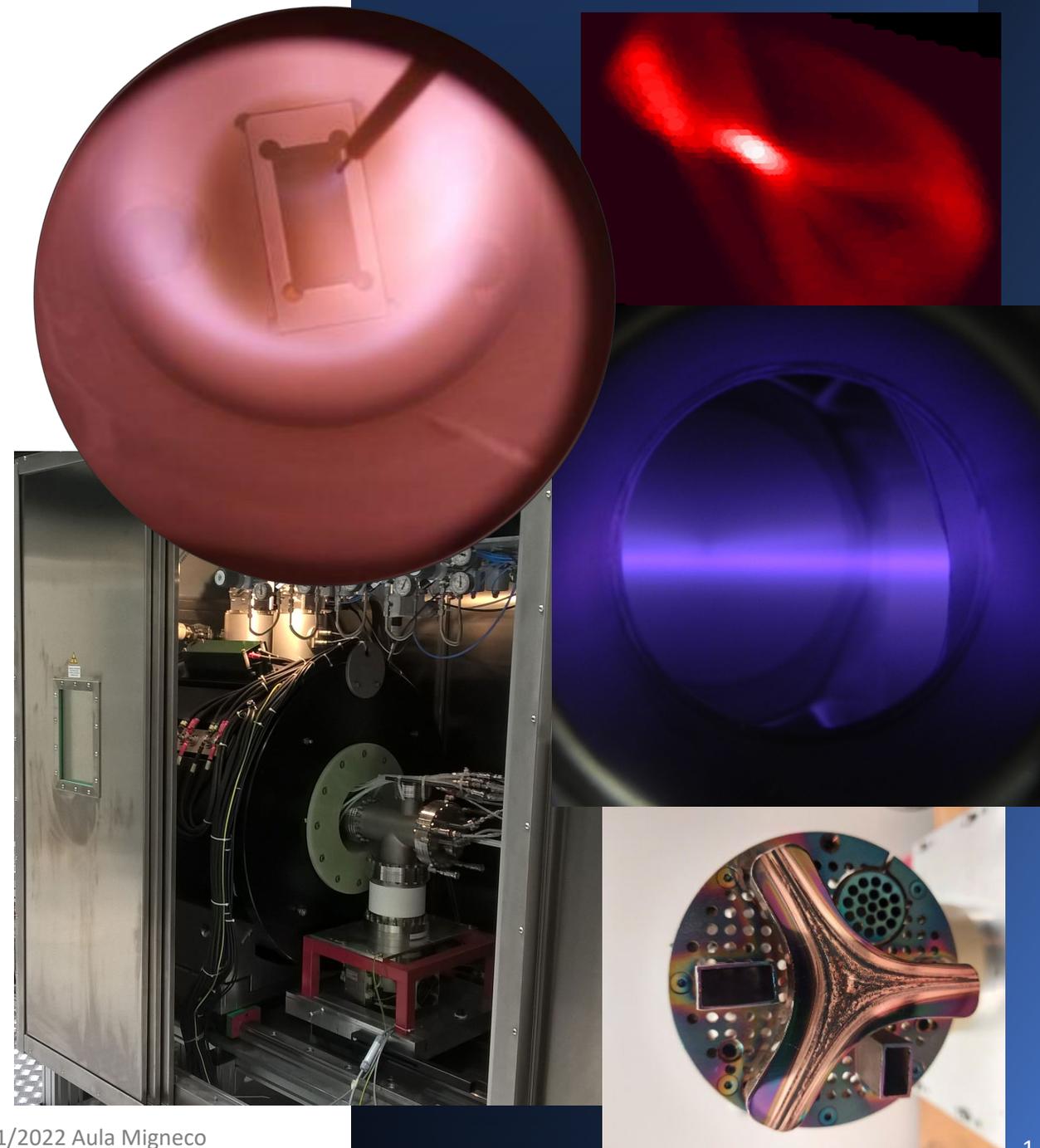


Fisica delle sorgenti di ioni al plasma

Giuseppe Castro



Cos'è una sorgente di ioni?

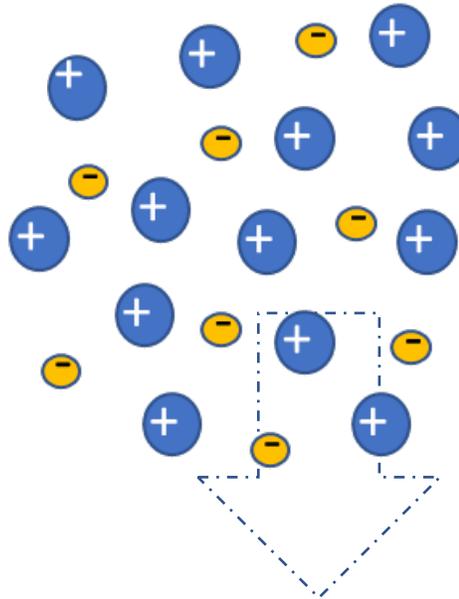
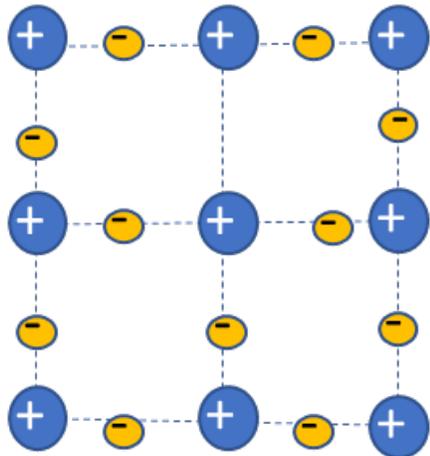
Una sorgente di ioni è un dispositivo per creare un fascio di particelle cariche.

Le principali proprietà di un fascio di particelle sono definite sin dalla sorgente di ioni:

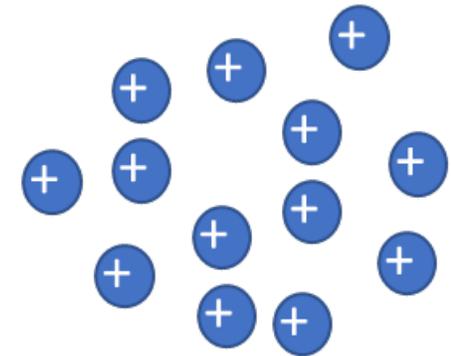
- **Stato di carica**
- **Intensità del fascio**
- **Energia del fascio**
- **Forma ed emittanza del fascio**
- **Struttura temporale del fascio (continuo o pulsato)**

Come generare un fascio?

Materiali Neutro



Fascio di ioni



**E' necessario uno stato della materia intermedio
tra Materiale neutro e un insieme di ioni positivi**

Plasma!

Parametri di plasma vs Parametri di sorgente

I parametri di fascio sono profondamente legati ai parametri del plasma che lo genera:
In generale, qualsiasi sia la sorgente, possiamo scrivere:

$$1) I_q \propto \frac{n_q}{\tau_q}$$

**Parametri
di fascio**

**Parametri
di Plasma**

$$2) \langle q \rangle \propto n_q \tau_q f(T_e)$$

**Parametri
di fascio**

**Parametri
di Plasma**

**Parametri
di sorgente**

$$3) \epsilon_{rms.norm.} \propto T_i, B_{extr}$$

Parametri di fascio

I_q e $\langle q \rangle$ sono rispettivamente la corrente estratta dallo stato di carica q (per esempio Ar^{12+}) mentre $\langle q \rangle$ è lo stato di carica medio che viene estratto da una sorgente (ci torneremo in seguito)



Parametri di plasma

n_q è la densità di particelle con carica q (ossia il numero di particelle per metro cubo) presente nel plasma, τ_q è il tempo di vita all'interno del plasma, $f(T_e)$ è una funzione della temperatura degli elettroni, T_i è la temperatura degli ioni.



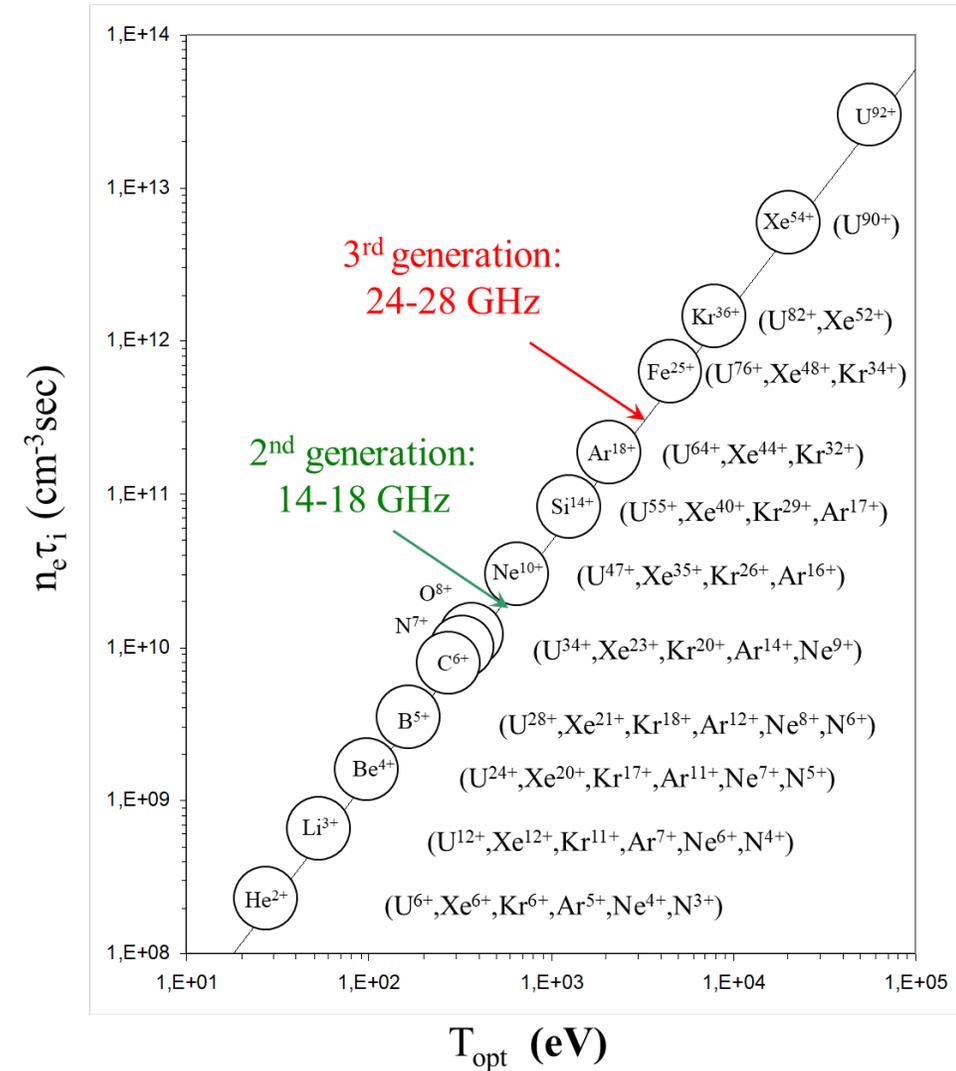
Parametri di sorgente

Condizioni di lavoro della sorgente (pressione – potenza operativa, campo magnetico, ecc. ecc.)

Parametri di plasma vs Parametri di sorgente

Per **ottenere i parametri di fascio richiesti** (corrente di tale fascio con tali caratteristiche) è necessario **modificare opportunamente i parametri di sorgente** (come devo modificare pressione, campo magnetico, frequenza microonde, ecc. ecc.).

«**Sfortunatamente**» l'unico modo per comprendere appieno come i parametri di fascio si collegano a quelli di sorgente è necessario avere dei **rudimenti di fisica del plasma**

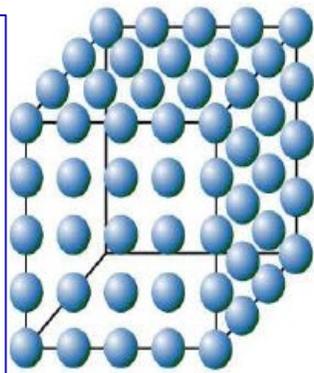


Che cos'è un plasma? uno stato della materia

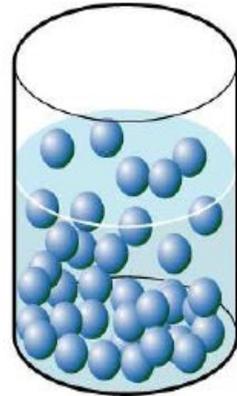


Definizione rigorosa di plasma:

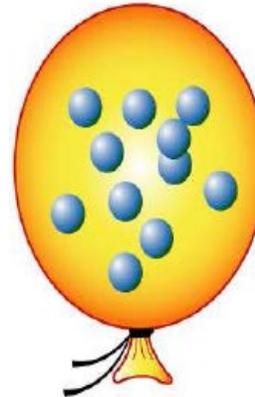
Un plasma è un gas quasi-neutro di particelle cariche e neutre che esibisce un comportamento collettivo



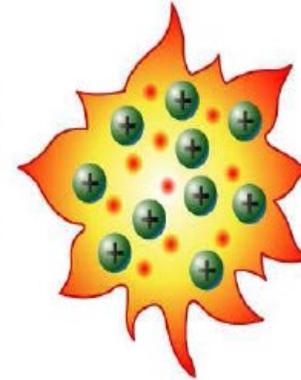
Cold
Solid (ice)



Warm
Liquid (water)



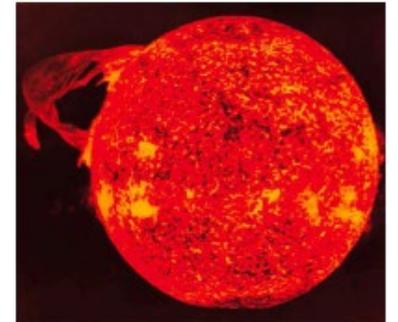
Hot
Gas (Steam)



Hotter
Plasma



Un plasma è un ottimo conduttore di elettricità'



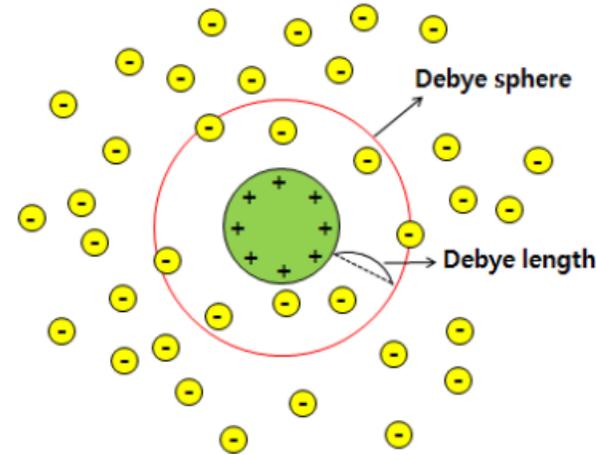
Quasi neutralità

- La neutralità complessiva della carica è sempre preservata:

$$\sum q_i n_i = n_e$$

- A condizione che il plasma abbia dimensioni maggiori della lunghezza di Debye λ_D :

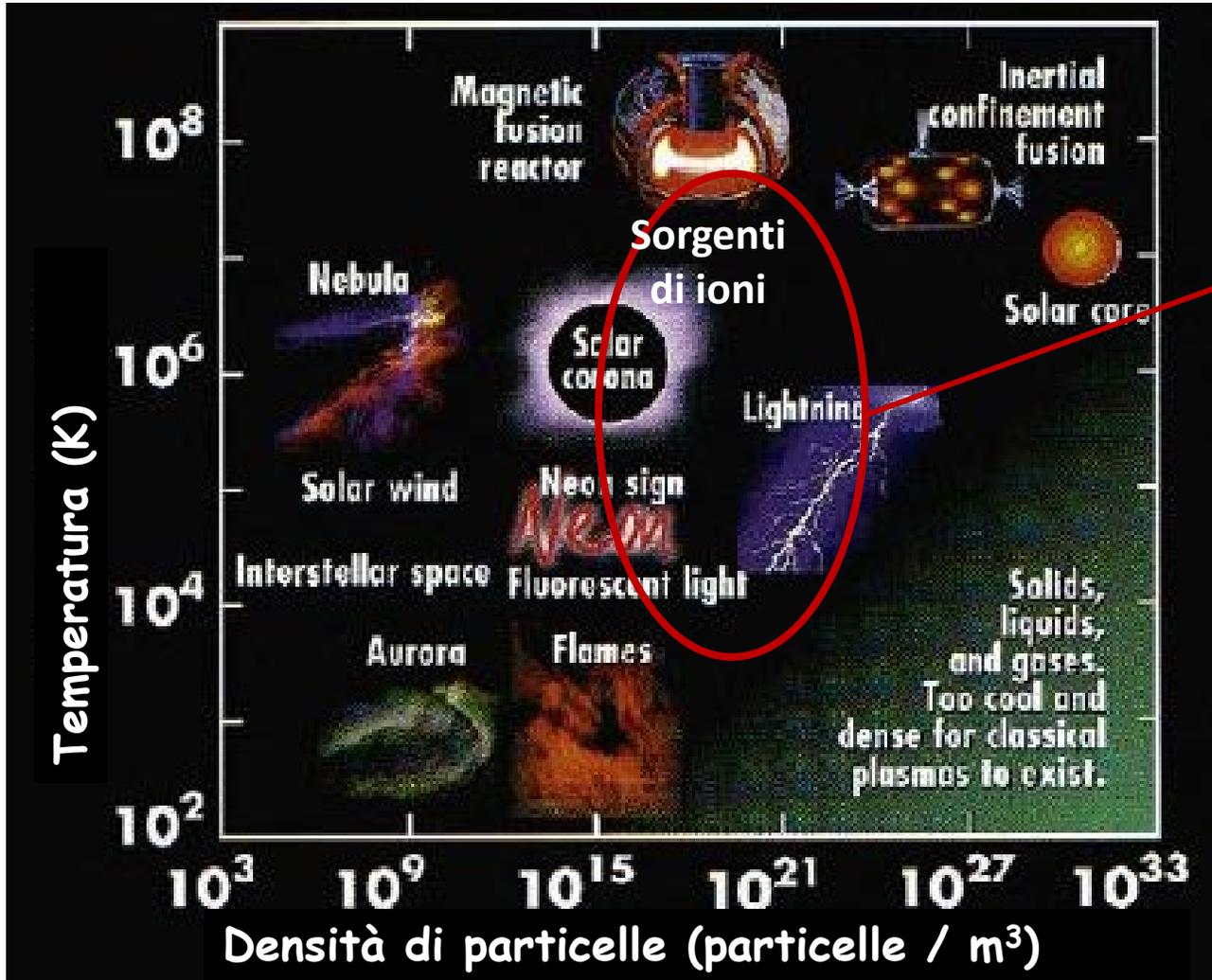
$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 K T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2}$$



Comportamento collettivo

- Il plasma è costituito da particelle cariche
- Le cariche in movimento possono creare concentrazioni locali di cariche e correnti -> campi elettrici e magnetici
- I campi così generati possono influenzare il movimento di altre particelle cariche anche molto lontane
- Accoppiamento delle condizioni locali con le regioni del plasma remote -> comportamento collettivo

Il plasma delle sorgenti di ioni



La densità e la temperatura tipiche delle sorgenti di ioni variano rispettivamente nel range:

Densità: 10^{16} - 10^{24} Particelle/m⁻³

Temperatura: 10^3 – 10^8 K

Per la temperatura si preferisce una seconda unità di misura: **1 eV**

1 eV = 11604 K \approx 10.000 K

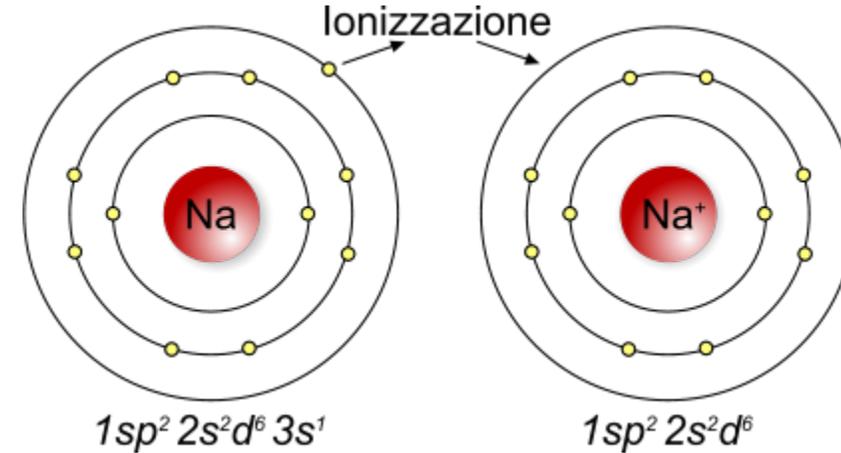
Introduzione alla Fisica del plasma

E' ben noto che la materia è usualmente neutra: un Atomo neutro contiene un egual numero di protoni (carica elettrica positiva) ed elettroni (carica elettrica negativa).

Gli elettroni sono legati all'atomo con un'energia che dipende dal numero di massa Z.

L'energia di **prima ionizzazione**, o «potenziale di ionizzazione» è la minima energia necessaria per togliere un elettrone;

L'energia di **seconda ionizzazione** è la minima energia necessaria per togliere un secondo elettrone;



	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+
H	13,6	-	-	-	-	-	-	-	-
He	24,6	54,4	-	-	-	-	-	-	-
N	14,5	29,8	47,7	77,9	98,4	554	670		
Ne	21,6	41,0	63,5	97,1	126	157	207	239	1195
Ar	15,8	27,6	40,7	59,8	75,0	91,0	124	144	422
Kr	14,0	24,4	36,9	52,5	64,7	78,5	111	126	231
Xe	12,1	21,2	32,1	44,6	57,0	68,4	96,4	109	205

Energia di legame vs stato di carica₉

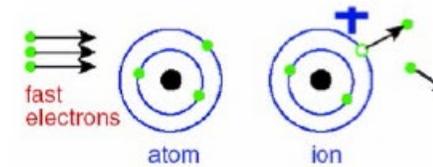
Principali metodiche di ionizzazione dell'atomo

- **Impatto elettronico:** un collisione tra un elettrone e^- e un atomo (o uno ione) A^{n+} espelle un elettrone e^- dal guscio elettronico:



Energia di soglia: il potenziale di ionizzazione I_n

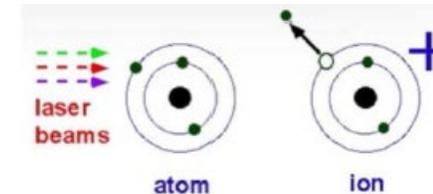
La collisione con elettroni è il metodo più utilizzato nelle sorgenti di ioni.



- **Ionizzazione tramite fotoni:** un fotone ν con un'energia vicina al potenziale di ionizzazione I_n cede la sua energia all'atomo A^{n+} e libera un elettrone e^- :



Il fotone scompare!

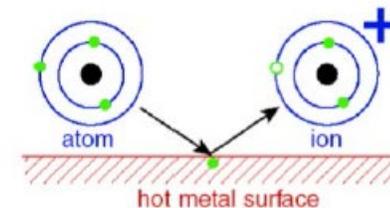


- **Ionizzazione di superficie:** un atomo A^{n+} è ionizzato direttamente da una superficie calda X liberando un elettrone e^-



Effetto tunnel (meccanica quantistica)

Metodo molto efficiente per ionizzare atomi alcalini



Gli ioni possono riacquisire elettroni?

Ricombinare uno ione è purtroppo estremamente facile

I principali canali di perdita di uno stato di carica da parte di uno ione sono:

- **Scambio carica:** uno ione e un atomo si urtano ed il campo elettrico dello ione ionico assorbe un elettrone dall'atomo



Processo dominante

Qualsiasi ione urti una superficie viene immediatamente neutralizzato!!

Ricombinazione radiativa: un elettrone lento (bassissima energia) è catturato da uno ione



Il concetto di sezione d'urto

Abbiamo visto che l'energia di ionizzazione dell'idrogeno è **13.6 eV**. Tale valore di energia va però considerato come il **valore minimo necessario per ionizzare l'idrogeno I_n** .

La probabilità di ionizzare l'idrogeno (e più in generale la probabilità di qualsiasi reazione a livello nucleare) è misurata dalla cosiddetta **Sezione d'urto!**

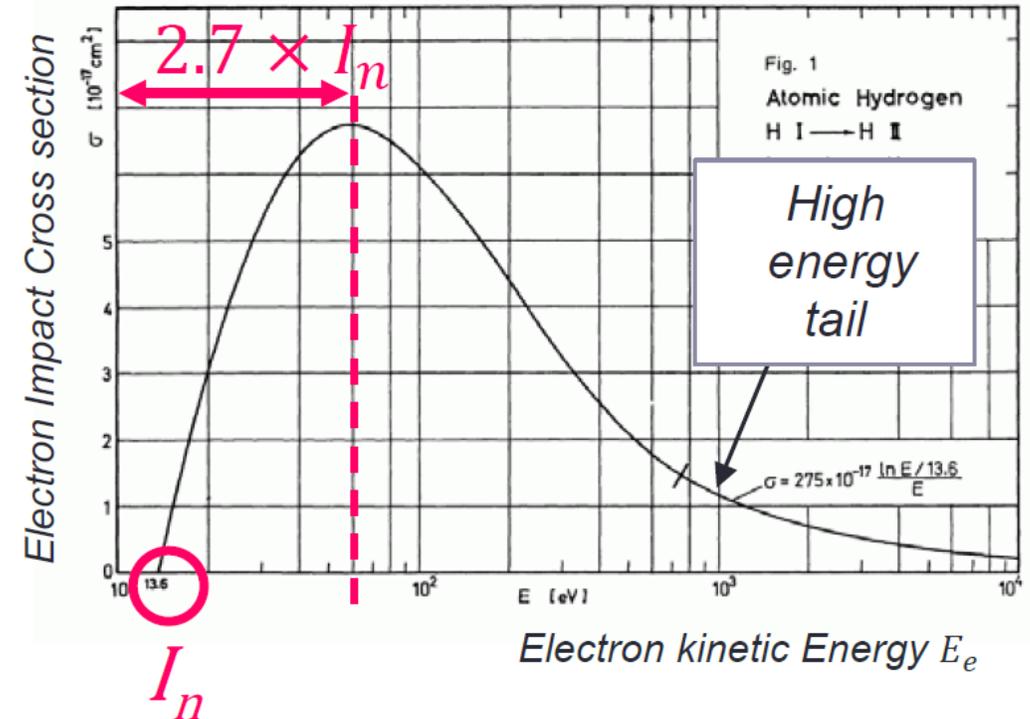
La sezione d'urto σ (si misura in cm^2) fornisce un valore direttamente proporzionale alla probabilità che una reazione avvenga!

Il valore di sezione d'urto ottimale affinché avvenga una certa reazione è all'incirca 2.7 volte l'energia di soglia.

Il prodotto σv mi da la probabilità che avvenga una reazione per unità di volume di particelle incidenti!

In parole povere se ho una certa densità di elettroni n_e con velocità v_e che urtano contro atomi di idrogeno aventi densità n_H , il numero di protoni n_{protoni} (H^+ o idrogeno ionizzato) che ottengo sarà:

$$\frac{d n_{\text{protoni}}}{dt} = n_H n_e \sigma v_e$$



Sezione d'urto ionizzazione singola vs multipla

Posso togliere tanti elettroni in una volta ad un atomo?

In teoria Sì, in pratica è improbabile, la sezione d'urto di doppia ionizzazione è **100 volte più piccola** di quella di ionizzazione singola!

Se voglio ottenere Ar^{12+} (per esempio) devo avere la pazienza e il tempo di togliere da un atomo neutro un elettrone alla volta.

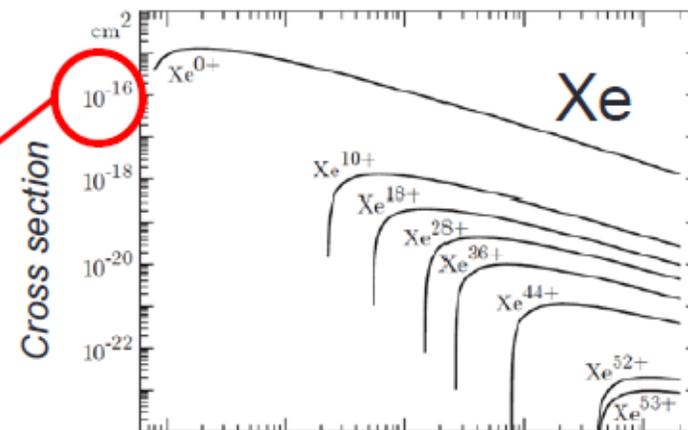
Non posso estrarre subito lo ione in forma di fascio!!!

Devo far sì che viva nel plasma finché non sia ionizzato allo stato di carica voluto...

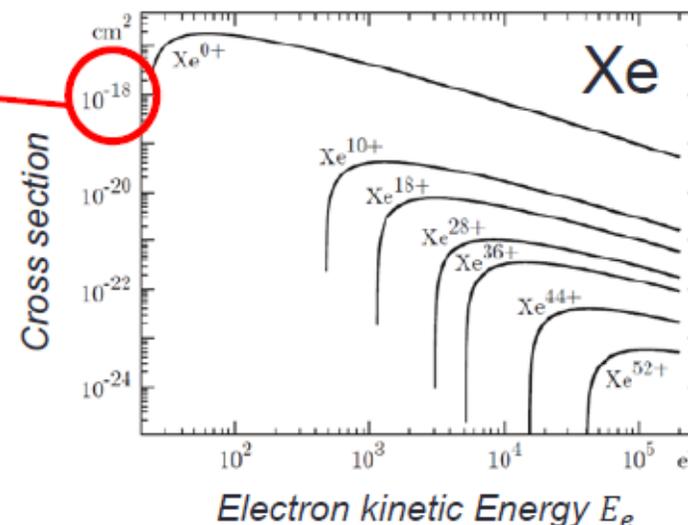
Ci vuole tempo!! Tempo di confinamento!

Vediamo meglio perché...

Electron impact
Single ionization
 $\sigma \sim 10^{-16} \text{ cm}^2$



Electron impact
Double ionization
 $\sigma \sim 10^{-18} \text{ cm}^2$



Il concetto di sezione d'urto (bis)

Introduciamo ora la sezione d'urto in maniera più formale:

Immaginiamo di avere un gas di densità n che interagisce con un fascio di elettroni Γ . Il numero di elettroni che hanno interagito con il gas sarà dato in generale da:

$$d\Gamma = -\Gamma n \sigma dx$$

fissate le caratteristiche del fascio (il flusso Γ), e della lamina essenzialmente densità e spessore), le proprietà fisiche dell'interazione sono descrivibili in termini del parametro σ , ovvero in termini di quella che abbiamo chiamato **sezione d'urto**

Integrando:

$$\Gamma = \Gamma_0 e^{-\frac{x}{\lambda_m}} \quad \text{dove:} \quad \lambda_m = \frac{1}{n\sigma} \quad \text{libero cammino medio della particella}$$

Tempo medio tra due collisioni: $\tau = \frac{\lambda_m}{v} = 1/n\sigma v$

Frequenza tra due collisioni: $\frac{1}{\tau} = \frac{v}{\lambda_m} = n\sigma v$

Critério per la produzione di ioni molteplícemente carichi

Indichiamo con $\sigma_z(v_e)$ la sezione d'urto del processo ionizzante che ionizza uno ione dallo stato di carica $z \rightarrow z + 1$.

Una processo di questo tipo richiederà mediamente un tempo, che chiameremo τ_z :

$$\tau_z = \frac{1}{n_e \sigma v}$$

Cosa succede se il tempo di vita di uno ione nel plasma è inferiore a τ_z ?

Il processo non potrà avere luogo!!

Per poter avere la ionizzazione, quindi il tempo di confinamento ionico τ_i deve essere maggiore o uguale al tempo di ionizzazione τ_z , ovvero deve accadere che: $\tau_i \geq \tau_z$

Cioè: $\tau_i \geq \tau_z \Rightarrow \tau_i \geq \frac{1}{n_e \sigma v} \Rightarrow n_e \tau_i \geq \frac{1}{\sigma v}$

Si può dimostrare (fidatevi in questa sede), che la precedente relazione si può scrivere come:

$$n_e \tau_i \geq 5 \cdot 10^4 (T_e^{opt})^{\frac{3}{2}}$$

T_e^{opt} temperatura ottimale, ossia temperatura in cui si ha il massimo della sezione d'urto.

Ionizzazione vs neutralizzazione

Ionizzazione per impatto elettronico



- La sezione d'urto della **ionizzazione per impatto elettronico** può essere stimata con la formula semi-empirica di Lotz (valida per $E \gg$ Potenziale di ionizzazione):

$$\bullet \sigma_{q \rightarrow q+1} \sim 4.5 \times 10^{-14} \sum_{i=1}^N q_i \frac{\ln\left(\frac{E}{P_i}\right)}{E P_i} \text{ (cm}^2\text{)} \quad \frac{d}{dt} n_{A^{(n+1)+}} = n_{A^{n+}} n_e \sigma_{q \rightarrow q+1} v$$

E energia cinetica dell'elettrone incidente; q_i degenerazione: numero di elettroni inclusi nella subshell;
 P_i energia di legame dell'elettrone sul subshell: $P_i = E_{n,l}$

Scambio carica

Il processo principale per ridurre uno stato di carica ionica è attraverso la collisione atomo-ione:



$$\bullet \sigma_{CE}(n \rightarrow n-1) \sim 1.43 \times 10^{-12} q^{1.17} I_0^{-2.76} \text{ (cm}^2\text{)} \text{ (A. Müller, 1977)}$$

I_n potenziale di prima ionizzazione in eV, q stato di carica dello ione che «scambia carica»:

$$\frac{d}{dt} n_{A^{(n-1)+}} = n_{A^{n+}} n_{B_0} \sigma_{CE} v$$

Ionizzazione vs neutralizzazione

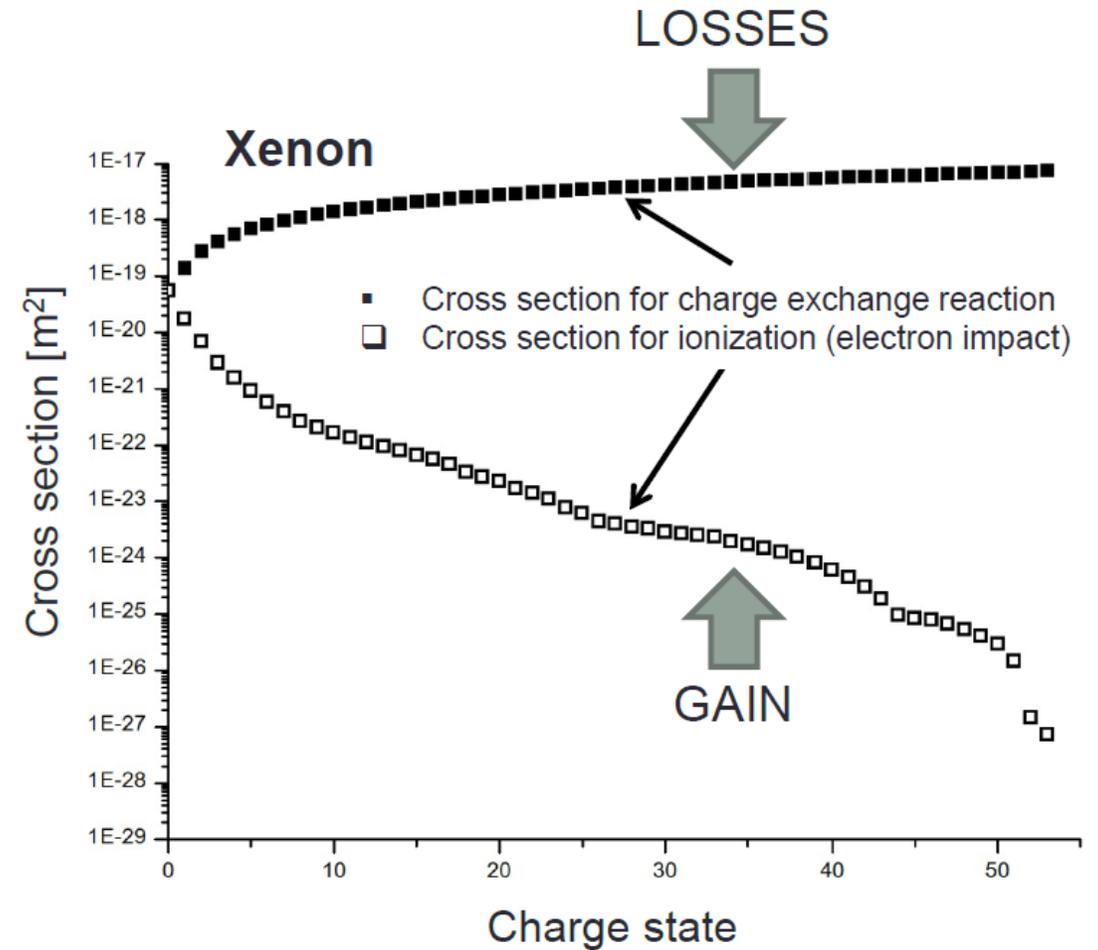
La sezione d'urto di scambio di carica è sempre superiore a quella dell'impatto dell'elettrone...

In altre parole **Perdite > creazione!**

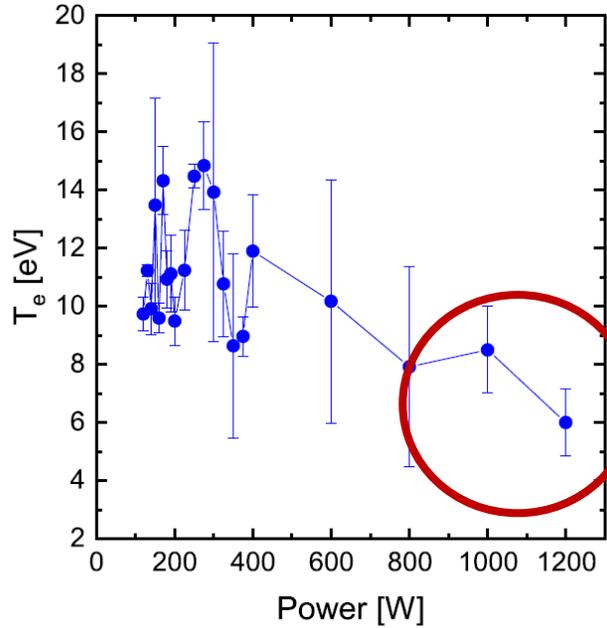
Come ridurre la perdita netta di ioni attraverso lo scambio di carica?

Riducendo la pressione nella sorgente per ridurre al minimo la popolazione di neutri!

Generando una grande popolazione di elettroni veloci per produrre più ionizzazione!

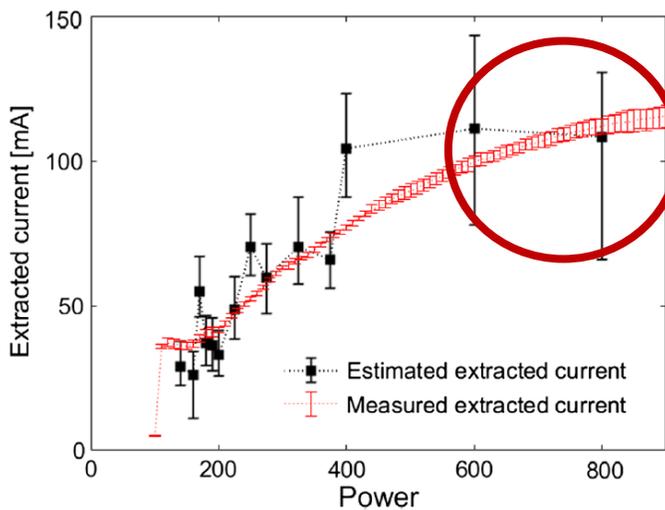


La distribuzione Maxwelliana delle temperature



In questa regione la temperatura misurata nel plasma della sorgente ESS (6 eV) è minore dell'energia di ionizzazione (13 eV).

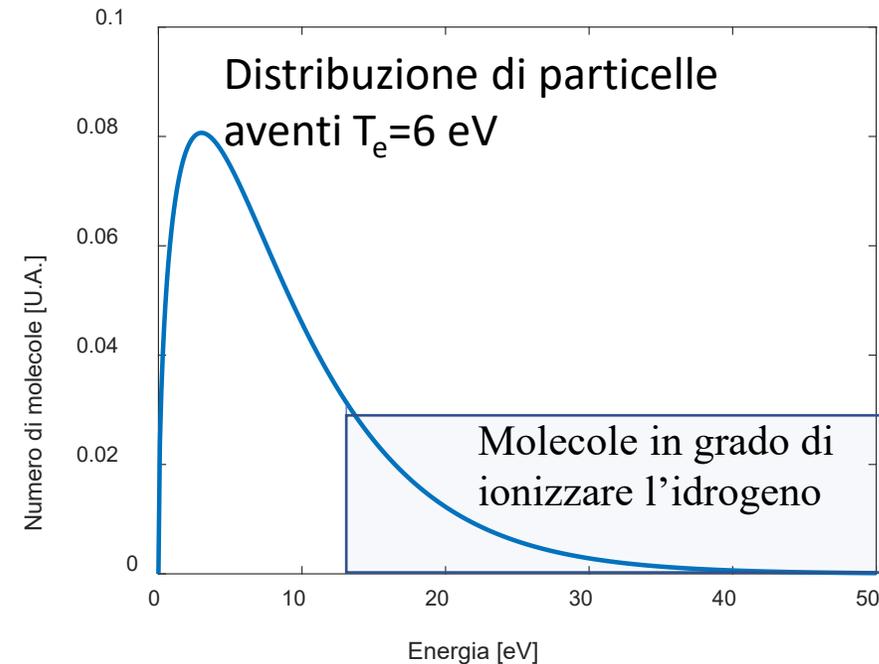
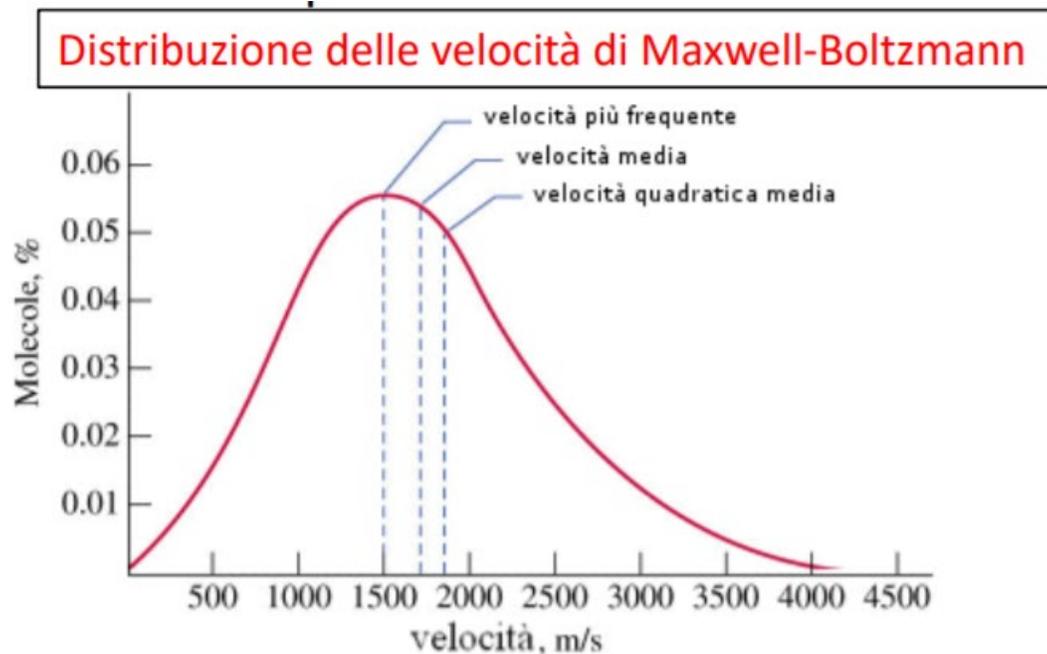
Ciò nonostante sono stati estratti 100 mA di protoni!!
Com'è possibile?



La distribuzione Maxwelliana delle temperature

La ragione è la stessa per cui l'acqua evapora, a pressione atmosferica, a temperatura anche molto inferiore rispetto ai 100° canonici!

La temperatura misura un valore energetico medio della popolazione elettronica. In realtà si ha che:



Affinità elettronica - ioni negativi

Cos'è uno ione negativo?

- Gli atomi con guscio non chiuso possono accettare un elettrone extra e formare uno ione stabile con una carica netta di e^-
- La **stabilità** è quantificata **dall'affinità elettronica**, cioè **l'energia minima richiesta per rimuovere l'elettrone in più.**
- Le **affinità elettroniche sono sostanzialmente inferiori alle energie di ionizzazione**, coprendo l'intervallo tra 0,08 eV per Ti⁻ e 3,6 eV per Cl⁻.
- Gli ioni negativi sono molto fragili! Qualsiasi collisione può distruggere lo ione negativo.

H 73																	He 0
Li 60	Be 0											B 27	C 154	N 7	O 141	F 328	Ne 0
Na 53	Mg 0											Al 43	Si 134	P 72	S 200	Cl 349	Ar 0
K 48	Ca 2	Sc 18	Ti 8	V 51	Cr 64	Mn 0	Fe 16	Co 64	Ni 112	Cu 118	Zn 0	Ga 29	Ge 119	As 78	Se 195	Br 325	Kr 0
Rb 47	Sr 5	Y 27	Zr 41	Nb 86	Mo 72	Tc 53	Ru 101	Rh 110	Pd 54	Ag 126	Cd 0	In 29	Sn 107	Sb 103	Te 190	I 295	Xe 0
Cs 45	Ba 14	Lu 50	Hf 0	Ta 31	W 79	Re 14	Os 106	Ir 151	Pt 205	Au 223	Hg 0	Tl 19	Pb 35	Bi 91	Po 183	At 270	Rn 0

0.75 eV for H⁻

0.08 eV for Ti⁻

3.6 eV for Cl⁻

1eV ~ 96,5 kJ/mol

Periodic table of **electronic affinity** in kJ/mol, actinids not represented

Creazione di ioni negativi tramite ionizzazione di volume

La creazione di ioni negatività è esotermica. L'energia in eccesso dovrebbe essere scaricata su una terza particella. Gli ioni negativi possono essere prodotti sulle superfici e in un plasma («ionizzazione di volume»).

Ionizzazione di volume:

Dissociative attachment (l'eccesso di energia viene trasferito a una terza particella quando si dissocia una molecola)

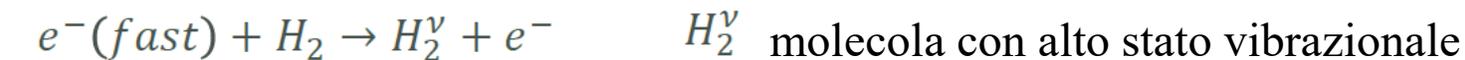
- $AB + e^- \rightarrow A^- + B$ (evento raro)

Collisione a 3 corpi:

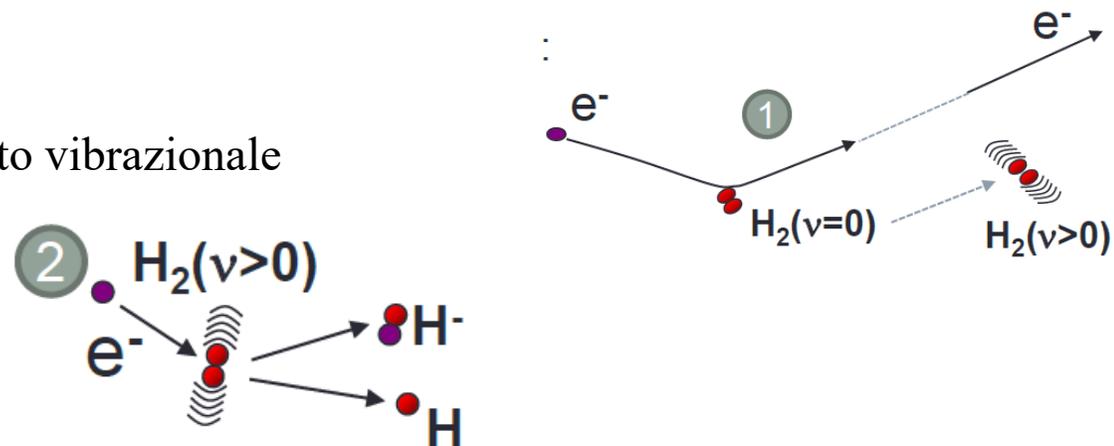
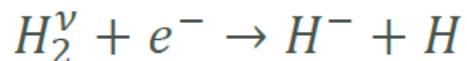
- $A+B+e^- \rightarrow A^-+B$ (evento raro)

Esempio di produzione che richiede 2 step:

Step 1: eccitazione per impatto molecola - elettrone:



Step 2: Dissociative attachment



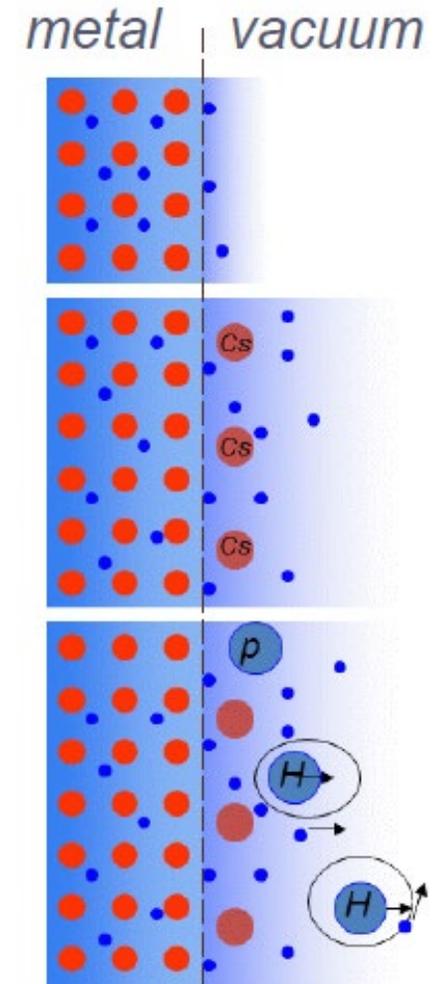
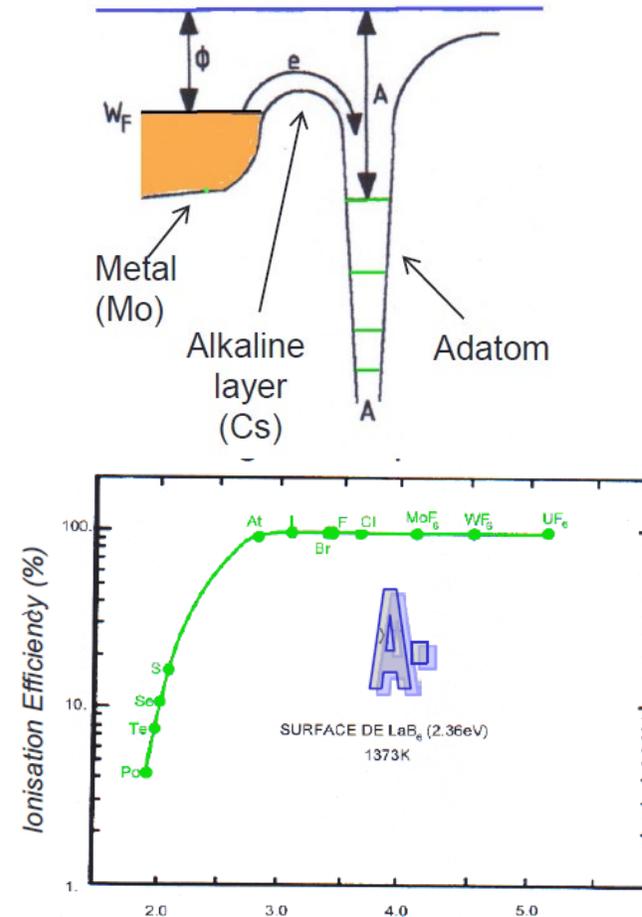
Creazione di ioni negativi tramite ionizzazione di superficie

Come visto in precedenza, i metalli ospitano un'abbondanza di elettroni liberamente legati (elettroni di conduzione), ma sono necessari da 4.5 a 6 eV circa per rimuovere un elettrone dalla superficie (funzione lavoro).

Tuttavia i metalli alcalini hanno funzioni di lavoro inferiori (2-3 eV). Quando vengono assorbiti da una superficie metallica come un monostrato parziale, gli atomi alcalini possono ridurre la funzione di lavoro della superficie ϕ a valori molto bassi, ad esempio ~ 1.6 eV per il cesio su Molibdeno.

A questo punto, gli elettroni dal metallo possono essere catturati da atomi adsorbiti sulla superficie attraverso l'effetto tunnel, a condizione che $I > \phi$

Langmuir-Saha Formula:
$$\frac{N^-}{N_0} = C^- e^{-\frac{I-\phi}{kT}}$$



Moto di una particella carica in un campo magnetico costante

Il moto individuale di una particella carica in un campo magnetico è regolato dalla seguente equazione del moto:

$$\frac{dm\vec{v}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

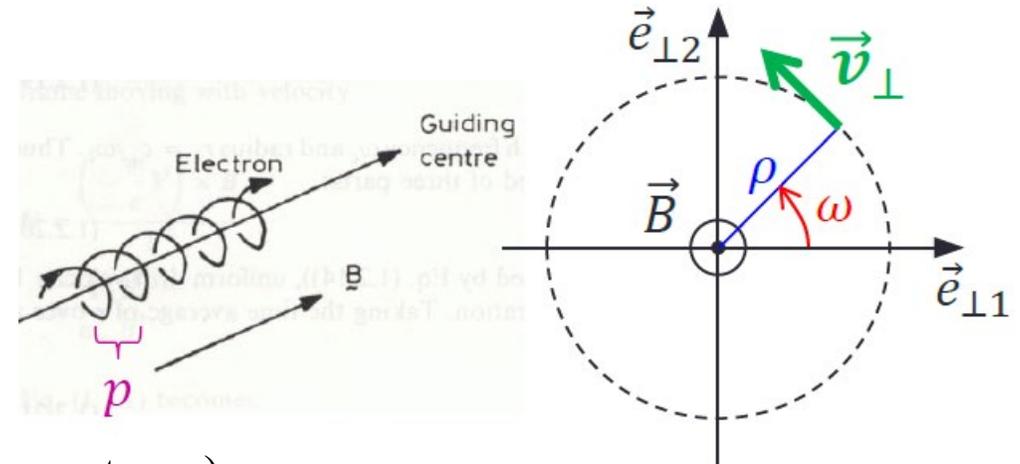
La soluzione generale di questa equazione è:

$$\begin{cases} v_{\parallel} = \text{const} \\ \vec{v}_{\perp} = \rho\omega(\sin \omega t \cdot \vec{e}_{\perp 1} + \cos \omega t \cdot \vec{e}_{\perp 2}) \end{cases}$$

Dove ρ è il raggio di Larmor (in questo ciclo di lezioni non avrà importanza)

Ed $\omega = \frac{eB}{m_e}$ è la frequenza ciclotronica.

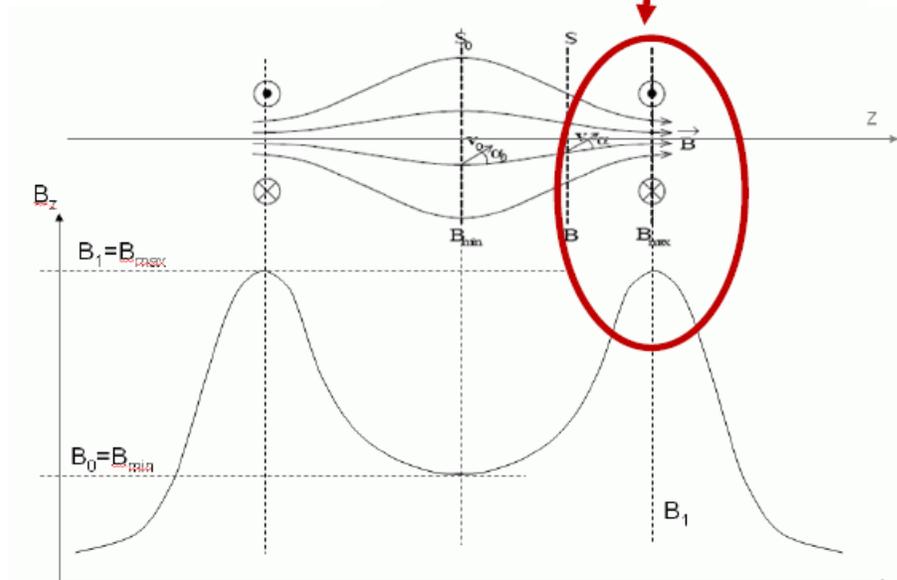
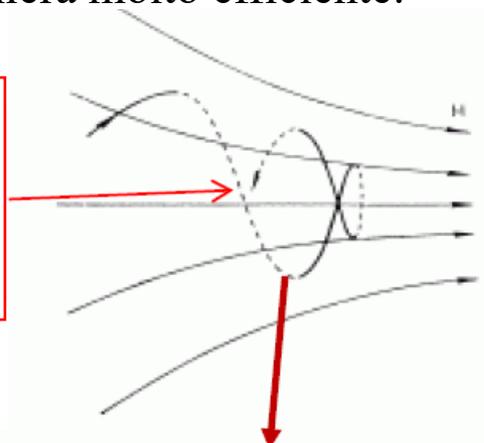
La traiettoria delle particelle è un'elica di passo p (anche questo parametro sarà ininfluente in questa sede)



Il confinamento magnetico

Il principio della bottiglia magnetica è largamente impiegato nel campo delle sorgenti ioniche poiché consentono di intrappolare gli ioni in maniera molto efficiente:

Una particella può essere riflessa da un forte campo magnetico!



Si può dimostrare, (ma voi fidatevi) che in un campo magnetico le seguenti due grandezze si conservano:

L'energia:

$$T_{kin} = W_{\parallel} + W_{\perp} = \frac{1}{2}mv_{\parallel}^2 + \frac{1}{2}mv_{\perp}^2 = const$$

Il momento magnetico: $\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} = \frac{W_{\perp}}{B} \sim const$

Osservate che dipende dalla componente ortogonale della velocità v_{\perp} rispetto al campo magnetico.

Posso scrivere l'equazione dell'energia come:

$$T_{kin}(z) = \frac{1}{2}mv_{\parallel}^2(z) + \mu B(z) = const$$

Quando B aumenta, allora la velocità viene trasferita adiabaticamente da v_{\parallel} a v_{\perp} .

La particella si ferma a $z=z_1$ dove $v_{\parallel}=0$ e $B_{z_1} = \frac{T_{kin}}{\mu}$

Ritorno alle sorgenti di ioni

Dovrebbe essere chiaro, a questo punto, che una buona progettazione di una sorgente ionica implica anche:

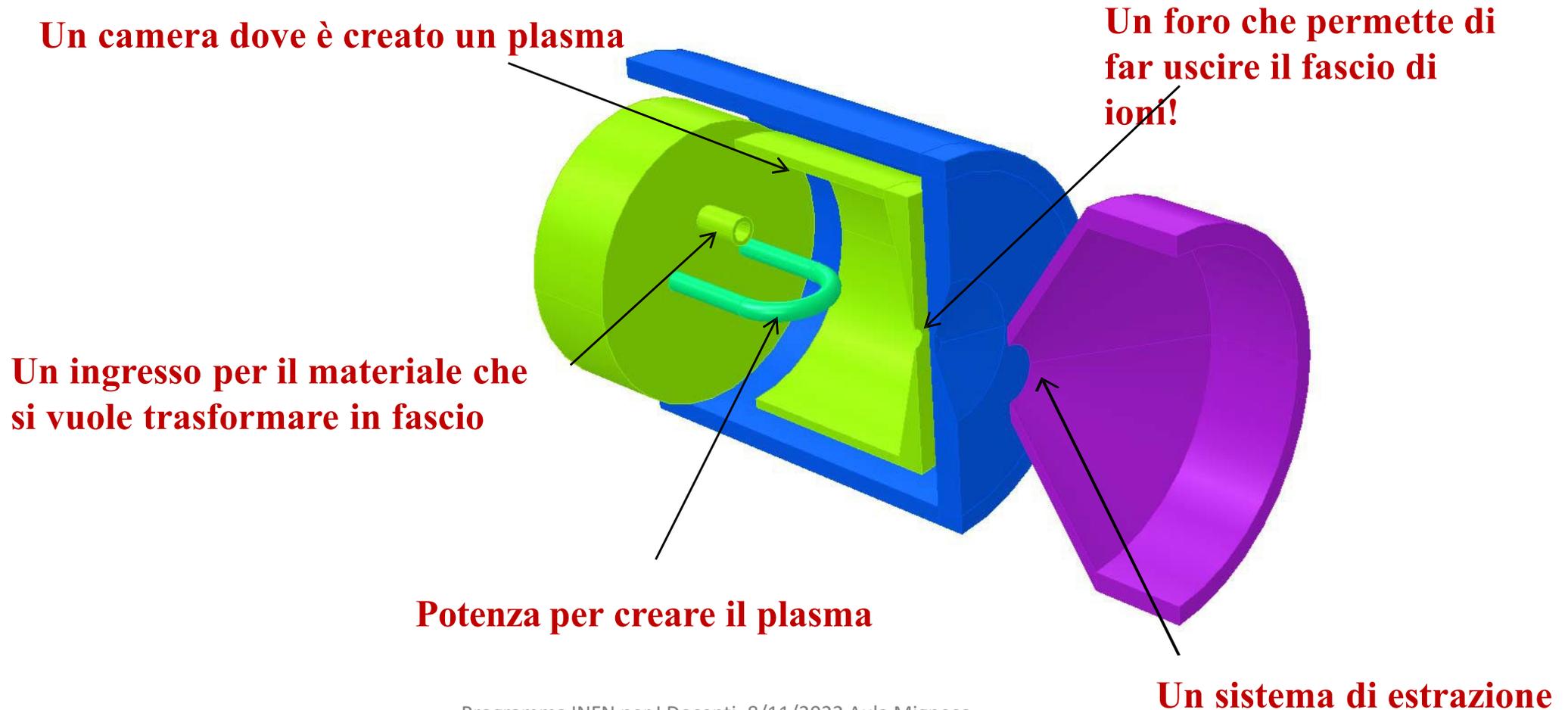
- **Conoscenza del processo di Fisica Atomica;**
- **Capacità di Calcolare l'ottica del fascio;**
- **Capacità di progettare trappole magnetiche appropriate e configurare l'alta tensione;**
- **Competenze in Scienze dei materiali;**
- **Competenze nella tecnologia del vuoto;**
- **Ecc. ecc.**

Una competenza in più, meno evidente, ma che definisce il successo di qualsiasi iniziativa: **la capacità di comprendere quali sono le reali esigenze degli utenti finali.**

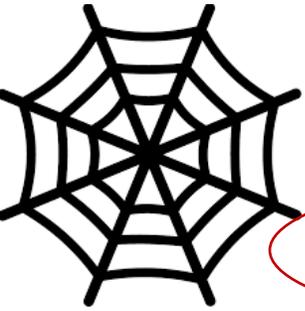
Esistono infatti diversi parametri che possono essere opportunamente ottimizzati una volta comprese appieno le esigenze degli utenti.

Come è fatta una generica sorgente di ioni?

Sebbene esistano decine e decine di sorgenti diverse, alcune caratteristiche tipicamente presenti in ognuna delle varie tipologie, con piccole variazioni:



The web of plasma ion source classification



Negative

Pulsed

Electron impact ionisation

Electron cyclotron resonance

Cusp-field

High charge state

High-current

Stable isotope

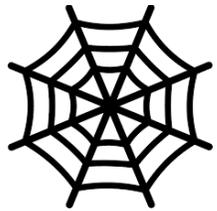
CW

Single charge

Electron beam

Volume ionisation

Microwave



Light ion

Single aperture

Heavy ion

Positive

Penning discharge

Large area

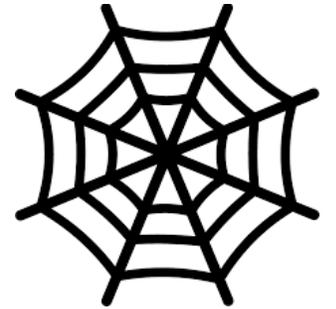
Gasdynamic

Filament-driven

Charge breeder

Inductive RF

Surface ionisation



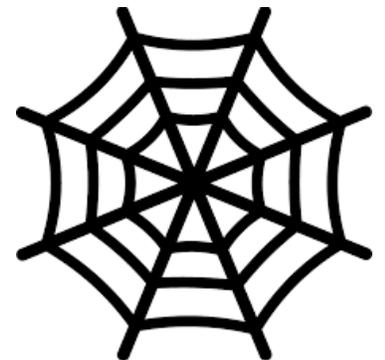
Minimum-B

Multi-aperture

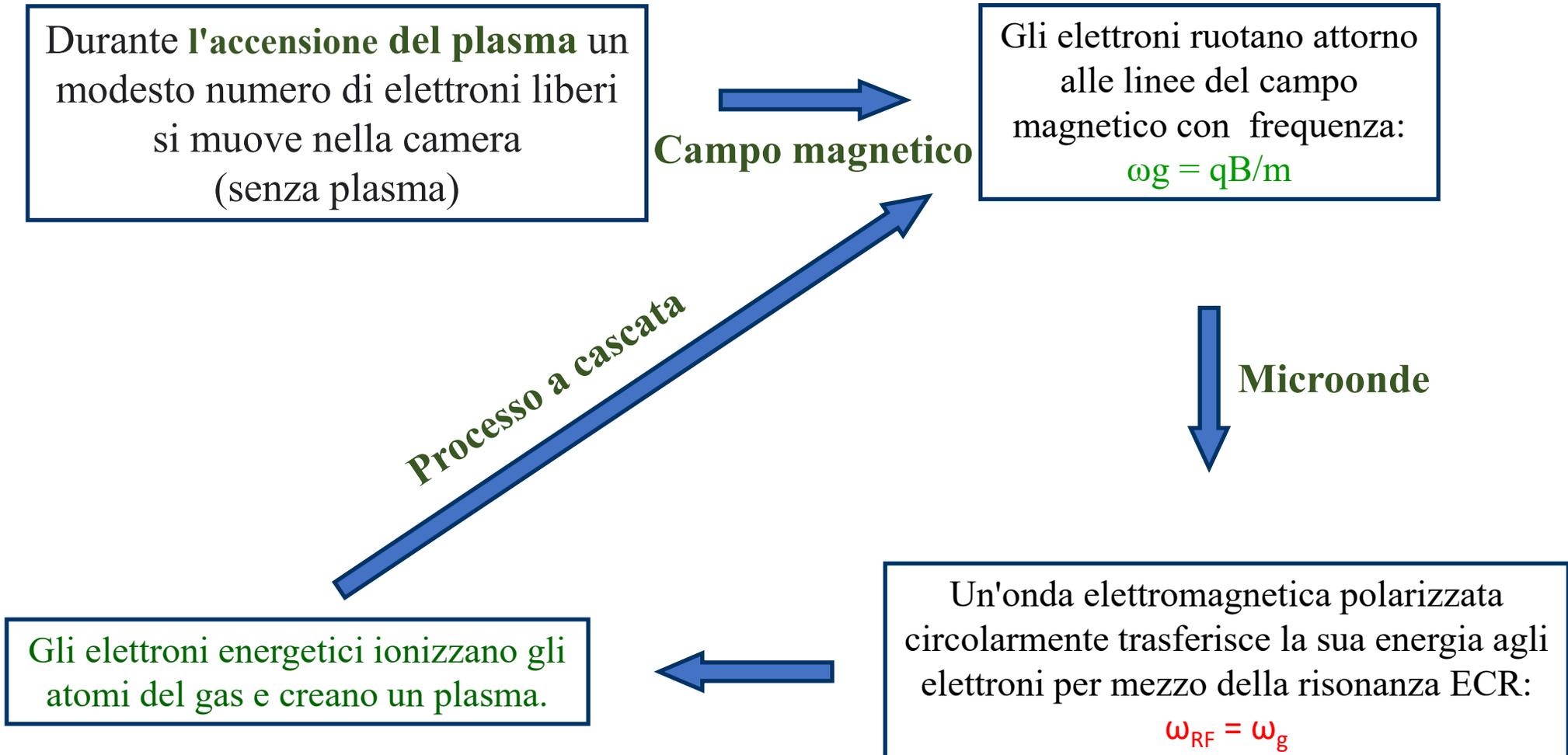
Caesiated

Radioactive isotope

Each plasma ion source requires different diagnostics



La creazione di un Plasma ECR



ECRIS vs MDIS

$$\langle q \rangle \sim n_e \tau_i$$

$$I \sim n_e / \tau_i$$

- **Alto τ_i**
Altissimi stati di carica ma basse corrente di fascio!!

- **Basso τ_i**
Bassi stati di carica ma alta corrente di fascio!!

ECRIS (Electron Cyclotron Resonance Ion Sources): fasci intensi di stati di bassa carica, moderata intensità di ioni altamente carichi

MDIS (Microwave Discharge Ion Sources): versione semplificata delle ECRIS per fasci di protoni (o ioni a stato di carica singolo) ad alta intensità.

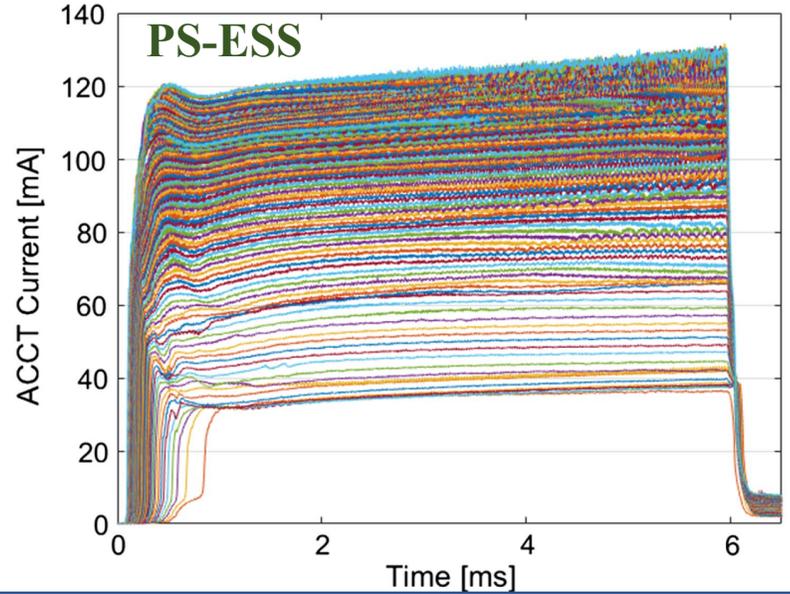
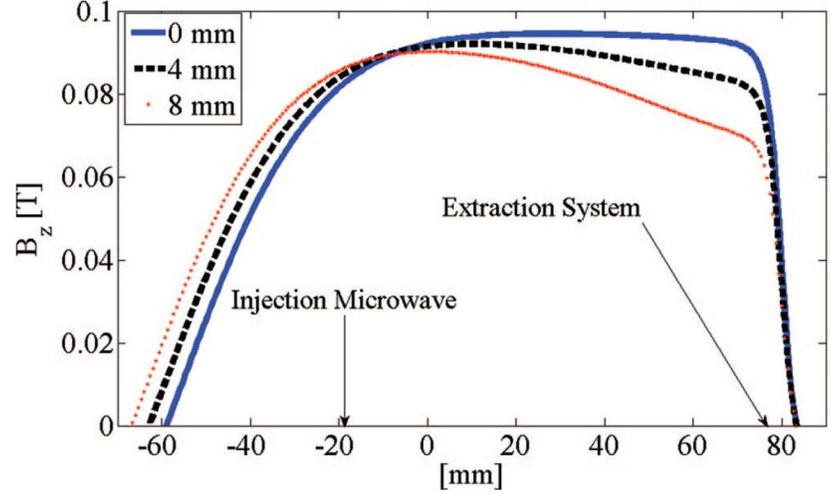
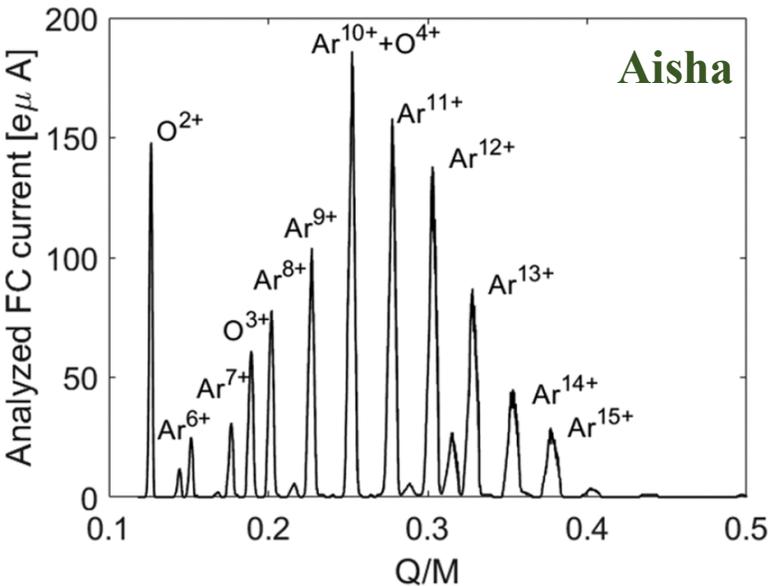
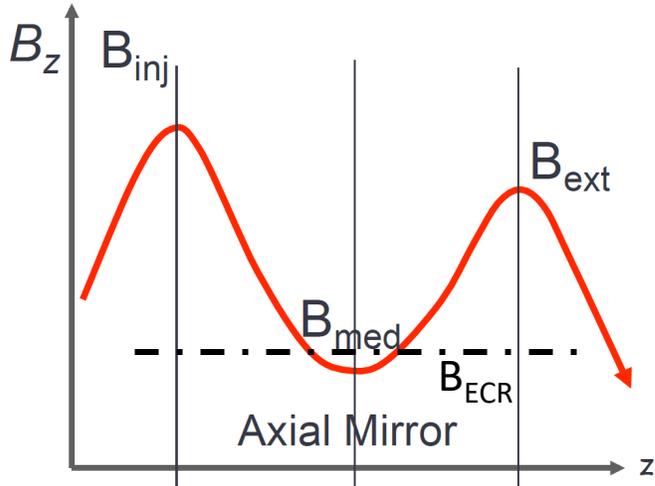
ECRIS vs MDIS

$$\langle q \rangle \sim n_e \tau_i$$

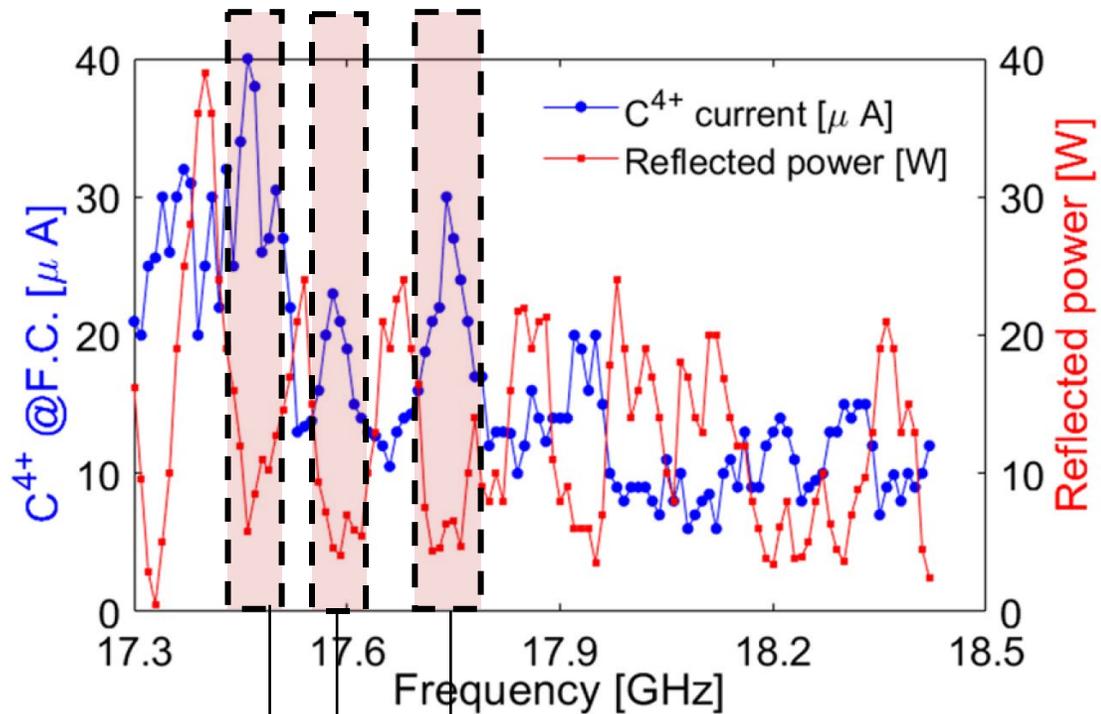
$$I_i \sim n_e / \tau_i$$

Ecris: confinamento magnetico, alto τ
Alti stati di carica
Corrente bassa

MDIS:
No Confinamento magnetico, basso τ
Ioni 1+
Alta corrente



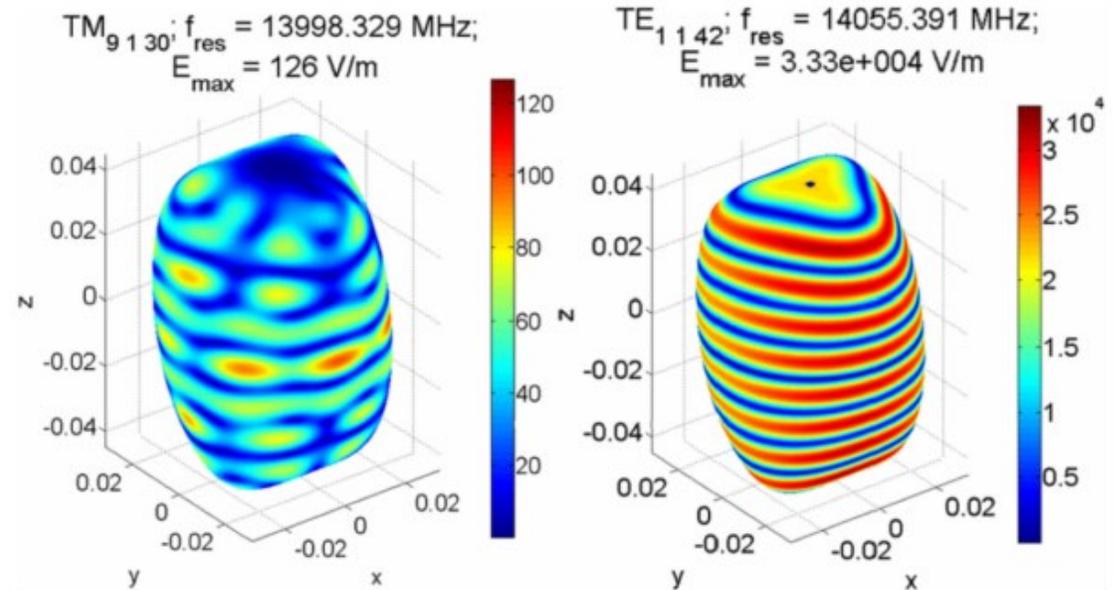
Ottimizzare i parametri di una ECRIS: *FREQUENZA*



**Regione di lavoro:
Bassa riflessa – alta corrente**

Cambiando la frequenza operativa si modifica il campo elettrico nella superficie di risonanza!

Si cambia l'energia che si trasferisce al plasma!



Ottimizzare i parametri di una ECRIS:

POTENZA, PRESSIONE E CAMPO MAGNETICO

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \underbrace{n_e n_j \langle \sigma_{j \rightarrow i}^{EI} v_e \rangle + n_0 n_{i+1} \langle \sigma_{i+1 \rightarrow i}^{CE} v_{i+1} \rangle}_{\text{Reazioni di creazione dello ione } n_i} - \underbrace{n_0 n_i \langle \sigma_{i \rightarrow i-1}^{CE} v_i \rangle - n_e n_j \langle \sigma_{i \rightarrow j}^{EI} v_e \rangle}_{\text{Reazione di distruzioni dello ione } n_i} - \underbrace{\frac{n_i}{\tau_i}}_{\text{Perdite su pareti/estrazione ione } n_i}$$

Reazioni di creazione dello ione n_i

Reazione di distruzioni dello ione n_i

Perdite su pareti/estrazione ione n_i

In pratica:
Caso Ar^{16+}

$$\left. \begin{array}{l} Ar_{17+}: n_e n_{Ar^{16+}} \sigma^{EI} v_e + n_0 n_{Ar^{18+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{18+}} - n_0 n_{Ar^{17+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{17+}} - n_e n_{Ar^{17+}} \sigma^{EI} v_e - \frac{n_{Ar^{17+}}}{\tau} \\ Ar_{16+}: n_e n_{Ar^{15+}} \sigma^{EI} v_e + n_0 n_{Ar^{17+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{17+}} - n_0 n_{Ar^{16+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{16+}} - n_e n_{Ar^{16+}} \sigma^{EI} v_e - \frac{n_{Ar^{16+}}}{\tau} \\ Ar_{15+}: n_e n_{Ar^{14+}} \sigma^{EI} v_e + n_0 n_{Ar^{16+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{16+}} - n_0 n_{Ar^{15+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{15+}} - n_e n_{Ar^{15+}} \sigma^{EI} v_e - \frac{n_{Ar^{15+}}}{\tau} \end{array} \right\}$$

Ottimizzare i parametri di una ECRIS:

POTENZA, PRESSIONE E CAMPO MAGNETICO

In pratica:
Caso Ar^{16+}

Ar_{17+} :

$$n_e n_{Ar^{16+}} \sigma^{EI} v_e + n_0 n_{Ar^{18+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{18+}} - n_0 n_{Ar^{17+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{17+}} - n_e n_{Ar^{17+}} \sigma^{EI} v_e - \frac{n_{Ar^{17+}}}{\tau}$$

Ar_{16+} :

$$n_e n_{Ar^{15+}} \sigma^{EI} v_e + n_0 n_{Ar^{17+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{17+}} - n_0 n_{Ar^{16+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{16+}} - n_e n_{Ar^{16+}} \sigma^{EI} v_e - \frac{n_{Ar^{16+}}}{\tau}$$

Ar_{15+} :

$$n_e n_{Ar^{14+}} \sigma^{EI} v_e + n_0 n_{Ar^{16+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{16+}} - n_0 n_{Ar^{15+}} \sigma^{CE} v_{Ar^{15+}} - n_e n_{Ar^{15+}} \sigma^{EI} v_e - \frac{n_{Ar^{15+}}}{\tau}$$

**Impatto elettronico: frequenza
e potenza microonde,**

**Scambio carica: CE
Modifica Pressione**

**Campo
magnetico**

Sorgenti di ioni ECR ai LNS

SERSE

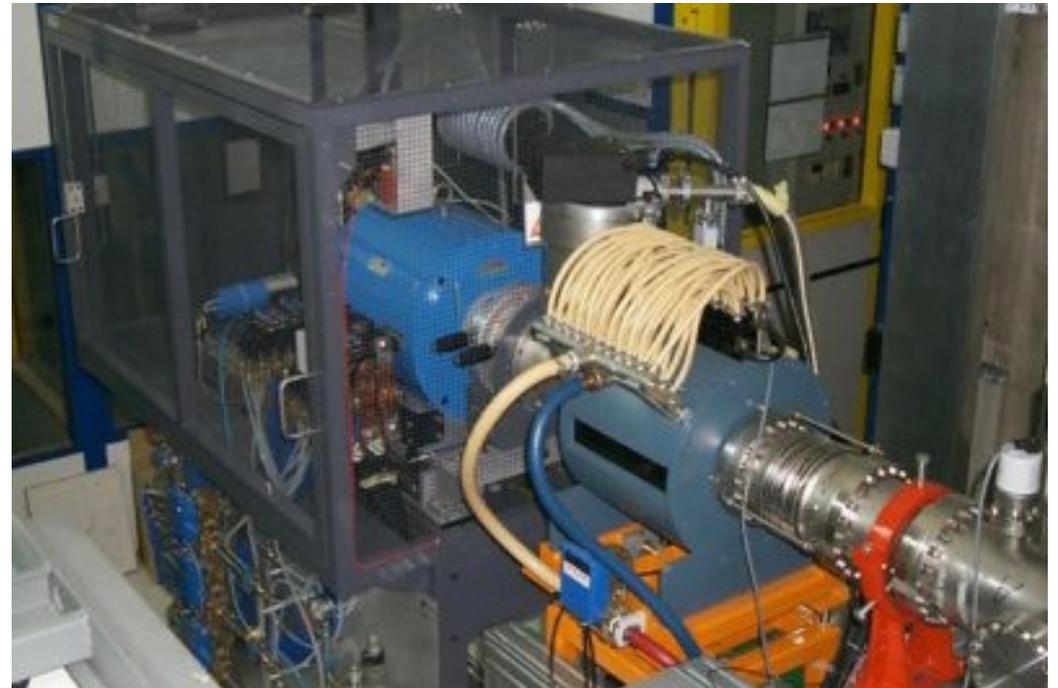
La sorgente SERSE è in funzione dal giugno 1998.
Il suo compito è quello di generare intensi fasci di ioni da inviare al CS ad alto e altissimo stato di carica per esperimenti di fisica nucleare .



Frequenza operativa: 18+14.5 GHz

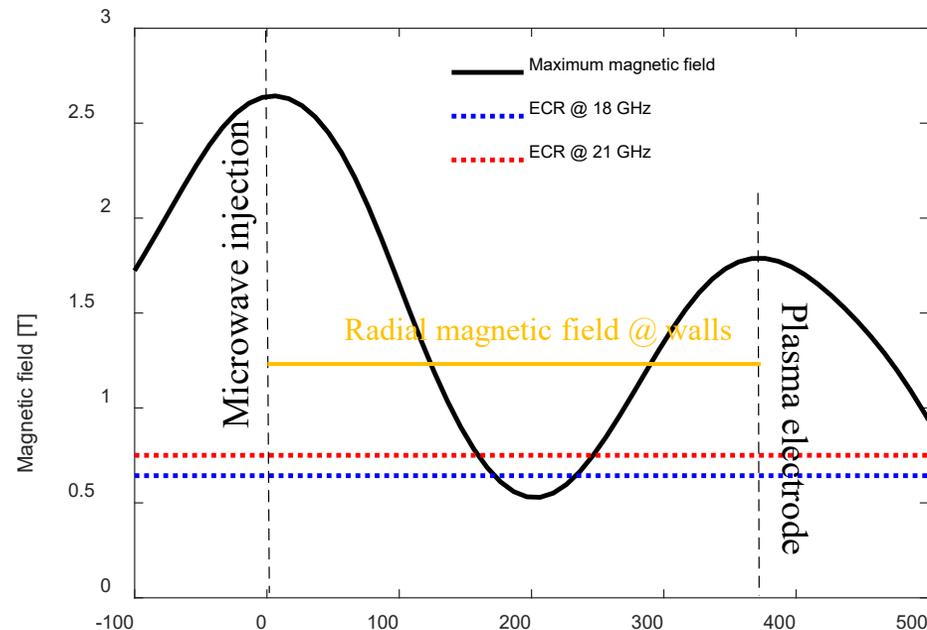
CAESAR

La sorgente Caesar è in funzione da marzo 1999.
Il suo compito è quello di generare di media intensità per il al CS (ioni per Catana) e operare come sorgente di back up quando la Serse non è disponibile.

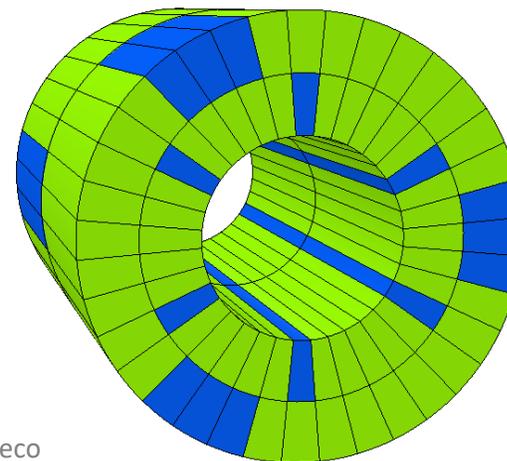


Frequenza operativa: 14 GHz

AISHA: the Advanced Ion Source for Hadrontherapy

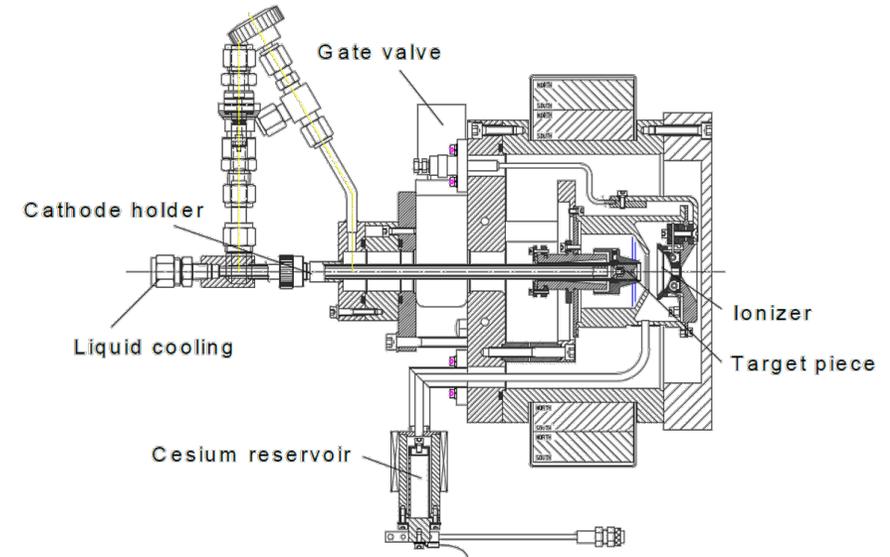
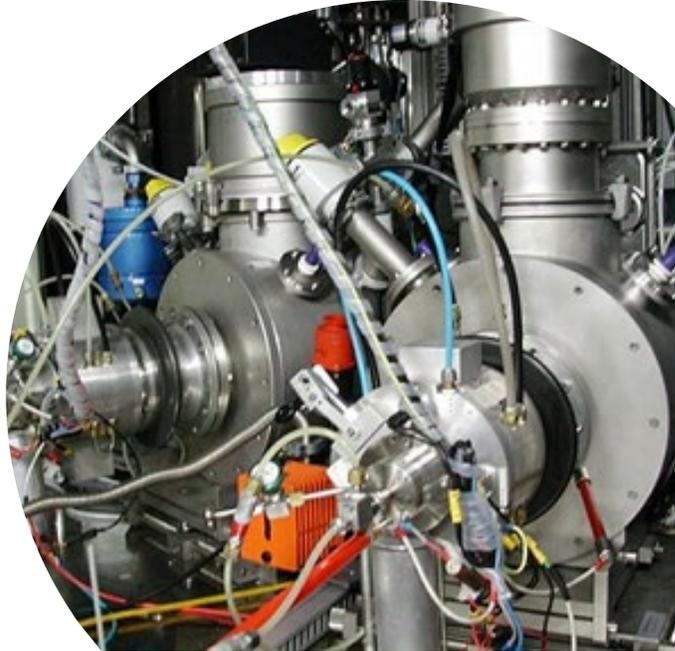


AISHA è una ECRIS ibrida: il campo di confinamento radiale è ottenuto mediante un esapolo a magnete permanente, mentre il campo assiale è ottenuto con un sistema superconduttore privo di elio. La frequenza operativa di 18 GHz consentirà di massimizzare la densità del plasma utilizzando tubi a microonde commerciali che soddisfano le esigenze dell'installazione in ambienti ospedalieri.



Green= VAC 745 HR
Blue= VAC677 HR

Sorgenti del Tandem



Sputtering il CeLa Piattaforma 450kV (fornita attualmente da un alimentatore da 200kV ospita attualmente due sorgenti Sputtering.

Le 2 sorgenti sputtering producono fasci negativi di intensità dell'ordine dei microamper da un'ampia varietà di materiali. Gli ioni negativi vengono prodotti bombardando un catodo cilindrico, contenente il materiale desiderato, da un fascio positivo di ioni Cesio. Le particelle del materiale bombardato vengono così sputterate producendo atomi a bassa velocità che subiscono un cambio di carica nell'attraversamento del layer di Cesio neutro.

Gli ioni negativi vengono respinti dalla tensione di catodo ed accelerati verso il potenziale di terra. Gli elettroni secondari vengono soppressi attraverso una coppia di magneti permanenti posti parallelamente sulla tank che ospita la sorgente stessa.

Nelle sorgenti sia è posto all'interno di un serbatoio, denominato reservoir, riscaldato e posto alla tensione di estrazione.

Grazie per l'attenzione

