e sono state imposte delle superfici di controllo a determinate altezze. Il risultato delle analisi fornisce la distribuzione di pressioni sulle superfici di controllo, che ci consente di ottenere la distribuzione delle particelle prodotte dall'evaporazione del campione all'interno della cella e di determinare in questo modo le dimensioni del cono di effusione.

Per effettuare una simulazione con MOLFLOW® solitamente si seguono quattro passaggi, che saranno trattati in modo più dettagliato nel paragrafo successivo:

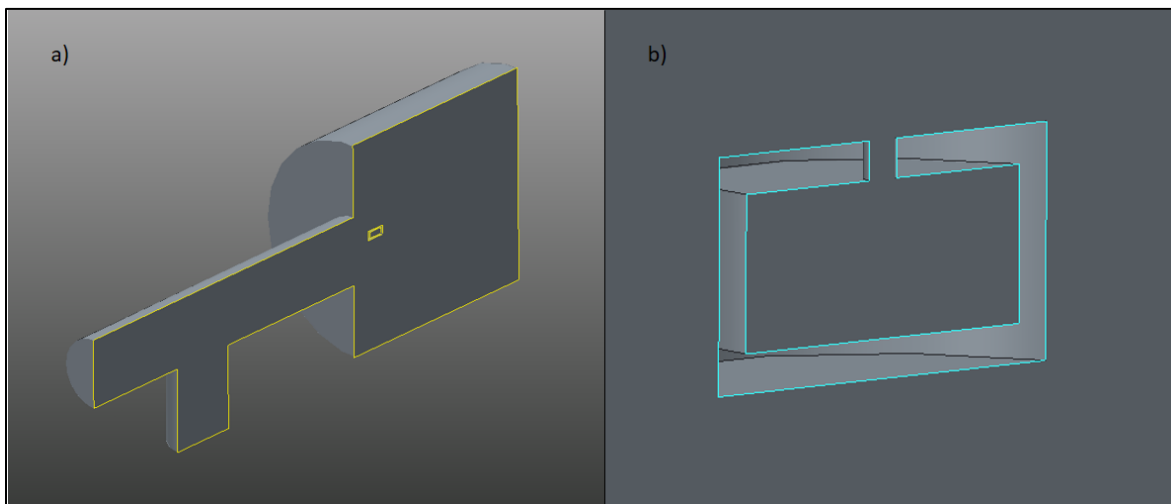
- 1- Importare la geometria: è necessario per prima cosa creare una geometria che rappresenti la porzione di spazio nel quale le particelle si muoveranno. Solitamente si effettua il disegno con un software CAD (Autodesk Inventor, Catia, Creo PTC, ecc.) e poi si esporta in formato STL. MOLFLOW® è in grado di aprire questi file e unire i triangoli creando una geometria delimitata da poligoni, detti *facets*.
- 2- Impostare i parametri di simulazione: una volta importata la geometria, si devono definire le proprietà fisiche dei suoi confini, come la temperatura e la proprietà riflettente della superficie. È importante poi definire il degassamento (outgassing) ed il desorbimento (desorption), ovvero da dove le particelle provengono, oltre alla posizione e le proprietà delle pompe da vuoto installate nel sistema.
- 3- Impostare cosa misurare: dopo il secondo passaggio la simulazione è pronta per essere lanciata. In questa fase si impostano i parametri di interesse inserendo formule e si definendo le path lungo le quali si vuole mostrare l'evoluzione dei parametri stessi.
- 4- Esecuzione della simulazione: lanciata la simulazione MOLFLOW genererà le particelle e tratterà le loro traiettorie fino a quando non verranno catturate dalla pompa. Ogni secondo i risultati visualizzati sono in fase di aggiornamento. Più a lungo viene eseguita una simulazione, minore sarà la fluttuazione statistica.

#### 6.4.2 - Modello geometrico e modello numerico

La prima cosa da fare è dunque creare una geometria che rappresenti la porzione di spazio nel quale le particelle si muoveranno.

Dunque si è modellato in ambiente CREO PTC® il volume interno dell'apparato sperimentale che viene posto in condizioni di alto vuoto durante i test: in sostanza si è disegnato il "negativo" della camera, della cella di Knudsen e dei tubi, fino alla sezione in corrispondenza della bocca della pompa turbomolecolare. Sono stati rimossi i puntali, le viti, i connettori in tantalio e tutte le parti meccaniche irrilevanti ai fini della simulazione. Si deve poi considerare che le geometrie saranno poi esportate in formato STL, e che quindi saranno sostanzialmente suddivise in triangoli: geometrie troppo complicate diventano in questo modo molto difficili da gestire ed è dunque preferibile eliminarle dal modello.

Il risultato è rappresentato in Fig. 6.14.



**Fig. 6.14** (a) Modello geometrico della porzione di spazio nel quale le particelle si muovono. (b) Particolare della cella di Knudsen modellata per le analisi in MOLFLOW®.

Una volta generato il modello è necessario esportarlo in formato STL al fine di poterlo importare in MOLFLOW.

L'STL (STereo Lithography interface format) è un formato di file binario o ASCII utilizzato soprattutto nell'ambito della prototipazione rapida.

Un file .stl rappresenta un solido la cui superficie è stata discretizzata in triangoli, e consiste nelle coordinate X, Y, Z ripetute per ciascun vertice di ogni triangolo e di un vettore per descrivere l'orientazione della normale alla superficie.

Questo formato è molto facile da generare e processare, ma presenta una geometria molto approssimata: per questo risulta necessario in fase di esportazione prestare attenzione e cercare di non generare un file STL troppo approssimato.

Quando si importa un file STL in MOLFLOW, la prima cosa da definire è l'unità di misura.

Come spiegato in precedenza, tale formato suddivide la geometria in triangoli. Ora, triangoli adiacenti che si trovano sullo stesso piano possono essere fusi, ottenendo in questo modo una geometria più maneggevole ed una simulazione più veloce.

Inoltre, ciascun vertice del sistema è descritto molteplici volte: se è comune a tre triangoli adiacenti è descritto ben 3 volte. Pertanto è possibile unirli e descrivere tale vertice una unica volta.

L'operazione che consente di fare ciò è detta *collapse*.

In breve, fare il *collapse* di una geometria significa usare solo la quantità di *facets* strettamente necessaria: questo è molto importante dato che il tempo richiesto per calcolare un urto è proporzionale al loro numero.

Sono state poi aggiunte tre superfici di controllo quadrate di lato 5 cm, rispettivamente a 10 mm, 15 mm e 20 mm di distanza dalla superficie superiore della cella di Knudsen, necessarie per definire la forma del cono di effusione.

Il sistema ottenuto è rappresentato in Fig. 6.15.

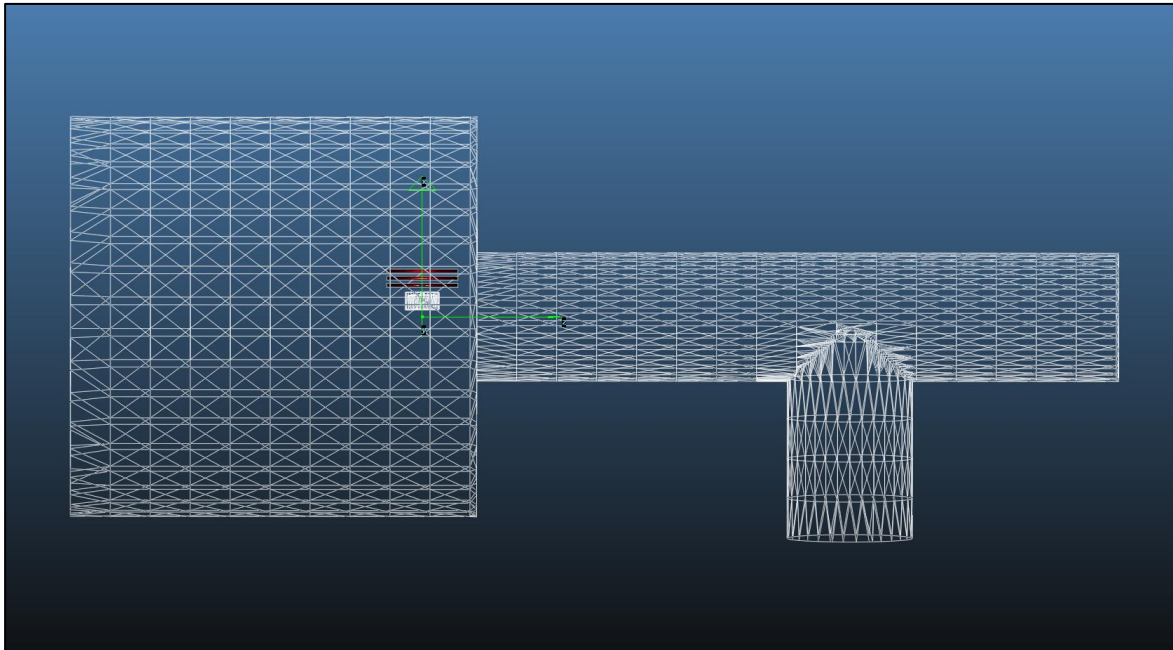


Fig. 6.15 Modello geometrico in MOLFLOW®

Una volta importata la geometria è necessario definire dove le particelle sono inserite o create e le proprietà delle pompe e delle superfici dove saranno assorbite.

Dunque si procede selezionando le aree di interesse e assegnando i parametri relativi, detti *facet parameters*.

Sulle superfici della camera e dei tubi si è imposta una temperatura pari a 293,15°K ed una opacità pari ad 1. L'opacità è la probabilità (da 0 ad 1) che una particella che passi attraverso un elemento lo colpisca. Ad esempio può essere usata per simulare un piano che ha fori sul 20% della superficie imponendo un'opacità dell'80%. È utile per definire *facets* trasparenti per misurare la pressione su piani arbitrari.

Sulla superficie che definisce la bocca di aspirazione della pompa turbomolecolare si è imposta una temperatura di 293,15°K, uno sticking factor di 1 ed una *volumetric pumping speed* pari a 261,439 l/s.

Una faccia che possiede uno *sticking factor* diverso da zero assorbe particelle, ovvero le pompa via.

Il pompaggio è impostato tramite due parametri che sono tra loro correlati: lo *sticking factor* e la *volumetric pumping speed*.

Lo *sticking factor* è la probabilità (da 0 ad 1) che una particella che colpisce la superficie dell'elemento venga assorbita.

La *volumetric pumping speed* è convertita in *sticking factor* prima di venire applicata. Se sono selezionate più superfici, allora per la conversione verrà considerata la somma delle velocità di pompaggio.

La conversione è effettuata utilizzando la seguente formula:

$$volumetric\ pumping\ speed = \frac{facet\ area * average\ molecule\ speed * sticking\ factor}{4}$$

dove la velocità media delle molecole dipende dalla massa del gas e dalla temperatura.

Sulle superfici della cella di Knudsen si è imposta una temperatura di 993,15°K ed una opacità pari ad 1.

Sulla superficie interna alla cella sulla quale viene depositato il campione di materiale si è applicata anche una condizione di generazione di particelle, scegliendo l'opzione *cosine* (coseno) nella casella *desorption* (desorbimento) ed impostando un *outgassing* (degassamento) pari a 0,02 mbar\*l/s.

Quando viene impostato il desorbimento, le particelle sono desorbite da punti scelti casualmente della superficie dell'elemento. Se esso ha 1 solo lato le particelle voleranno nella direzione della normale alla faccia, se invece possiede due lati esse voleranno in entrambe le direzioni. La distribuzione angolare dipende dal tipo di desorbimento che si imposta:



- Uniforme: le particelle sono emesse in tutte le direzioni con uguale probabilità a tutti gli angoli;
- Coseno: segue la legge di Lambert per la quale la probabilità che le particelle lascino la superficie con un certo angolo è proporzionale al coseno di tale angolo. Questo significa che le particelle lasceranno con maggiore probabilità la superficie perpendicolarmente ad essa;
- Coseno<sup>N</sup>: come prima, ma la probabilità è proporzionale ad un esponente N-esimo del coseno.

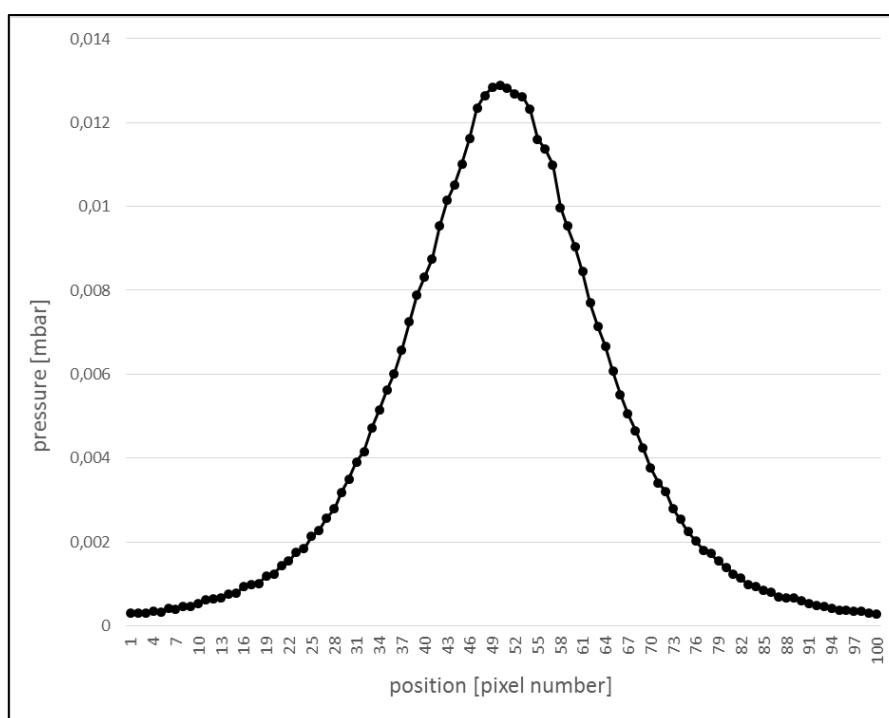
Il valore di outgassing serve per poter calcolare la pressione (che è proporzionale al rate di degasaggio) e per aiutare MOLFLOW a calcolare la densità di desorbimento (quando esso avviene su più superfici). Sulle superfici di controllo, infine, si è impostata una opacità nulla, in modo tale che le particelle le attraversino senza urtare su di esse.

#### 6.4.3 - Risultati numerici e confronto con i risultati sperimentali

L'analisi è durata circa 2 giorni e sono avvenuti 12,01 Ghits, ovvero  $12,01 \cdot 10^9$  urti delle particelle. Per valutare le dimensioni del cono di effusione si valuterà il suo diametro in corrispondenza delle tre superfici di controllo.

Si importa in Excel, per ciascuna superficie, il valore dei pixel in corrispondenza della linea mediana che divide longitudinalmente la superficie stessa in due parti uguali.

È quindi possibile plottare tali valori in funzione della posizione, ottenendo un grafico come quello in Fig. 6.16, relativo alla superficie di controllo posta a 15 mm di distanza dalla cella di Knudsen.



**Fig. 6.16** Valore della pressione in funzione della posizione (espressa in pixels) per il campione posto a 15 mm di distanza dalla cella di Knudsen

Si osservi come l'andamento sia gaussiano e come agli estremi il valore non scenda a zero, ma assuma un valore costante.

Si è considerato quest'ultimo valore come un rumore di fondo e si è assunta una incertezza del 5% (calcolato sul valore massimo). Si sono dunque considerati all'interno del cono di effusione tutti i pixel per i quali il valore di pressione (in mbar) è al di sopra del valore minimo maggiorato del 5% calcolato sul valore massimo.

In questo modo si può effettuare una stima del diametro.

Considerando pertanto la Fig. 6.16, abbiamo che il valore massimo è di 0,012892mbar e, considerando un errore del 5% (circa 0,00095), si può assumere che la zona di effusione sia compresa tra il pixel numero 17 e quello numero 83. Sapendo la superficie di controllo è lunga 50 mm e che è stata suddivisa in fase di definizione del modello in una matrice di 100 x 100 pixel, otteniamo che la lunghezza di ciascun pixel è pari a 0,5 mm.

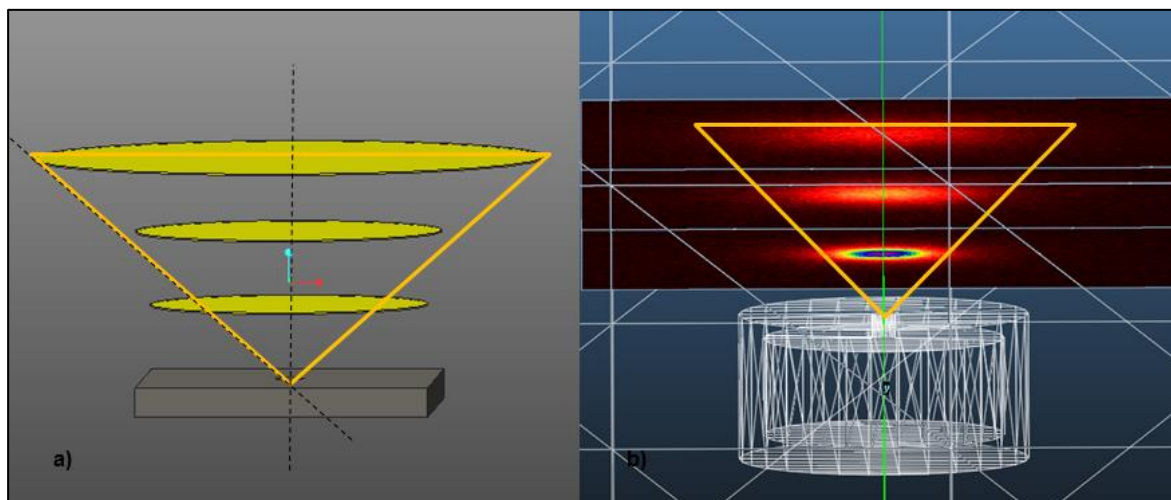
Si può arrivare ad una stima del diametro del cono di effusione a 15 mm di distanza dalla superficie superiore della cella di Knudsen, ottenendo un valore di 33 mm molto simile a quello ottenuto sperimentalmente.

Allo stesso modo sono stati stimati i diametri in corrispondenza delle superfici di controllo poste a 10 mm e 5 mm, che sono risultati essere rispettivamente pari a 25 mm ed 13 mm.

Confrontando i risultati ottenuti con quelli sperimentali si ha che l'errore massimo percentuale è pari al 31% ad una distanza di 5 mm dalla cella. Alla distanza di 10 mm l'errore percentuale sui diametri è del 19%, mentre a 15 mm risulta essere solo del 6%.

Si è infine calcolato l'angolo medio del cono di effusione ottenuto sperimentalmente, pari a 54°.

In FIGURA è esposto un confronto visivo tra il cono di effusione ricavato sperimentalmente e quello ottenuto numericamente che consente di valutare qualitativamente la somiglianza tra di loro.



**Fig. 6.17** Confronto visivo tra cono di effusione ottenuto sperimentalmente (a) e cono di effusione ricavato numericamente da MOLFLOW (b)

In conclusione, si può quindi affermare che il metodo proposto consente di valutare in prima approssimazione la geometria del cono di effusione.

## 6.5 - Conclusioni

In questo capitolo si sono effettuati dei test di effusione con il piombo al fine di valutare qualitativamente la geometria del cono di effusione stesso. Nota tale geometria, è possibile calcolare il volume di interazione del fascio laser per stimare il numero di atomi teoricamente ionizzabili e consentire dunque un calcolo dell'efficienza di ionizzazione.

La distribuzione delle particelle prodotte dall'evaporazione del campione posto all'interno della cella (e quindi la forma del cono di effusione) può essere stimata numericamente utilizzando MOLFLOW®, un software di simulazione che sfrutta il metodo Monte Carlo.

Si è voluto quindi confrontare i dati ottenuti numericamente con quelli ottenuti sperimentalmente: l'obiettivo è quello di capire se le simulazioni numeriche possano essere utilizzate per avere una stima qualitativa della dimensione del cono di effusione.

Si è ottenuta una discreta concordanza e dunque si può affermare che il metodo proposto consente di valutare in prima approssimazione la geometria del cono di effusione.





# Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è incentrato sullo studio e sviluppo della cella di Knudsen per applicazioni laser del progetto SPES.

Dopo aver affrontato preliminarmente la teoria della ionizzazione, focalizzandosi sulla ionizzazione laser mediante tecnica RILIS, si sono illustrate la spettrometria di massa a tempo di volo e la camera TOF a disposizione dei LNL. Si è poi spiegato cos'è una cella di Knudsen, quali sono i vincoli progettuali da rispettare, e verrà presentato il prototipo realizzato ai LNL.

Mediante il software Ansys® si è poi costruito un modello numerico che permette di conoscere le condizioni di temperatura della cella di Knudsen in esercizio: la distribuzione di temperatura in corrispondenza delle pareti interne della cella stessa è infatti il parametro che più influenza l'efficienza del processo di effusione. Mediante l'utilizzo di un apposito apparato di test, il modello numerico è stato poi validato sperimentalmente alimentando la cella da 100 A a 800 A e misurando la temperatura in determinati punti sulla superficie della cella, ottenendo degli errori sui risultati inferiori al 12 %.

Si sono poi affrontate le scelte progettuali effettuate per poter installare la cella di Knudsen all'interno della camera TOF realizzata ai Laboratori Nazionali di Legnaro.

Si sono illustrate le soluzioni tecniche adottate per quanto riguarda la linea di alimentazione elettrica ed è stato descritto il sistema progettato per garantire un corretto posizionamento e centraggio della cella stessa. Poi si è discusso dettagliatamente la simulazione termica effettuata con il codice di calcolo agli elementi finiti ANSYS® al fine di valutare la resistenza dei materiali scelti in fase di progettazione nelle condizioni più critiche di utilizzo e la necessità di disporre di un sistema di raffreddamento per la camera TOF. Si sono rilevate alcune problematiche riguardanti le temperature raggiunte in esercizio da alcuni componenti del sistema di supporto e centraggio della cella di Knudsen.

È stata quindi proposta una soluzione che prevede l'installazione di schermetti termici in tantalio e si sono effettuate delle analisi FE per valutare la loro efficacia. La loro installazione ha consentito di abbassare la temperatura dei componenti di interesse di circa 30°C. Dunque la massima corrente di alimentazione possibile senza compromettere il sistema è 700 A.

Vengono poi espone le fasi di progettazione del sistema di collimazione e del suo sistema di supporto e posizionamento. Sono poi esposti i risultati delle analisi termiche agli elementi finiti svolte per valutare la temperatura sui componenti del supporto stesso e quindi l'adeguatezza o meno della scelta dei materiali effettuata nella fase di design: fino a 700 A non sorgono criticità.

Nell'ultimo capitolo, infine, si sono effettuati dei test di effusione con il piombo per valutare qualitativamente la geometria del cono di effusione stesso. Nota tale geometria, è possibile calcolare il volume di interazione del fascio laser per stimare il numero di atomi teoricamente ionizzabili e consentire dunque un calcolo dell'efficienza di ionizzazione. La distribuzione delle particelle prodotte dall'evaporazione del campione posto all'interno della cella (e quindi la forma del cono di effusione) può essere stimata numericamente utilizzando MOLFLOW®, un software di simulazione che sfrutta il metodo Monte Carlo. Si è voluto quindi confrontare i dati ottenuti numericamente con quelli ottenuti sperimentalmente: l'obiettivo è quello di capire se le simulazioni numeriche possano essere utilizzate per avere una stima qualitativa della dimensione del cono di effusione. Si è ottenuta una discreta concordanza e dunque si può affermare che il metodo proposto consente di valutare in prima approssimazione la geometria del cono di effusione.



# Appendice A

## Classificazione dei pirometri e leggi della radiazione termica

### A.1 - Classificazione dei pirometri [19]

Il metodo più semplice non a contatto per stimare la temperatura di un corpo radiante è osservarne il colore. La relazione tra temperatura e colore assunto da un corpo è riassunta in Tabella A-1, consentendoci dunque, nell'ambito dei trattamenti di processo, di valutare con una certa precisione temperature sopra i 700°C semplicemente osservando l'oggetto.

Temperatura [°C]	Colore	Temperatura [°C]	Colore
559-580	Nero/porpora	830-880	Arancione scuro
580-650	Marrone/porpora	880-1050	Arancione
650-750	Porpora	1050-1150	Giallo/arancione
750-780	Carminio scuro	1150-1250	Giallo
780-800	Carminio	1250-1320	Bianco/giallo
800-830	Arancione/carminio		

**Tabella A-1** *Correlazione tra la temperatura ed il colore di un corpo radiante*

I pirometri, detti anche termometri ad infrarosso, sono degli strumenti per la misura di temperatura senza contatto che per effettuare la misurazione si basano sull'emissività termica, consentendo una migliore valutazione rispetto all'occhio umano. Questo metodo di misura è inoltre esente da fenomeni di disturbo legati al campo di temperatura esistente.

Le lunghezze fondamentali delle radiazioni emesse dal corpo in esame, che variano dai 0,4 ai 20 $\mu$ m, appartengono alla bande del visibile e dell'infrarosso. In Fig. A.1 è schematizzata una classificazione dei pirometri in funzione della risposta spettrale e del metodo di utilizzo.

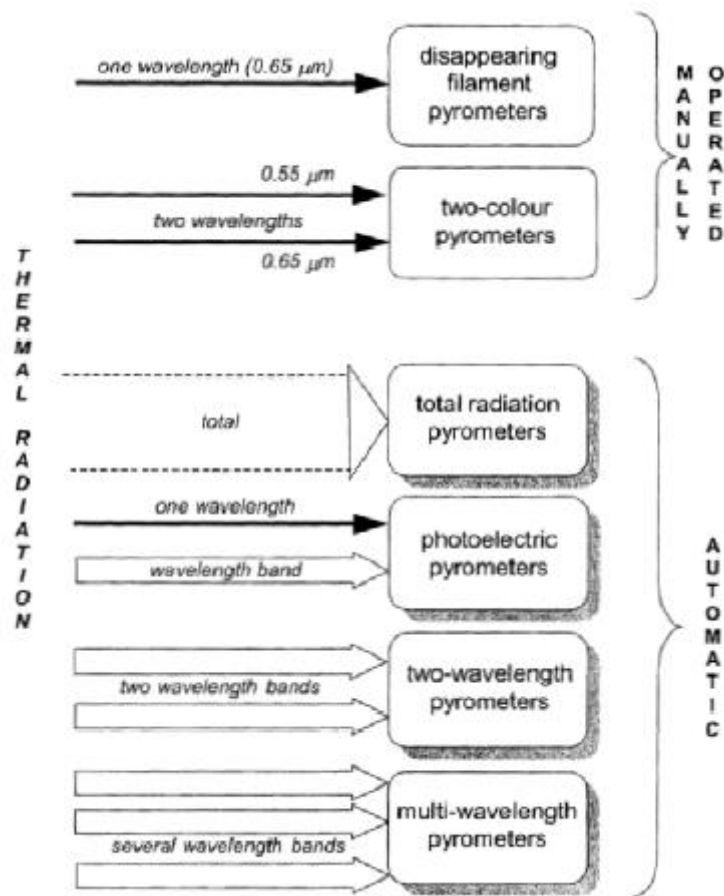


Fig. A.1 Classificazione dei pirometri in funzione della lunghezza d'onda e delle modalità operative

Essi si suddividono fondamentalmente in due classi: i pirometri manuali ed i pirometri automatici.

I pirometri manuali (Fig. A.2) vedono l'operatore come un'importante parte del processo di misura: l'occhio umano viene infatti usato come comparatore tra l'elemento di riferimento e l'oggetto da misurare. Un segnale di riferimento viene comparato con la radiazione proveniente dalla sorgente e visualizzato su di uno strumento di lettura.

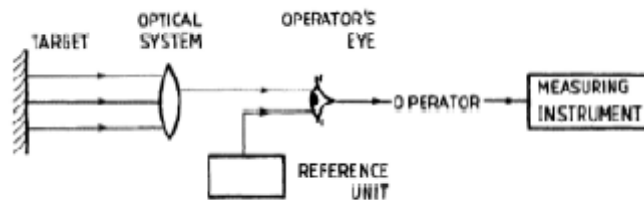


Fig. A.2 Schema di un pirometro manuale

Le due tipologie più importanti appartenenti alla categoria dei pirometri manuali sono:

- *Pirometro a filamento:* si basa sulla corrispondenza tra la luminescenza del corpo ed quella di un filamento di tungsteno. La luminescenza viene impostata variando la corrente che passa attraverso il filamento, mentre l'occhio umano funge da rilevatore. La banda delle lunghezze



d'onda di funzionamento è tale da poter considerare il pirometro monocromatico funzionante per una lunghezza d'onda di riferimento di  $\lambda_c = 0,65\mu$ .

- *Pirometro a due colori*: deduce la temperatura del corpo in base al rapporto tra l'intensità radiante emessa dall'oggetto in due diverse lunghezze d'onda spettrali, comunemente 0,55 e 0,65 $\mu$ m.

I pirometri automatici, invece, il cui diagramma a blocchi semplificato è rappresentato in Fig. A.3, si compongono delle seguenti parti principali:

- Il sistema ottico, che concentra la radiazione sul rivelatore;
- Il rivelatore radiativo;
- Un convertitore di segnale, che condiziona l'output del rivelatore prima che venga portato al display;
- Strumenti di misurazione, con segnale di uscita analogico o digitale.

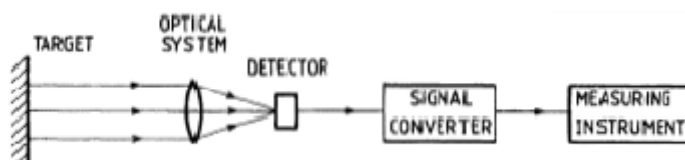


Fig. A.3 Diagramma a blocchi di un pirometro automatico

Appartengono alla categoria dei pirometri automatici le seguenti tipologie:

- Pirometro a radiazione totale: usa un rivelatore di radiazione riscaldato attraverso la radiazione incidente. La trasmissività del sistema ottico fa sì che la banda di lunghezze d'onda sia compresa tra 0,2 e 14  $\mu$ m;
- Pirometro fotoelettrico: opera in una banda di lunghezze d'onda scelta in cui il segnale è generato dal bombardamento di fotoni su di un rivelatore fotoelettrico;
- Pirometro a due lunghezze d'onda: l'intensità della radiazione emessa in due diverse bande di lunghezza d'onda è comparata attraverso un rivelatore fotoelettrico;
- Pirometro a lunghezze d'onda multiple: utilizzato per misurare la temperatura di corpi a bassa emissività.

Verranno in questa sede trattati i pirometri a due colori, utilizzati per le misure sperimentali di temperatura sulla cella di Knudsen.

## A.2 - Pirometri a due colori

### A.2.1 - Informazioni generali

I pirometri a due colori misurano la temperatura di un corpo attraverso il rapporto delle radiazioni monocromatiche emesse in corrispondenza dei due lunghezze d'onda caratteristiche. Essi sono calibrati per corpi grigi, e danno informazioni corrette sulla temperatura per corpi grigi e neri.

Il nome pirometro a due colori è usato propriamente se le lunghezze d'onda caratteristiche scelte si posizionano nel campo del visibile rispetto alla distribuzione in frequenza delle onde elettromagnetiche. Spesso viene però utilizzato anche per identificare pirometri automatici che lavorano su lunghezze d'onda non appartenenti al campo del visibile.

In Fig. A.4 è rappresentato uno schema semplificato di un pirometro a due colori, che è costituito da lenti, oculare ed un filtro a due colori, nella maggior parte dei casi rosso/verde.

L'osservatore corregge la posizione del filtro fino a che il misurando non risulti apparire di colore grigio. Questa posizione è associata a uguali radiazioni monocromatiche percepite dall'occhio umano come colori integrati in uno singolo, ovvero il grigio.

Quando la temperatura del corpo aumenta la percentuale di colore verde nello spettro aumenta, mentre la componente rossa diminuisce: quindi ad ogni temperatura corrisponde una precisa posizione del filtro. La temperatura misurata è detta anche temperatura in colore ( $T_c$ ) e può essere valutata direttamente grazie alla presenza di un puntatore su una scala graduata una volta che si è regolato il filtro fino alla posizione in cui l'oggetto appare di colore grigio.

L'errore che si può commettere nella valutazione del colore del corpo si traduce in un errore di temperatura che va da  $\pm 20$  a  $\pm 30$  °C in relazione ad un range di temperatura misurata compreso tra 1200 e 2000°C.

Questo errore può essere in parte superato utilizzando pirometri automatici a due colori, che sostituiscono all'occhio umano un rilevatore fotoelettrico.

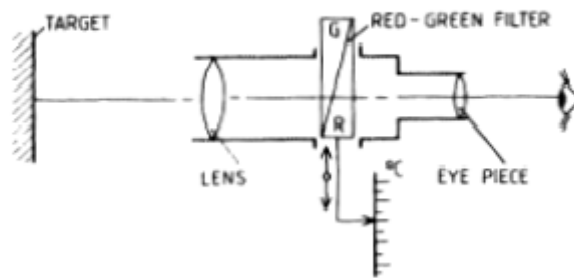


Fig. A.4 Pirometro a due colori

### A.2.2 - Definizione della scala

Dalla legge di Wien l'intensità dell'emissione monocromatica relativa alla lunghezza d'onda  $\lambda_1$ ,  $W_{\lambda_1}$ , alla temperatura  $T_t$  di un corpo di emissività  $\epsilon_{\lambda_1}$  è data da:

$$W_{\lambda_1} = c_1 \epsilon_{\lambda_1} \lambda_1^{-5} e^{-c_2/\lambda_1 T_1} \quad (1.1)$$

e analogamente per  $\lambda_2$  diviene:

$$W_{\lambda_2} = c_1 \epsilon_{\lambda_2} \lambda_2^{-5} e^{-c_2/\lambda_2 T_2} \quad (1.2)$$

Le equazioni scritte sono inoltre proporzionali alle rispettive intensità dell'emissione monocromatica  $L_{\lambda_1}$  ed  $L_{\lambda_2}$ . Il rapporto tra le emissività monocromatica e tra le intensità dell'emissione monocromatica, per lunghezze d'onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  è quindi:

$$\frac{W_{\lambda_1}}{W_{\lambda_2}} = \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp \left[ \frac{c_2}{T_t} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right] \quad (1.3)$$

Il pirometro a due colori fornisce informazioni corrette per corpi grigi, i quali hanno emissività indipendente dalla lunghezza d'onda ( $\epsilon_{\lambda} = \text{costante}$ ).

L'equazione 1.3 diventa pertanto:

$$\frac{W_{\lambda_1}}{W_{\lambda_2}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp \left[ \frac{c_2}{T_t} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right] \quad (1.4)$$

Per quanto riguarda la progettazione del pirometro, si può assumere che le lunghezze d'onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  siano costanti, semplificando dunque ulteriormente la relazione precedente, che diventa:

$$\frac{W_{\lambda_1}}{W_{\lambda_2}} = A e^{B/T_t} \quad (1.5)$$

dove le costanti A e B sono rispettivamente:

$$A = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5$$

$$B = c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \quad (1.6)$$

Dall'equazione (1.3) si può notare che il rapporto tra le emissività cromatiche per le lunghezze d'onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  di qualsivoglia corpo grigio è una funzione esplicita della temperatura  $T_t$  del corpo.

In molti pirometri a due colori sono solitamente associati filtri rossi con lunghezza d'onda effettiva  $\lambda_1=0,65 \mu\text{m}$  e filtri verdi  $\lambda_2=0,55 \mu\text{m}$ .

In Fig. A.5(a) è rappresentata parte della curva relativa alla legge di Planck alla temperatura di 200 K, e sono evidenziate le emissività monocromatiche alle lunghezze d'onda  $\lambda_1=0,65 \mu\text{m}$  e  $\lambda_2=0,55 \mu\text{m}$ .

Il rapporto tra le emissioni monocromatiche per queste lunghezze d'onda, calcolato per diverse temperature, è diagrammato in Fig. A.5(b).

Si può osservare come la temperatura  $T_t$  aumenta quando il rapporto  $W_{\lambda_1}/W_{\lambda_2}$  decresce. Questo mostra la limitazione della fotosensibilità, analogamente a quanto accade per l'occhio umano relativamente alla percezione delle variazioni di colore. Ciò causa una riduzione della precisione nella misura di temperatura che si verifica a seguito di un repentino aumento della temperatura del corpo in esame.

Riguardo alle due lunghezze d'onda tipicamente utilizzate, ovvero quelle precedentemente introdotte, il limite superiore di impiego del pirometro a due colori è relativo a una temperatura di 2200°C, mentre il limite inferiore, dovuto principalmente alla limitata sensibilità dell'occhio umano, è di 700°C.

La temperatura in colore di tutti i corpi neri e grigi è coincidente alla reale temperatura assunta da tali corpi.

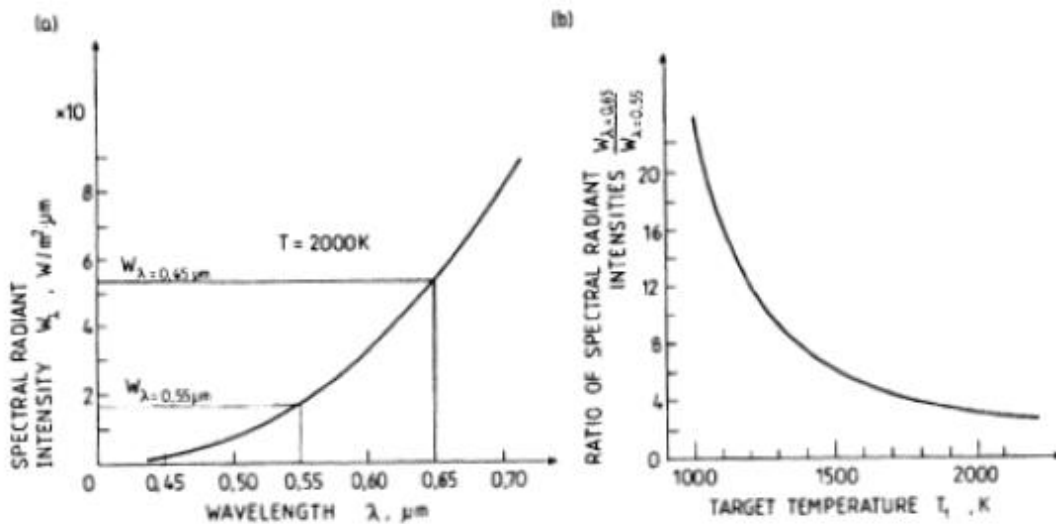


Fig. A.5 (a) Intensità radiante spettrale in funzione della lunghezza d'onda a 2000K. (b) Rapporto tra le intensità radianti spettrali in rosso e verde rispetto alla temperatura vera del corpo radiante

### A.2.3 - Misure di temperatura di corpi non grigi

Corpi non-neri e non-grigi, anche chiamati corpi radianti selettivi, sono caratterizzati da una lunghezza d'onda dipendente dall'emissività monocromatica del corpo.

La temperatura rilevata tramite un pirometro a due colori è chiamata anche temperatura in colore, e si indica con  $T_c$ .

Ribaud (1959) definisce la  $T_t$  di un corpo come la temperatura corrispondente alla temperatura di un corpo nero dove il rapporto tra l'emissione monocromatica alle lunghezze d'onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  è uguale al rapporto tra l'emissione monocromatica del corpo sottoposto a misurazione.

In accordo con questa definizione, e facendo uso dell'equazione relativa alla legge di Wien, appare chiaro che:

$$\frac{\varepsilon_{\lambda_1} e^{-c_2/\lambda_1 T_c}}{\varepsilon_{\lambda_2} e^{-c_2/\lambda_2 T_c}} = \frac{e^{-c_2/\lambda_1 T_t}}{e^{-c_2/\lambda_2 T_t}} \quad (1.7)$$

dove  $T_t$  è la temperatura reale del corpo.

Facendone il logaritmo e riscrivendola, la 1.7 diventa:

$$\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_c} = \left\{ \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})}{c_2[(1/\lambda_1)-(1/\lambda_2)]} \right\}^{-1} \quad (1.8)$$

e infine:

$$T_c = \left\{ \frac{1}{T_t} - \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})}{c_2[(1/\lambda_1)-(1/\lambda_2)]} \right\}^{-1} \quad (1.9)$$

Dall'equazione 1.8 è possibile notare che per  $\varepsilon_{\lambda_1} \neq \varepsilon_{\lambda_2}$  la temperatura in colore differisce dal valore vero  $T_t$ . Questa differenza  $\Delta T = T_c - T_t$  dipende dal rapporto  $\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2}$  delle emissività monocromatiche come dalle lunghezze d'onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  scelte.

Dal momento che l'emissività dei materiali metallici aumenta per lunghezze d'onda piccole, la temperatura in colore indicata è maggiore della temperatura reale.

Se  $\varepsilon_{\lambda_1}$  e  $\varepsilon_{\lambda_2}$  sono note, allora può essere calcolata la correzione da apportare alla misura di temperatura effettuata.

In molti casi gli errori causati da minime variazioni delle lunghezze d'onda effettive in funzione della temperatura dei filtri utilizzati sono trascurabili.

I pirometri a due colori sono stati al giorno d'oggi sostituiti dai pirometri automatici, nei quali l'occhio umano in qualità di sensore è stato sostituito da elementi fotosensibili.

## A.3 - **Pirometri automatici**

Nei pirometri automatici, per raggiungere una precisione di misura soddisfacente, la radiazione emessa dal corpo considerato è focalizzata sul sensore attraverso una lente, una fibra ottica oppure uno specchio. In questo modo viene ridotto l'angolo di vista del pirometro e, di conseguenza, il minimo diametro richiesto per l'oggetto affinché possa essere misurato. Il pirometro ottico deve poter poi essere puntato direttamente sul target su cui misurare la temperatura.

### A.3.1 - Lenti

Il materiale del quale sono costituite le lenti deve rispondere alle seguenti caratteristiche:

- alto fattore di trasmissione per un ampio range di lunghezze d'onda,

- alta resistenza meccanica,
- alta temperatura di lavoro,
- buona resistenza agli agenti atmosferici e chimici,
- buona resistenza all'abrasione,
- buona resistenza a gradienti termici notevoli.

La radiazione termica incidente viene attenuata dall'assorbimento e dalla riflessione delle superfici delle lenti stesse. Il medesimo effetto si verifica nella finestra di osservazione, ma nonostante ciò di norma si tiene in considerazione il problema della riflessione solo per i componenti interni allo strumento.

Per attenuare il coefficiente di riflessione delle superfici ed aumentare la trasmissibilità globale, vengono utilizzate delle lenti rivestite con materiali e spessori accuratamente scelti.

A riguardo vengono utilizzati materiali quali SiO, ZnS, CeO<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>, ognuno dei quali con uno spessore pari a un quarto della lunghezza d'onda relativa alla radiazione incidente.

Il range di applicazione di ogni materiale ottico dipende dal coefficiente di trasmissione, che varia in funzione della lunghezza d'onda, dallo spessore delle lenti e della finestra di osservazione. Nello studio della misura di temperatura attraverso pirometri risulta di estrema importanza considerare il cut-off superiore, relativo alle lunghezze d'onda delle radiazioni infrarosse incidenti. Seguendo la legge di Wien questo difetto di trasmissione delle onde lunghe si riflette sul valore limite della temperatura minima che il pirometro può misurare.

In Fig. A.6, vengono messi in luce i valori limite delle lunghezze d'onda minime trasmissibili per diversi materiali di uso comune impiegati nella produzione di lenti e oculari, mentre, in Fig. A.7, sono rappresentati i valori di trasmissibilità monocromatica di piatti, di spessore noto, costituiti dei medesimi materiali in funzione della lunghezza d'onda. ( Warnke, 1972, Baker, 1953, Hackforth, 1960, Harrison, 1960 ).

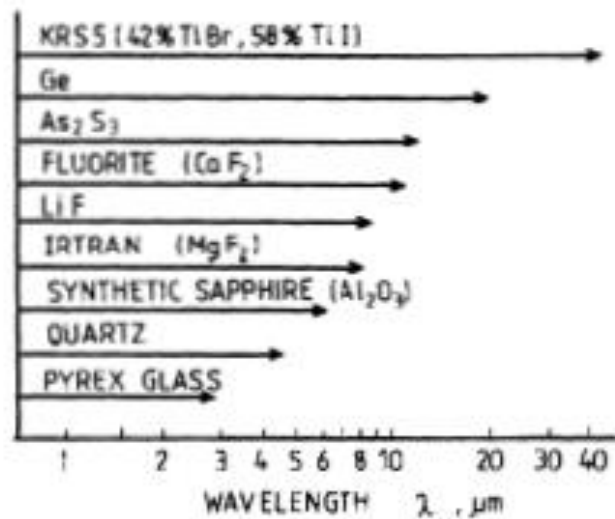


Fig. A.6 Limiti di trasmissibilità per materiali di comune impiego per lenti e oculari

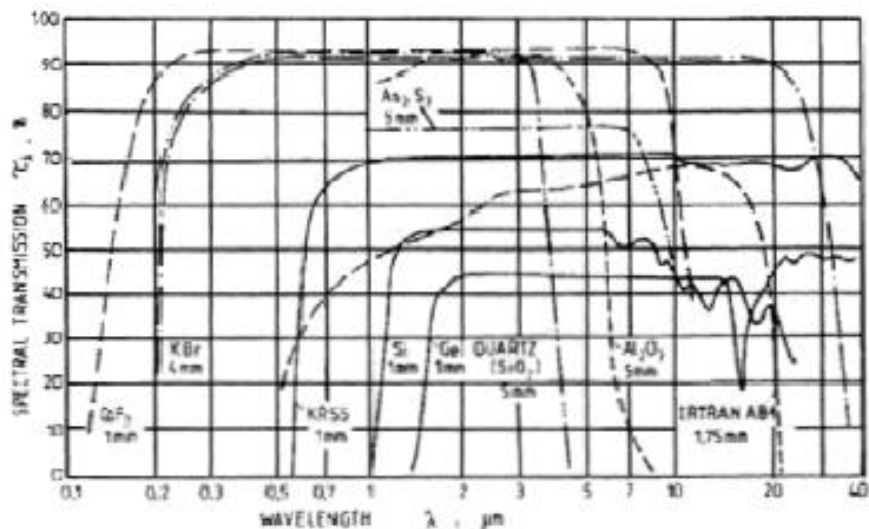


Fig. A.7 Trasmittività spettrale di piatti per lenti per pirometri

Di seguito sono illustrate sinteticamente le principali proprietà di tali materiali.

**Vetro Pyrex:** è trasparente nel range tra 0,3 e 3  $\mu\text{m}$  e viene utilizzato quando è richiesta una elevata resistenza meccanica e all'attacco chimico.

**Quarzo ( $\text{SiO}_2$ ):** trasparente da 0,2 a 0,4  $\mu\text{m}$ , può sopportare temperature maggiori di quelle del vetro. Ha elevate caratteristiche di resistenza meccanica e agli agenti chimici e si adatta bene alle variazioni repentine di temperatura.

**Zaffiro sintetico ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ):** è trasparente da 0,3 a 5  $\mu\text{m}$  e possiede ottime caratteristiche di durezza e resistenza all'abrasione. Sopra 1000  $^\circ\text{C}$  può essere usato nella produzione di fibra ottica ma possiede lo svantaggio di essere particolarmente fragile e non adattarsi bene alle brusche variazioni di temperatura.

**Fluorite ( $\text{CaF}_2$ ):** trasparente da 0,1 a 9,5  $\mu\text{m}$ , può essere usato per misure di temperatura che si spingono a + 50  $^\circ\text{C}$ . La sua applicazione è limitata dalla bassa resistenza meccanica, scarsa durezza e bassa lavorabilità.

**KRS-S (42% TlBr, 58% TlI):** è trasparente nel range tra 0,5 a 36  $\mu\text{m}$ . Oggigiorno è il materiale più comunemente utilizzato per lenti di pirometri impiegati nella misura di basse temperature, a partire da - 50  $^\circ\text{C}$ .

**Silicio:** trasparente da 8 a 14  $\mu\text{m}$ , per misure di basse temperature. Viene talvolta sostituito con KRS-S.

Infine è da sottolineare che la maggior parte dei pirometri automatici sono forniti di un sistema ottico con focus costante sebbene in commercio si trovino, anche se meno frequentemente, pirometri con dispositivo a lenti regolabile.

Assieme ad ogni pirometro, il costruttore fornisce un diagramma con il valore del diametro dello spot di puntamento  $d$  (dimensione minima che l'oggetto deve possedere in termini di diametro) in funzione della distanza  $l$  del componente dal pirometro (Fig. A.8). Il rapporto approssimato di distanza  $l/d$ , che spesso viene fornito, è molto utile per fare un confronto tra diversi pirometri.

Tale rapporto permette anche una rapida stima del diametro massimo del corpo da misurare,  $d$ , per una assegnata distanza di quest'ultimo dal pirometro.

Questi misuratori di temperatura, al giorno d'oggi, sono equipaggiati con un sistema di puntamento laser integrato nel sistema ottico, che permette di individuare, senza errori di stima, la posizione corretta del punto appartenente al corpo che si vuole valutare.

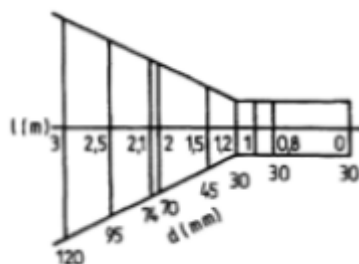


Fig. A.8 Diametro dello spot di puntamento  $d$  in funzione della distanza  $l$  del componente dal pirometro

### A.3.2 - Fibra ottica

Il sistema ottico di lenti viene sostituito in modo completo dalla fibra ottica nel caso in cui l'oggetto del quale si voglia misurare la temperatura sia molto piccolo o non facilmente accessibile, oppure nel caso in cui le temperature in gioco siano talmente alte da poter danneggiare il pirometro stesso. Il principio di funzionamento del pirometro a fibra ottica è rappresentato in Fig. A.9.

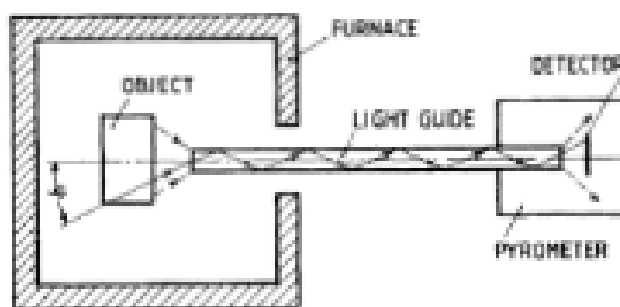


Fig. A.9 Schema di funzionamento della fibra ottica

L'estremità finale della fibra ottica è posta vicino all'oggetto emettitore e le radiazioni, venendo riflesse sulla superficie interna lucidata del corpo cilindro costituente la fibra stessa, giungono al sensore. Parte dell'energia trasmessa dal corpo viene persa a causa di componenti assorbite all'interno della fibra ottica, componenti riflesse in maniera non ideale e componenti non indirizzate al sensore all'ingresso e all'uscita della fibra.

L'efficienza dipende anche dalla lunghezza della fibra e dalla sua tipologia: solitamente sono costruite in zaffiro artificiale e quarzo, e possono essere a filamento rigido o trecce di fibre sottili di lunghezza superiore a 2 m.

### A.3.3 - Specchi

Per misure di basse temperature, per le quali non possono essere utilizzati sistemi a lenti, si possono adottare sensori a specchio. Sono costituiti da materiali metallici dotati di buona conduttività termica, un alto coefficiente di riflessione alle basse temperature e adeguati per lunghezze d'onda importanti. Sebbene lo specchio assorba radiazioni infrarosse in modo meno significativo delle lenti, tale vantaggio è parzialmente ridotto dal necessario impiego di finestre di protezione.

I metalli utilizzati per gli specchi sono principalmente oro lucidato, argento o alluminio ad alto coefficiente di riflessione. Mentre l'oro ha buone proprietà di resistenza agli agenti atmosferici e chimici, gli altri metalli hanno bisogno di una copertura di rivestimento trasparente agli infrarossi (film protettivo). In Fig. A.10 sono riportati i coefficienti monocromatici emisferici di riflessione ( $\rho_\lambda$ ) di diversi materiali metallici in funzione delle lunghezze d'onda della radiazione incidente, come riportato da Harrison (1960). I pirometri che poggiano su questa tecnologia sono raramente impiegati, se non per casi eccezionali.

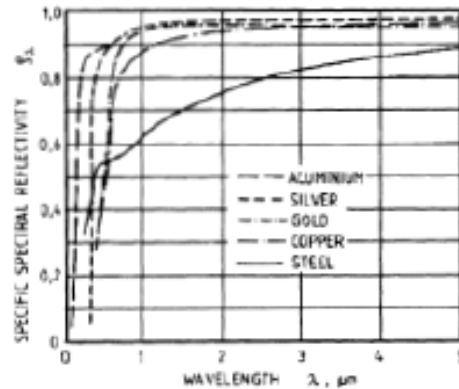


Fig. A.10 Coefficienti monocromatici emisferici di riflessione per diversi materiali metallici in funzione delle lunghezze d'onda della radiazione incidente

#### A.3.4 - Sensori

Nei pirometri automatici a radiazione totale viene impiegato un sensore a radiazioni termiche. Nei pirometri automatici fotoelettrici a due lunghezze d'onda e a lunghezza d'onda multipla, vengono utilizzati dei sensori fotoelettrici.

Verranno ora analizzati questi due tipi di sensori e verranno citate le tipologie più importanti per ciascuna categoria.

##### Sensori termici

Il sensore a radiazione termica viene riscaldato dalla radiazione incidente.

Le proprietà che devono avere questi sensori sono le seguenti:

- Elevata sensibilità, intesa come il rapporto tra il segnale di uscita e la totale potenza radiativa incidente;
- Stabilità delle proprietà nel tempo;
- Elevata resistenza a vibrazioni e shock termici;
- Bassa inerzia termica;
- Segnali di output indipendenti dalla posizione del pirometro;
- Elevato rapporto tra segnale in uscita e fattore di disturbo;
- Alta emissività;
- Sensibilità indipendente dalla lunghezza d'onda.

Dei sensori termici citeremo le termopile, la termopila a filo e le termopile a film.

##### **TERMOPILE**



Si configura come il più comune tra i sensori termoelettrici e possiede tutte le proprietà precedentemente elencate. Inoltre risulta anche garantire una elevata facilità di misurazione e di semplicità di trasformazione del segnale di output.

Si compone di molteplici termocoppie connesse in giunzioni esposte alla radiazione incidente emessa dal componente del quale si vuole conoscere la temperatura.

Le connessioni di riferimento del sensore sono prese dalla medesima temperatura dell'involucro del pirometro.

Una buona soluzione del problema è ad esempio inserire la termopila in un bulbo di vetro sotto vuoto (Linewig, 1975): ciò incrementerebbe la sensibilità del sensore ed annullerebbe lo scambio termico convettivo, rendendo così il segnale di output completamente indipendente dalla posizione del sensore stesso.

#### *TERMOPILE A FILO*

La termopila a filo è costituita da un sottile filamento (termocoppia) di diametro che va da 0,1 a 0,15 mm.

La termopila a nastro è invece una termocoppia costituita da una bandella di dimensioni di 0,025 mm di spessore e 0,5 mm di larghezza.

Queste termocoppie vengono saldate o brasate a dei piatti anneriti che fungono da ricevitori di radiazioni.

#### *TERMOPILE A FILM*

Un film sottile dotato di una bassa inerzia termica e di una costante di tempo inferiore a 15 ms viene depositato su di una superficie non metallica.

Le termopile a forcina, invece, sono simili alle termopile a film ma sono dotate di sezioni maggiori, così da evitare cedimenti per frattura fragile. Sono realizzate in Tellurio-Bismuto con una sensibilità elevata pari a 600  $\mu\text{m}/\text{K}$ . L'incremento della sezione è reso possibile grazie alla bassa conduttività termica di entrambi i metalli impiegati.

#### Sensori fotoelettrici

Di questa categoria di sensori fanno parte i fotoconduttori, i fotodiodi, le celle fotovoltaiche e le fotocelle.

#### *FOTOCONDUTTORI*

Sono costituiti da piatti in vetro rivestiti da un film sottile di materiale. Il rivestimento solitamente viene fatto con i seguenti materiali: PbS, CdS, PbSe, PbTe.

Quando la radiazione incidente ha la stessa lunghezza d'onda del materiale capace di assorbirla, i fotoni catturati liberano fotoelettroni in grado ora di formare una corrente elettrica.

La resistenza elettrica di un fotoconduttore decresce con l'aumentare dell'intensità della radiazione e dipende anche dalla propria temperatura: questo rende necessario un attento studio in fase di realizzazione del pirometro.

Se non irradiato il fotoconduttore ha resistenza di  $10^4 - 10^8 \Omega$ . Dato che la sensibilità di un fotoconduttore dipende dalla lunghezza d'onda radiante, è necessario introdurre il concetto di banda di lunghezze d'onda operativa. Finché la sensibilità e la risposta in frequenza dei fotoconduttori non subiscono variazioni con la temperatura ambiente e nel tempo, essi sono applicabili in molte situazioni, come ad esempio nel caso dei rivelatori di azzeramento. Questo è possibile attraverso il confronto istantaneo di due intensità radianti, che giungono in modo alterno sulla superficie del sensore. La superficie dei fotoconduttori va protetta dagli agenti atmosferici attraverso coperture a base di vernici o materiali quali il polistirolo.

#### *FOTODIODI*

I fotodiodi sono realizzati in germanio o silicio e operano alla tensione di polarizzazione inversa. La loro conduttività termica, come la corrente di saturazione inversa, sotto l'azione di una radiazione incidente è proporzionale all'intensità della radiazione stessa e alla risposta in frequenza. Quest'ultima va da 0,4 a 1,7  $\mu\text{m}$  per il Ge e da 0,6 a 1,1  $\mu\text{m}$  per il Si.

L'elevata sensibilità dei fotodiodi permette la realizzazione di pirometri con un rapporto di distanza l/d elevato.

Per compensare la corrente nera, che non si manifesta in presenza di luce ma in presenza di una forza elettromotrice, viene utilizzato un secondo diodo schermato dalle radiazioni.

#### *CELLE FOTOVOLTAICHE*

Le celle fotovoltaiche generano una tensione in funzione della radiazione incidente.

Sono costituite da sottili strati di materiale semiconduttore depositato su piastre metalliche.

La tensione generata è funzione logaritmica dell'intensità della radiazione incidente.

Le celle fotovoltaiche presentano un segnale in uscita tale che non sia richiesto un'ulteriore amplificazione a posteriori, con la possibilità dunque di non impiegare una tensione esterna, altrimenti necessaria. Tuttavia, a causa della limitata sensibilità nel campo dell'infrarosso, possono essere impiegate solo nella misura di temperature elevate.

Sono impiegati materiali quali il silicio (Si), selenio (Se), antimoniuro di indio (InSb) e arseniuro di indio (InAs).

#### *FOTOCELLE IN VUOTO*

Le fotocelle in vuoto operano secondo il principio seguente: la radiazione infrarossa incidente induce emissione di elettroni nel fotocatodo metallico, posto in un bulbo sotto vuoto assieme al corrispettivo anodo. Per una data tensione tra anodo e catodo, la corrente elettrica è funzione dell'intensità della radiazione. In regime di bassa pressione o presenza di gas neutro, la fotocella presenta elevata sensibilità a basse tensioni di esercizio. Sebbene il vuoto garantisca sensibilità inferiori, per contro risultano più stabili, lineari e più rapidi nella risposta. La banda di risposta in frequenza è inferiore a 2  $\mu\text{m}$ .

#### *FOTOMOLTIPLICATORI*

Sono simili alle fotocelle ma non sono frequentemente impiegati perché presentano notevoli dimensioni ed un elevato costo. Fotocelle e fotomoltiplicatori sono comunemente influenzati dalla temperatura ambiente: è necessario dunque impiegare un circuito di compensazione, salvo avere certezze sulla raggiunta stazionarietà delle condizioni ambientali.

### **A.4 - Pirometri a due lunghezze d'onda**

I pirometri a due lunghezze d'onda hanno un principio di funzionamento identico a quello dei pirometri manuali a due colori ma, per eliminare il carattere soggettivo della misurazione dovuto alla necessità di fare affidamento sull'osservatore, l'occhio umano è sostituito dal sensore fotoelettrico.

In riferimento alle lunghezze d'onda effettive la banda di lunghezze d'onda è sufficientemente stretta, a tal punto da poterlo considerare un pirometro a due lunghezze d'onda. A volte viene denominato come pirometro automatico a due colori.

Il primo pirometro automatico a due colori venne presentato nel 1939 da Russel, Lucks e Turnbull.

Presentava due celle fotoelettriche in vuoto che erano utilizzate come sensori in tandem con filtri rosso e verde. Il segnale di tali celle era amplificato attraverso dei tubi in vuoto, tipo 57, e il rapporto di amplificazione voluto era ottenuto tramite un registratore elettro-meccanico auto-regolante.

Il range di misurazione di questo pirometro era superiore ai 1000°C e l'errore di misurazione era di  $\pm 10^\circ\text{C}$ . La principale fonte d'errore era costituita dalla dipendenza della trasmittività del filtro rosso alla variazione della temperatura.

In FIGURA è illustrato il principio di funzionamento di questa tipologia di pirometri.

Come mostrato invece in Fig. A.11(a), un sensore fotoelettrico singolo D è irradiato in modo alterno attraverso un disco rotante avente due filtri F1 ed F2 di lunghezza d'onda effettiva  $\lambda_{e1}$  e  $\lambda_{e2}$ .

L'uso di un singolo sensore per confrontare due intensità radianti consente di raggiungere una elevata stabilità nella lettura della misura. Il sistema si basa sul principio della compensazione nulla, dove una delle due intensità radianti è attenuata da un filtro addizionale F<sub>3</sub>, che viene posizionato nel campo di visualizzazione da un servomotore.

A seconda di quale delle due radiazioni sia predominante, la fase del segnale di uscita del sensore è corretta di un fattore  $\pi$ . Dopo una fase dedicata all'amplificazione, il senso di rotazione del motore che muove il filtro F<sub>3</sub> viene invertito realizzando in questo modo la compensazione.

Quando si è in una situazione di equilibrio ottico il puntatore, che è accoppiato al movimento del filtro  $F_3$ , indica il valore della temperatura misurata.

In Fig. A.11(b) è invece raffigurato un sistema nel quale il flusso radiativo o passa attraverso il filtro rotante, oppure viene riflesso da quest'ultimo.

I flussi successivamente raggiungono alternativamente i sensori  $D_1$  e  $D_2$ , e poi i segnali elettronici vengono opportunamente condizionati e modulati nei circuiti a ponte.

La regolazione della resistenza del ponte, che avviene mediante un servomotore, esplicita la temperatura misurata attraverso l'indicatore puntiforme collegato direttamente con la slitta di posizionamento del resistore.

Metodi alternativi per la realizzazione di due canali a partire da un'unica radiazione incidente sono l'impiego di specchi semitrasparenti o l'impiego di fibre ottiche a doppia estremità, come mostrato in Fig. A.11(c) e Fig. A.11(d).

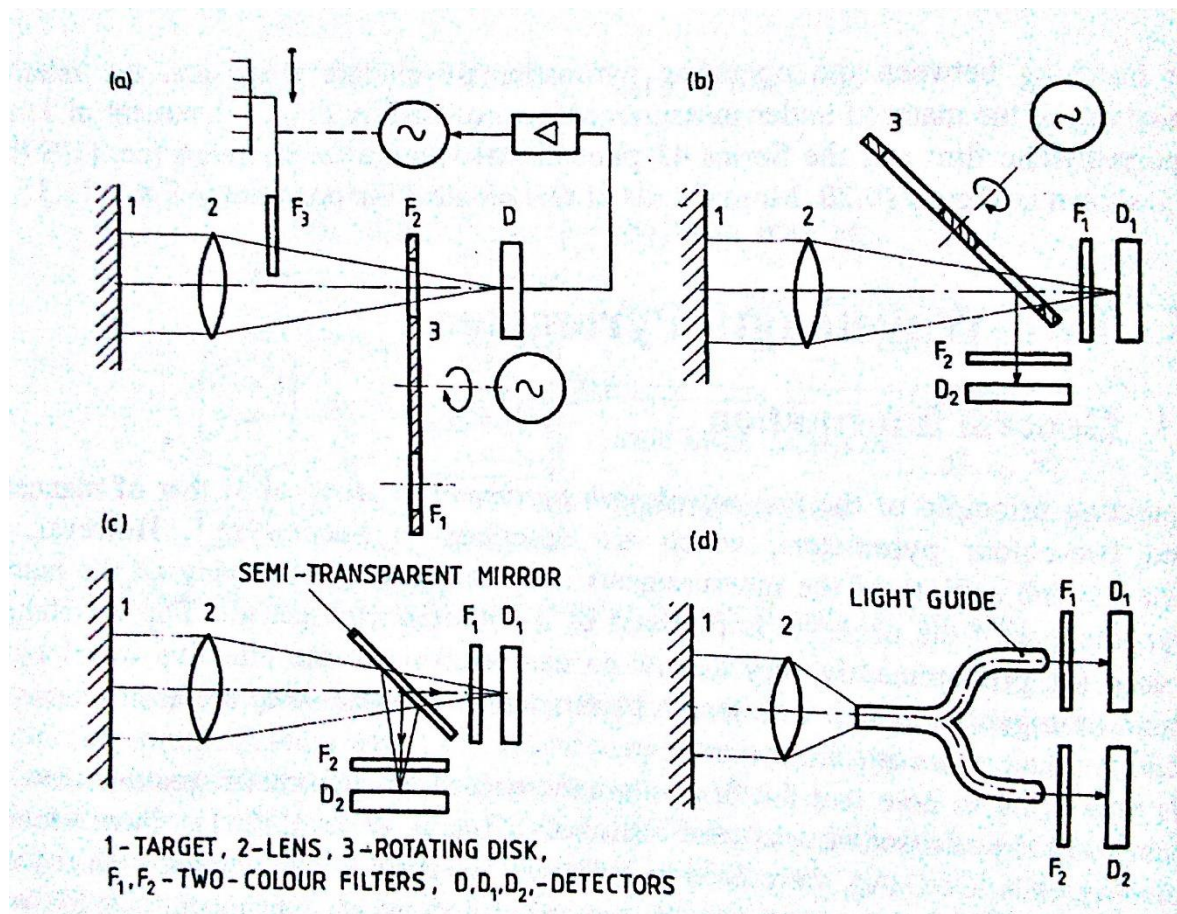


Fig. A.11 Principio di funzionamento dei pirometri a due lunghezze d'onda



# Appendice B

## Termografia infrarossa per misure di temperatura

### [20]

#### B.1 - Introduzione

La termografia infrarossa (IRT, Infrared Thermography) è una scienza che si occupa dell'acquisizione e dell'elaborazione di informazioni riguardanti la temperatura tramite strumenti di misura non a contatto. Si basa sulla radiazione infrarossa, una forma di radiazione elettromagnetica con lunghezze d'onda più lunghe di quelle del visibile. Ogni oggetto che sia ad una temperatura al di sopra dello zero assoluto ( $T > 0$  K) emette radiazione infrarossa. L'occhio umano non è in grado di vedere questo tipo di radiazione, pertanto si rendono necessari strumenti opportuni in grado di acquisire e processare questa informazione. Essi acquisiscono la radiazione infrarossa emessa da un oggetto e la trasformano in un segnale elettronico.

Lo strumento a infrarossi più semplice è il pirometro, che produce un output singolo usando in unico sensore, mentre esistono soluzioni più complesse che prevedono array di sensori che forniscono dettagliata immagine infrarossa della scena.

La differenza tra un'immagine visibile ed un'immagine infrarossa è che la prima è una rappresentazione della luce riflessa nella scena, mentre, nella seconda, la scena stessa è la sorgente e può essere osservata senza luce tramite una termocamera ad infrarossi.

Le immagini acquisite utilizzando termocamere ad infrarossi sono convertite in immagini visibili assegnando un colore a ciascun livello di energia infrarossa: il risultato è un'immagine chiamata termogramma, i cui colori non sono quelli reali visibili nella scena.

La termografia infrarossa possiede molti vantaggi rispetto alle altre tecnologie:

- Non prevede contatto: gli strumenti utilizzati non sono in contatto con la sorgente di calore. In questo modo si possono misurare in sicurezza temperature di oggetti estremamente caldi o pericolosi, come per esempio gli acidi.
- Fornisce immagini termiche bidimensionali, che consente di fare una comparazione tra diverse zone del misurando.
- La misurazione avviene in tempo reale, il che consente di fare acquisizioni in velocità sia di target stazionari che di target in movimento o con rapido cambiamento dello stato termico.
- Non ha effetti collaterali sulla salute che sono presenti in altre tecnologie di misura, come i raggi x. Risulta quindi adatto nel caso in cui si debba fare un uso prolungato e ripetuto dello strumento.
- È una tecnologia non invasiva, e quindi non influenza il campione in alcun modo.

Dati i numerosi vantaggi che caratterizzano la termografia infrarossa, questa tecnica si sta sempre più affermando in numerosi campi.

Tuttavia essa non è esente da difetti: hardware veloci ed a prezzi accessibili recentemente hanno cominciato ad essere disponibili, ma una termocamera generalmente resta ancora uno strumento molto costoso.

Solo ultimamente il mercato offre alcuni modelli relativamente economici dotati di una risoluzione spaziale sufficiente per la maggior parte delle applicazioni (640x512), ma purtroppo questi modelli di fascia

bassa dotati di buona risoluzione spaziale hanno un'accuratezza più bassa, che li rende inutilizzabili in numerose circostanze.

Inoltre le immagini infrarosse possono risultare di difficile interpretazione e spesso è richiesta una specifica formazione.

Parametri come temperatura circostante, flusso d'aria e umidità, infine, influenzano pesantemente il risultato della misurazione, che deve quindi avvenire possibilmente in un ambiente controllato.

### B.1.1 - Alcune applicazioni della termografia

Alcuni dei principali campi di utilizzo della termografia infrarossa sono la medicina, la medicina veterinaria, il settore dei test non distruttivi, ispezione degli edifici, il monitoraggio e la manutenzione di processo.

#### Medicina

La temperatura è un ottimo indicatore della salute, dato che un cambiamento di qualche grado della temperatura della pelle può essere un indicatore di possibili malattie.

Per esempio la termografia viene utilizzata per individuare tumori superficiali, come il cancro al seno: infatti i tumori hanno un maggiore afflusso di sangue che aumenta la temperatura della pelle in loro corrispondenza.

In queste applicazioni l'IRT è uno strumento diagnostico complementare molto efficace solo nella rivelazione dei primi segnali di allarme: questa capacità di rilevare i primi segnali di pericolo è il principale vantaggio della termografia nei confronti degli altri metodi.

Vi sono molte altri settori della medicina che fanno uso della termografia: malattie della pelle, dermatologia, odontoiatria, operazioni di cuore, controllo della febbre, diagnosi della neuropatia diabetica o di disturbi vascolari.

#### Manutenzione

Un'altra area dove la termografia è utilizzata con successo è la manutenzione, soprattutto nel campo elettrico, in quello meccanico e nell'isolamento termico.

Nella manutenzione meccanica ed elettrica essa viene adoperata per rilevare segni preliminari di malfunzionamento, in modo da consentire una manutenzione predittiva andando ad evitare i costi di breakdown.

Nel campo elettrico, temperature anormali possono indicare connessioni difettose mentre, nel campo meccanico, possono indicare fatica del materiale oppure eccessivo attrito a causa di una scarsa lubrificazione.

La termografia viene anche applicata nell'ispezione di saldature, nella valutazione della fatica del materiale e nel monitoraggio di processo, come ad esempio il monitoraggio delle deformazioni plastiche.

#### Building inspections

La distribuzione di temperatura sulla facciata di un edificio fornisce informazioni molto utili legate al monitoraggio, alla manutenzione ed anche alle performance termiche dell'edificio.

Per esempio, la termografia può essere usata per rilevare dove e quanta energia sta trapelando dall'involucro edilizio. Oltre a queste applicazioni relative alla dispersione termica negli edifici, essa può venire anche utilizzata per scoprire altre anomalie, come ad esempio infiltrazioni d'acqua e umidità.

Nella termografia infrarossa si utilizzano due approcci differenti: attivo e passivo.

Nell'approccio passivo, la radiazione proveniente dal target è misurata senza alcuna stimolazione di calore esterna, e l'informazione ottenuta può essere utilizzata per misure di temperatura.

Nell'approccio attivo, invece, il provino viene stimolato termicamente dall'esterno. La propagazione del calore dipende dalle proprietà termiche del materiale, ma anche dalle anomalie superficiali, che si traducono in differenze di temperatura sulla superficie del target. Pertanto, in questo caso, la radiazione misurata proviene dalla risposta termica del target stesso ad una eccitazione termica esterna.

La termografia passiva viene utilizzata nelle applicazioni di controllo qualità e monitoraggio di processo.

In ogni processo industriale, infatti, la temperatura gioca un ruolo fondamentale: dunque la misura ed il monitoraggio della temperatura durante e dopo il processo sono fondamentali per ottenere risultati ottimali (ad esempio nella sinterizzazione e nella laminazione).

Tuttavia, il calcolo della temperatura da immagini infrarosse non si basa solo dalla radiazione misurata, ma dipende da numerosi fattori, come l'emissività dell'oggetto e la calibrazione interna della termocamera.

L'approccio attivo è invece usato prevalentemente nelle applicazioni di test non distruttivi, dove viene applicato al provino uno stimolo esterno al fine di indurre un contrasto termico rilevante tra le regioni di interesse. Viene utilizzato nelle ispezioni dei materiali per rilevare difetti superficiali oppure aree del campione che possiedono proprietà differenti sotto la superficie.

Di seguito verranno trattati i principi fisici della termografia e il suo utilizzo nelle misure di temperatura.

## B.2 - Principi fisici della termografia infrarossa

La radiazione infrarossa è l'energia irradiata da una superficie di un oggetto la cui temperatura è sopra lo zero assoluto ed è funzione della temperatura stessa del materiale: maggiore è la temperatura maggiore è l'intensità di energia infrarossa emessa.

L'energia radiante che colpisce un oggetto può essere dissipata per assorbimento, riflessione o trasmissione.

Vengono utilizzati tre parametri per descrivere il fenomeno, che dipendono dalla lunghezza d'onda:

- l'assorbanza spettrale  $\alpha_\lambda$ , che è il rapporto tra la potenza spettrale radiante assorbita dall'oggetto,
- la riflettanza spettrale  $\rho_\lambda$ , che è il rapporto tra la potenza spettrale radiante riflessa dall'oggetto,
- la trasmittanza spettrale  $\tau_\lambda$ , che è il rapporto tra la potenza spettrale radiante trasmessa dall'oggetto.

Ad ogni lunghezza d'onda la somma di questi tre parametri deve dare 1:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (1.1)$$

Nei materiali opachi, tutta l'energia incidente è assorbita o riflessa, e quindi l'equazione si semplifica in questo modo:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (1.2)$$

I materiali per i quali trasmissività e riflettanza sono nulle sono detti corpi neri: in questi materiali tutta l'energia radiante incidente è assorbita ( $\alpha_\lambda = 1$ ).

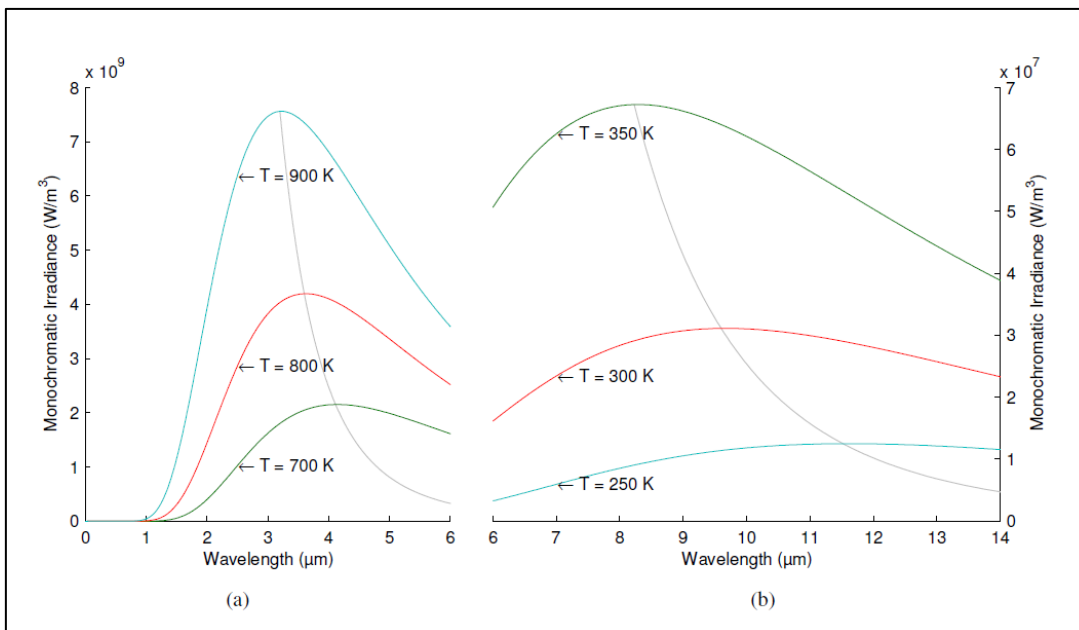
La radiazione emessa da un corpo nero ( $W_{\lambda b}$ ) può essere calcolata tramite la legge di Plank:

$$W_{\lambda b} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1.3)$$

dove  $C_1$  e  $C_2$  sono delle costanti,  $\lambda$  è la lunghezza d'onda e  $T$  la temperatura.

In Fig. B.1 è rappresentata la radiazione emessa da un corpo nero a diverse temperature. Come si può notare, per un oggetto più caldo il picco della curva risulta essere più largo.

Inoltre si può osservare come vi sia una relazione inversa tra la temperatura e la lunghezza d'onda del picco di emissione: la lunghezza d'onda alla quale la radiazione elettromagnetica è emessa dipende dalla temperatura dell'oggetto, ovvero maggiore è la temperatura minore è la lunghezza d'onda.



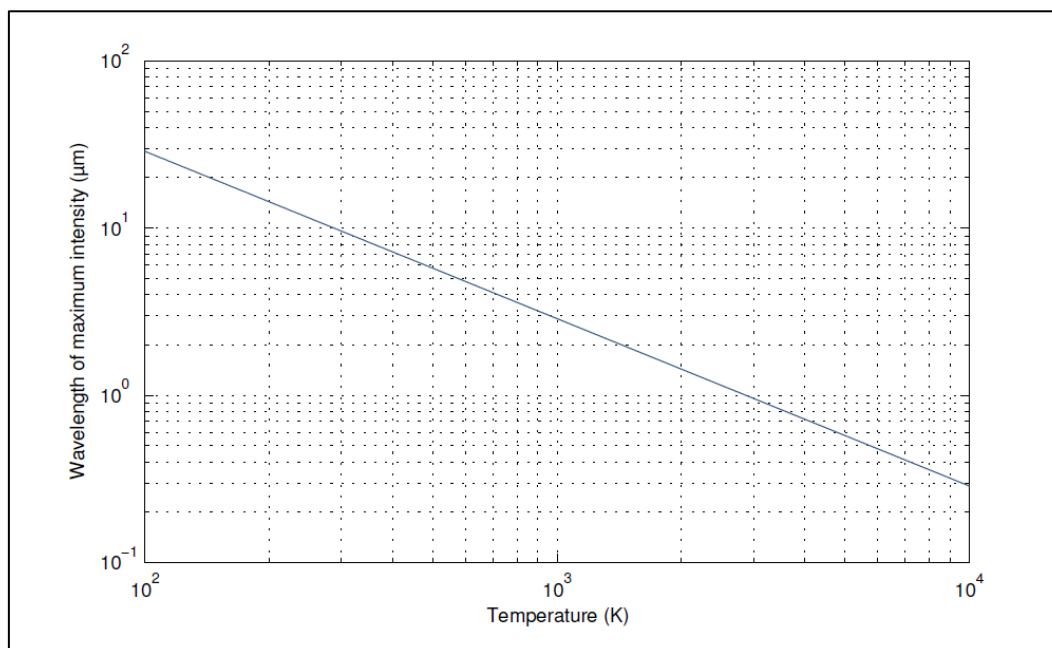
**Fig. B.1** Legge di Planck: radiazione elettromagnetica emessa da un corpo nero in equilibrio termico ad una certa temperatura. (a) Oggetti ad una temperatura elevata emettono la maggior parte della radiazione nell'infrarosso a media lunghezza; (b) Oggetti a bassa temperatura emettono la maggior parte della radiazione nell'infrarosso ad elevata lunghezza d'onda. Le due parti del grafico sono scalate in maniera diversa sull'asse y.

Per una specifica temperatura, la lunghezza d'onda del picco può essere calcolata con la legge di Wien:

$$\lambda_{peak} = \frac{0.0029}{T} \tag{1.4}$$

La legge di Wien è ottenuta differenziando l'equazione della legge di Planck rispetto a  $\lambda$  e trovando la massima intensità di radiazione.

In Fig. B.2 è rappresentata graficamente, utilizzando una scala logaritmica, la relazione tra la lunghezza d'onda dei picchi e la temperatura.



**Fig. B.2** Lunghezza d'onda dell'intensità massima di radiazione di un corpo nero in funzione della temperatura



Per ottenere la radiazione emisferica totale, l'equazione 1.3 è integrata lungo tutte le lunghezze d'onda ( $\lambda$  da zero a infinito) andando così ad ottenere l'equazione di Stefan-Boltzmann:

$$W_b = \sigma \cdot T^4 \quad (1.5)$$

dove  $\sigma$  è una costante.

L'emissività di un corpo nero è definita, per una lunghezza d'onda  $\lambda$ , come il rapporto tra l'energia radiante emessa dal corpo e la radiazione che sarebbe emessa da un corpo nero alla medesima temperatura, ed è espressa dalla relazione seguente:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda b}} \quad (1.6)$$

Un corpo reale emette solo una frazione dell'energia termica emessa da un corpo nero alla stessa temperatura.

Se l'emissività è costante ed indipendente dalla lunghezza d'onda, il corpo è detto corpo grigio. Ciò è espresso dall'equazione 1.7:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda b}} = \frac{W}{W_b} = \varepsilon \quad (1.7)$$

L'emissività degli oggetti reali non è costante e neppure indipendente dalla lunghezza d'onda e quindi non possono essere considerati dei corpi grigi.

Tuttavia si assume che per brevi intervalli di lunghezza d'onda l'emissività possa essere considerata una costante.

Facendo la media della loro emissività lungo brevi intervalli di lunghezza d'onda, essi possono essere considerati come dei corpi grigi.

Ciò è possibile perché l'emissività, per oggetti solidi, varia lentamente in funzione della lunghezza d'onda.

Quanto affermato non si applica ad altre casistiche, come ad esempio gas o liquidi.

Sostituendo l'equazione 1.7 nella 1.5 si ottiene la formula di Stefan-Boltzmann per i corpi grigi che irradiano:

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1.8)$$

In Fig. B.3 è rappresentata graficamente tale relazione in funzione dell'emissività.

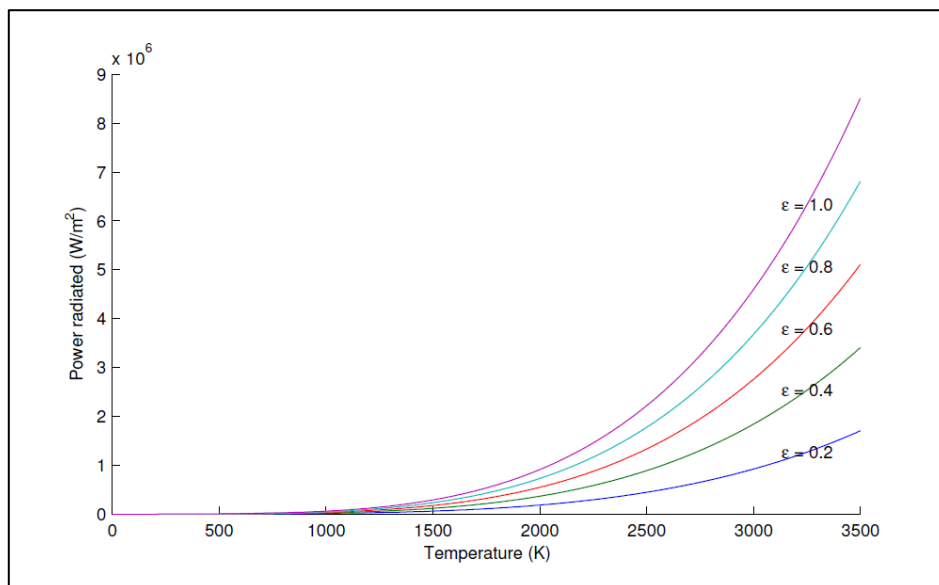


Fig. B.3 Legge di Stefan-Boltzmann: potenza irradiata da un corpo grigio per differenti emissività

In assenza di trasmissione e riflessione, assorbanza è pari ad uno. In condizioni di temperatura stazionarie, poi, tutta l'energia assorbita deve essere ri-emessa, pertanto l'emissività risulterebbe unitaria. Perciò l'assorbanza in un corpo nero è pari all'emissività.

In generale, secondo la legge di Kirchhoff, l'emissività e l'assorbanza di ogni materiale sono uguali a determinate temperature e lunghezza d'onda:

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (1.9)$$

Per i materiali opachi pertanto varrà la seguente relazione:

$$\rho_\lambda = 1 - \varepsilon_\lambda \quad (1.10)$$

I corpi grigi emettono solo una frazione dell'energia termica emessa da un corpo nero equivalente e, pertanto, la loro emissività sarà sempre minore di uno mentre la riflettività maggiore di zero.

### B.2.1 - Bande

Lo spettro elettromagnetico è diviso in numerose regioni o bande in base alla lunghezza d'onda.

Queste regioni non sono definite nettamente.

La regione dell'infrarosso è definita approssimativamente da 0,8  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$ , ovvero dalla fine del visibile alle microonde.

Parte di questo range è bloccata dall'atmosfera, e quindi non è utilizzabile nella termografia infrarossa.

Le porzioni utilizzabili nell'IRT sono dunque le seguenti:

- Near-infrared infrared (NIR): da 0,8  $\mu\text{m}$  a 1,7  $\mu\text{m}$ ;
- Short-wavelength infrared (SWIR): da 1  $\mu\text{m}$  a 2,5  $\mu\text{m}$ ;
- Mid-wavelength infrared (MWIR): da 2  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ ;
- Long-wavelength infrared (LWIR): da 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ .

Le bande più usate nella termografia infrarossa sono MWIR e LWIR.

Ci sono fondamentalmente due motivi.

Un primo motivo è legato al fatto che le misure più efficaci per una particolare temperatura dovrebbero essere effettuate per la lunghezza d'onda alla quale si ha la maggiore intensità di emissione: misurare ad una differente lunghezza d'onda richiederebbe una termocamera molto più sensibile per poter ottenere le stesse performance.

Pertanto, per molte applicazioni sono richieste lunghezze d'onda maggiori delle SWIR.

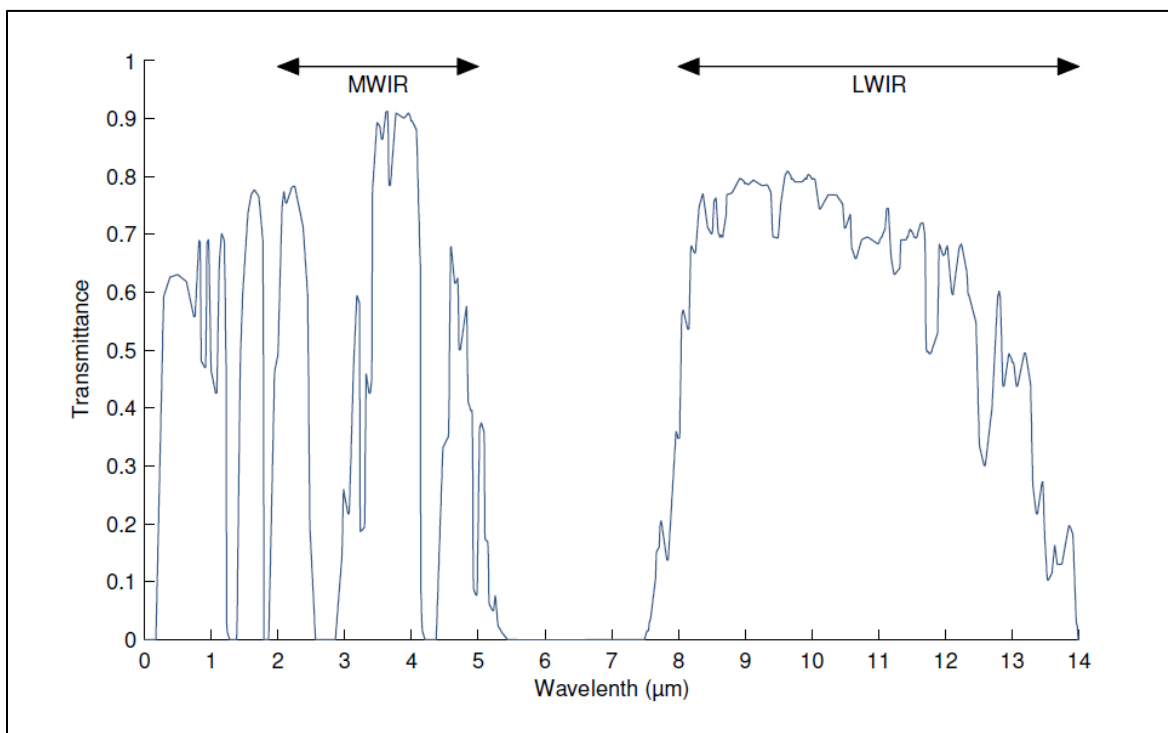
Un secondo motivo è collegato alla trasmittanza atmosferica.

La radiazione infrarossa viaggia attraverso l'aria e viene assorbita da varie particelle dell'aria stessa, principalmente da  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Il grado di assorbimento di radiazione infrarossa da parte dell'aria dipende dalla lunghezza d'onda: nelle bande MWIR ed LWIR, questo assorbimento è basso, consentendo ad una maggiore porzione di radiazione di raggiungere i sensori della termocamera.

In Fig. B.4 è diagrammata la trasmittanza atmosferica per diverse lunghezze d'onda.

Come si può notare, nella parte visibile dello spettro (da 0,4  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$ ) solo il 60% della radiazione emessa è trasmesso, mentre tra i 5  $\mu\text{m}$  e i 7,5  $\mu\text{m}$  non si ha trasmissione poiché l'atmosfera assorbe tutta la radiazione.

Pertanto gli strumenti di misura usano MWIR oppure LWIR: gli strumenti MWIR sono utilizzati per misure di alte temperature, mentre i LWIR sono usati per misure a temperatura ambiente.



**Fig. B.4** *Trasmittanza atmosferica ad una miglio marino, 15,5°C, 70% di umidità relativa al livello del mare*

### B.2.2 - Digitalizzazione

Un sensore trasforma la radiazione infrarossa in un segnale elettronico. Il detector fornisce un voltaggio proporzionale alla radiazione ricevuta.

I detector più comuni si dividono in due famiglie: detector microbolometrici non raffreddati e detector raffreddati, che sono usati per termocamere ad alta sensibilità.

Le termocamere si suddividono in due classi: quelle a singolo sensore e quelle FPA (*Focal Plane Array*).

Per ottenere misure a due dimensioni, le termocamere a singolo sensore usano uno specchio rotante. Il sensore misura l'energia irradiata sulla superficie di un oggetto riflesso sullo specchio. Quest'ultimo ruota, consentendo di misurare la radiazione lungo una linea orizzontale.

Dunque, ad ogni rotazione si effettua una misurazione lungo una linea. L'oggetto è posto in movimento lungo un percorso e pertanto facendo ripetute scansioni lineari si possono ottenere delle acquisizioni di temperatura su tutta la superficie dell'oggetto.

Un altro approccio prevede l'utilizzo di un array di detectors chiamato focal plane array, nel quale ogni detector fornisce informazioni sulla radiazione in un punto.

Un'immagine infrarossa può essere descritta come una funzione  $f(x,y)$  dove l'ampiezza del valore di  $f$  per le coordinate spaziali  $x$  e  $y$  è uno scalare positivo, che corrisponde alla quantità di energia irradiata da una regione di un piano. La funzione  $f$  è continua quindi per convertirla in un formato digitale deve essere campionata nello spazio e nell'ampiezza.

La digitalizzazione dello spazio è detta campionamento mentre quella dell'ampiezza quantizzazione.

Il campionamento è definito dalla risoluzione della termocamera, cioè dal numero di detector dell'FPA.

La risoluzione descrive la quantità di informazioni che la termocamera può acquisire, ed è indicata da due parametri:  $M$  e  $N$  (spesso indicati come  $M \times N$ ), ovvero rispettivamente il numero di righe ed il numero di colonne.

Valori tipici vanno dai  $120 \times 140$  ai  $1280 \times 1024$ .

La quantizzazione è definita dal numero di bit usati per rappresentare un singolo valore di radiazione misurato.

Per effettuare il processo di quantizzazione, è necessario definire un set di livelli per il segnale.

Il range di variazione del segnale è suddiviso in quel numero di livelli, e il valore continuo è associato al livello nel quale è localizzato.

Un valore tipico è 14 bits, ovvero 16384 livelli.

La quantizzazione è poi influenzata dalla sensibilità, ovvero dalla differenza di temperatura minima tra due punti dell'immagine, tipicamente espressa in NETD (*Noise-Equivalent Temperature Difference*).

Valori tipici sono intorno ai 20÷50mK.

Un terzo aspetto della digitalizzazione riguarda il campionamento temporale, cioè il numero di immagini o frames che una termocamera può acquisire al secondo. Solitamente i valori variano nel range 30 Hz ÷ 60 Hz.

### B.3 - Misure di temperatura

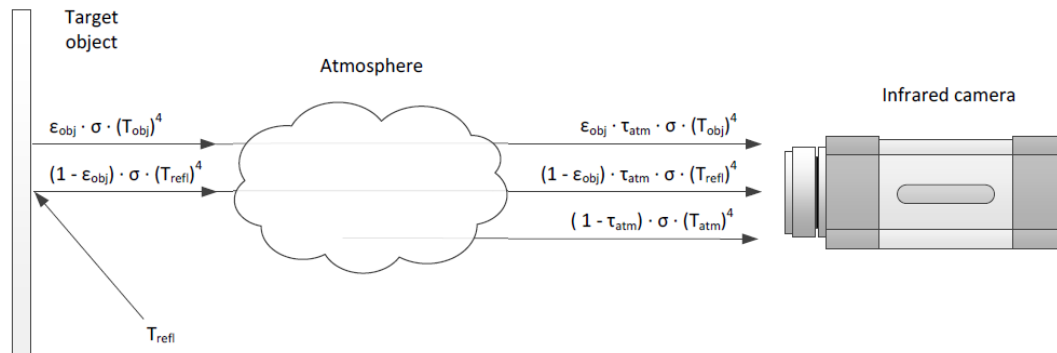
La misura della temperatura fornisce un'informazione sull'energia interna dell'oggetto, quindi in molte applicazioni industriali risulta di fondamentale importanza.

La misura di temperatura tramite la termografia infrarossa misura la radiazione infrarossa emessa da un oggetto e converte l'energia rilevata in un valore di temperatura.

Tuttavia, dato che non tutta la radiazione ricevuta proviene dal target, al fine di misurare accuratamente la temperatura si rende necessario effettuare una compensazione, andando a rimuovere in fase di conversione la radiazione proveniente da altre sorgenti.

La radiazione totale ricevuta dalla camera ( $W_{tot}$ ) proviene da tre sorgenti: l'emissione del target ( $E_{obj}$ ), l'emissione dell'ambiente circostante riflessa dall'oggetto target ( $E_{refl}$ ) e l'emissione dell'atmosfera ( $E_{atm}$ ), come espresso dall'equazione 1.11 e dalla Fig. B.5.

$$W_{tot} = E_{obj} + E_{refl} + E_{atm} \quad (1.11)$$



**Fig. B.5** Radiazione ricevuta dalla termocamera a infrarossi

La prima fonte è la radiazione emessa dall'oggetto target. Tuttavia non tutta la radiazione emessa da quest'ultimo è ricevuta dalla telecamera ad infrarossi, ma una porzione di essa è assorbita dall'atmosfera proporzionalmente alla sua trasmittanza ( $\tau_{atm}$ ).

Quindi la radiazione emessa dal target può essere così espressa:

$$E_{obj} = \epsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{obj}^4 \quad (1.12)$$

I corpi grigi hanno una riflettività maggiore di zero, quindi riflettono la radiazione infrarossa emessa dall'ambiente circostante. Parte di questa radiazione è assorbita dall'atmosfera. La componente  $E_{refl}$  può essere calcolata con l'equazione seguente:

$$E_{refl} = \rho_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 = (1 - \epsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 \quad (1.13)$$

La terza componente è la radiazione infrarossa emessa dall'atmosfera, ed è espressa dall'equazione seguente, dove  $(1 - \tau_{atm})$  è l'emittanza dell'atmosfera:

$$E_{atm} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 = (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \quad (1.14)$$

Sostituendo le equazioni 1.12 ed 1.14 nella 1.11 si ottiene l'equazione 1.15:

$$W_{tot} = \varepsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 + (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 \quad (1.15)$$

Dunque, dalla 1.15 si può ricavare l'espressione della temperatura dell'oggetto:

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 - (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4}{\varepsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma}} \quad (1.16)$$

Per risolvere l'equazione 1.16 devono essere noti i seguenti parametri: l'emissività dell'oggetto ( $\varepsilon_{obj}$ ), la temperatura riflessa ( $T_{refl}$ ), la trasmittanza dell'atmosfera ( $\tau_{atm}$ ) e la temperatura dell'atmosfera ( $T_{atm}$ ). La trasmittanza dell'atmosfera è solitamente stimata usando la distanza tra l'oggetto e la termocamera e l'umidità relativa dell'ambiente. In generale questo valore è molto vicino ad 1.

Per quanto riguarda la temperatura dell'atmosfera, invece, si ottiene per mezzo di un comune termometro. Tuttavia, dato che l'emissività dell'atmosfera è molto vicino a zero ( $1 - \tau_{atm}$ ), questo parametro ha una scarsa influenza sul valore di temperatura misurato.

D'altro canto, l'emissività dell'oggetto e la temperatura riflessa hanno un'elevata influenza e devono quindi essere misurati in maniera molto accurata.

### B.3.1 - Misure di emissività e temperatura riflessa

Il parametro di calibrazione più importante per la misura della temperatura usando la termografia infrarossa è l'emissività. Questo parametro indica quanta radiazione è emessa dal target rispetto a quella emessa da un corpo nero alla medesima temperatura. Quindi materiali a bassa emissività emettono meno radiazione infrarossa rispetto a materiali dotati di emissività elevata alla medesima temperatura. Nei materiali a bassa emissività risulta molto importante fare una misura accurata dell'emissività stessa, mentre in quelli ad elevata emissività piccole variazioni di tale valore comportano solo piccole variazioni nella temperatura superficiale misurata.

Per misurare l'emissività il target deve essere riscaldato fino a che non raggiunga le temperature che sarebbero raggiunte in condizioni di lavoro reali.

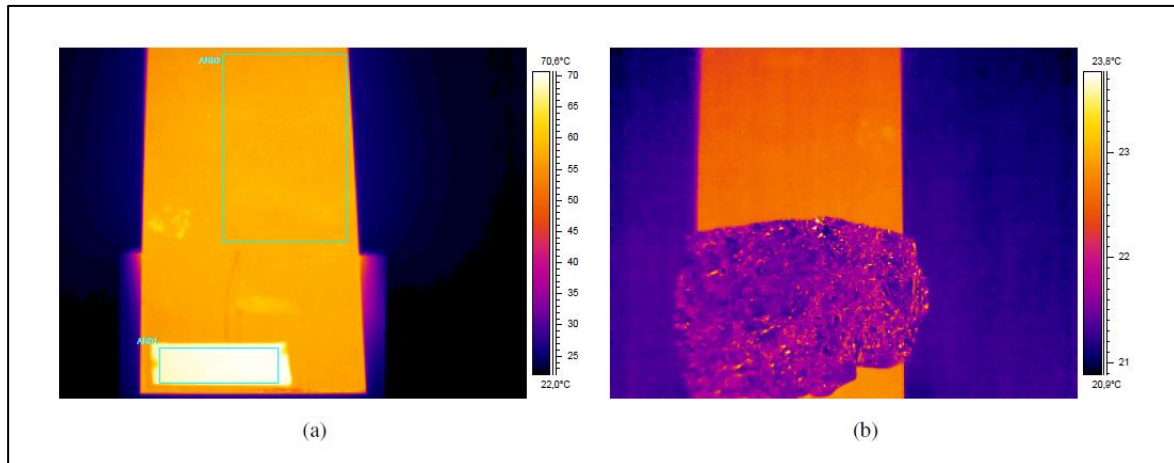
Per ottenere la temperatura di riferimento si può adoperare una termocoppia (metodo a contatto), ma spesso per basse temperature è più comune usare la termocamera stessa andando ad incollare sul target un pezzo di nastro adesivo di emissività nota (reference emissivity material method).

Una volta nota la reale temperatura del pezzo riscaldato, il campione è misurato di nuovo con lo strumento ad infrarossi, ma questa volta sulla superficie del target e non su quella del nastro adesivo.

Viene poi variata la configurazione di emissività fino a che non viene misurata la reale temperatura.

L'emissività che ne risulta è quella del target da misurare.

In Fig. B.6 (a) è rappresentata un'immagine acquisita utilizzando questo metodo: come si può notare, il nastro ha un'emissività molto alta, che si traduce in una maggiore temperatura apparente.



**Fig. B.6** Immagini infrarosse acquisite durante la calibrazione. (a) Misura dell'emissività con il metodo *reference emissivity material method*. (b) Misure della temperatura riflessa con il metodo del riflettore.

Un altro parametro molto importante è la temperatura riflessa, soprattutto quando la riflessività del target è alta (materiali a bassa emissività).

I metodi più utilizzati per misurare la temperatura riflessa sono due: il metodo del riflettore ed il metodo diretto.

Il metodo del riflettore è molto più comune perché è più semplice e fornisce risultati migliori.

Esso consiste nell'utilizzare un standard di riflessione calibrato, come per esempi un rivestimento metallico in oro. Un'alternativa molto usata è usare un foglio di alluminio accartocciato e poi rappiattato. Il riflettore è posizionato nel campo di vista della termocamera e la sua temperatura è misurata assumendo una emissività di 1 ed una distanza nulla.

Infine la misura è ripetuta usando la temperatura del riflettore come temperatura riflessa.

Il valore di temperatura risultante è la temperatura riflessa.

La Fig. B.6 (b) mostra un'immagine acquisita durante delle misure effettuate utilizzando questo metodo.

# Appendice C

## Esempi di comandi *Ansys*® *APDL* utilizzati per le analisi numeriche

In questa appendice verranno presentati degli esempi di comandi APDL utilizzati per la creazione e la risoluzione dei modelli numerici descritti in questo lavoro di tesi. Verrà inizialmente presentata la macro APDL della grafite EDM-3®, realizzata appositamente per questo lavoro di tesi. Successivamente verranno descritti i comandi utilizzati per le analisi elettro-termica della cella e infine dell'intera camera TOF con assemblata all'interno la cella di Knudsen, il sistema di supporto e centraggio della cella, il sistema di schermatura termica progettato ed il sistema di collimazione.

### C.1 - Macro APDL per la grafite EDM-3®

```
!-----
!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,

!-----

!EMISSION (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,
```

## C.2 - Comandi APDL utilizzati per le analisi elettro-termiche della cella di Knudsen

```
!-----initializing-----
FINISH
/CLEAR, START
/TITLE, Knudsen cell - thermal/electrical analysis - heating current = 750A
/CONFIG,NRES,100000 !maximum number of substeps allowed on the result file
!-----parameters-----
T0=25 !temperature constraint [°C]
I_LINE=750 !line electric current [A]
!-----geometry import-----
/AUX15!enters the IGES file transfer processor

IOPTN,IGES,NODEFEAT !no defeaturing
IOPTN,MERG,YES !automatic merging of entities
IOPTN,SOLID,YES !solid is created automatically
IOPTN,SMALL,YES !small areas are deleted
IOPTN,GTOLER,0.0001 !merging tolerance

IGESIN,'kc_main_clamp_1','igs' !copper main clamp import
IGESIN,'kc_main_clamp_2','igs' !copper main clamp import
IGESIN,'kc_tof_clamp_1a','igs' !copper clamp import
IGESIN,'kc_tof_clamp_1b','igs' !copper clamp import
IGESIN,'kc_top','igs' !cell cover import
IGESIN,'kc_bottom','igs' !cell bottom import
IGESIN,'kc_ta_plate_1','igs' !tantalum plate import
IGESIN,'kc_ta_plate_2','igs' !tantalum plate import
IGESIN,'kc_ta_screwed_plate_1','igs' !tantalum screwed plate import
IGESIN,'kc_ta_screwed_plate_2','igs' !tantalum screwed plate import
IGESIN,'kc_ta_screw_1','igs' !tantalum screw import
IGESIN,'kc_ta_screw_2','igs' !tantalum screw import
```

```

IGESIN,'kc_ta_screw_3','igs'           !tantalum screw import
IGESIN,'kc_ta_screw_4','igs'           !tantalum screw import
IGESIN,'kc_ta_screen','igs'            !tantalum screen import
IGESIN,'kc_ta_foil_conn_1','igs'        !tantalum foil connector import
IGESIN,'kc_ta_foil_conn_2','igs'        !tantalum foil connector import
IGESIN,'kc_ta_foil_conn_3','igs'        !tantalum foil connector import
IGESIN,'kc_ta_foil_conn_4','igs'        !tantalum foil connector import
IGESIN,'kc_centering_support_1','igs'   !tantalum support bar import
IGESIN,'kc_centering_support_2','igs'   !tantalum support bar import
IGESIN,'kc_centering_support_3','igs'   !tantalum support bar import
IGESIN,'kc_centering_support_4','igs'   !tantalum support bar import
IGESIN,'kc_mo_nut_1','igs'              !molibdenum nut import
IGESIN,'kc_mo_nut_2','igs'              !molibdenum nut import
IGESIN,'kc_mo_nut_3','igs'              !molibdenum nut import
IGESIN,'kc_mo_nut_4','igs'              !molibdenum nut import

FINISH !
!-----model definition-----
/PREP7                                !enters the model creation preprocessor

*USE,M26Ta.mac                         !tantalum macro
*USE,M10C_EDM3.mac                      !graphite edm-3 macro
*USE,M28Cu.mac                           !copper macro
*USE,M30Mo.mac                           !molibdenum macro

ET,1,SOLID226                            !3D element with element with multi-field formulation
KEYOPT,1,1,110                           !specification of thermal-electric capability for ET 1

ET,2,SOLID87

vsel,s,,all
vsel,u,,15
vsel,u,,20,23,1
VGLUE,all                                !generates new volumes by gluing volumes

NUMCMP,VOLU                             !compresses volume numbers
NUMCMP,AREA                             !compresses area numbers
NUMCMP,LINE                             !compresses line numbers
NUMCMP,KP                               !compresses keypoint numbers

ALLSEL, ALL                             !selects all entities
VLSCALE,ALL,,0.001,0.001,0.001,,0,1     !scaling from "mm" to "m"
!
!Meshing
!
!Tantalum screen meshing
VSEL,S,,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.003
VMESH,ALL
ALLSEL

!cell top&bottom meshing
VSEL,S,,26,27,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,C_EDM3
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.002
VMESH,ALL
ALLSEL

!Tantalum connectors meshing
VSEL,S,,22,25,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta

```

```
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.004
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!copper clamps meshing
VSEL,S,,14,15,1
VSEL,A,,10,11,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Cu
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.008
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Tantalum support bars meshing
VSEL,S,,2,5,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.002
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Tantalum plates meshing
VSEL,S,,12,13,1
VSEL,A,,16,17,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.003
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Tantalum screws meshing
VSEL,S,,18,21,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.002
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Molibdenum nuts meshing
VSEL,S,,6,9,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Mo
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.003
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
/REPLOT
!
!  
!Loads & Boundary conditions  
!  
!
```

```

!Ta components radiating surfaces
ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,Ta           !reselects the volumes of a specific material
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Ta,1     !specifies surface radiation as surface loads

!EDM-3 components radiating surfaces
ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,C_EDM3      !reselects the volumes of a specific material
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1 !specifies surface radiation as surface loads

!Mo components radiating surfaces
ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,Mo          !reselects the volumes of a specific material
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Mo,1     !specifies surface radiation as surface loads

!removal of the contact surfaces from the radiation problem
ALLSEL, ALL
*GET,nvolu,VOLU,0,COUNT
nn=0
*DO,i,1,nvolu
nn=vlnext(nn)
VSEL,ALL
VSEL,U,VOLU,,nn
ALLSEL,BELOW,VOLU
VSEL,S,VOLU,,nn
ASLV,R
SFADELE,ALL,,RDSF
ALLSEL,ALL
*ENDDO

!thermal initial conditions
TUNIF,T0                 !assigns a uniform temperature to all nodes [°C]

!temperature DOF constraint
ASEL,S,AREA,,8,8,1
ASEL,A,AREA,,13,14,1
DA,ALL,TEMP,T0          !defines DOF constraints on areas [°C]

!electrical connector voltage DOF constraint
DA,7,VOLT,0 !defines DOF constraints on areas [V]

!power generation - Joule effect
ASEL,S,AREA,,12         !selects a subset of areas
ALLSEL,BELOW,AREA       !selects all entities
NSLA,S,1                !selects those nodes associated with the selected areas
CP,3,VOLT,ALL           !defines a set of coupled degrees of freedom
ni=kpnxt(0)             !ndnext(x) get the next selected kp having a number greater than "x"
FK,ni,AMPS,I_LINE      !specifies force loads (el. current) at the master kp "ni"
ALLSEL                  !selects all entities with a single command

!space temperature definition (open enclosure)
SPCTEMP,1,T0 !defines a free-space ambient temperature using the Radiosity method

!defining Solution Options
STEF,5.67e-8            !specifies Stefan-Boltzmann radiation constant [W/(m^2*K^4)]
RADOPT,0.5,0.006,,5000 !specifies Gauss-Seidel Radiosity Solver options
TOFFST,273.15          !specifies the temperature offset from absolute zero to zero [°C]

!defining View Factor Options
HEMIOPT,100             !specifies options for Hemicube view factor calculation
VFOPT,OFF               !specifies options for view factor file

FINISH
/REPLOT

!-----solver-----
/SOLU !enters the solution processor

```

```

SOLCONTROL,ON           !specifies to use optimized nonlinear solution defaults
ANTYPE,TRANS            !specifies to perform a transient analysis, valid for all DOF
AUTOTS,ON              !specifies to use automatic time stepping
KBC,1                  !specifies stepped 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        !specifies to save the nodal DOF solution for every substep
TIME,1000              !sets the time for a load step

SAVE,,,,ALL            !saves all current database information
SOLVE                  !starts a solution
SAVE,,,,ALL

FINISH

```

### c.3 - Comandi APDL utilizzati per le analisi strutturali della cella di Knudsen

```

!-----initializing-----
FINISH
/CLEAR, START
/TITLE, TOF Chamber - Thermal/electrical analysis - Current=700A
/CONFIG,NRES,100000      !maximum number of substeps allowed on the result file

!-----parameters-----
T0=25                   !temperature constraint [°C]
I_LINE=700              !line electric current [A]
!-----geometry import-----
/AUX15                  !enters the IGEN file transfer processor

IOPTN,IGES,NODEFEAT     !no defeaturing
IOPTN,MERG,YES          !automatic merging of entities
IOPTN,SOLID,YES        !solid is created automatically
IOPTN,SMALL,YES        !small areas are deleted
IOPTN,GTOLER,0.000001 !merging tolerance

IGESIN,'blocchetti_macor','igs'           !macor plate import
IGESIN,'blocchetti_macor_001','igs'       !macor plate import
IGESIN,'blocchetti_macor_001_cpy_1','igs' !macor plate import
IGESIN,'blocchetti_macor_001_cpy_2','igs' !macor plate import
IGESIN,'blocchetti_macor_001_cpy_3','igs' !macor plate import
IGESIN,'blocchetti_macor_cpy_1','igs'     !macor plate import
IGESIN,'blocchetti_macor_cpy_2','igs'     !macor plate import
IGESIN,'blocchetti_macor_cpy_3','igs'     !macor plate import

IGESIN,'camera-croce','igs'               !camera croce import

IGESIN,'cmp_guida_radiale','igs'           !guida radiale import
IGESIN,'cmp_guida_radiale_001','igs'       !guida radiale import
IGESIN,'cmp_guida_radiale_001_cpy_1','igs' !guida radiale import
IGESIN,'cmp_guida_radiale_cpy_1','igs'     !guida radiale import
IGESIN,'comp_orizz','igs'                 !componente orizzontale import
IGESIN,'comp_orizz_001','igs'             !componente orizzontale import
IGESIN,'comp_orizz_001_cpy_1','igs'       !componente orizzontale import
IGESIN,'comp_orizz_cpy_1','igs'          !componente orizzontale import

IGESIN,'comp_vert_reg_lato','igs'         !componente verticale import
IGESIN,'aaa','igs'                       !componente verticale import
IGESIN,'comp_vert_reg_lato_001_cpy_1','igs' !componente verticale import
IGESIN,'comp_vert_reg_lato_cpy_1','igs'   !componente verticale import

IGESIN,'kc_bottom','igs'                 !KC bottom import
IGESIN,'kc_centering_support','igs'       !KC centering support import
IGESIN,'kc_centering_support_cpy_1','igs' !KC centering support import
IGESIN,'kc_centering_support_cpy_2','igs' !KC centering support import
IGESIN,'kc_centering_support_cpy_3','igs' !KC centering support import
IGESIN,'kc_main_clamp','igs'             !KC main clamp import
IGESIN,'kc_main_clamp_cpy_1','igs'       !KC maoin clamp import

```

```

IGESIN,'kc_mo_nut','igs'           !KC molibdenum nut import
IGESIN,'kc_mo_nut_cpy_1','igs'    !KC molibdenum nut import
IGESIN,'kc_mo_nut_cpy_2','igs'    !KC molibdenum nut import
IGESIN,'kc_mo_nut_cpy_3','igs'    !KC molibdenum nut import
IGESIN,'kc_ta_foil_conn','igs'    !KC tantalium foil import
IGESIN,'kc_ta_foil_conn_cpy_1','igs' !KC tantalium foil import
IGESIN,'kc_ta_foil_conn_cpy_2','igs' !KC tantalium foil import
IGESIN,'kc_ta_foil_conn_cpy_3','igs' !KC tantalium foil import
IGESIN,'kc_ta_plate','igs'        !KC tantalium plate import
IGESIN,'kc_ta_plate_cpy_1','igs'  !KC tantalium plate import
IGESIN,'kc_ta_screw','igs'        !KC tantalium screw import
IGESIN,'kc_ta_screw_cpy_1','igs'  !KC tantalium screw import
IGESIN,'kc_ta_screw_cpy_2','igs'  !KC tantalium screw import
IGESIN,'kc_ta_screw_cpy_3','igs'  !KC tantalium screw import
IGESIN,'kc_ta_screwed_plate','igs' !KC tantalium screwed plate import
IGESIN,'kc_ta_screwed_plate_cpy_1','igs' !KC tantalium screwed plate import

IGESIN,'kc_tof_clamp_1a','igs'     !KC clamp import
IGESIN,'kc_tof_clamp_1b','igs'     !KC clamp import
IGESIN,'kc_top','igs'              !KC top import

IGESIN,'piastra','igs'             !piastra import

IGESIN,'tappo','igs'               !tappo import

IGESIN,'prt0001','igs'
IGESIN,'prt0001_cpy_1','igs'
IGESIN,'schermo_tantalo','igs'
IGESIN,'schermo_tantalo_cpy_1','igs'

IGESIN,'graphite_screen','igs'     !graphite screen import
IGESIN,'graphite_screen_support_1','igs' !graphite_screen_support_1 import
IGESIN,'graphite_screen_support_1_cpy_1','igs' !graphite_screen_support_1_cpy_1 import
IGESIN,'graphite_screen_support_3','igs' !graphite_screen_support_3 import
IGESIN,'graphite_screen_support_3_cpy_1','igs' !graphite_screen_support_3_cpy_1 import
IGESIN,'ta_upper_screen','igs'     !ta_upper_screen import
IGESIN,'macor_upper_screen_support','igs' !macor_upper_screen_support import
IGESIN,'macor_upper_screen_support_cpy_1','igs' !macor_upper_screen_support_cpy_1 import
IGESIN,'allumina_platelets','igs'   !allumina_platelets import
IGESIN,'allumina_platelets_cpy_1','igs' !allumina_platelets_cpy_1 import
IGESIN,'allumina_platelets_cpy_2','igs' !allumina_platelets_cpy_2 import
IGESIN,'allumina_platelets_cpy_3','igs' !allumina_platelets_cpy_3 import
IGESIN,'allumina_platelets_cpy_4','igs' !allumina_platelets_cpy_4 import
IGESIN,'allumina_platelets_cpy_5','igs' !allumina_platelets_cpy_5 import
IGESIN,'allumina_platelets_cpy_6','igs' !allumina_platelets_cpy_6 import
IGESIN,'allumina_platelets_cpy_7','igs' !allumina_platelets_cpy_7 import

FINISH !

!-----model definition-----
/PREP7                               !enters the model creation preprocessor

*USE,M26Ta.mac                       !tantalum macro
*USE,M10C_EDM3.mac                   !graphite edm-3 macro
*USE,M28Cu.mac                       !copper macro
*USE,M30Mo.mac                       !molibdenum macro
*USE,M50SS316.mac                   !steel macro
*USE,M31Al2O3_XX.mac                 !allumina macro

ET,1,SOLID226                        !3D element with element with multi-field formulation

```





```
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.001*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Tantalum connectors meshing
VSEL,S,,,42,45,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.003*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!copper clamps meshing
VSEL,S,,,30,31,1
VSEL,A,,,36,37,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Cu
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.006*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Tantalum plates meshing
VSEL,S,,,32,35,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.003*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Tantalum screws meshing
VSEL,S,,,38,41,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,1
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.003*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Molibdenum nuts meshing
VSEL,S,,,5,8,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Mo
TYPE,1
MSHAPE,1,3Dmshape
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.003*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!-----mesh for the KC's supports-----
```

```
!Tantalium shields
VSEL,S,,,52,55,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.00175
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Tantalum support bars meshing (mesh dei puntali in tantalio)
VSEL,S,,,19,22,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Ta
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.001*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!radial guide meshing (mesh guida radiale)
VSEL,S,,,56,59,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,SS316
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.004*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!horizontal parts meshing (mesh componente orizzontale)
VSEL,S,,,66,69,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,SS316
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.0025*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!vertical components meshing (mesh componente verticale)
VSEL,S,,,60,63,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,SS316
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.003*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!alumina parts meshing (mesh placchette isolanti in allumina)
VSEL,S,,,10,17,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,Al2O3_XX
TYPE,2
```

```
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.004*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!-----chamber meshing-----
```

```
!chamber meshing (mesh camera)
VSEL,S,,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,SS316
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.01*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!cover meshing (mesh coperchio)
VSEL,S,,18
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,SS316
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.01*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!plate meshing (mesh piastra)
VSEL,S,,51
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,SS316
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.01*1.15
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!-----mesh for the graphite and tantalum screens and supports-----
```

```
!Graphite screen meshing (mesh schermetto grafite)
VSEL,S,,24
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,C_EDM3
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.002
VMESH,ALL
ALLSEL
```

```
!Graphite screen support part 1
VSEL,S,,64,65,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
MAT,SS316
TYPE,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
AESIZE,ALL,0.004
```



```
!EDM-3 components radiating surfaces
ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,C_EDM3      !reselects the volumes of a specific material
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-C_EDM3,1 !specifies surface radiation as surface loads
```

```
!Cu components radiating surfaces
ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,Cu          !reselects the volumes of a specific material
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Cu,1    !specifies surface radiation as surface loads
```

```
!Mo components radiating surfaces
ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,Mo          !reselects the volumes of a specific material
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Mo,1    !specifies surface radiation as surface loads
```

```
!Al2O3_XX components radiating surfaces
ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,Al2O3_XX    !reselects the volumes of a specific material
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-Al2O3_XX,1 !specifies surface radiation as surface loads
```

```
!A316L_X components radiating surfaces
ALLSEL, ALL
VSEL,R,MAT,,SS316        !reselects the volumes of a specific material
ALLSEL,BELOW,VOLU
SFA,ALL,,RDSF,-SS316,1  !specifies surface radiation as surface loads
```

```
!removal of the contact surfaces from the radiation problem
```

```
ALLSEL, ALL
*GET,nvolu,VOLU,0,COUNT
nn=0
*DO,i,1,nvolu
nn=vlnext(nn)
VSEL,ALL
VSEL,U,VOLU,,nn
ALLSEL,BELOW,VOLU
VSEL,S,VOLU,,nn
ASLV,R
SFADELE,ALL,,RDSF
ALLSEL,ALL
*ENDDO
```

```
!removal of the surfaces that exchange by convection
```

```
ASEL,S,,44              !natural convection
ASEL,A,,,31,37,1
ASEL,A,,,536,539,1
ASEL,A,,,540,541,1
ASEL,A,,,533,534,1
ASEL,A,,,490,492,1
ASEL,A,,,566
```

```
SFADELE,ALL,,RDSF
ALLSEL
```

```
!Definition of convective heat transfer surfaces
```

```
ASEL,S,,44              !natural convection
```









# Bibliografia

- [1] M. Manzolaro, *Study, design and test of the target-ion source system for the INFN SPES*, PhD Thesis, XXIII PhD Cycle, Department of Mechanical Engineering, University of Padua, 2011.
- [2] «www.eurisol.org,» [Online].
- [3] M. Lindroos, *Review of ISOL-type radioactive beam facilities*, EPAC, 2004.
- [4] A. Andrighetto et al., *The SPES Project At LNL*, AIP (American Institute of Physics), 2009.
- [5] G. Meneghetti et al., *Design of the SPES Target Heating System: theoretical analyses and comparison with experimental data*, TCN CAE, 2008.
- [6] B. Marsh, *Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Ion Sources*, Senec, Slovakia, 29 May – 8 June 2012, edited by R. Bailey, CERN-2013-007, pp. 203-254.
- [7] M. Manzolaro et al., *Thermal-electric coupled-field finite element modeling and experimental testing of high-temperature ion sources for the production of radioactive ion beams*, Review of Scientific Instruments 87.2 (2016): 02B502.
- [8] Borgna F., *Potenzialità della tecnologia Isotope Separation On-Line (ISOL) per la realizzazione di un radiofarmaco a base di  $^{89}\text{Sr}$  e preliminare sviluppo tecnologico della forma farmaceutica*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, 2012/2013.
- [9] Schwellnus, F., et al., *Study of low work function materials for hot cavity resonance ionization laser ion sources*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 267.10 (2009): 1856-1861..
- [10] C. e. a. Rauth, *First laser ions at an off-line mass separator of the ISAC facility at TRIUMF*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 215.1 (2004): 268-277.
- [11] Henares, J. L., et al. , *Hot-cavity studies for the resonance ionization laser ion source.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (2015).
- [12] M. Knudsen, *The Kinetic theory of gases; some modern aspects*, Methuen and Co., Ltd., London, 1950.
- [13] T. Rockhold, *Development of a Knudsen Cell Reactor for Measuring the Uptake of Atmospheric Gases on Particulate Matter*, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University (U.S.A.), 2011.
- [14] M. Heyrman, C. Chatillon, H. Collas e J. Chemin, *Improvements and new capabilities for the multiple Knudsen cell device in high-temperature mass spectrometry*, Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2003.
- [15] M. Miller e K. Armatys, *Twenty Years of Knudsen Effusion Mass Spectrometry: Studies performed in the Period 1990-2010*, The Open Thermodynamics Journal, 2013.
- [16] E. Copland e N. Jacobson, *Thermodynamic Activity measurements with Knudsen Cell Mass Spectrometry*, The Electrochemical Society Interface, 2001.

- [17] F. D'Agostini, *Sviluppo e Caratterizzazione Sperimentale della Sorgente di Ionizzazione Superficiale e Laser del Progetto SPES*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, 2015.
- [18] Sheppard, R. G., D. M. Mathes and D. J. Bray, *Properties and characteristics of graphite*, Poco Graphite Inc, 2001.
- [19] M. L., E. K., K. J. e M. J., *Temperature Measurements*, Wiley, 1991.
- [20] R. Usamentiaga, P. Venegas e J. Guerediaga, *Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing*, Sensors, 2014.