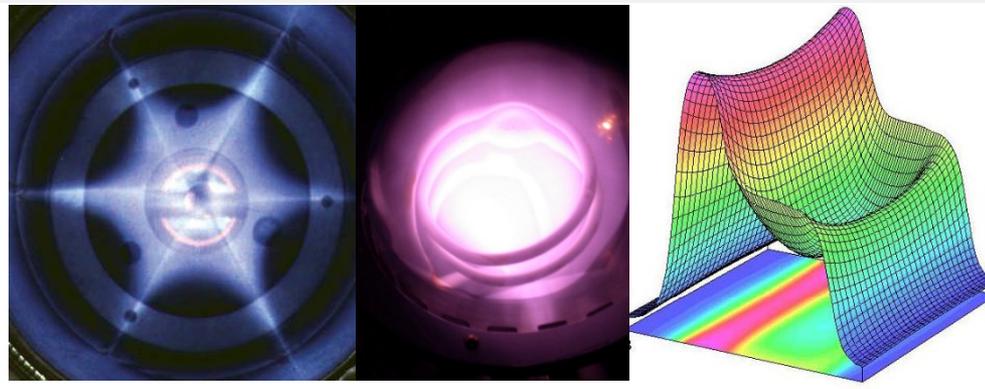


CONGRES SFP 2019 - NANTES

REVUE SUR LES SOURCES D'IONS PLASMA APPLIQUEES AUX ACCELERATEURS ET PERSPECTIVES



Contenu

Introduction

Sources d'ions à filaments

Sources laser

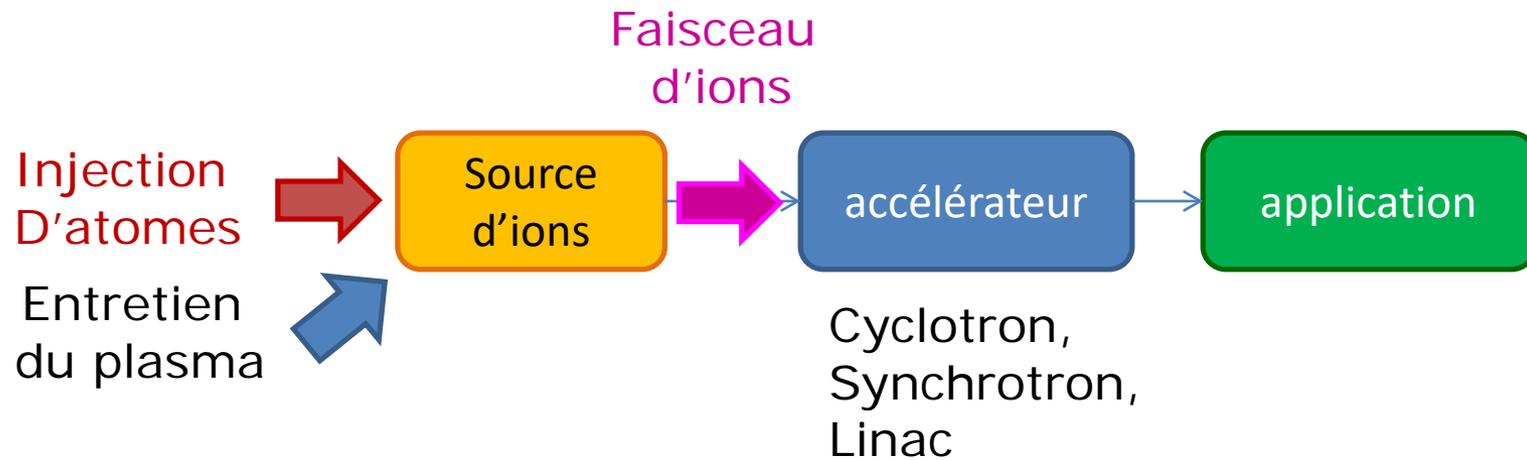
Sources d'ions plasma

Perspectives

Source d'ions stables

➤ Fabriquer les faisceaux d'ions utilisées:

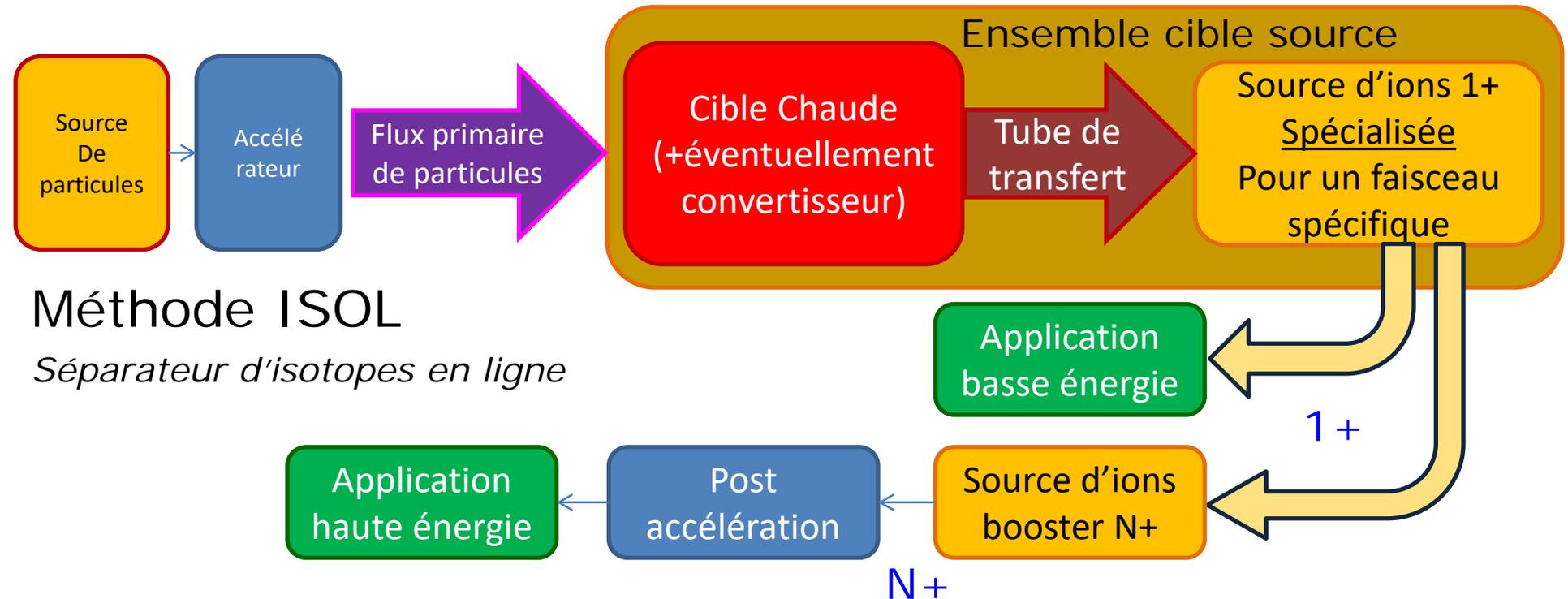
- Après des grands accélérateurs d'ions lourds
 - physique des particules, physique nucléaire
- Pour traiter certains cancers (hadronthérapie, protonthérapie)
- Pour étudier les propriétés des atomes, molécules, des surfaces, etc à basse énergie



- Budget Source ~ 1-5% du budget total du projet : non négligeable!
- La charge élevée des ions Peut réduire significativement la longueur/le cout de l'accélérateur

Sources d'ions radioactifs

- Pour étudier les propriétés des noyaux exotiques à faible durée de vie loin de la zone de stabilité

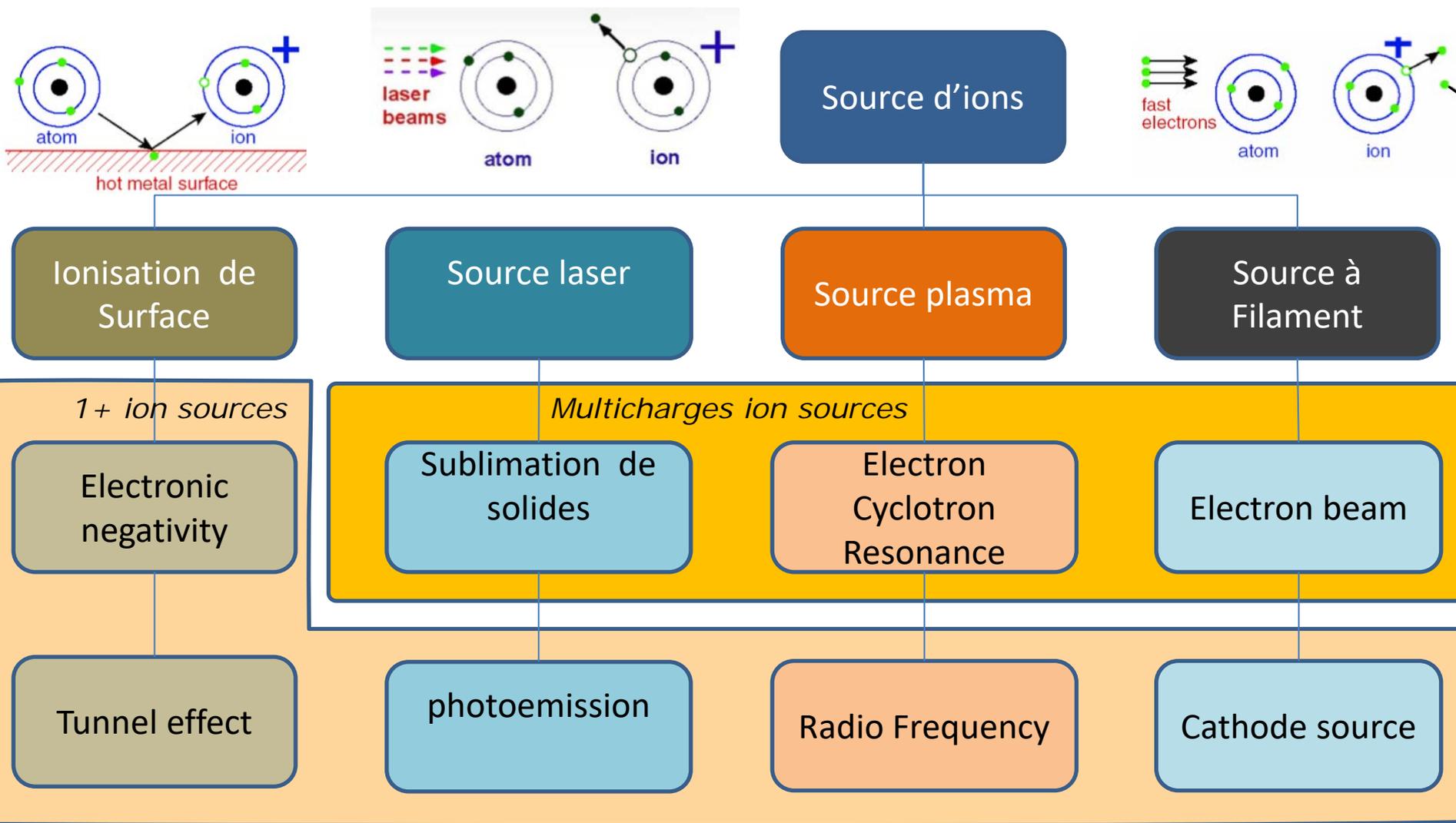


Méthode ISOL

Séparateur d'isotopes en ligne

✓ *Voir la présentation de Maher Cheikh Mahmed*

Famille de Sources d'ions

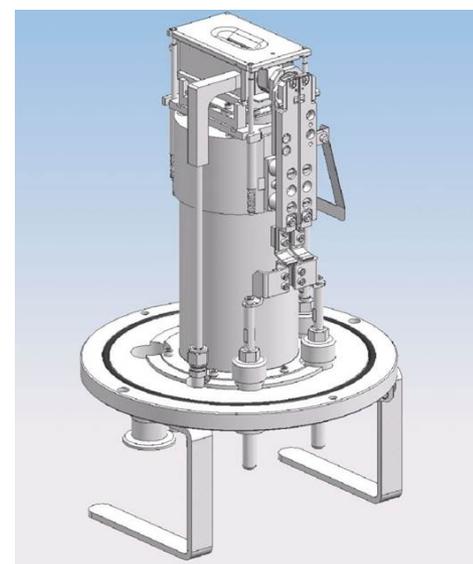
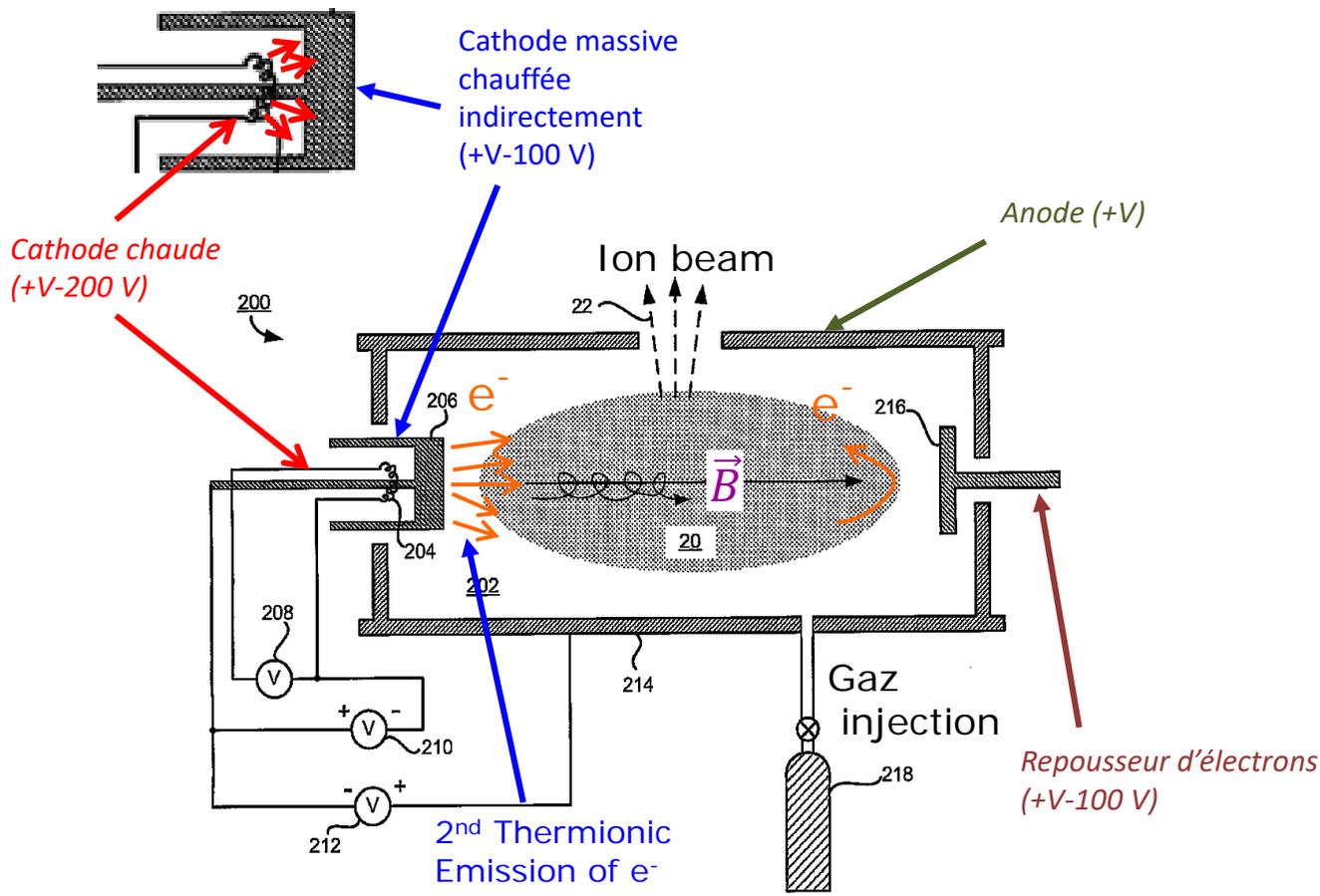


Source à Filament moderne : IHC

➤ Source industrielle à chauffage indirect de cathode (IHC)

- Implantation ionique, ions 1+
- Mais pulvérisation de la cathode...

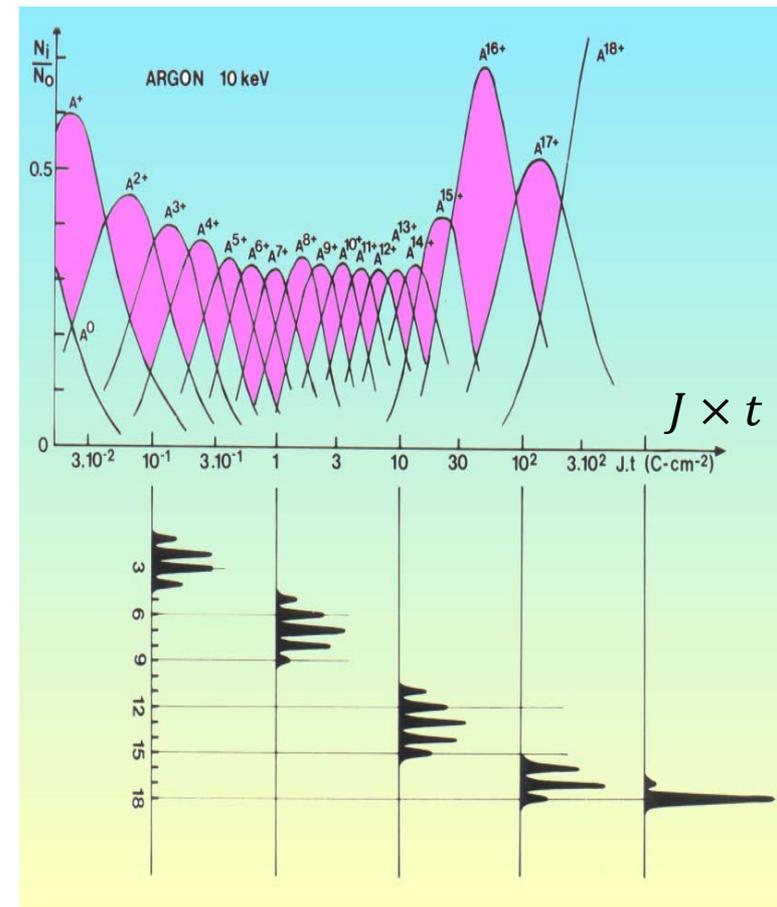
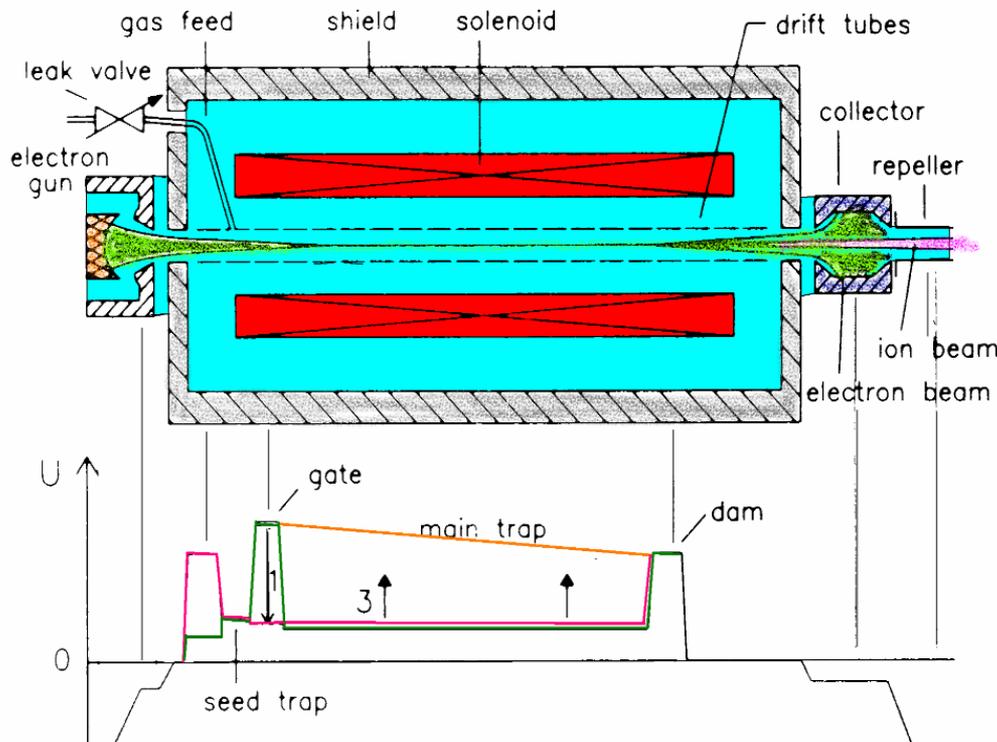
$I \sim 30 \text{ mA}$
 $\Delta t \sim 800 \text{ à } 2000 \text{ h}$



Electron Beam Ion Source (EBIS)

➤ Source pulsée pour les accélérateurs linéaires et synchrotrons

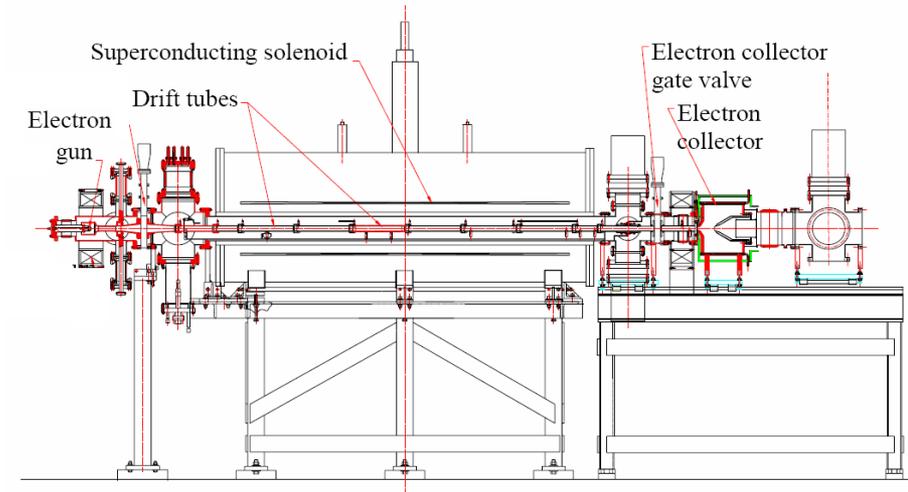
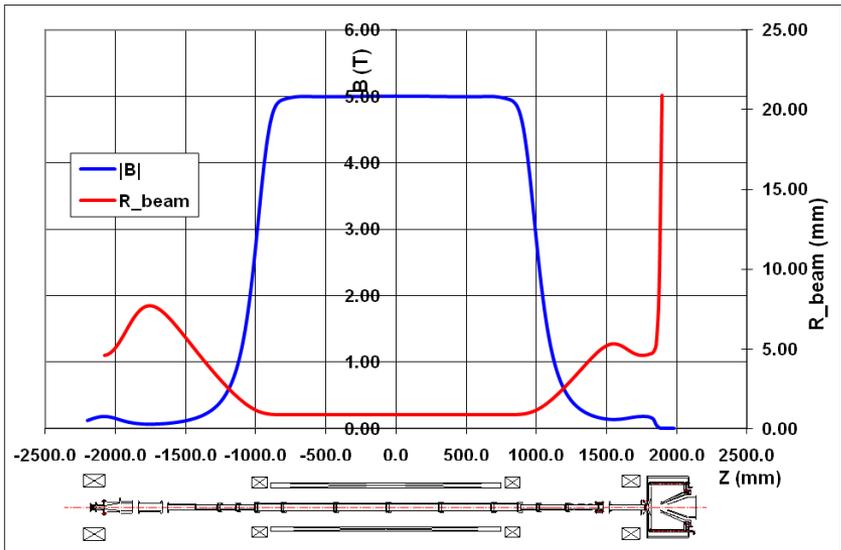
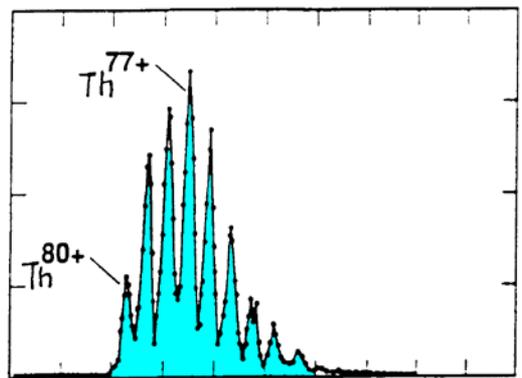
- Très basse pression ($\sim 10^{-9}$ mbar)
- Très forts états de charge (noyaux nus!)
- $\langle I \rangle \sim 0.1-10$ nA
 - charge d'espace



Ions argon vs temps

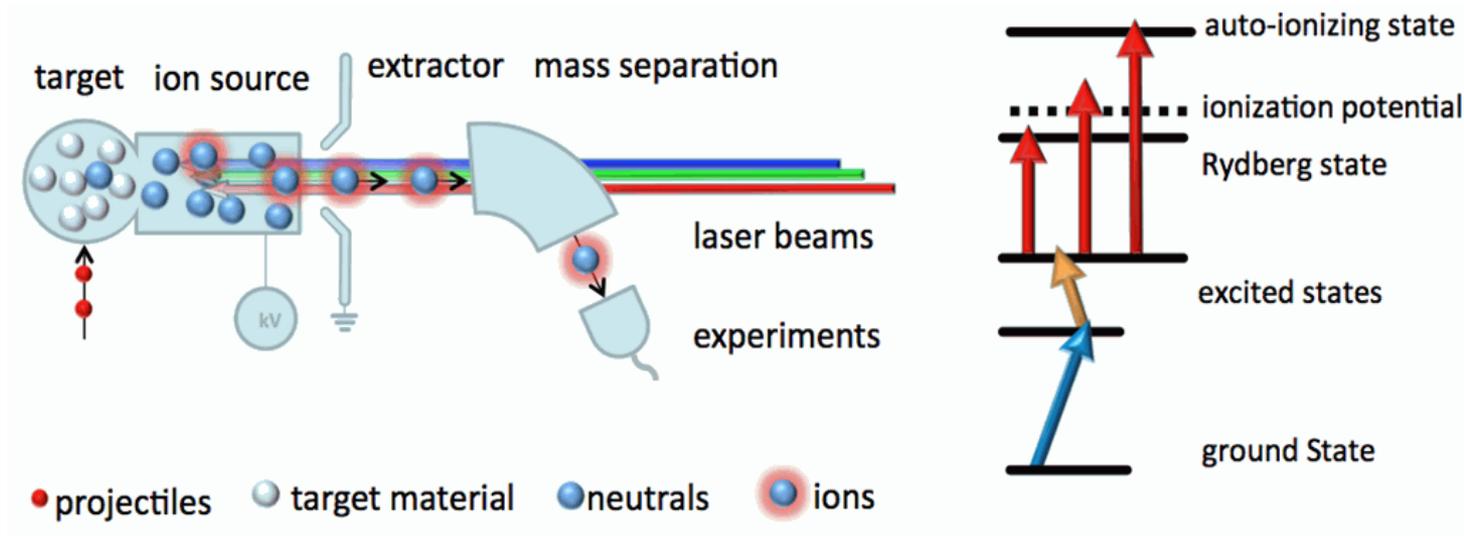
EBIS à Brookhaven, USA (RHIC)

➤ 1.7 mA – 10 μs – 5 Hz



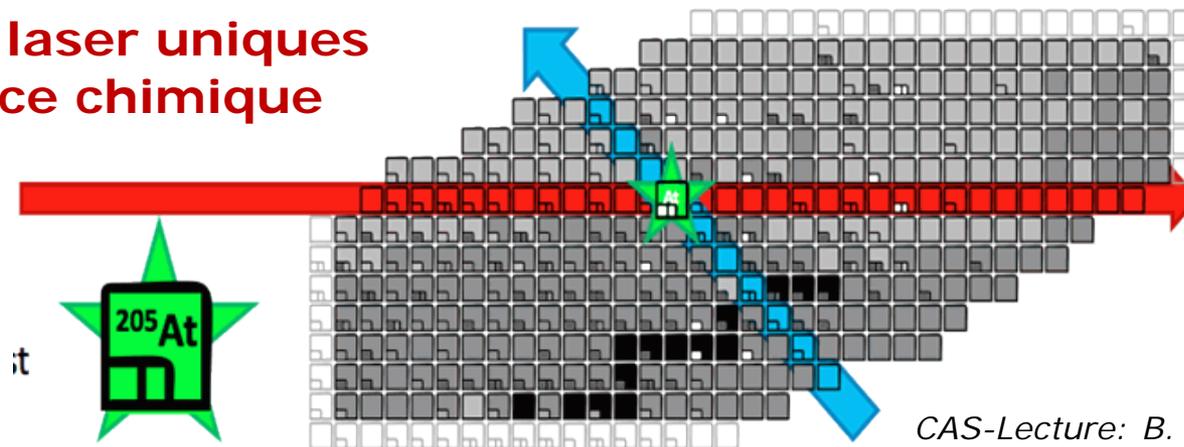
Source d'ions Laser

- Haute sélectivité et faible intensité pour les **ions radioactifs**



**Fréquences laser uniques
Pour 1 espèce chimique**

**Ions 1+
Compacte
Robuste**



CAS-Lecture: B. Marsh

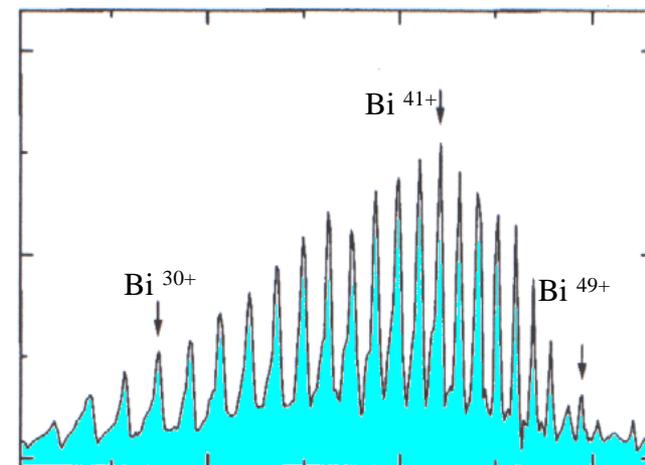
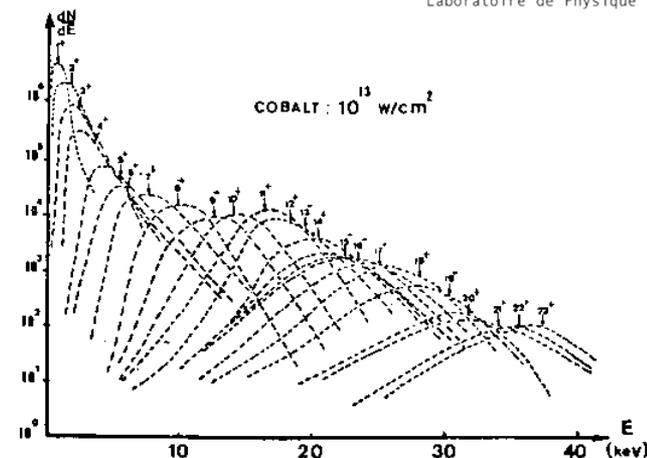
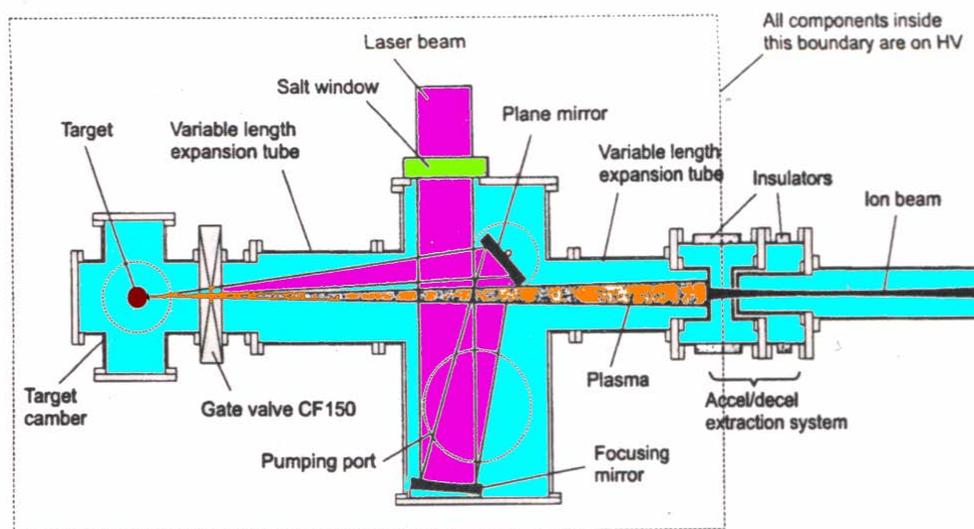
✓ **Voir la présentation de Maher Cheikh Mahmed**

Source d'ions par ablation laser

➤ Recherche du CERN années 2000

- Objectif: insertion mono-tour dans les synchrotrons du CERN pour le LHC
- Permet d'économiser une mise en forme et une injection multi-tour complexe
- Projet arrêté
 - pbm laser
 - Dispersion en énergie

➤ Nouvelle étude en cours à IMP Lanzhou, Chine



Specifications :
 laser CO₂-N₂-He 100J-10¹³W.cm⁻²
 pulses 50ns à 1Hz
 1.4 10¹⁰ Pb²⁵⁺ par pulse

Source d'ions Radio Fréquence

➤ Faisceau d'ions H⁻

- Oak Ridge, CERN
- 300W @ 13 MHz CW
- 60 kW [1ms/60Hz] @ 2 MHz
- Maintenance /3 semaines

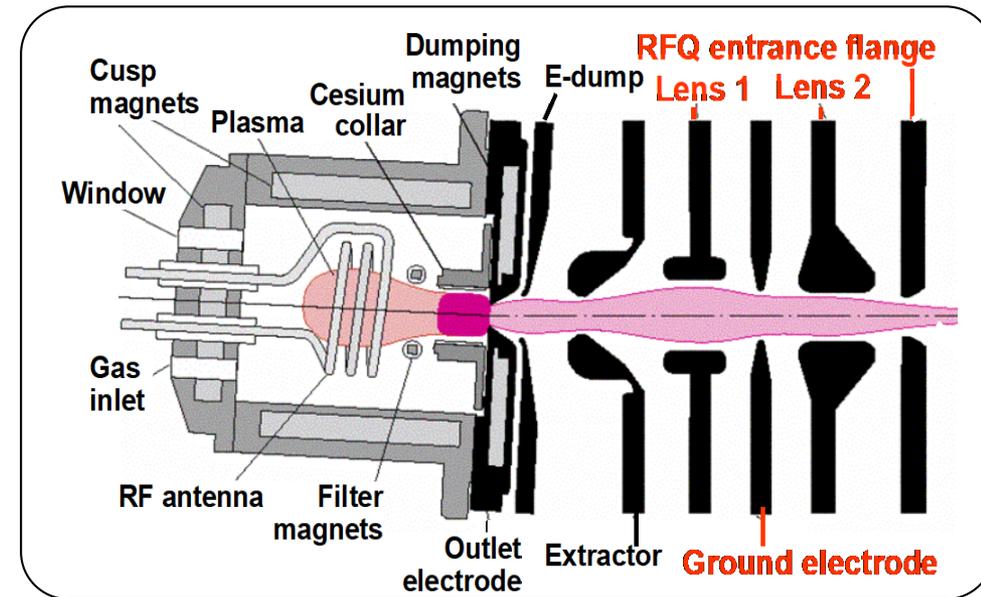
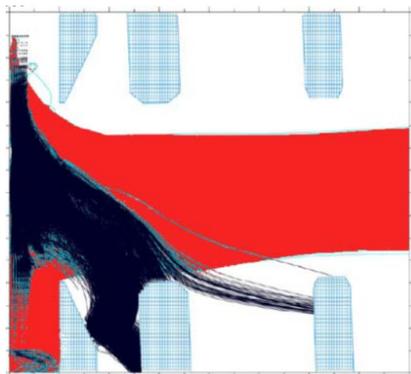
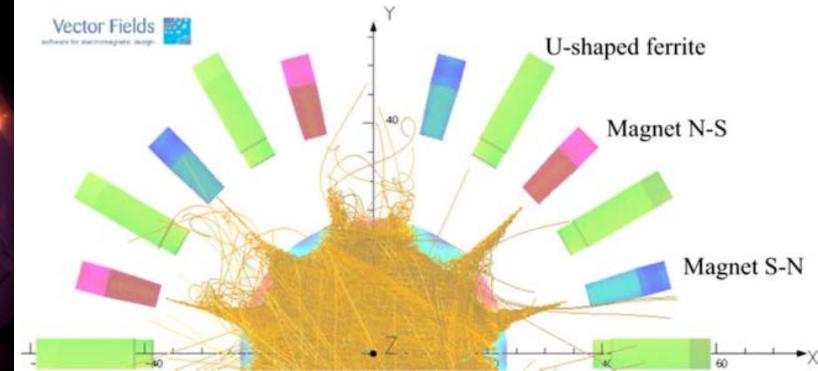
➤ Production de H⁻ en volume:

- 10 mA

➤ Production en surface (Cs)

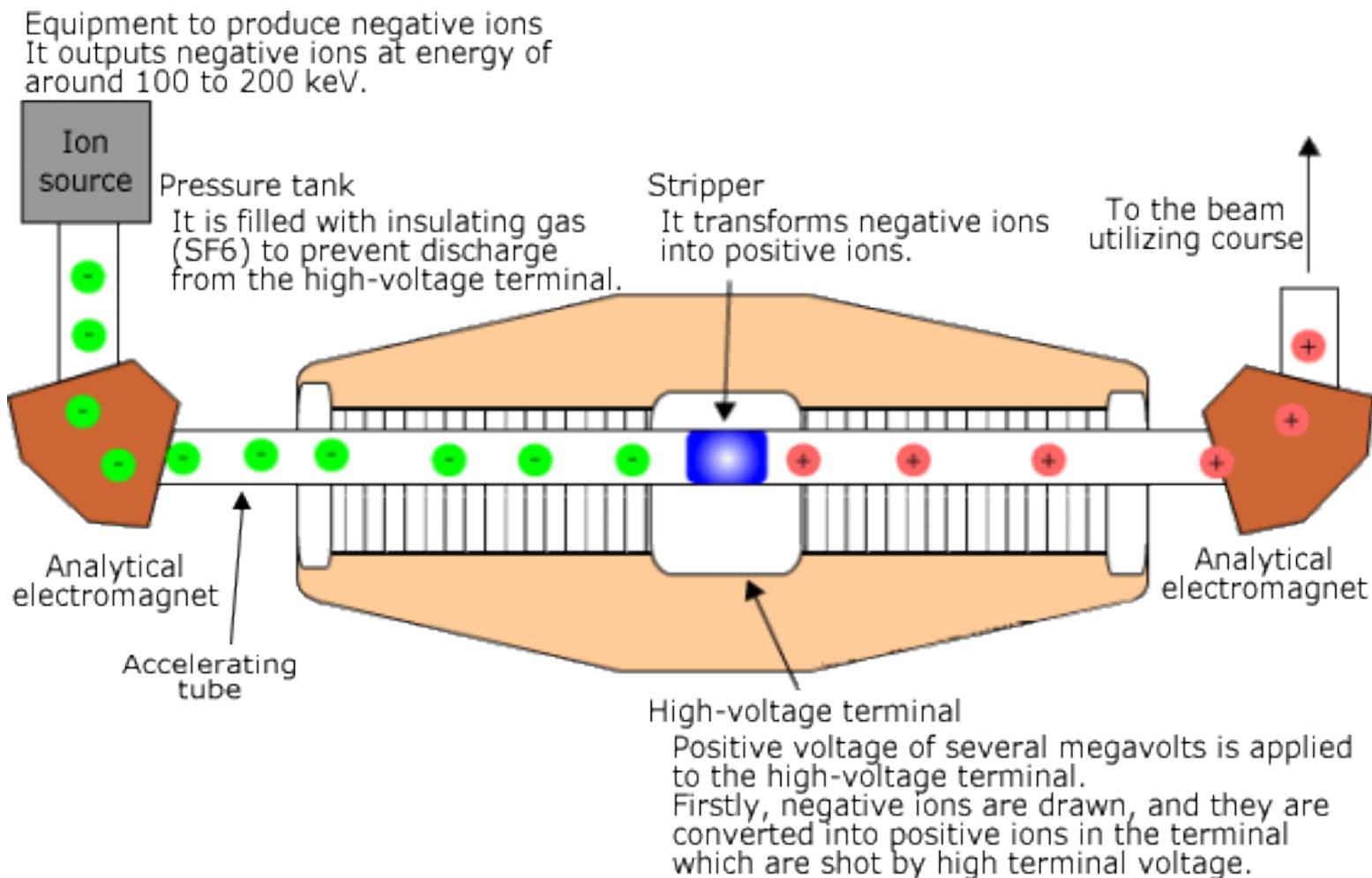
- 50 mA total

➤ Filtrage électrons , gestion Cs, gestion electrons co-extraits



Plot et images: ORNL, CERN

Application sources H⁻ aux tandems

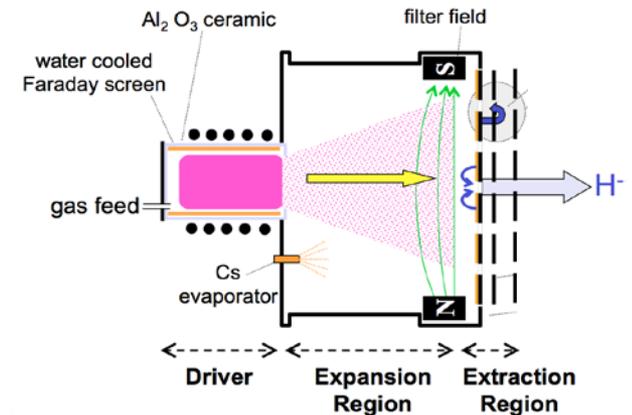


Source D⁻ pour les Tokamaks

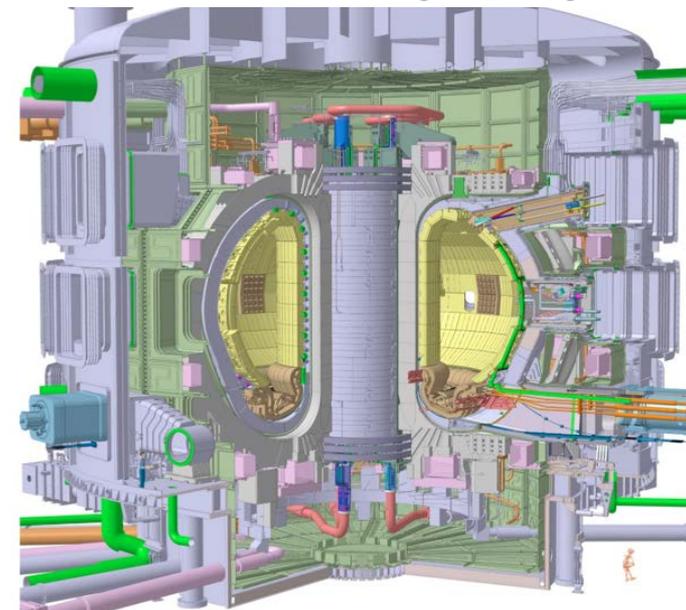
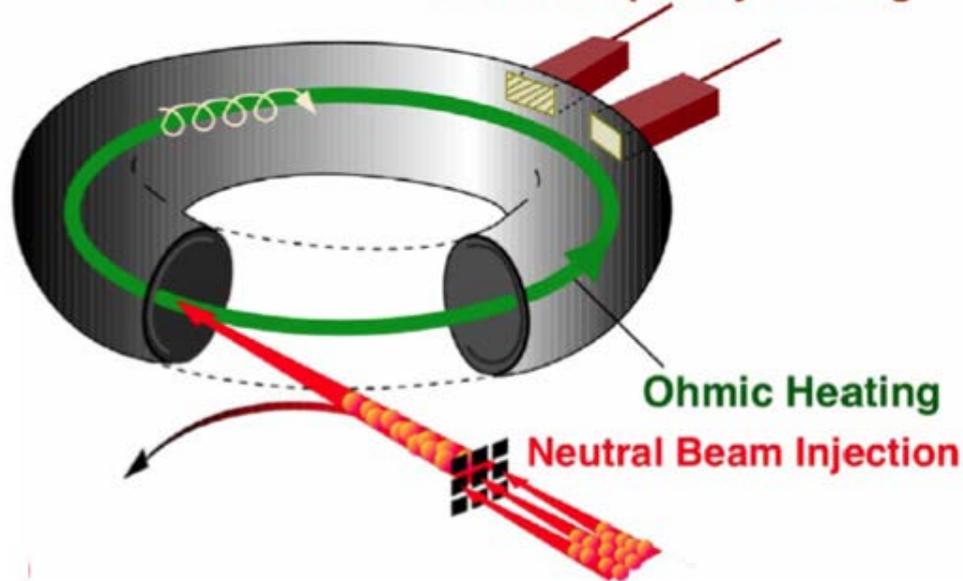
➤ Chauffage du plasma par injection de neutre

- ITER: 40 A (D⁻) @1 MeV !

✓ [Voir Présentation d'Adrien Revel](#)



Radio Frequency Heating



Source d'ions à la Résonance Cyclotronique Electronique (RCE)

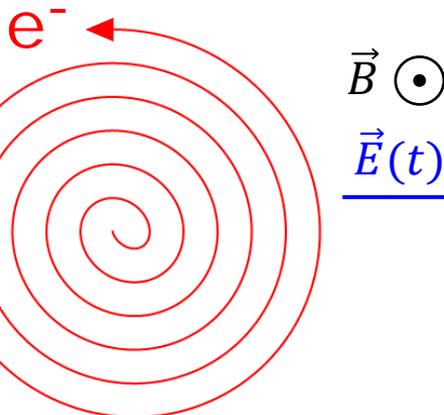
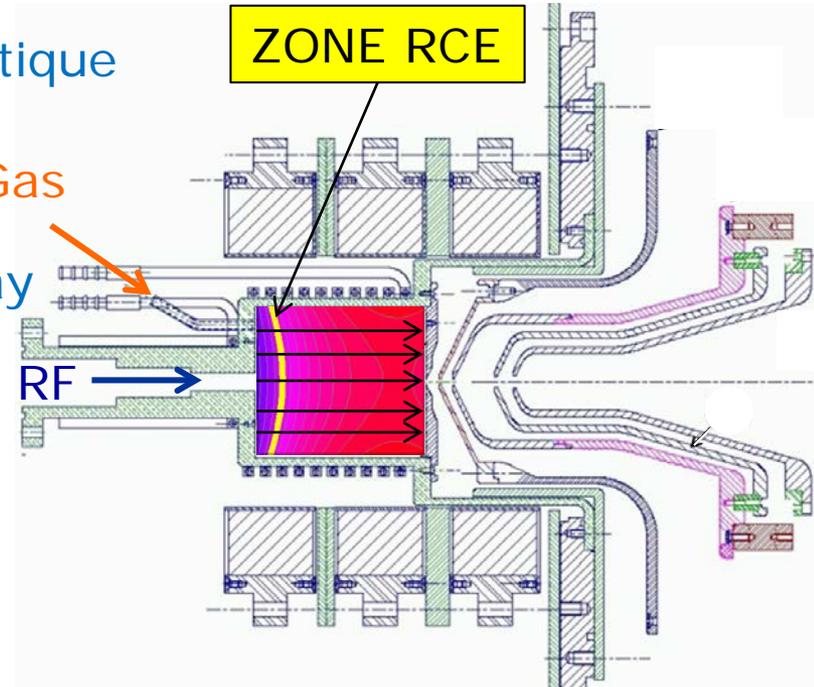
➤ Champ plat, pas de confinement magnétique

- Électrons ~100 eV
- Ions froids

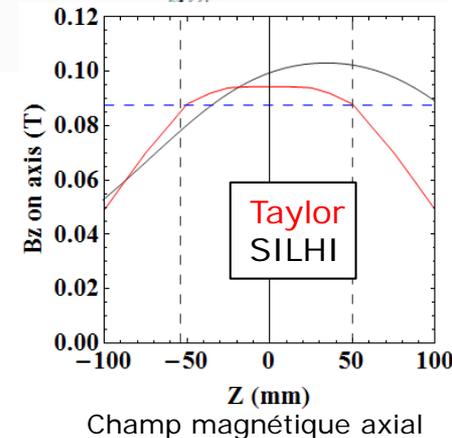
➤ Source d'ions léger 1+ SILHI, CEA Saclay

- $P \sim 10^{-5}$ mbar
- 150 mA H^+ continu
- 80% $H^+ \gg H_2^+, H_3^+$
- 2 kW HF@2.45 GHz ($\lambda \sim 12$ cm)

➤ Utilisé comme injecteur au GANIL, à ESS (Suède), IPHI...



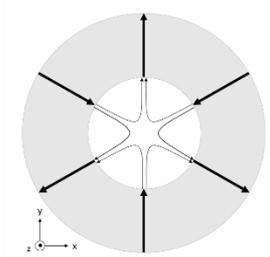
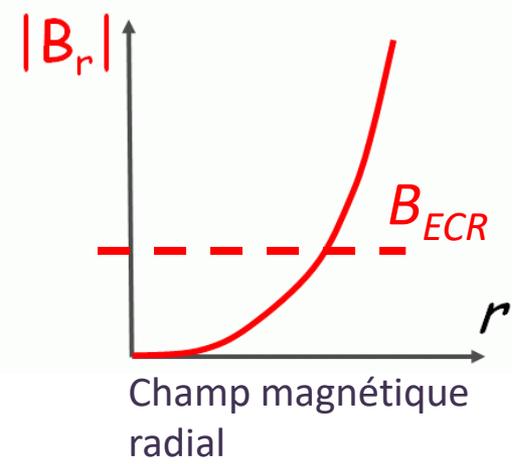
$$\omega_{HF} = \omega = \frac{eB}{m}$$



Source d'ions RCE multichargés

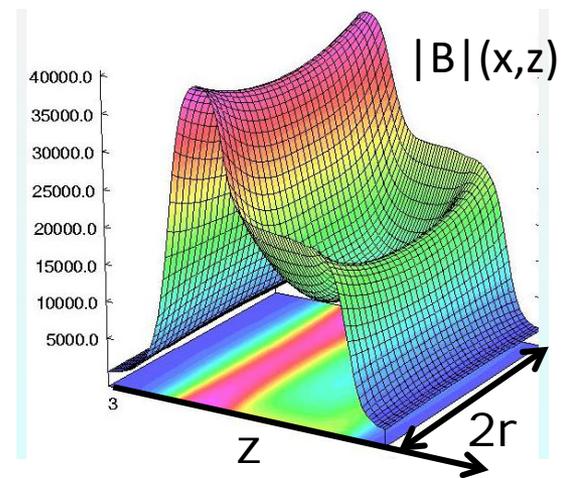
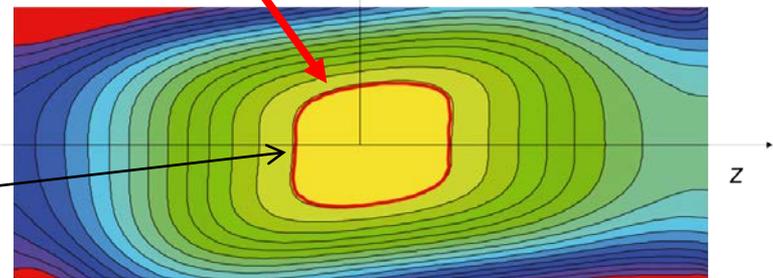
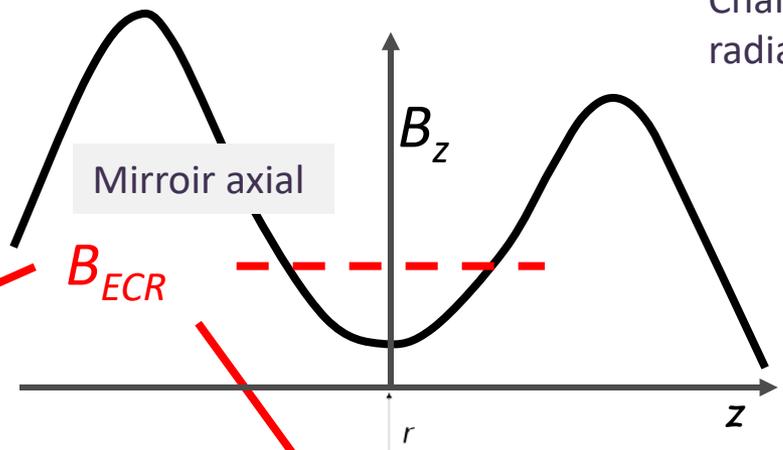
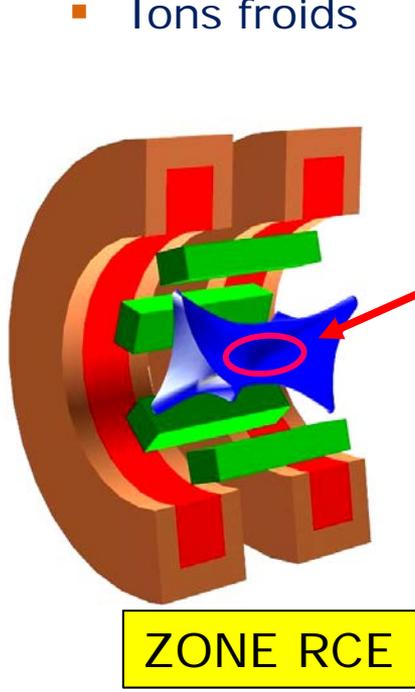
➤ Confinement magnétique des électrons

- « Minimum-B »
- Surface de résonance fermée



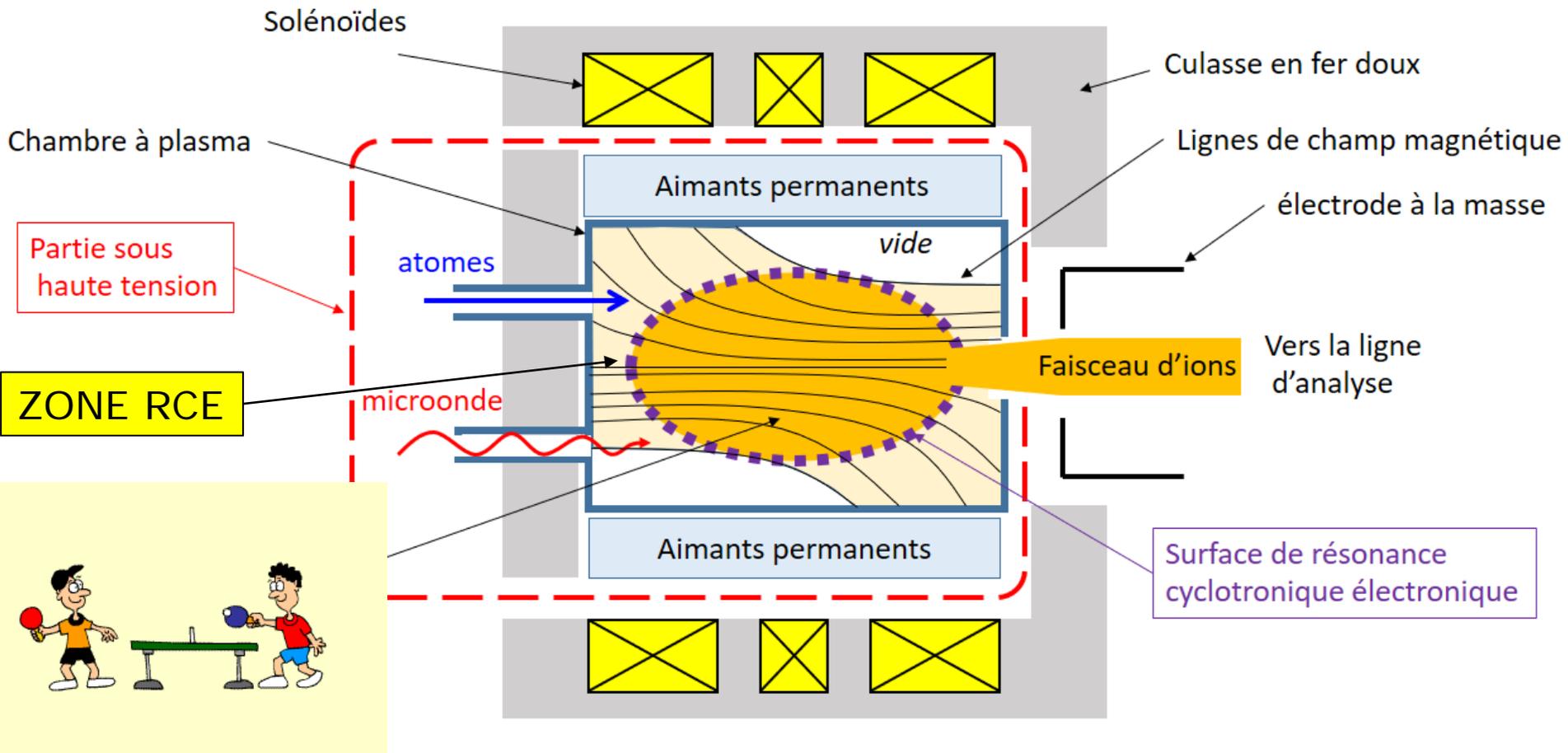
➤ Confinement électrostatique des ions

- Ions froids



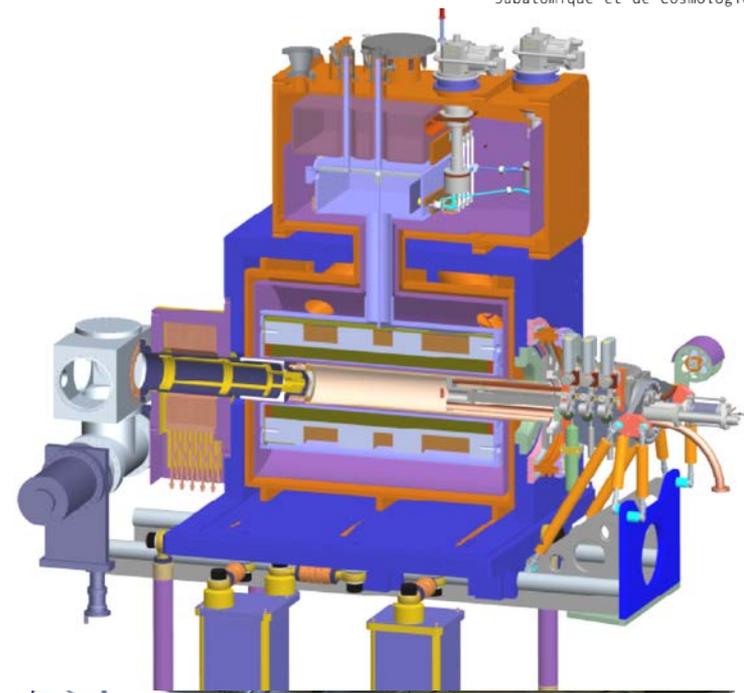
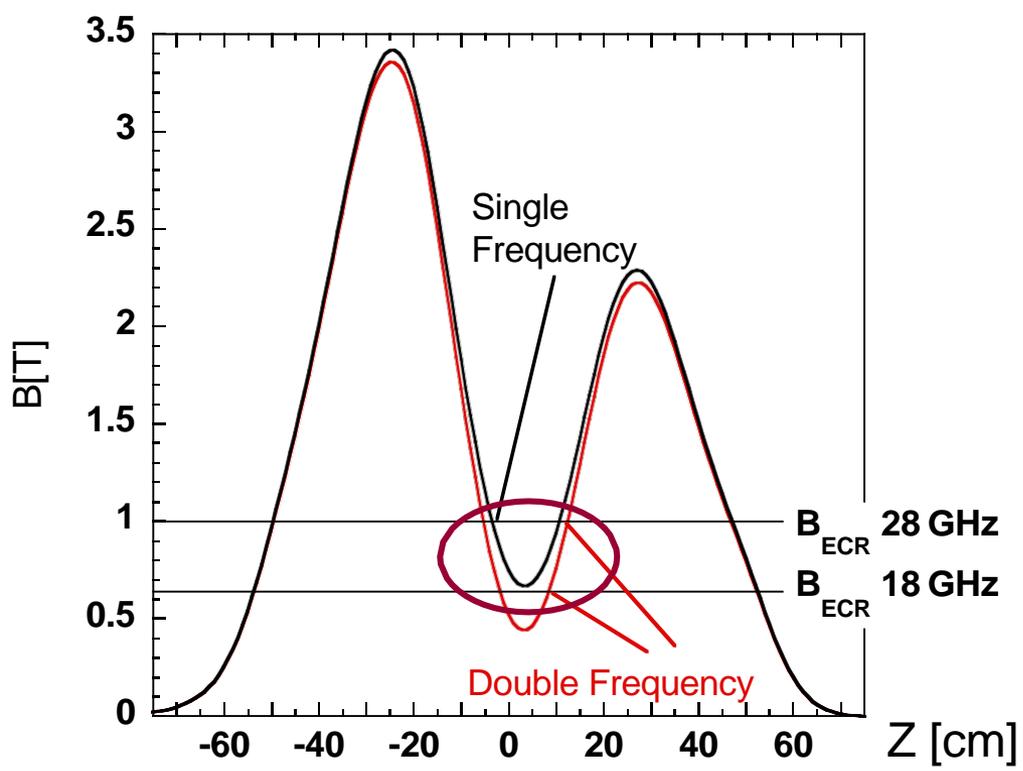
Source d'ions RCE multichargés

- $n_e \sim 10^{10} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
- $I_{ions} \sim \omega_{HF}^2 V \sim 1-20 \text{ mA}$
- $T_e > 5 \text{ keV}$
- Loi d'échelle: $n_e \propto \omega_{HF}^2$
- $f_{HF} \sim 2.45 - 28 \text{ GHz}$
- $T_i \sim 1-10 \text{ eV}$
- $P \sim 10^{-7} \text{ mbar}$



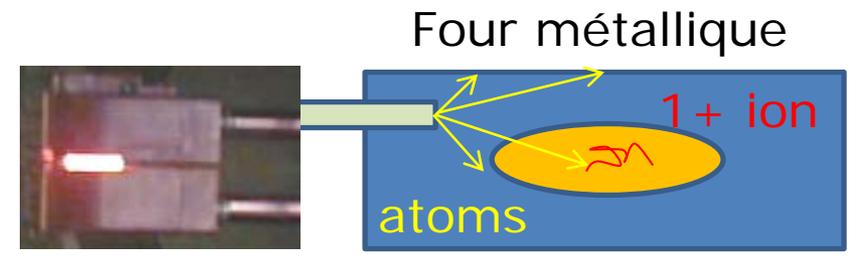
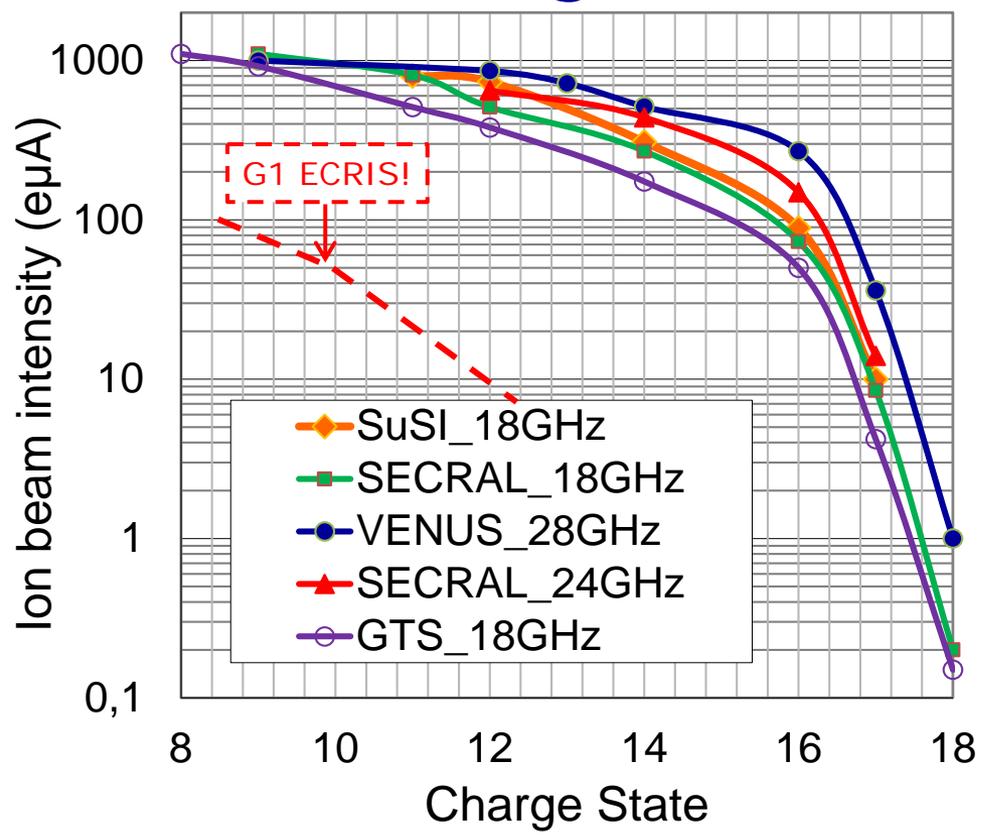
Source d'ions moderne 28 GHz

- VENUS, Berkeley, USA
- Aimant SC NbTi
- Volume chambre ~ 8.5 litre
- Hexapole 2.2 T – Miroir axial 3.5 T
- $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $P \sim 10^{-7} - 10^{-8} \text{ mbar}$

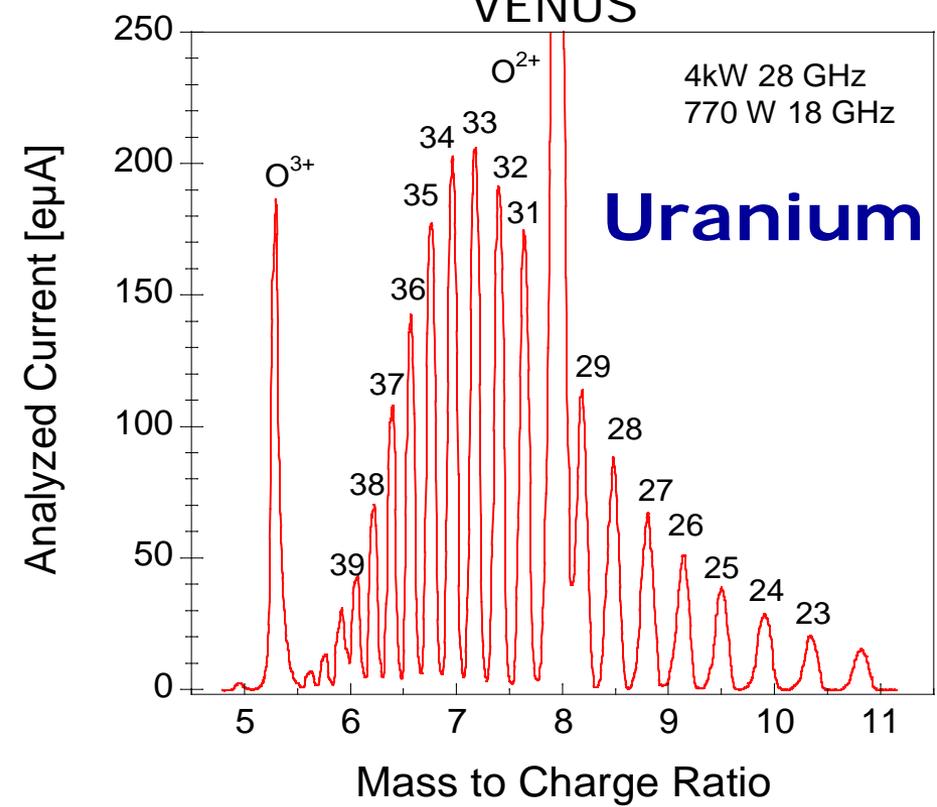


Performances Sources d'ions modernes

Argon



VENUS



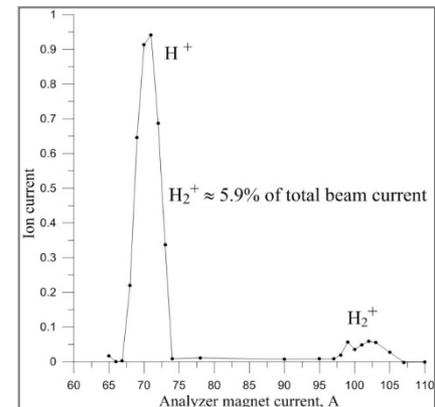
Uranium

*Vapeurs métalliques injectées
Dans un plasma d'oxygène*

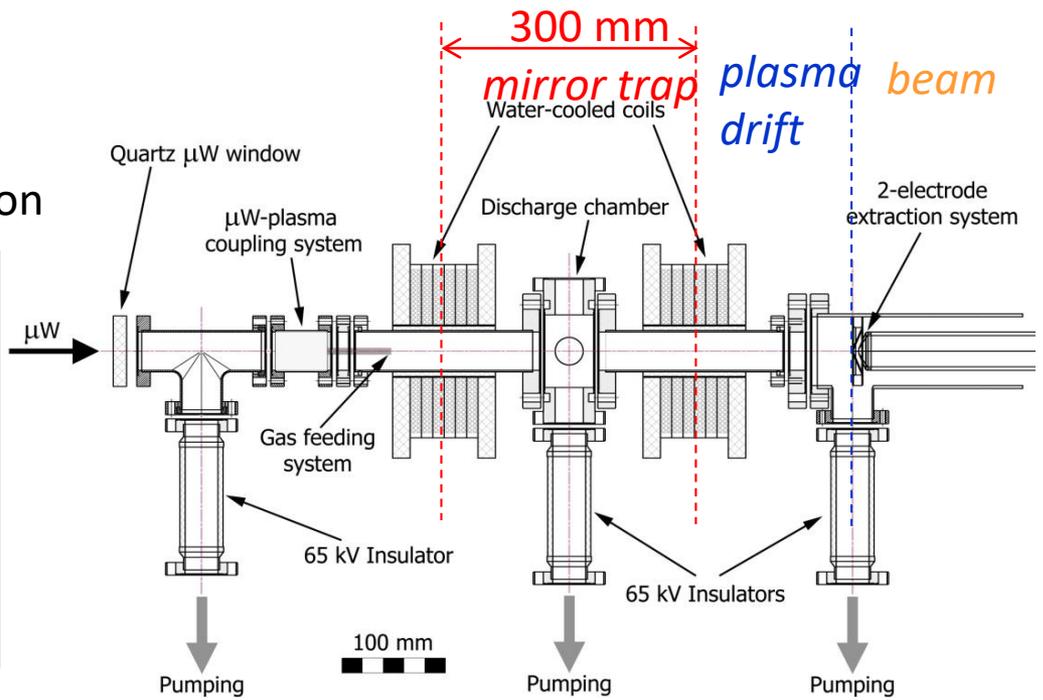
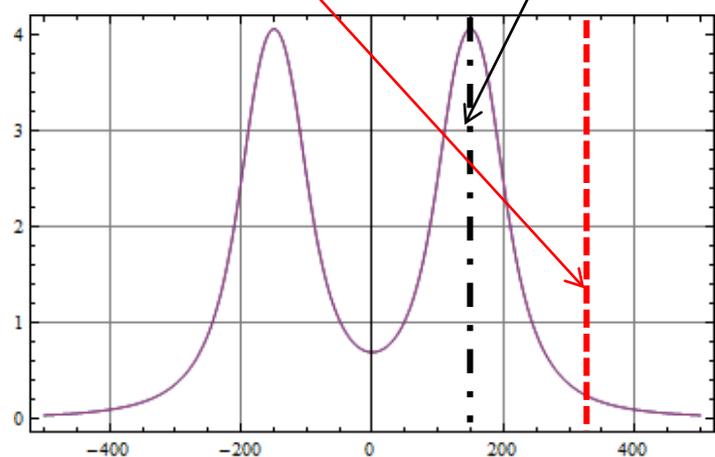
Source: G.Machicoane, MSU/NSCL, ICIS'11, modified

Source plasma « gasdynamic »

- IAP RAS, SMIS 37
- 100 KW-1 ms @ 37.5 GHz
- pulses up to **450 mA of H⁺**
- Plasma collisionnel : P ~ 10⁻⁴ - 10⁻² mbar
- Emittance très petite 0.06 pi/mm.mrad 1σRMS



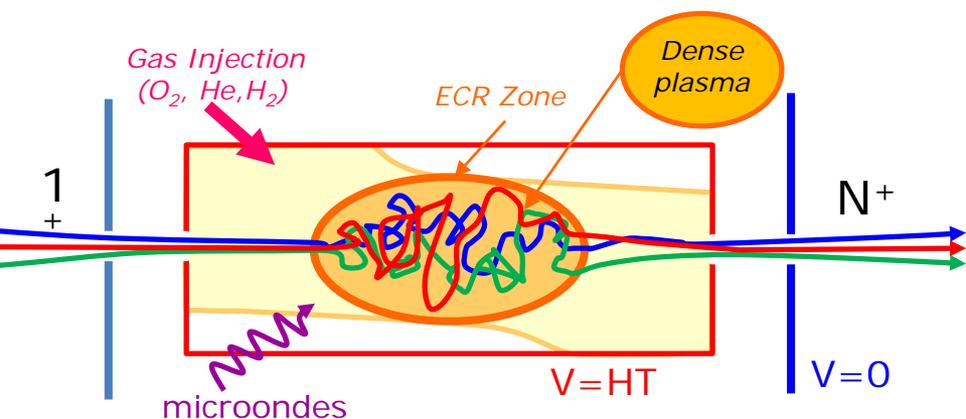
Gasdynamic extraction position
Classical ECRIS extraction position



Les boosters de charge

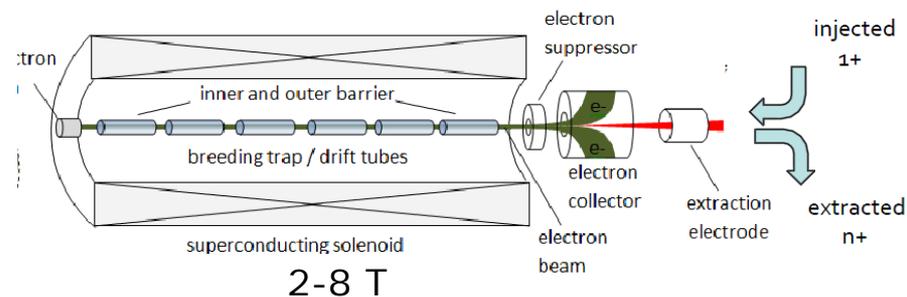
- Augmenter l'état de charge des ions radioactifs de courte durée de vie

Booster RCE



- Forte intensité
- Forte contamination
- Forte charge
- Temps sortie long

Booster EBIS

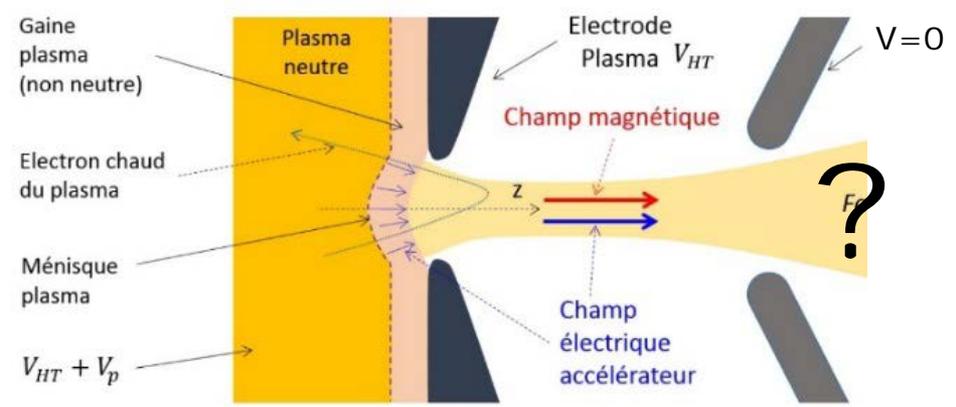
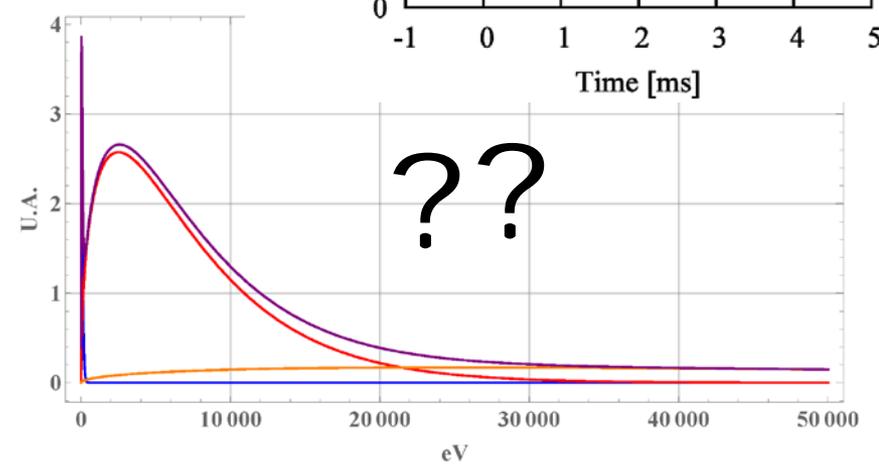
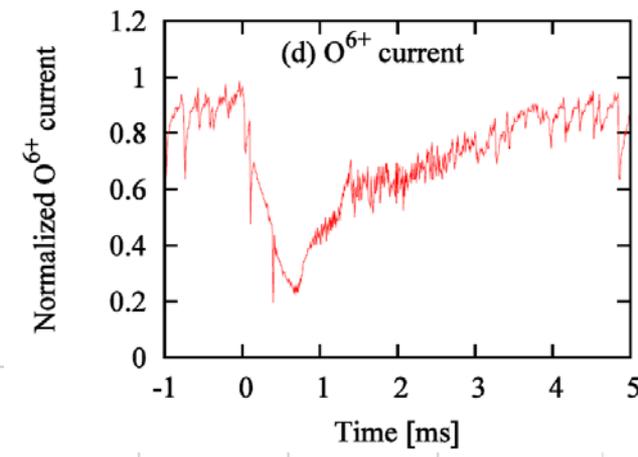
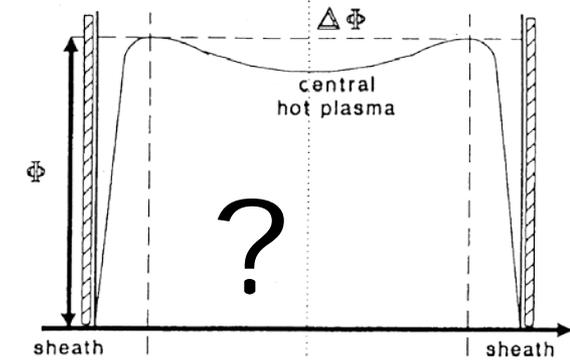


- Faible intensité
- Faible contamination
- Très forte charge
- Temps sortie court

- Etude CERN: technologies complémentaires
- Permettent de réduire le coût de la post accélération

Problèmes ouverts sources RCE

- Un plasma très complexe et mal connu
 - Hors équilibre, anisotrope
 - Fonction de distribution énergie électronique
 - Confinement électrostatique des ions
 - Puits de potentiel: force ponderomotive, electrons chauds?
 - Couplage microonde-plasma
 - Gaine plasma et formation de l'émittance du faisceau
 - Instabilité cinétique (anisotropie FDEE électrons)
- Perspectives d'étude par simulations PIC

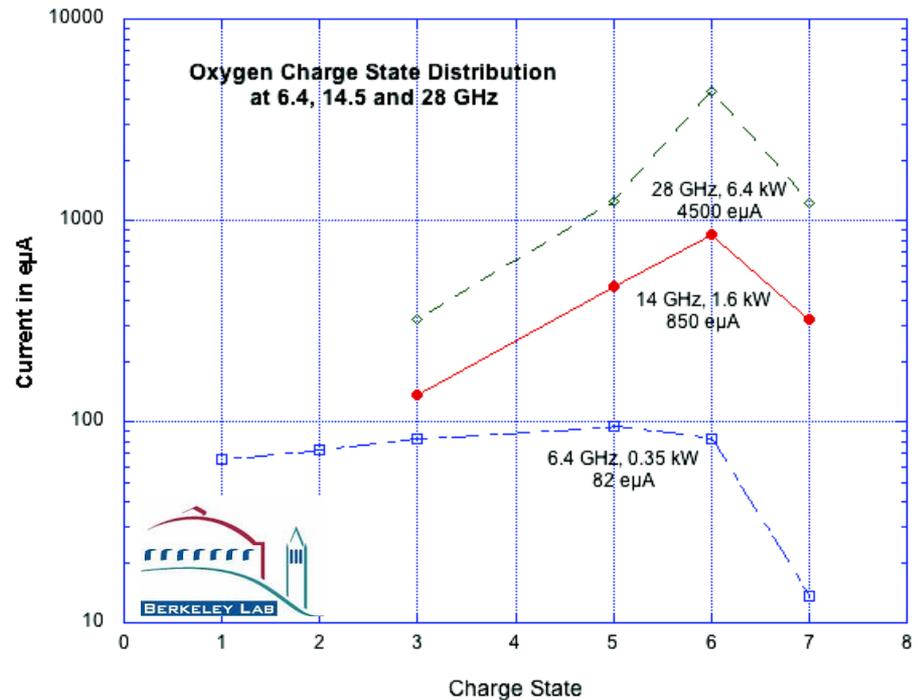
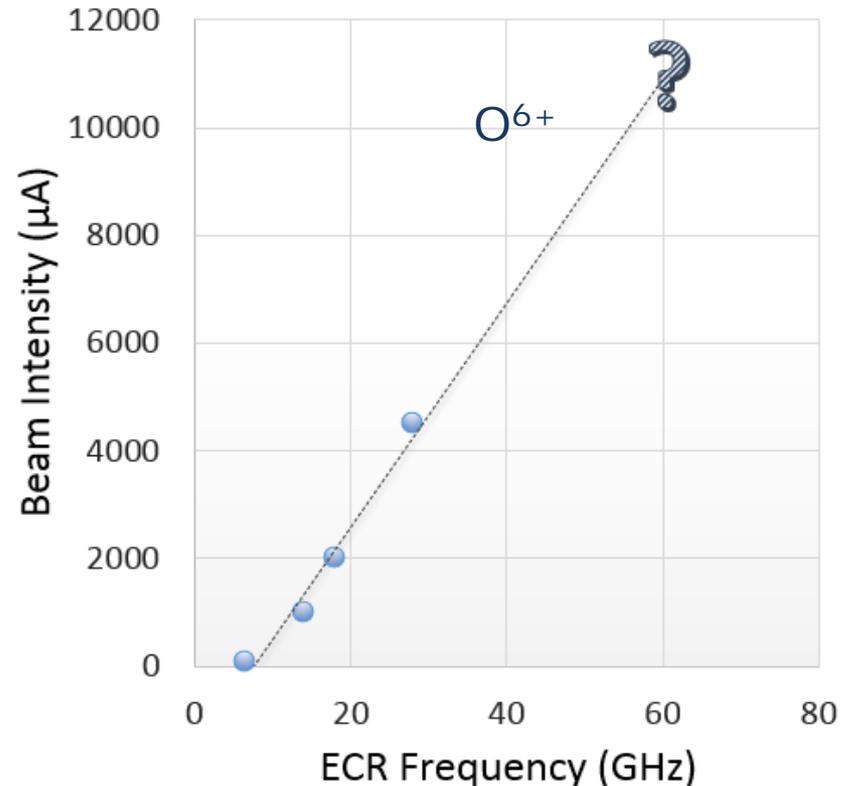


Motivations pour innover

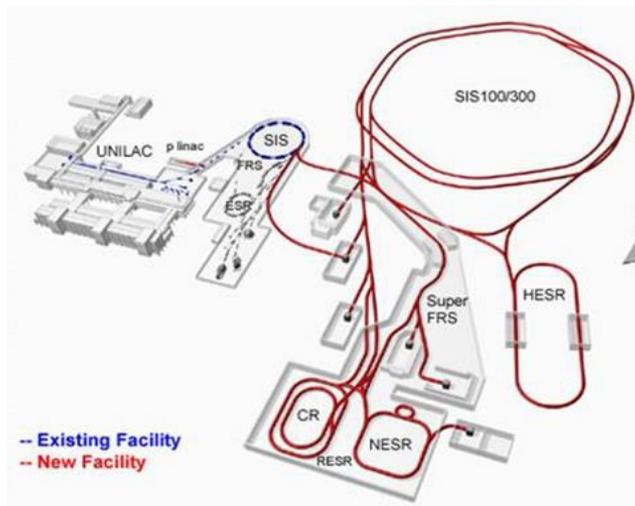
Loi d'échelle en fréquence vérifiée : $I_{ions} \sim f_{HF}^2 V$

Vers des plasmas de sources d'ions multichargés plus denses

- Plus d'intensité à plus haute fréquence : 45 GHz , 60 GHz
- Mais champs magnétiques intenses $B \sim f$: de 5 à 7 T!



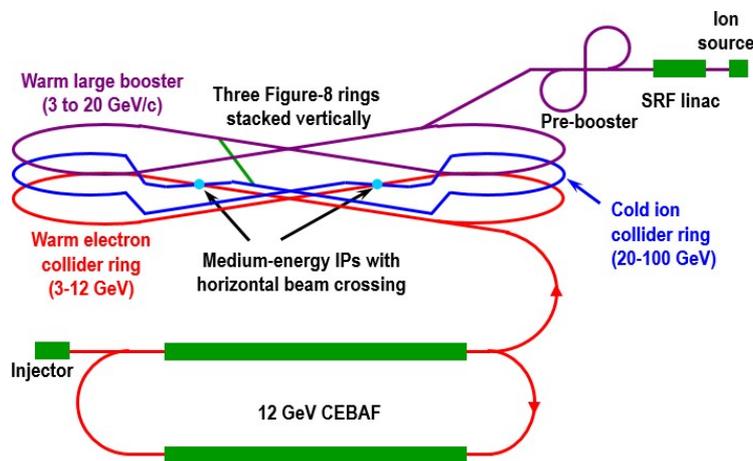
Besoins de faisceaux d'ions pulsés ultra intenses



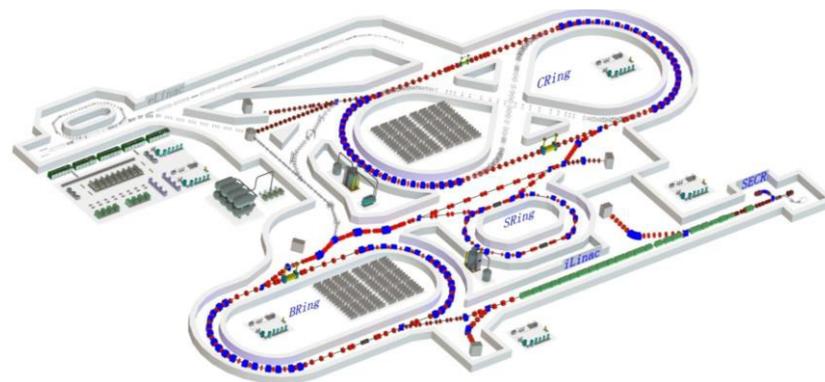
GSI FAIR U^{28+} 15emA/100 μ s



BNL RHIC Au^{32+} 2 emA/10 μ s

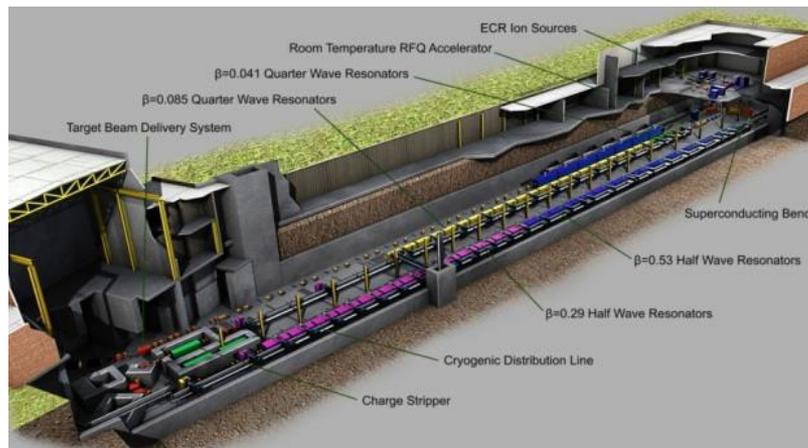


JLAB MEIC Pb^{30+} / Au^{32+} 0.5 emA/500 μ s

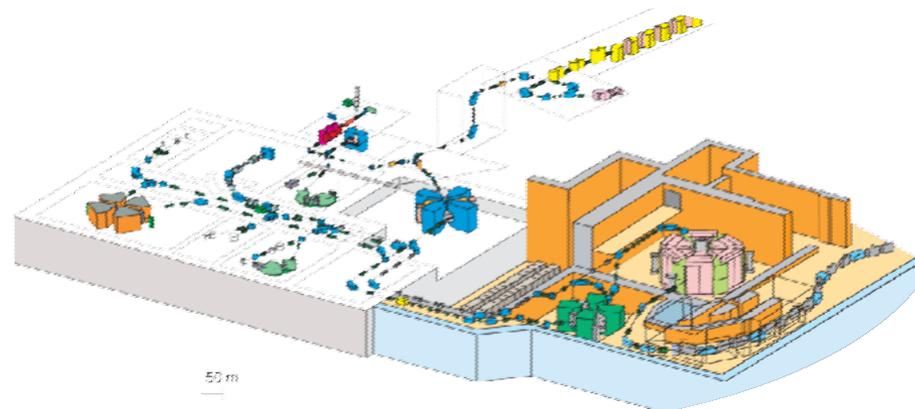


IMP HIAF U^{34+} 1.7 emA/400 μ s

Besoins de faisceaux d'ions continus intenses



MSU FRIB U³⁴⁺ 13pμA/CW



RIKEN RIBF U³⁵⁺ 525eμA/CW



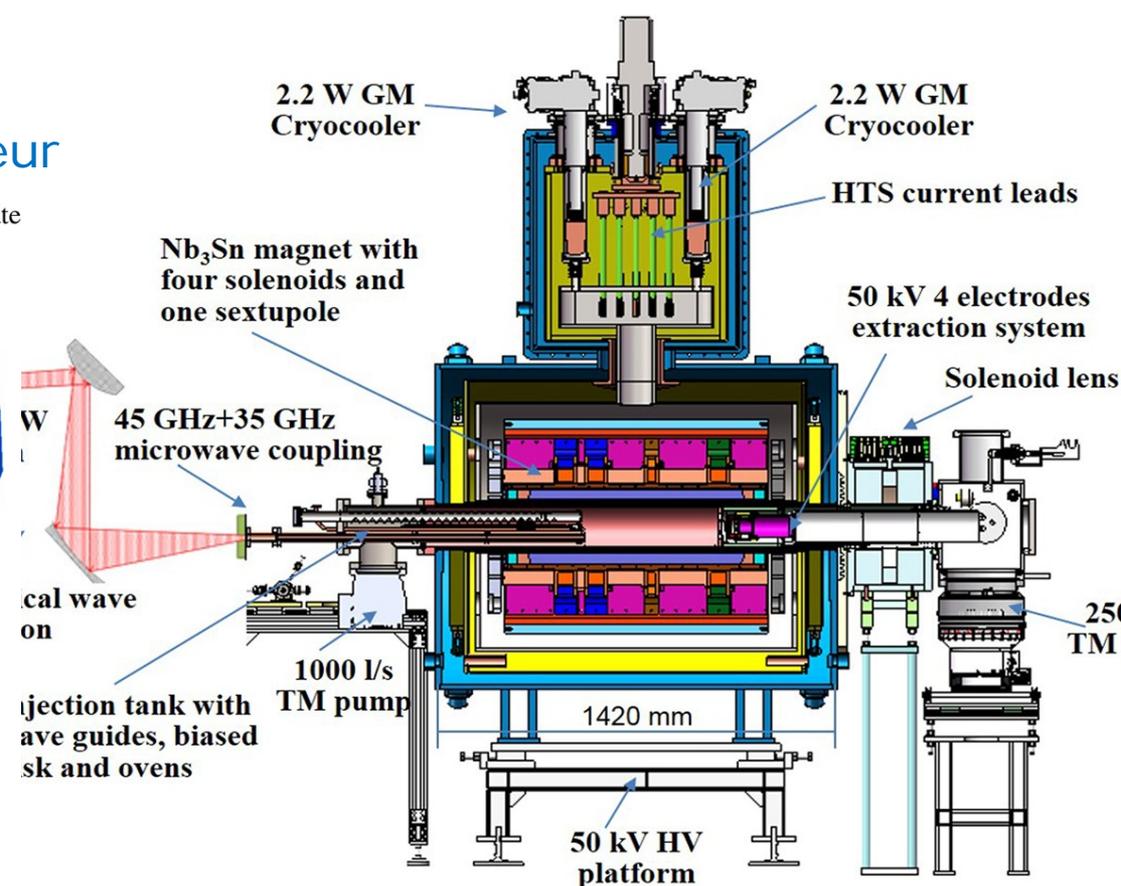
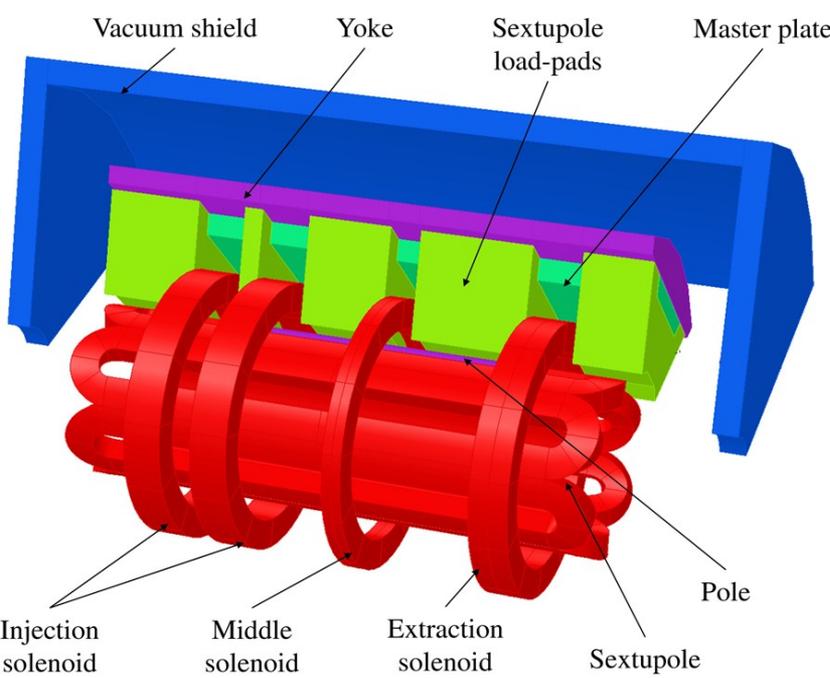
IMP HIRFL U⁴¹⁺ 100eμA/CW



SPIRAL2 Ar¹³⁺ 1eμA/CW

Rupture Technologique à Lanzhou

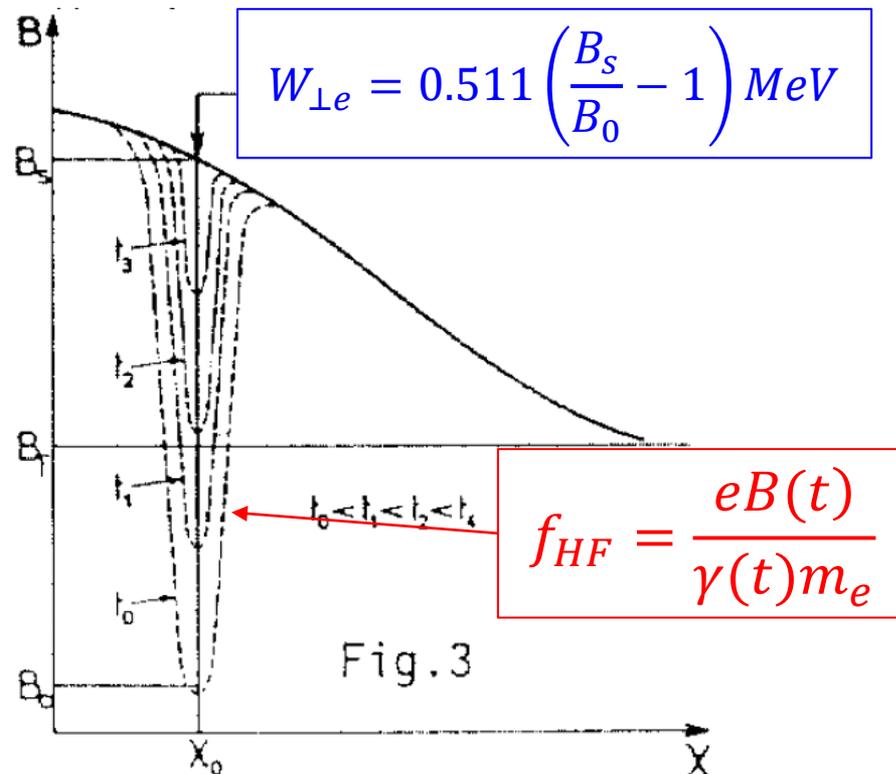
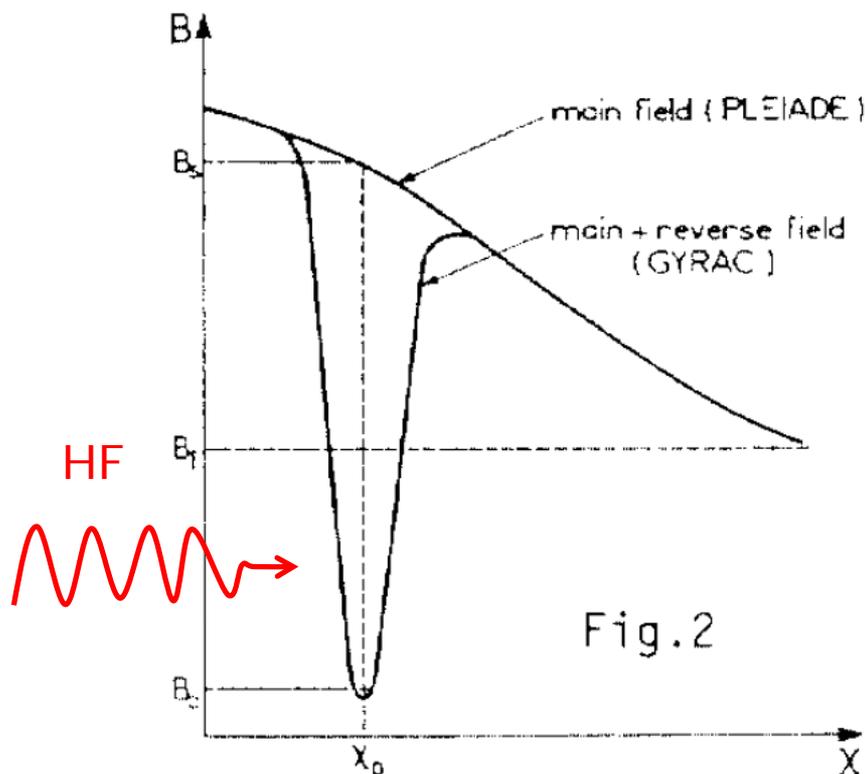
- Source RCE en cours de construction à 45 GHz
- aimant en Nb₃Sn
 - Conception aimant LBNL, CA, USA
 - peak field 11.8 T!
 - risque projet fort!
- ~5% du coût de l'accélérateur



Perspective : Electron Cyclotron Resonance Ion Plasma Accelerator



- ECRIPAC Proposé par R. Geller en 1994
- Le triple effet « kiss cool »
 - RCE : chauffage résonant des électrons
 - GIRAC : chauffage ECR relativiste avec $B(t)$
 - PLEIADE : transfert de $v_{\perp} \rightarrow v_{\parallel}$ (conservation de $\mu = W_{\perp}/B$)



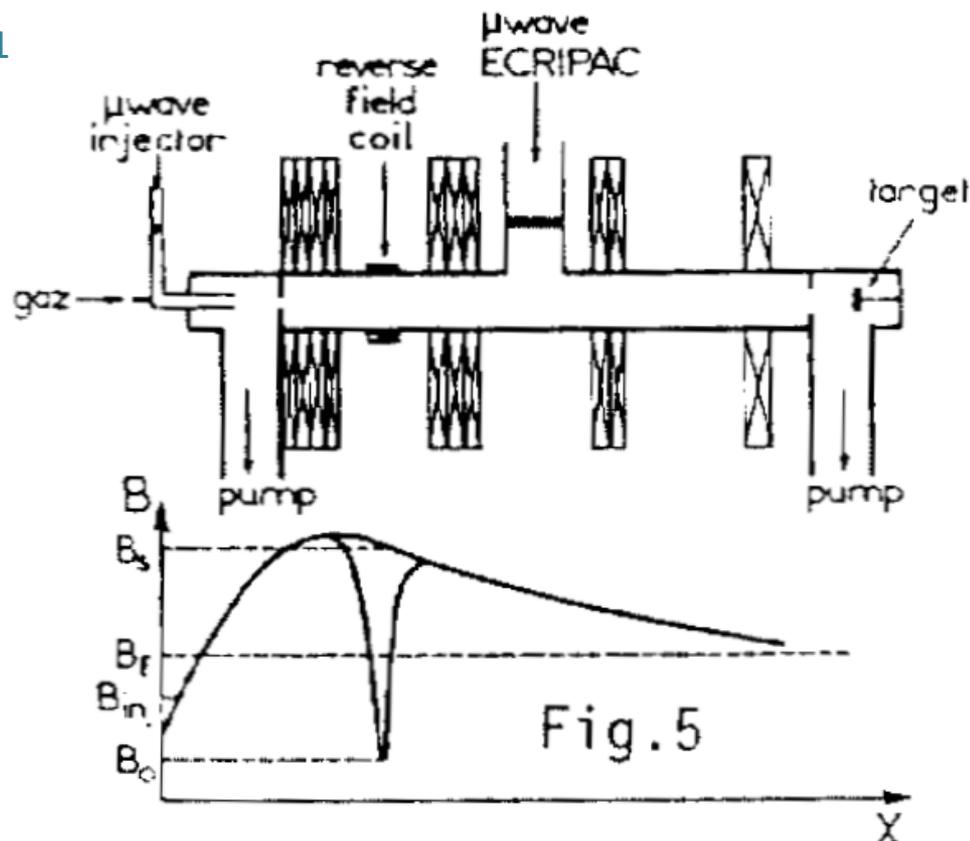
Développer un ECRIPAC

➤ Simuler une machine avec un code PIC et valider le concept

- E_i max de 25 à 470 MeV/A selon la longueur L ?
- Intensité du faisceau d'ions ?
 - 10 kW@2.45 GHz $L=5$ mètre $\Rightarrow E_i \sim 1$

➤ Fabriquer la machine !

- Applications médicales
- Applications industrielles



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

