

# SEMINAIRE A L'IRFU

## LES SOURCES D'IONS ECR SUPRACONDUCTRICES DE 3ÈME GÉNÉRATION: TECHNOLOGIE, PERFORMANCES ET APPLICATION À SPIRAL2

---

Thomas Thuillier  
LPSC  
53 rue des Martyrs  
38026 Grenoble cedex  
France  
e-mail: [thuillier@lpsc.in2p3.fr](mailto:thuillier@lpsc.in2p3.fr)



# SOMMAIRE

- **INTRODUCTION AUX SOURCES ECR**
- **TECHNOLOGIE DES SOURCES ACTUELLES**
- **PERFORMANCES**
- **LIMITATIONS**
- **UNE SOURCE D'ION SUPRACONDUCTRICE POUR SPIRAL2**

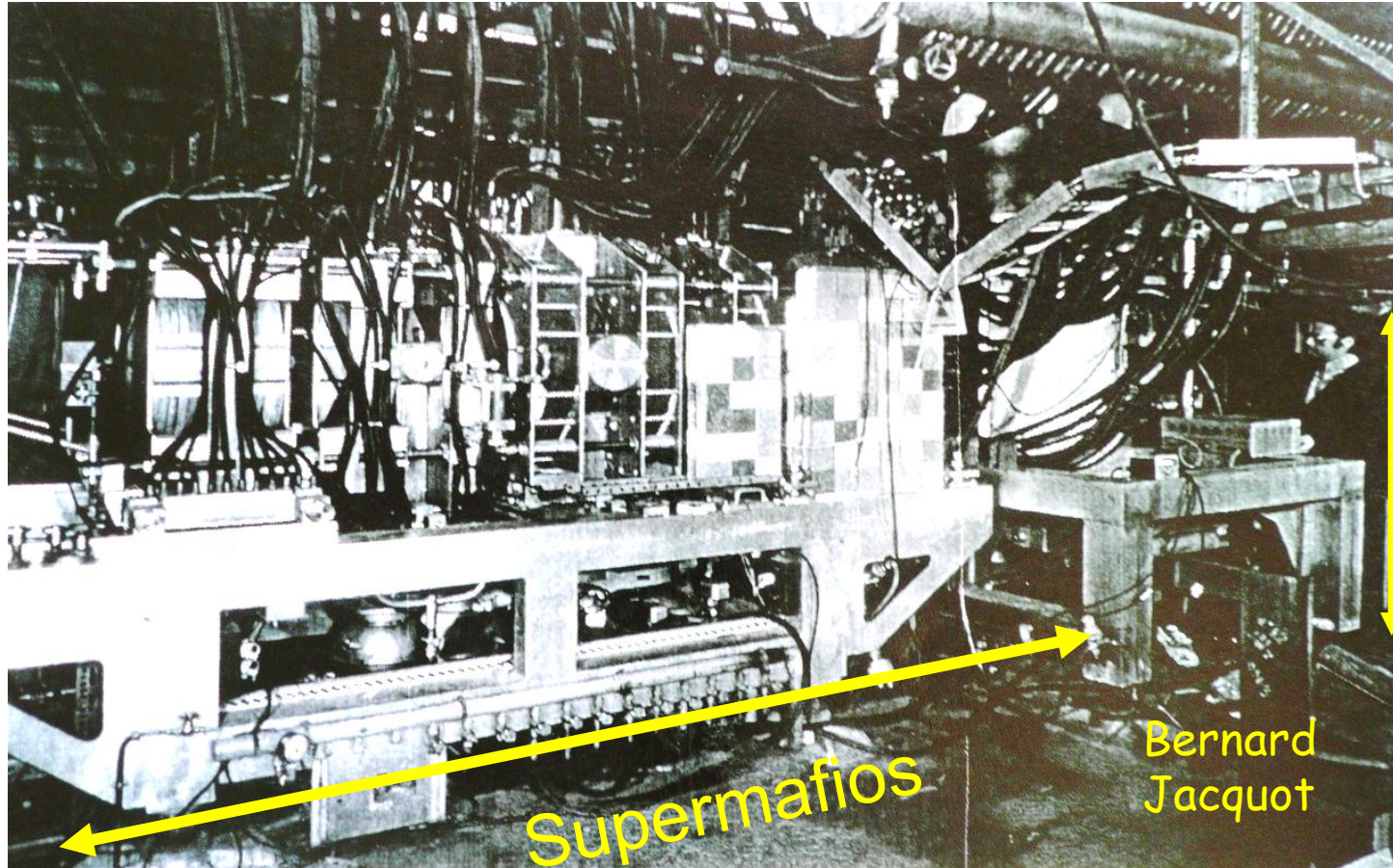
- **INTRODUCTION AUX SOURCES ECR**
- TECHNOLOGIE DES SOURCES ACTUELLES
- PERFORMANCES
- LIMITATIONS
- UNE SOURCE D'ION SUPRACONDUCTRICE POUR SPIRAL2

# La première Source d'ion ECR: SUPERMAFIOS 1975

- Inventée au CEA Grenoble par l'équipe de R. Geller



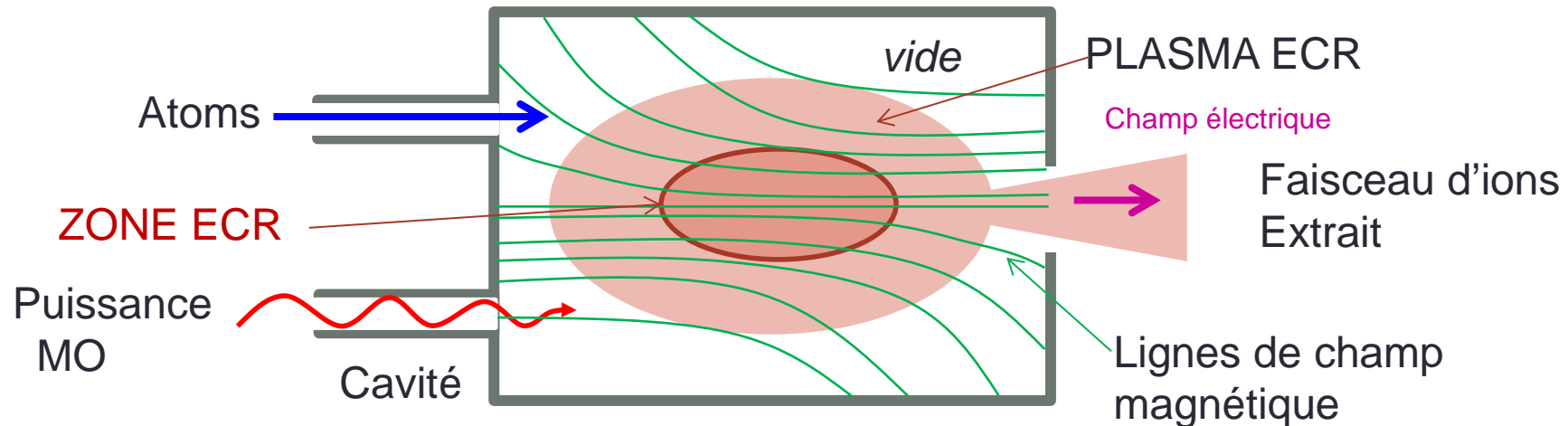
R. Geller



- une machine de fusion de 3 MW modifiée pour produire des faisceaux d'ions (CIRCE)
- La légende dit qu'à l'allumage de la machine, la moitié de la ville de Grenoble a été plongée dans le noir

# Les ingrédients d'une source d'ions multichargés

- Pour faire fonctionner une source ECR, il faut:
  - Un vide secondaire pour conserver la production d'ions multichargés
  - Une injection de micro-onde (MO) dans une cavité (multimode)
  - Une structure magnétique sophistiquée pour :
    - Transférer la puissance MO aux électrons via le mécanisme ECR
    - Confiner suffisamment longtemps les électrons (chauds) pour ioniser les atomes
    - Confiner suffisamment longtemps les ions pour les multi-ioniser
    - Générer un plasma continu et stable
  - Un système d'injection d'atomes pour maintenir la densité du plasma
  - Un **champ électrique** pour accélérer les ions hors du plasma



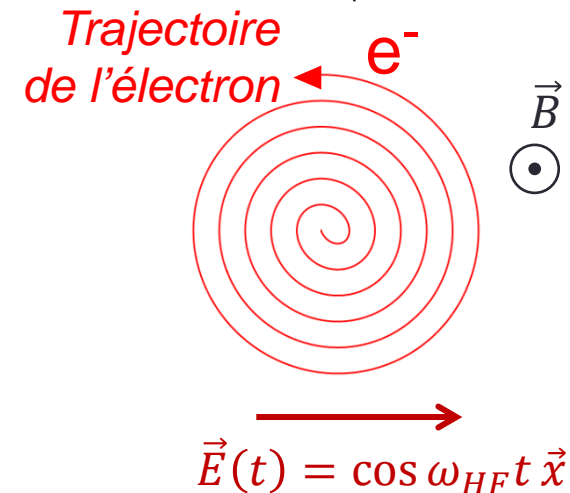
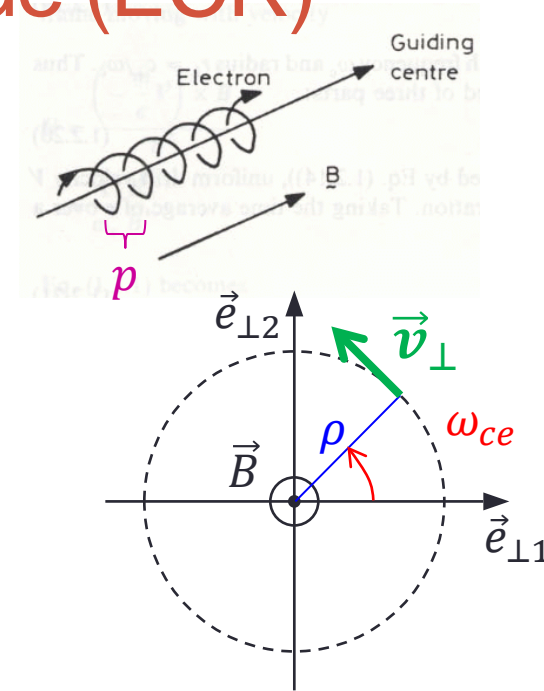
# La résonance cyclotronique électronique (ECR)

- Trajectoire d'un électron dans un champ magnétique:

- $\vec{v} = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}$  ( $\vec{v}_{\perp} \cdot \vec{B} = 0$  et  $\vec{v}_{\parallel} \parallel \vec{B}$ )
- La trajectoire est une hélice avec:
  - une vitesse de rotation  $\omega_{ce} = \frac{qB}{m}$   
( $\omega_{ce}$  fréquence cyclotronique électronique)
  - un rayon  $\rho = \frac{v_{\perp}}{\omega}$
  - un pas  $p = \frac{2\pi v_{\parallel}}{\omega}$

- Résonance ECR

- Application d'un champ électrique  $\vec{E}(t)$  de fréquence  $\omega_{HF} = \omega_{ce}$
- Accélération résonante de l'électron
  - Augmentation linéaire de  $v_{\perp}(t)$ , donc de  $\rho(t)$
  - Constance de  $v_{\parallel}$

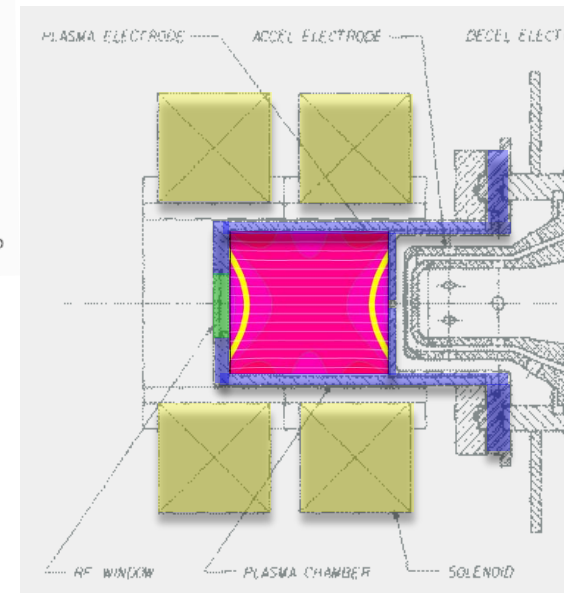
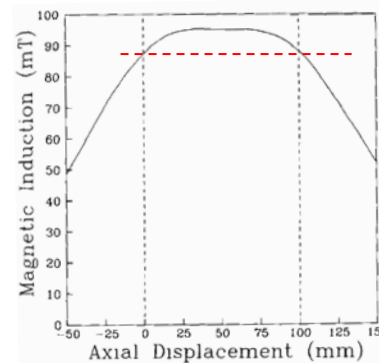
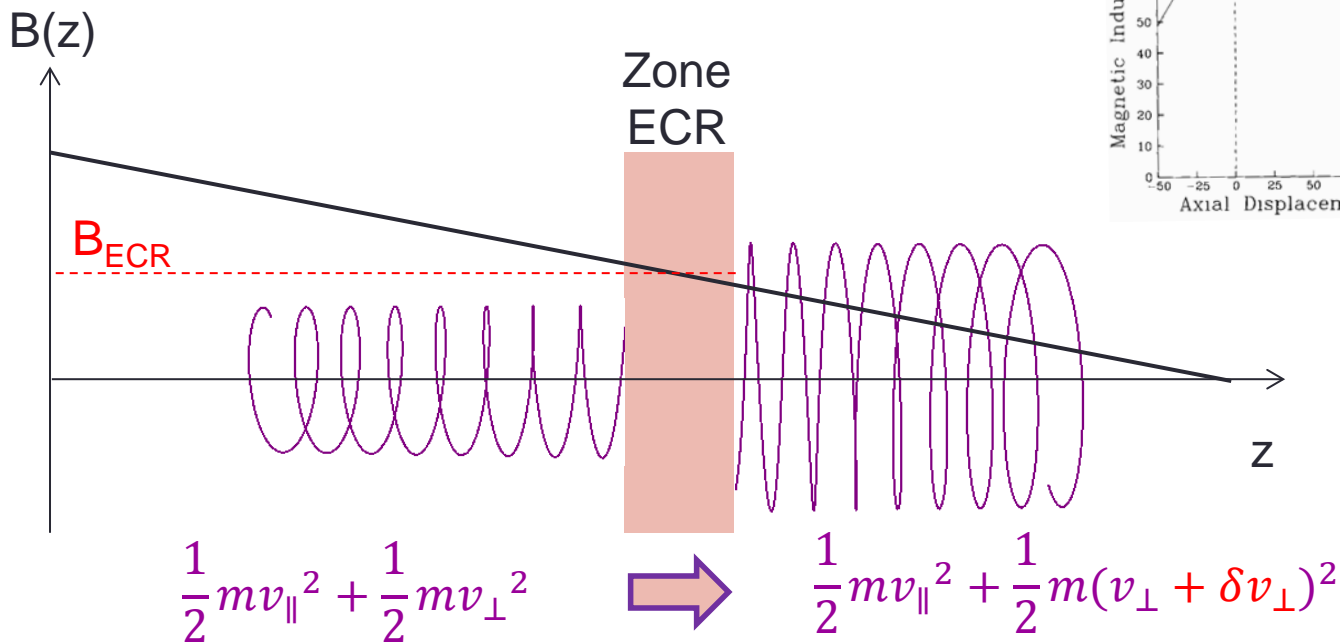


# Chauffage ECR dans un gradient magnétique

- La zone ECR est réduite à une surface où  $B$  est tel que:

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

- L'électron gagne 1-20 eV quand il passe dans la zone de résonance
  - $v_{\parallel}$  est inchangé,  $v_{\perp}$  augmente



Exemple: source Taylor pour faire des ions 1+

# Chauffage des électrons par effet miroir magnétique

- Une particule chargée peut être réfléchi lorsque l'intensité du champ magnétique augmente

- $T_{cin} = \frac{1}{2}mv_{\parallel}^2 + \frac{1}{2}mv_{\perp}^2 = const$
- $\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} \sim const$
- $T_{cin}(z) = \frac{1}{2}mv_{\parallel}^2(z) + \mu B(z) = const$
- $v_{\parallel} \rightarrow 0$  si  $B(z) = \frac{T_{kin}}{\mu} \Rightarrow$  La particule est réfléchi

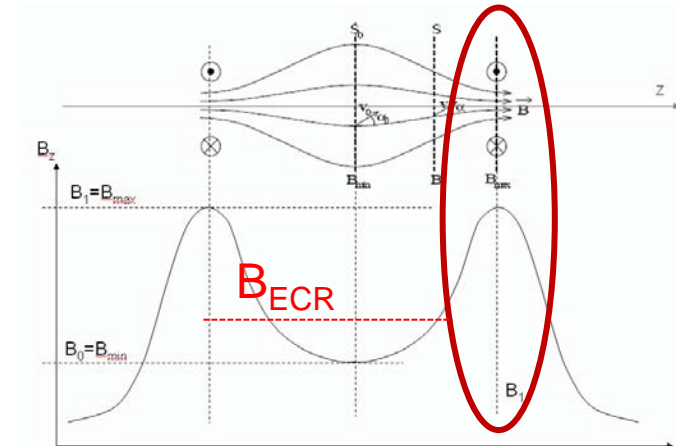
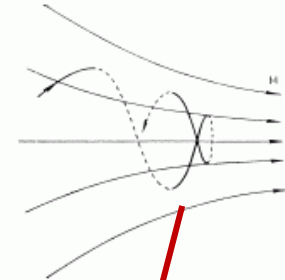
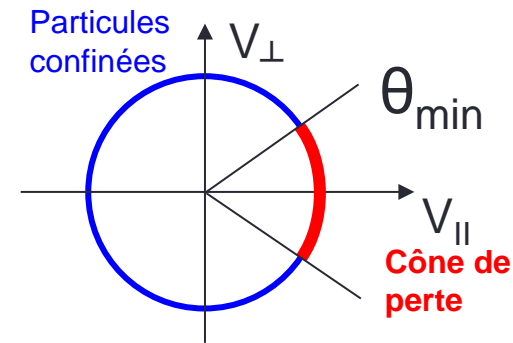
- Si une surface ECR est présente dans le miroir magnétique, les électrons vont passer de nombreuses fois à travers la surface ECR

- Chauffage des électrons  $\rightarrow$  keV
- Possibilité de **multi-ioniser** les atomes

- Cône de perte magnétique

- Le confinement n'est pas parfait  
 $\Rightarrow$  Les particules avec  $\theta < \theta_{min}$  sortent du piège
- Le cône de perte permet d'extraire le faisceau

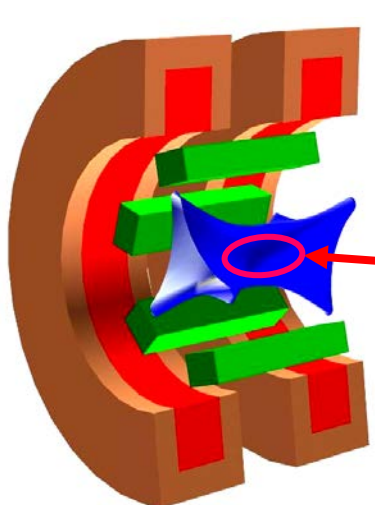
Vent solaire  
réfléchi par la  
magnétosphère



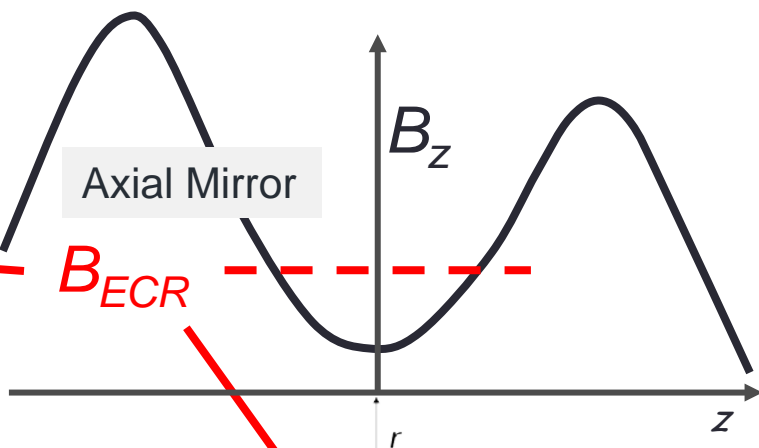


# Confinement magnétique d'une source ECR

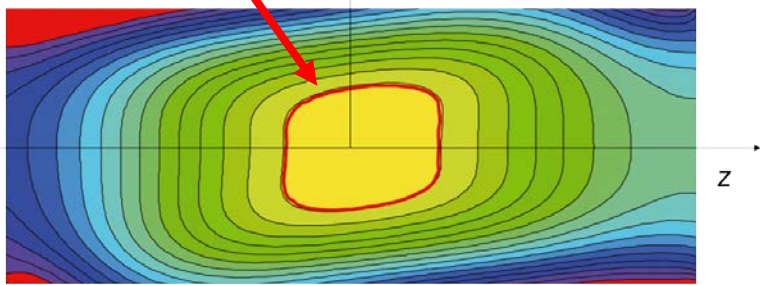
- Le champ magnétique est la superposition d'un miroir magnétique axial et d'un champ radial multipolaire
  - La surface ECR ( $|B|=B_{ECR}$ ) est fermée



Source LBNL

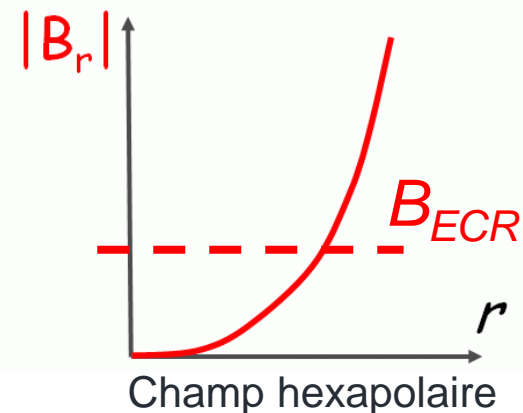


$B_{ECR}$

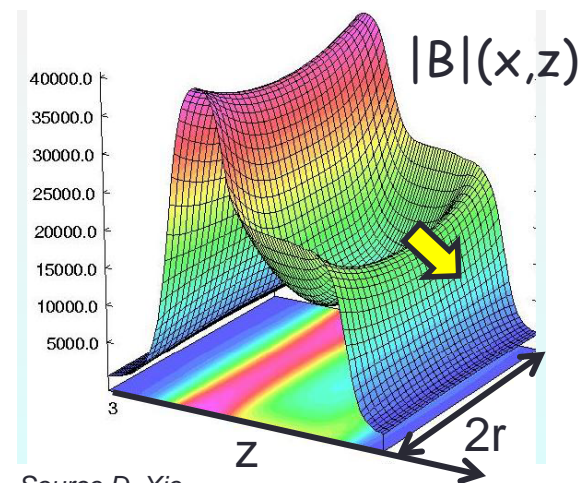


lignes Iso-B

Source RIKEN, Nakagawa



Champ hexapolaire



Source D. Xie

$$\omega = \omega_{ce} = \frac{qB_{ECR}}{m}$$

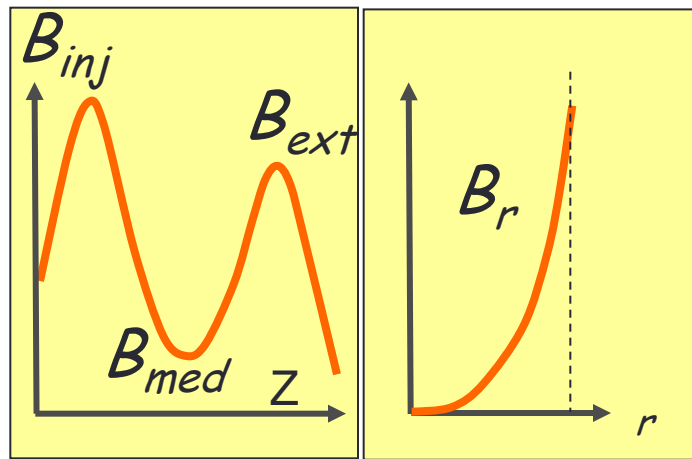
# Les lois d'échelle ECR (R. Geller, 1987)

- Plus on augmente la fréquence, plus le courant d'ions extrait augmente
- Densité plasma  $n \sim f_{ECR}^2$
- Courant d'ions  $I \sim n \sim f_{ECR}^2$
- Mais le champ magnétique ECR augmente ( $B_{ECR} = \frac{f_{ECR} [GHz]}{28} \text{ Tesla}$ )
- Mais l'émittance croît avec B

$f_{ECR}$ [GHz]	$\lambda_{ECR}$ [cm]	$n_e$ [cm <sup>-3</sup> ]	$\Lambda_{0 \rightarrow 1+}$ [cm]	$\tau_{0 \rightarrow 1+}$ [μs]	$B_{ECR}$ [T]
2.45	~12	$7.4 \times 10^{10}$	~7	~10	~0.09
14	~2	$2.5 \times 10^{12}$	0.2	3	0.5
28	~1	~ $10^{13}$	0.05	0.7	1
60	~0.5	$4.4 \times 10^{13}$	0.01	0.17	2

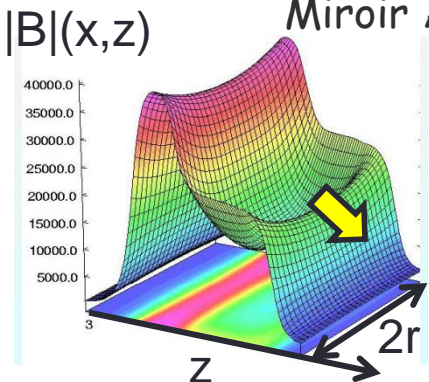
# Le modèle standard ECR

- La production d'ions multichargés est expérimentalement optimale pour un confinement magnétique particulier
- On peut définir le confinement optimal en fonction de la fréquence ECR



$$B_{ECR} = \frac{f_{ECR} [GHz]}{28} \text{ Tesla}$$

$f_{ECR} [GHz]$	14	18	28	56
$B_{ECR} [T]$	0.5	0.64	1	2
$B_{rad} \sim 2 \times B_{ECR}$	1	1.28	2	4
$B_{inj} \sim 3-4 \times B_{ECR}$	2	2.2	3.5	7
$B_{med} \sim 0.5-0.8 \times B_{ECR}$	0.25	0.50	0.5	1
$B_{ext} \leq B_{rad}$	1	1.2	2	4

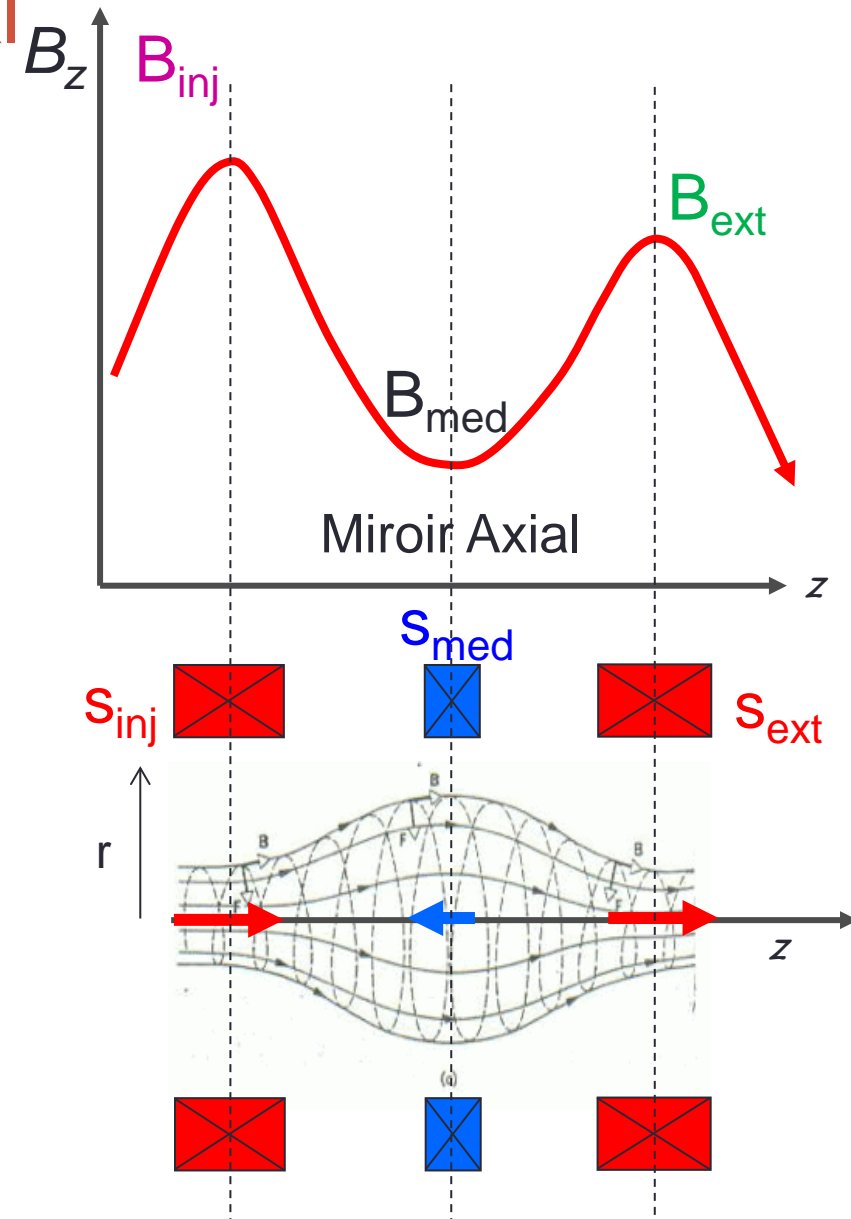


Source D. Xie

- INTRODUCTION AUX SOURCES ECR
- **TECHNOLOGIE DES SOURCES ACTUELLES**
- PERFORMANCES
- LIMITATIONS
- UNE SOURCE D'ION SUPRACONDUCTRICE POUR SPIRAL2

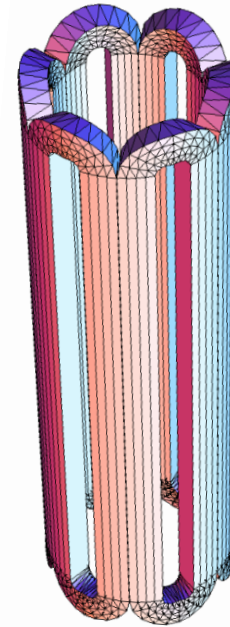
# Confinement Magnétique Axial

- Composé de 2 ou 3 solénoïdes
  - Bobines chaudes et fer
  - Ou supraconducteurs
- Dans le cas de 3 solénoïdes, l'intensité dans la bobine médiane est opposée pour réduire  $B_{med}$
- Habituellement  $B_{inj}$ ,  $B_{ext}$  représentent respectivement le champ magnétique à l'injection (HF, atoms...) et l'extraction (de faisceau)
- $B_{ext} < B_{inj}$  et  $B_{rad}$  pour favoriser l'extraction des ions du bon côté

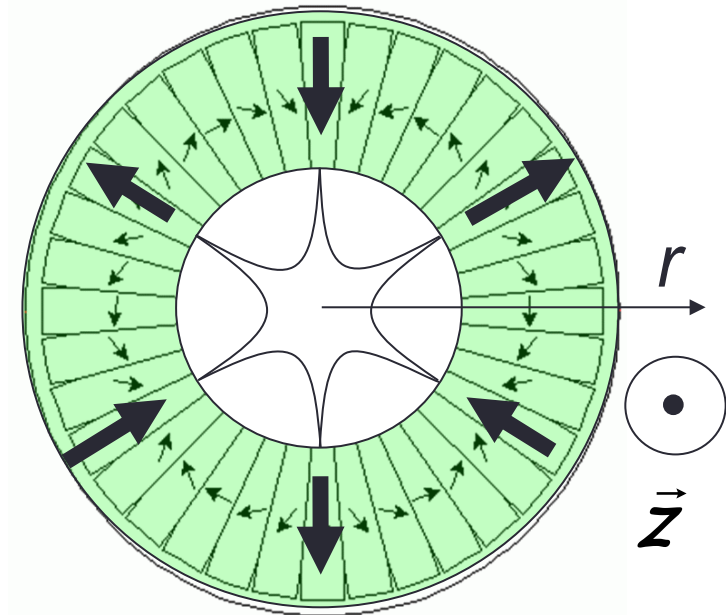
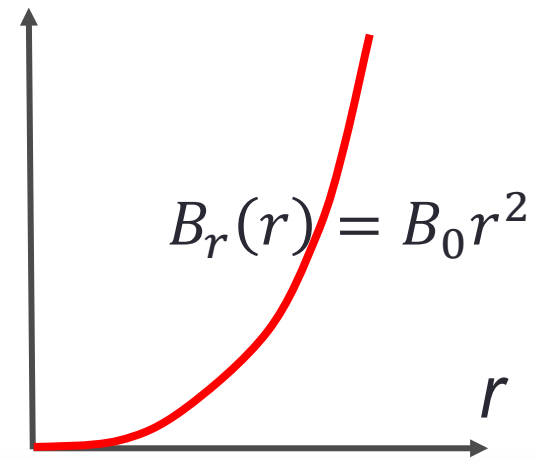


# Confinement Magnétique Radial $|B_r|$

- Le confinement radial est habituellement assuré par un hexapole
- Soit composé d'aimants permanents
  - $B_r \leq 1.6 \text{ T}$  , éventuellement  $\sim 2\text{T}$  avec qq astuces
  - Avantage : économique
  - Inconvénient: fixe
- Soit avec des bobines supraconductrices
  - $B_r > 1.6 \text{ T} - 2 \text{ T}$
  - Avantage: réglage en ligne pour optimiser la production d'ions.
  - Inconvénient: cher, construction compliquée et risquée



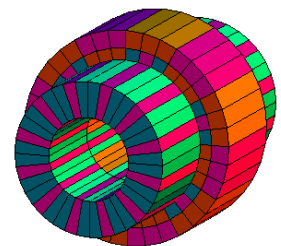
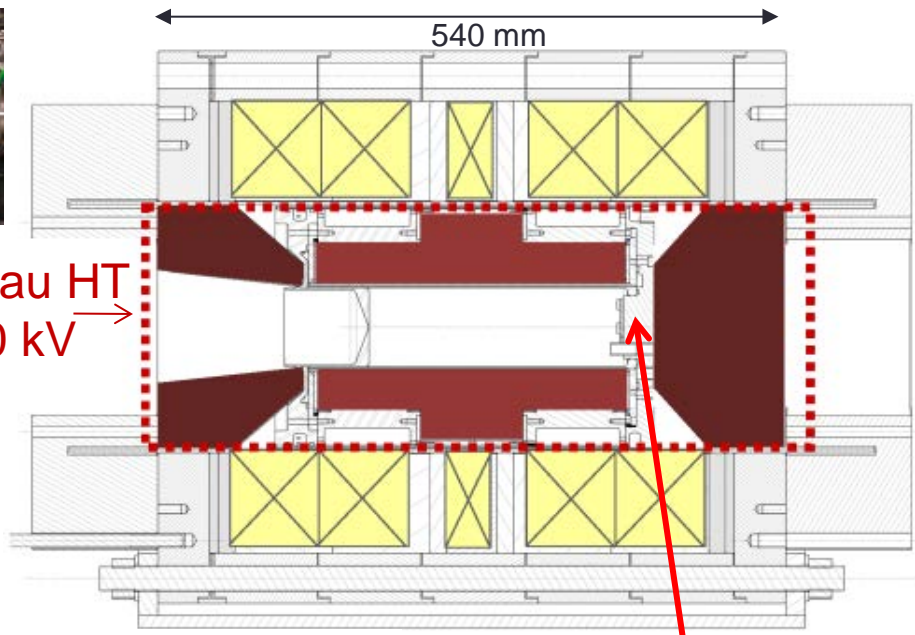
Superconducting hexapolar coil



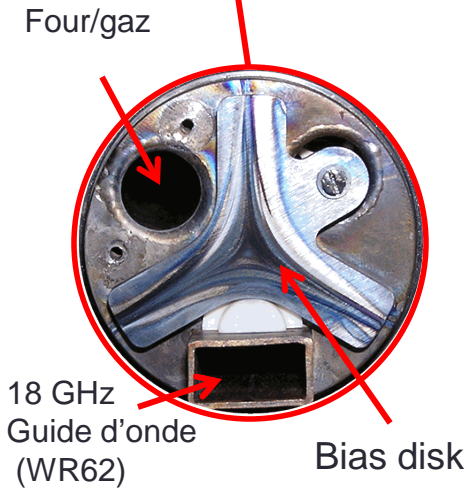
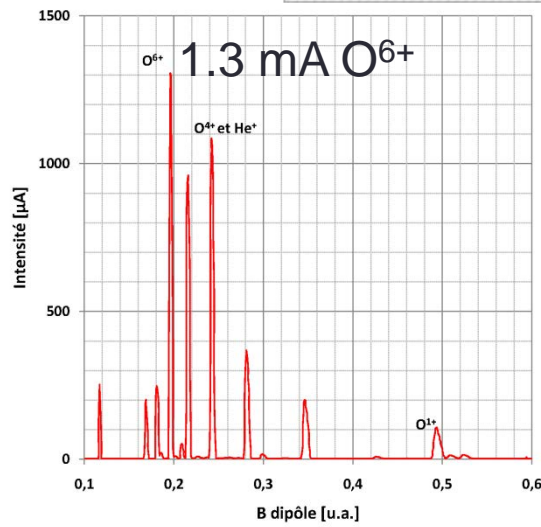
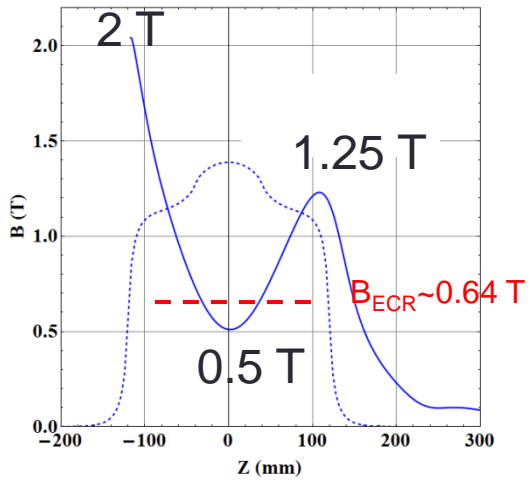
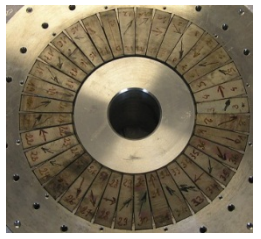
Hexapole de HallBach  
36 aimants permanents

# Exemple de la source chaude PHOENIX V2, LPSC/SPIRAL2 (2004)

- $f=18$  GHz-2 kW ( $B_{ECR}=0.64$  T)
- 3 solénoïdes
- Hexapole: 1.35 T FeNdB, 2 couches
- Miroir: 2-0.5-1.25 T
- Volume chambre plasma~ **0.6 litre**
- Faisceau typique 1.3 mA  $O^{6+}$  ; 20  $\mu A$   $Ni^{19+}$

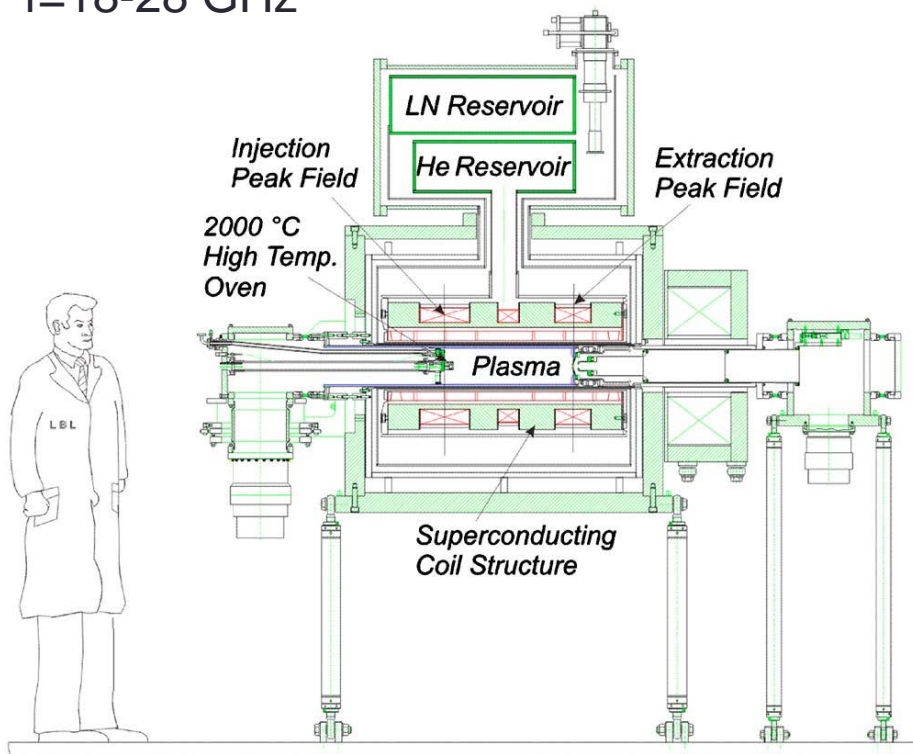


hexapole optimisé



# Exemple de la source VENUS (LBNL)

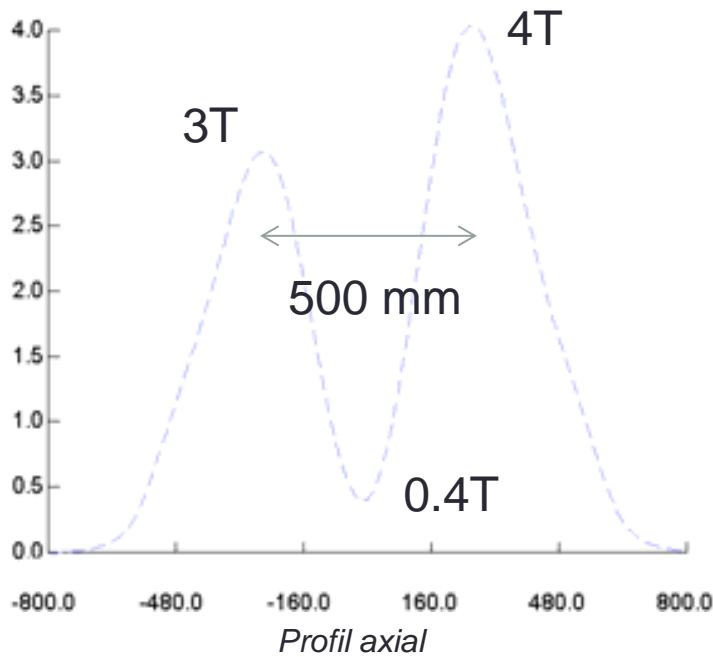
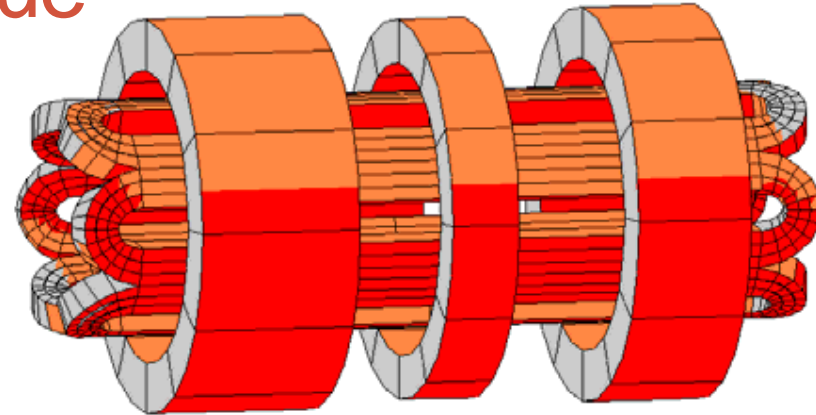
- Démarrage projet 1998
- 1<sup>er</sup> plasma 2002
- Chambre plasma de **9 litre**
- $f=18-28$  GHz





# VENUS: Conception Magnétique

- TOSCA Opera 3D
- Hexapole de 820 à l'intérieur des solénoïdes
- Forces magnétiques importantes entre l'hexapole et les solénoïdes=> conception mécanique délicate
- Diamètre chaud libre Ø160mm

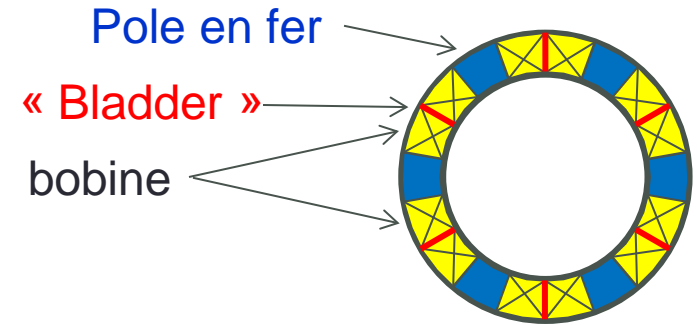


Coil parameters	Injection	Extraction	Middle	Sextupole
axial position of center (cm)	+25	-25	0	+1.5
ID (cm)	34.00	34.00	34.00	20.00
OD (cm)	45.82	45.82	44.13	27.20
Depth (cm)	5.91	5.91	5.06	3.60
Width (cm)	19.44	13.60	8.00	
Turns/layer	112	80	46	
Number layers	56	56	48	
Turns/coil	6272	4480	2208	637
Design current (A)	227	224	-243	385
Bmax(T) at coil	<b>6.22</b>	<b>5.43</b>	<b>4.22</b>	<b>7.30</b>
Bmax(T) in the plasma chamber	4	3		2.2(Ø=14)

# VENUS: Hexapole & montage

- Bobines type Cos 3θ
- Noyau en fer au centre pour augmenter le champ magnétique
- Bobines entourées de cylindres structurants et de brides aux extrémités
- 6 « expandable bladders » ajoutées entre les aimants
- 2 autres « bladders » placés contre les têtes de bobine
- Dilatation des « bladders » par injection de métal liquéfié pressurisé (Incalloy) qui produit une compression radiale, azimutale et axiale uniforme, une fois que le métal est solidifié et refroidi

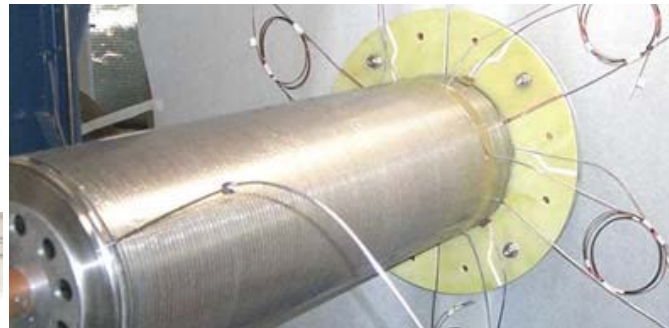
NbTi wire properties	Sextupole
wire size insulated (mm <sup>2</sup> )	1.90 x 1.00
Cu/SC ratio	3.00



Vue en coupe de l'Hexapole



1 pôle de l'Hexapole

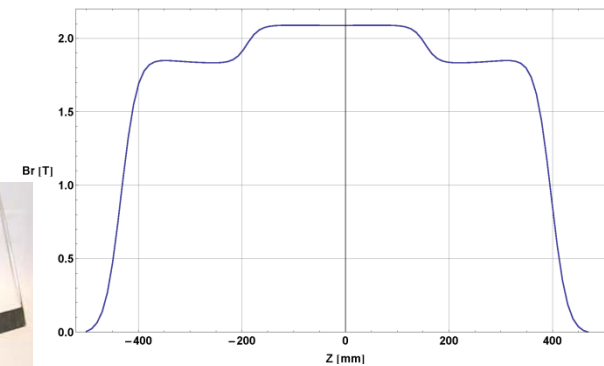


Ensemble de l'hexapole avant installation du cylindre de support extérieur et dilatation des "bladders"



Hexapole bladder

2.2 T at Ø=14 cm



Profil magnétique radial le long de l'axe de la source à R=7 cm

# VENUS: solénoïdes et montage

- Les 3 solénoïdes sont bobinés sur un unique cylindre en Alu
- Le diamètre intérieur du cylindre de support est ajusté au diamètre extérieur du support de l'hexapole pour assurer une compression supplémentaire à froid

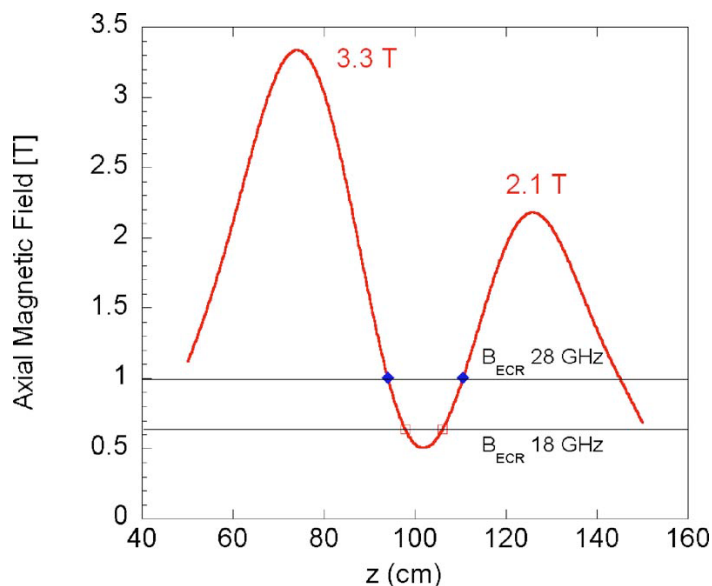
NbTi wire properties	Solenoids
wire size insulated (mm <sup>2</sup> )	1.65 x 0.96
Cu/SC ratio	4.00



Solenoid coil winding at Wang NMR



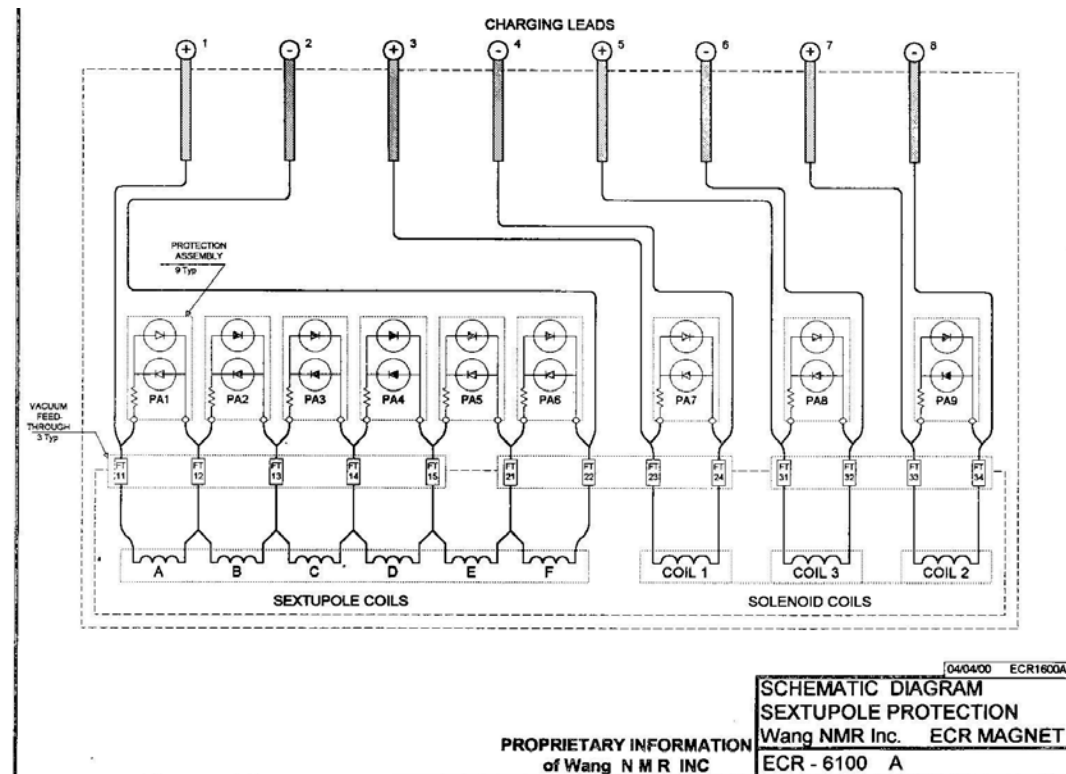
Insertion of the sextupole assembly into the bore of the solenoid bobbin



Typical axial magnetic field profile along the source axis

# VENUS: protection contre les quenches

- Chaque bobine est connectée en parallèle à des diodes tête-bêches en série avec une résistance pour limiter la tension pendant un quench. L'ensemble est placé dans l'He liquide
- L'élévation de température globale pendant un quench est  $\sim 150\text{K}$



# VENUS: Training quenches

- L'Hexapole **dépasse de 20%** la conception prévue
- Les aimants ont atteint le niveau de conception après 13 quenches

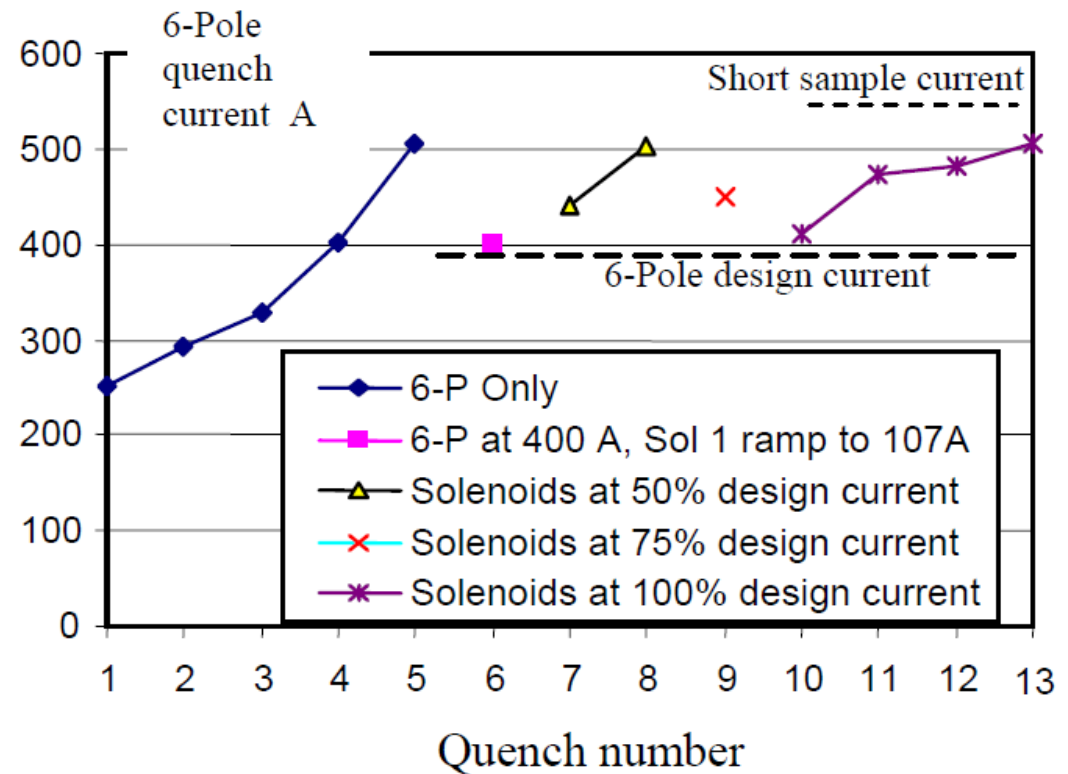
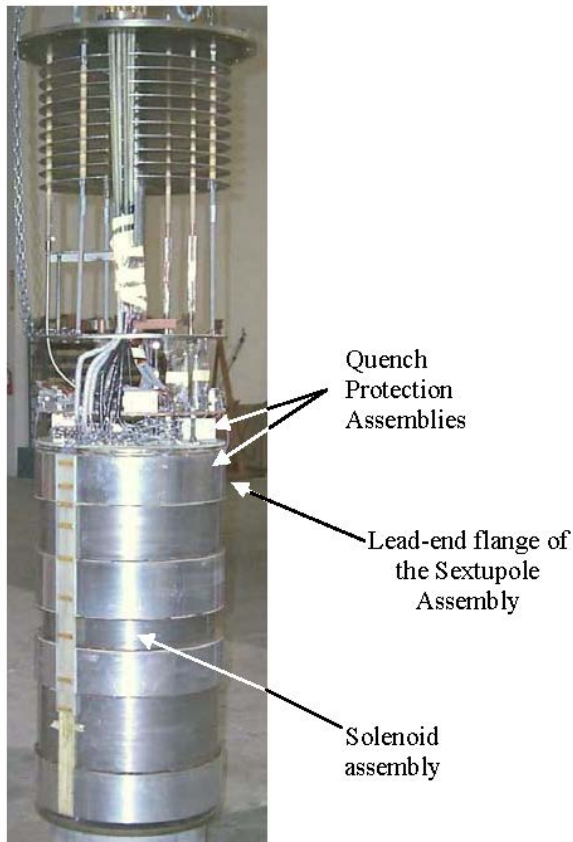


Fig. 10 Quench current of the sextupole v.s. quench number

# VENUS: cryostat et masse froide d'origine

## Upper Cryostat (Service Tower)



77K LN used to thermalize current From the 8 leads (70 W)

He cycled by condensing vapors back to the LHe tank

50 K shield provided by the 1st stage of the cryocoolers

## Lower Cryostat

Power Feed through (1 out of 8)

LN Reservoir (70 K)

LHe (upper cryostat) Reservoir (4.2 K)

Vacuum Feed throughs

Warm Bore Plasma Chamber

Iron Yoke

Cryocooler Flange (2)

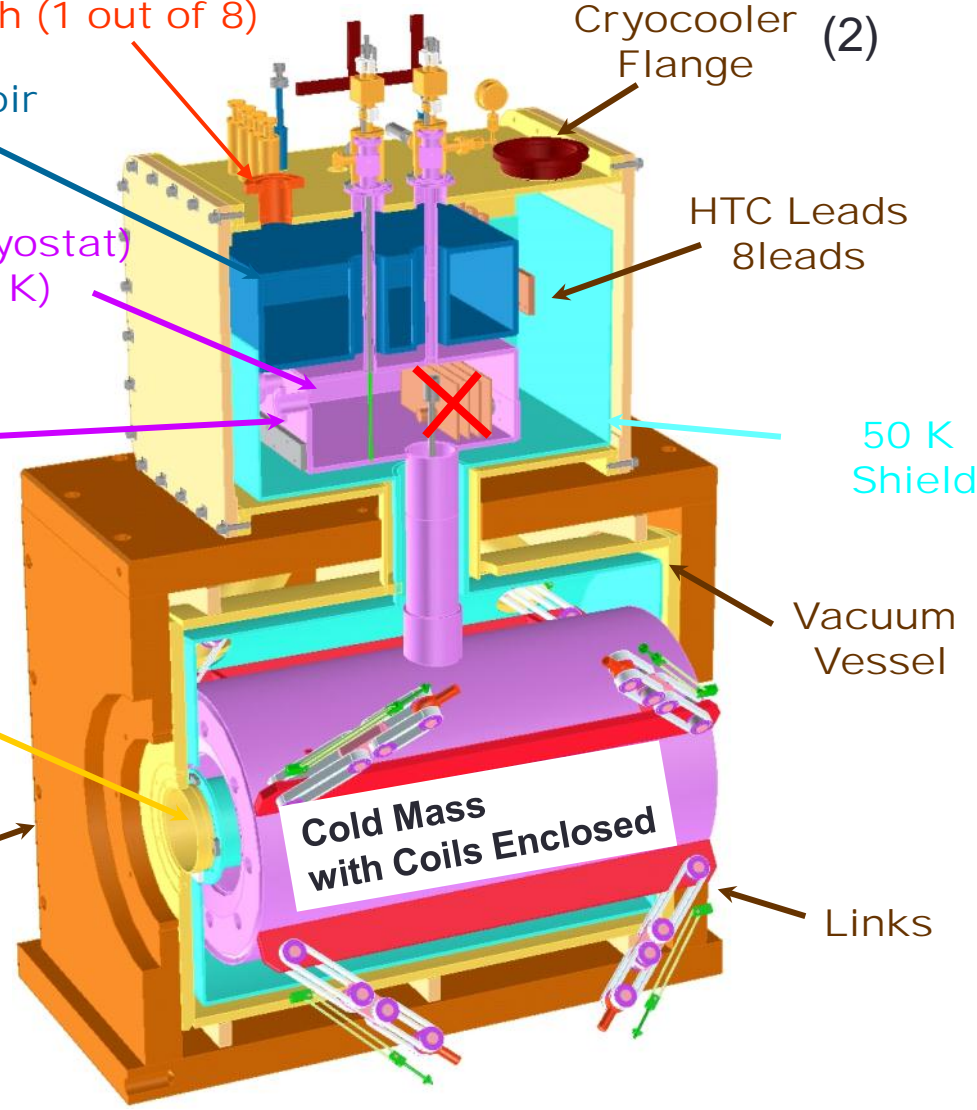
HTC Leads 8leads

50 K Shield

Vacuum Vessel

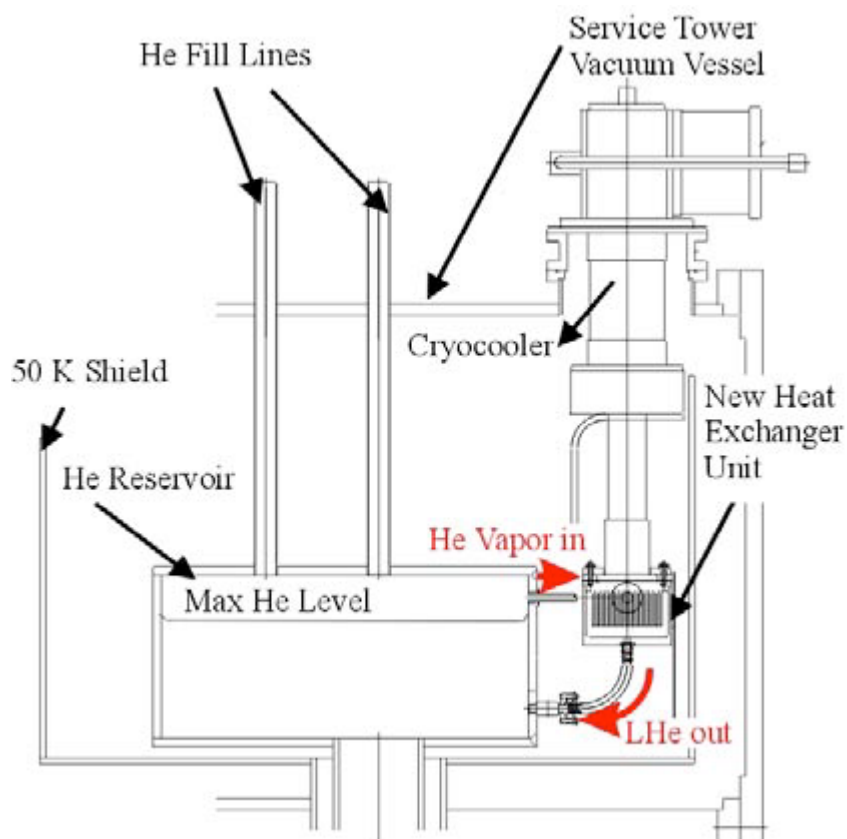
Cold Mass with Coils Enclosed

Links

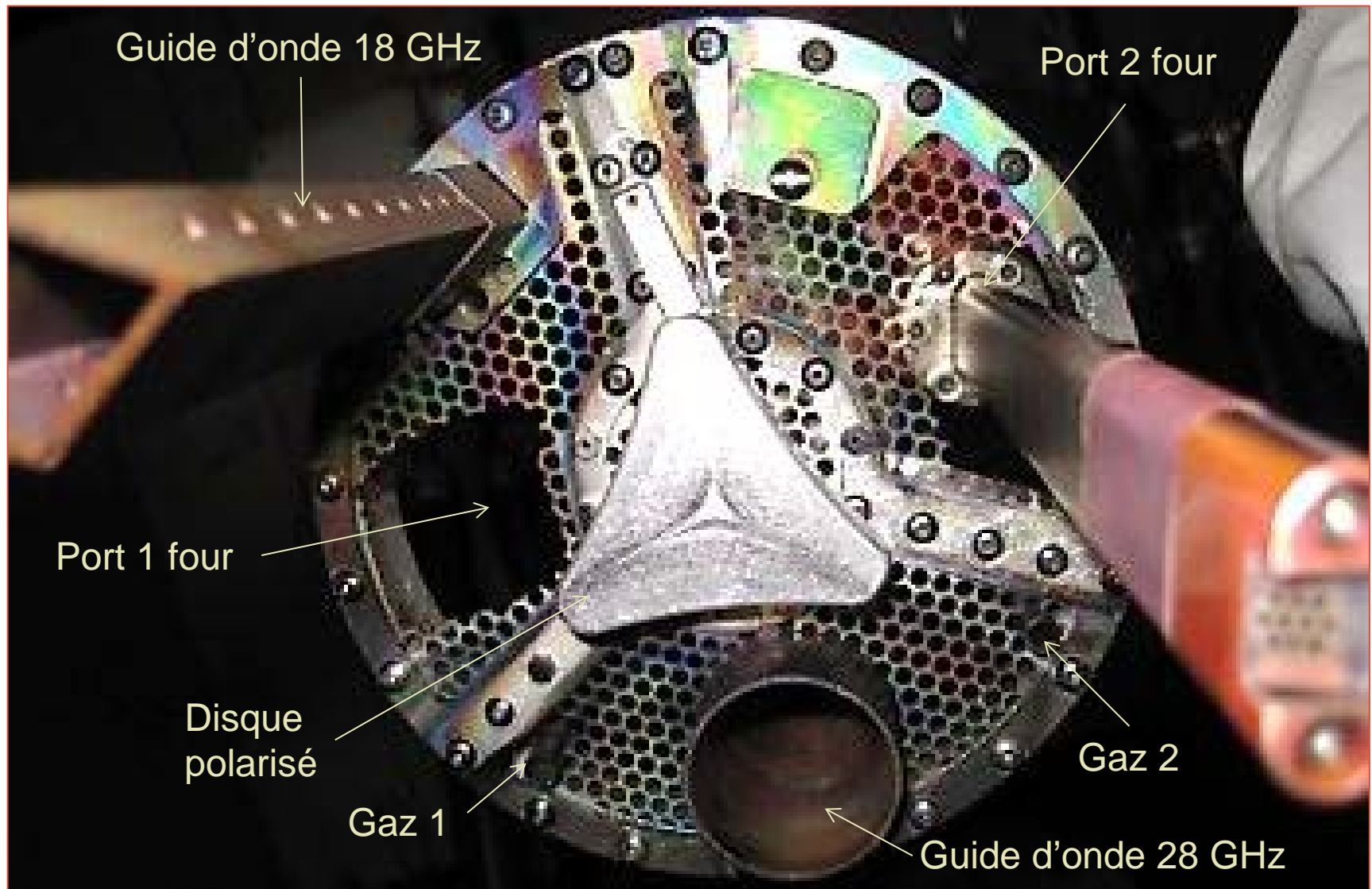


# Refroidissement de l'Hélium dans le cryostat

- Le refroidissement de l'Hélium est réalisé par un condenseur collé sur la tête froide de chaque cryocooler



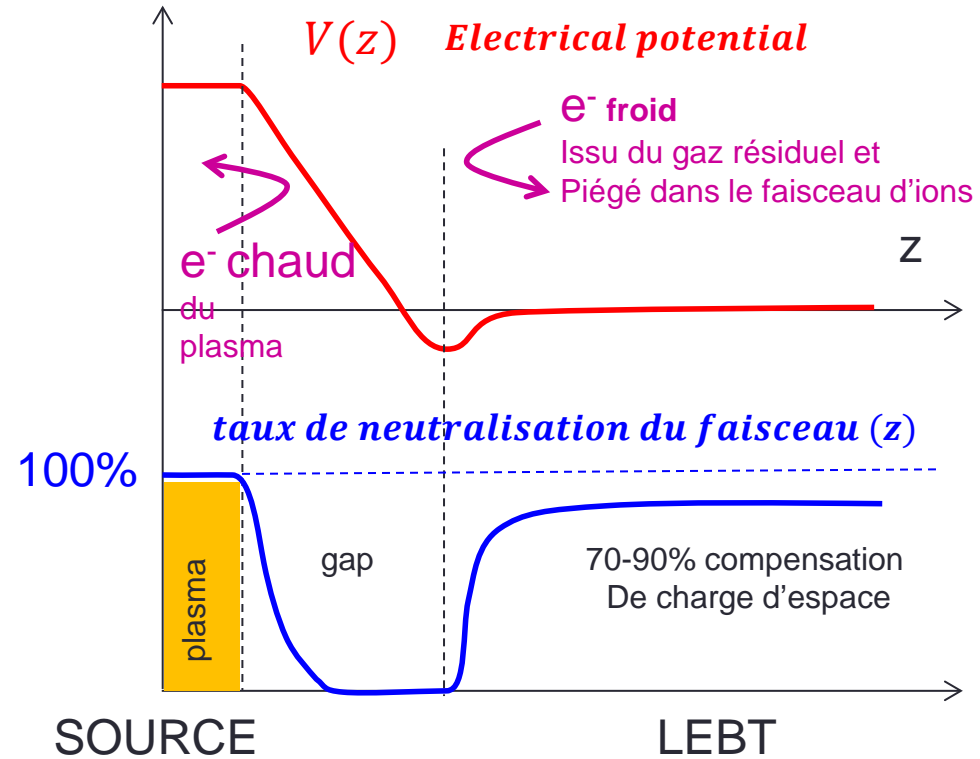
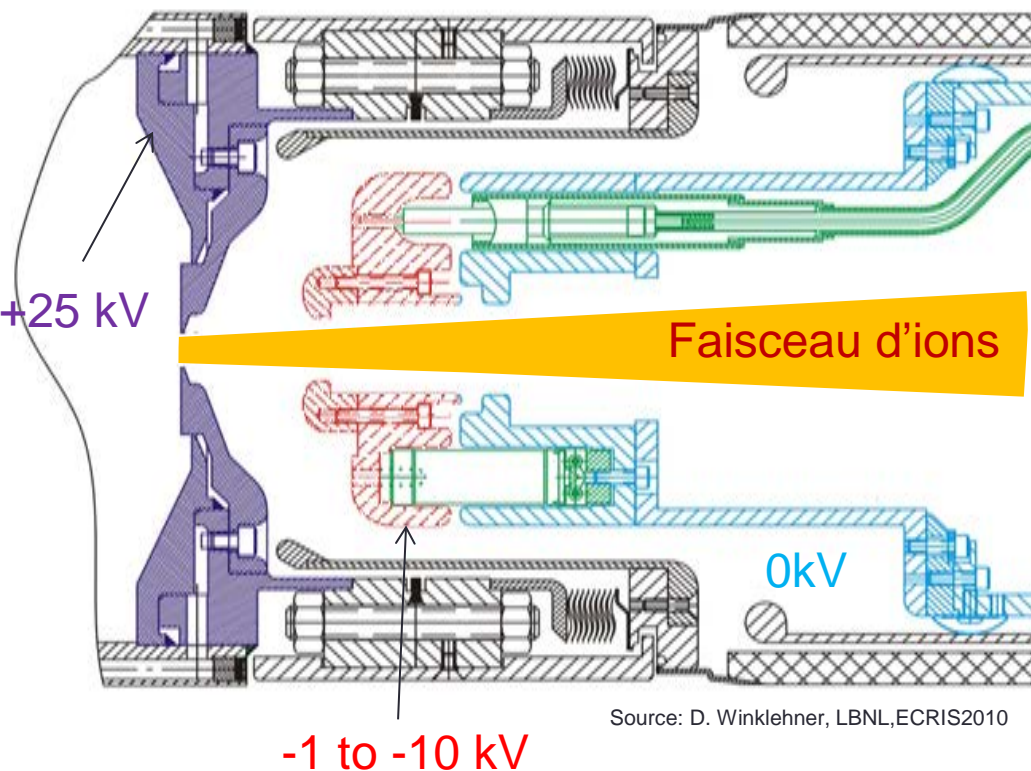
# VENUS: système d'injection





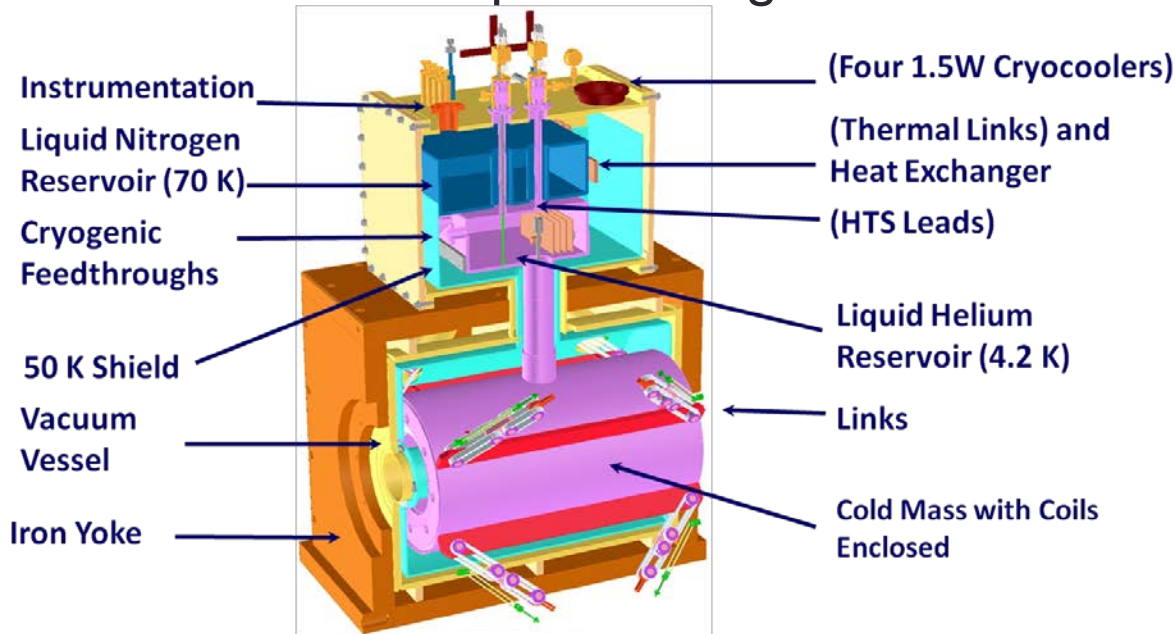
# VENUS: Extraction de faisceau par une triode

- L'extraction en triode permet d'empêcher les électrons froids piégés dans le potentiel du faisceau de'être accéléré vers la source => source plus stable en opération
- Elle permet aussi d'augmenter l'intensité extraite si le faisceau est limité par la charge d'espace

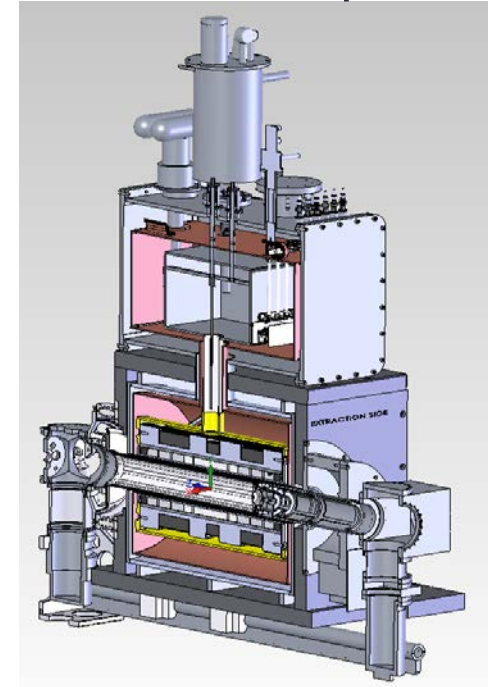


# Amélioration de VENUS pour FRIB

- VENUS conception d'origine



- VENUS améliorée pour FRIB

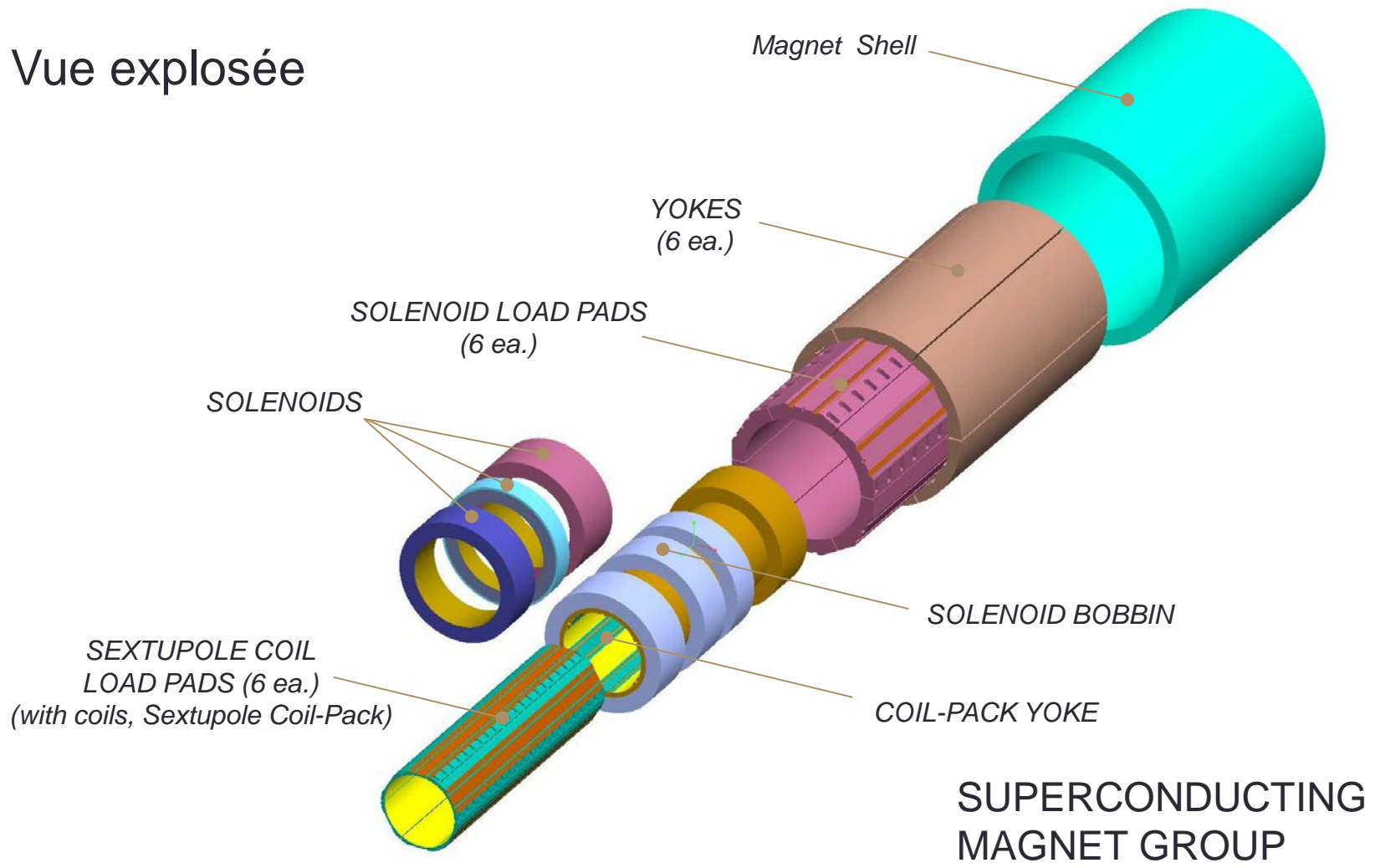


- La masse froide de la future source de FRIB sera très similaire à celle de VENUS
  - conception sous-traitée au LBL Superconducting Group (see next slides)
- Cryostat fortement modifié (MSU)
  - Refroidissement de l'écran et des amenées de courant HTC par cryocoolers (plus de LN)
  - Ajout de cryocoolers à 4.2 K (8 - 10W total vs. 5 -6 W pour VENUS)
  - Optimisation des matériaux, réduction des pertes thermiques et simplification maintenance



# Amélioration FRIB / VENUS : conception de la masse froide envisagée

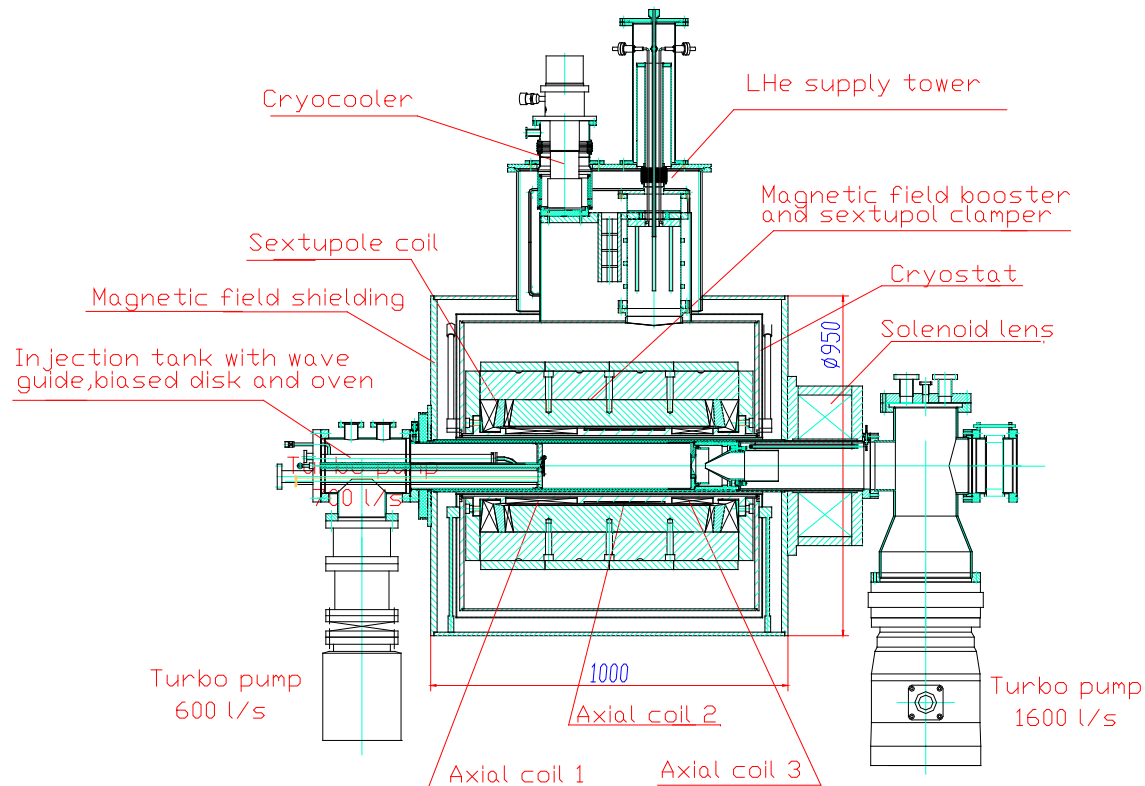
- Vue explosée



**SUPERCONDUCTING  
MAGNET GROUP**

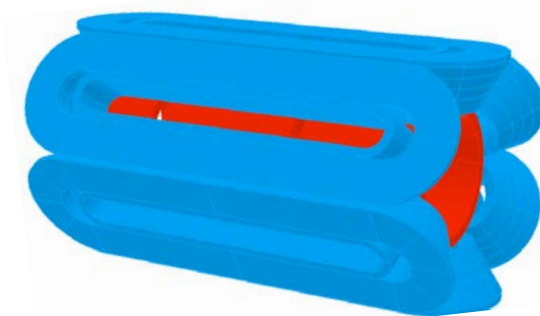
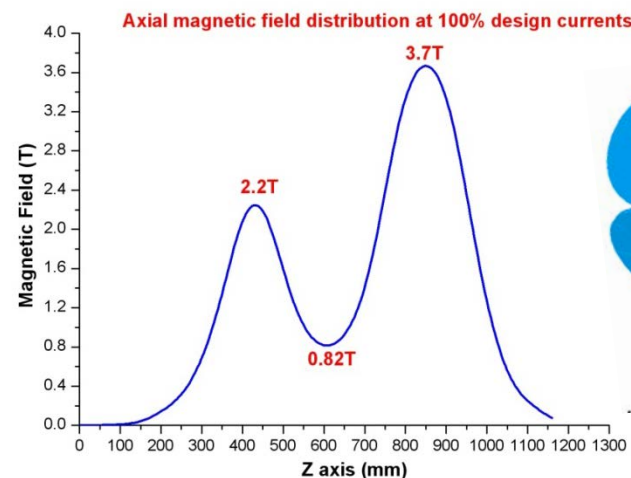
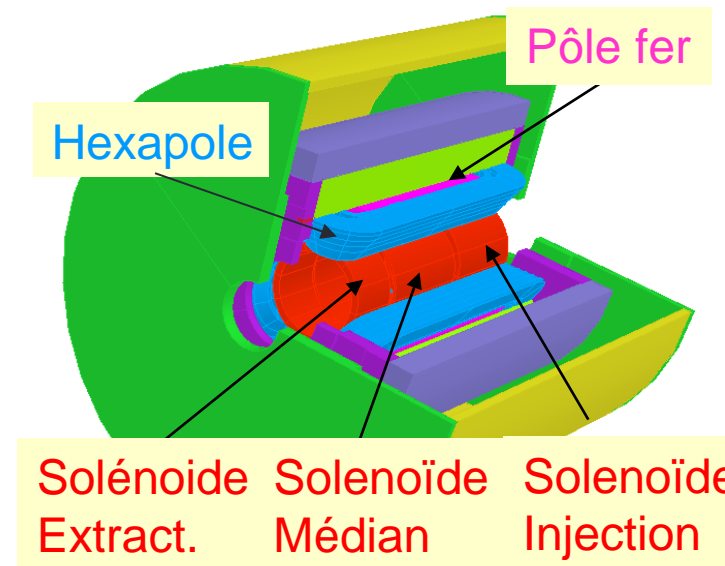
# Exemple de la source SECRAL (IMP Lanzhou, Chine)

- Démarrage projet 2000
- 1<sup>er</sup> plasma 2005
- $f=18-24$  GHz



# Aimant SECRAAL sous-traité chez Accel

- Structure inversée: Hexapole autour des bobines
  - **Pôle en fer** au pour chaque bobine d'hexapole
  - Bobine d'hexapole type « racetrack », section trapézoïdale
  - Bobinage des têtes en 2 parties
- Bobines axiales ultra compactes
- Confinement final moins performant que VENUS
  - Bradial < 1.8 T à Ø120 mm
  - Warm bore Ø140 mm
  - L chambre 42 cm
  - **Volume chambre ~4.7 litre**



SC Hexapole outside  
The solenoids

# Conception de la masse froide

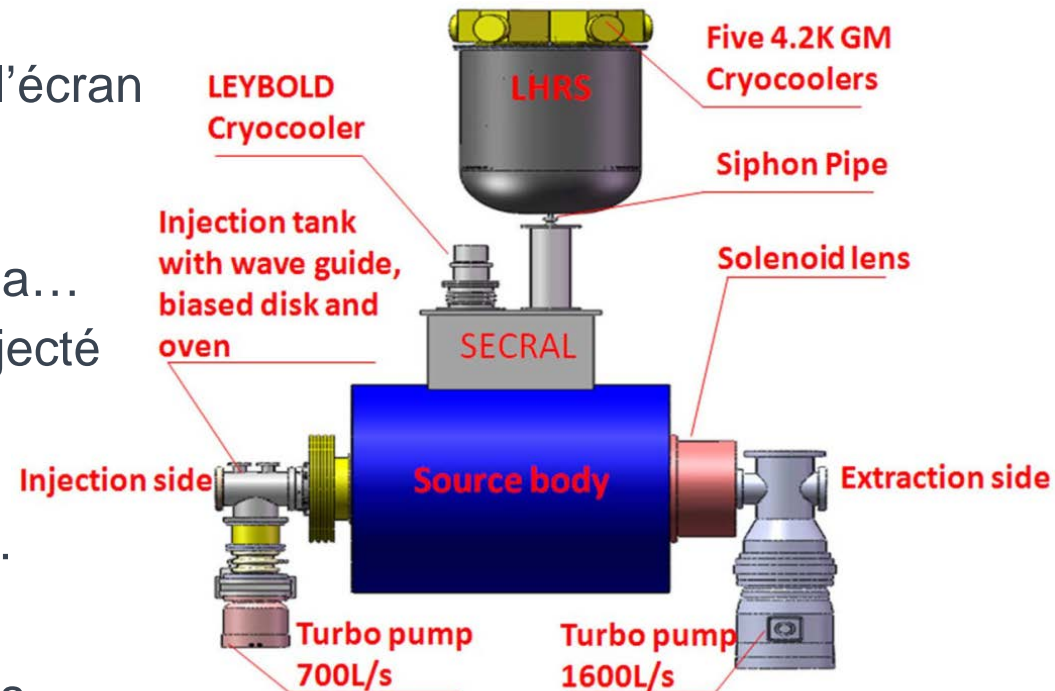
- Solénoïdes montés sur un unique bloc en acier inoxydable
- Bobines hexapole assemblées autour des solénoïdes
- Les pistes hexapolaires sont bobinées autour d'un pôle en fer doux pour augmenter le champ magnétique
- L'ensemble des bobines hexapolaires est maintenu par l'extérieur par 6 secteurs en acier doux qui referment le flux magnétique et augmentent l'intensité du champ magnétique radial
- La pré-contrainte radiale de l'ensemble est assurée par la contraction à froid d'un ensemble d'anneaux en aluminium



Masse froide de SECRAL

# Cryogénie de SECRAL

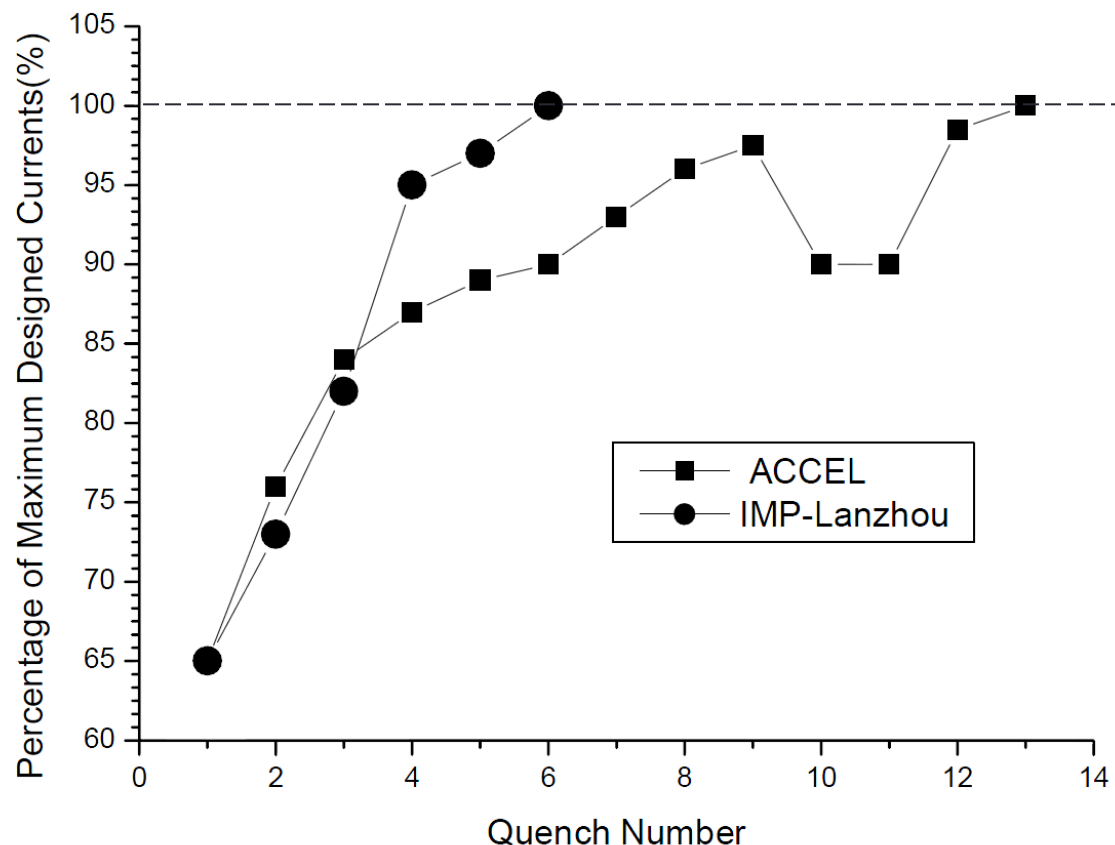
- Système LHe ouvert...
  - 1 seul cryocooler 1 étage refroidissant l'écran radiatif à 30-40K
  - 1 W de perte du cryostat en statique
  - Mais forte ébullition d'He avec le plasma...
  - 90% de l'He gazeux récupéré puis réinjecté vers le liquéfacteur (Linde)
  - Transfert LHe par Dewar
  - Solution intenable en opération 24/24...
- Amélioration réalisée en 2009
  - 4 cryocoolers recondensent 1 partie des vapeurs en sortie du cryostat et la réinjectent dans la masse froide
  - Réduction du taux net de LHe évaporé en opération, mais toujours un cycle ouvert





# « Training quench » des aimants de SECRAL

- Rampe commune de tous les aimants (solénoïdes et hexapôle)
- 1<sup>ère</sup> conception de la tenue de l'hexapôle ratée par ACCEL (aimants à 70% de  $I_{max}$ )
- Modification de la tenue mécanique hexapôle par Lanzhou (ajout d'anneaux alu autour hexapôle) => **100% de  $I_{max}$**



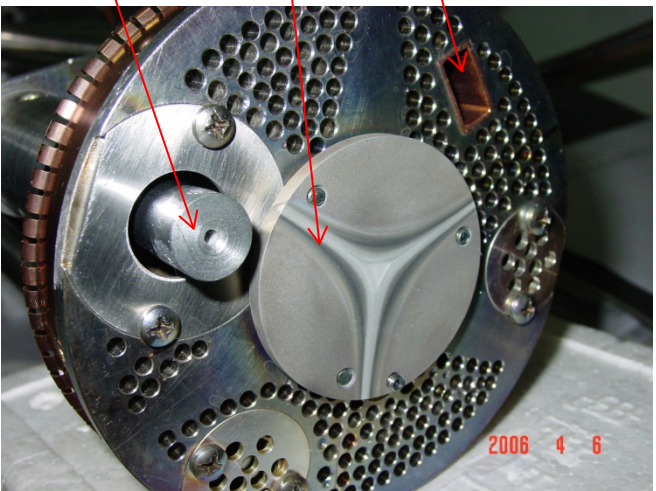
# Ensemble injection SECRAL



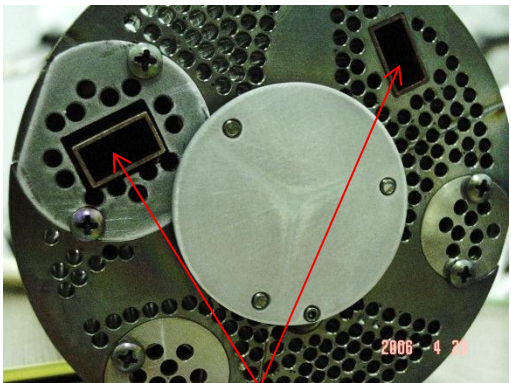
Disque polarisé

Four haute température

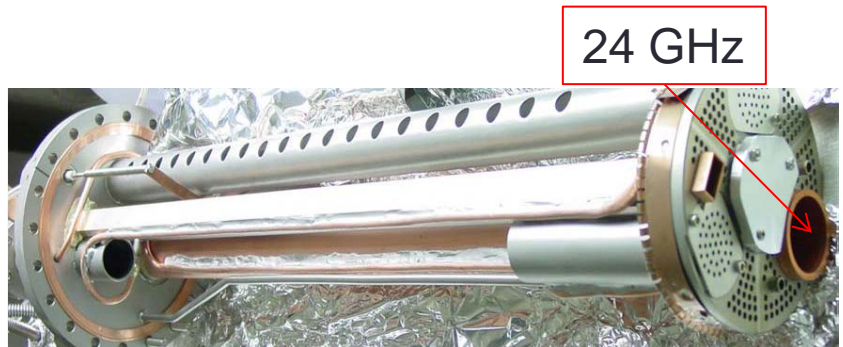
Injection 18 GHz



Removable UHV Injection system



2x18 GHz

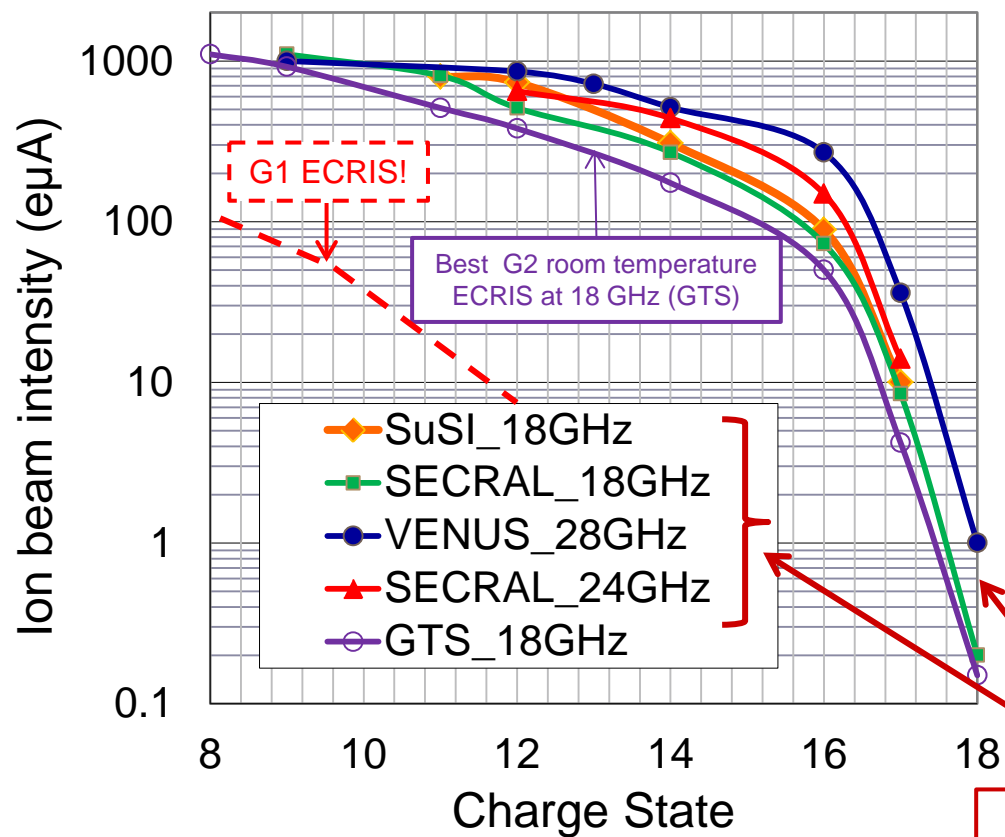


24 GHz

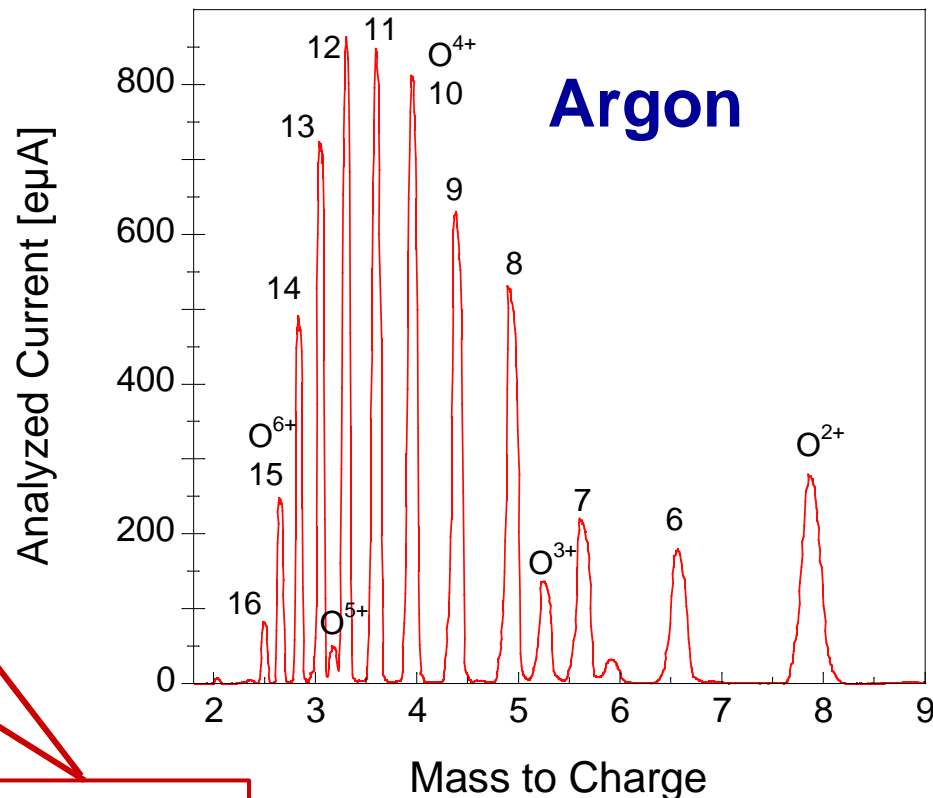
Ensemble d'injection complet 18+24 GHz

- INTRODUCTION AUX SOURCES ECR
- TECHNOLOGIE DES SOURCES ACTUELLES
- **PERFORMANCES**
- LIMITATIONS
- UNE SOURCE D'ION SUPRACONDUCTRICE POUR SPIRAL2

# Performance des sources ECR en Argon

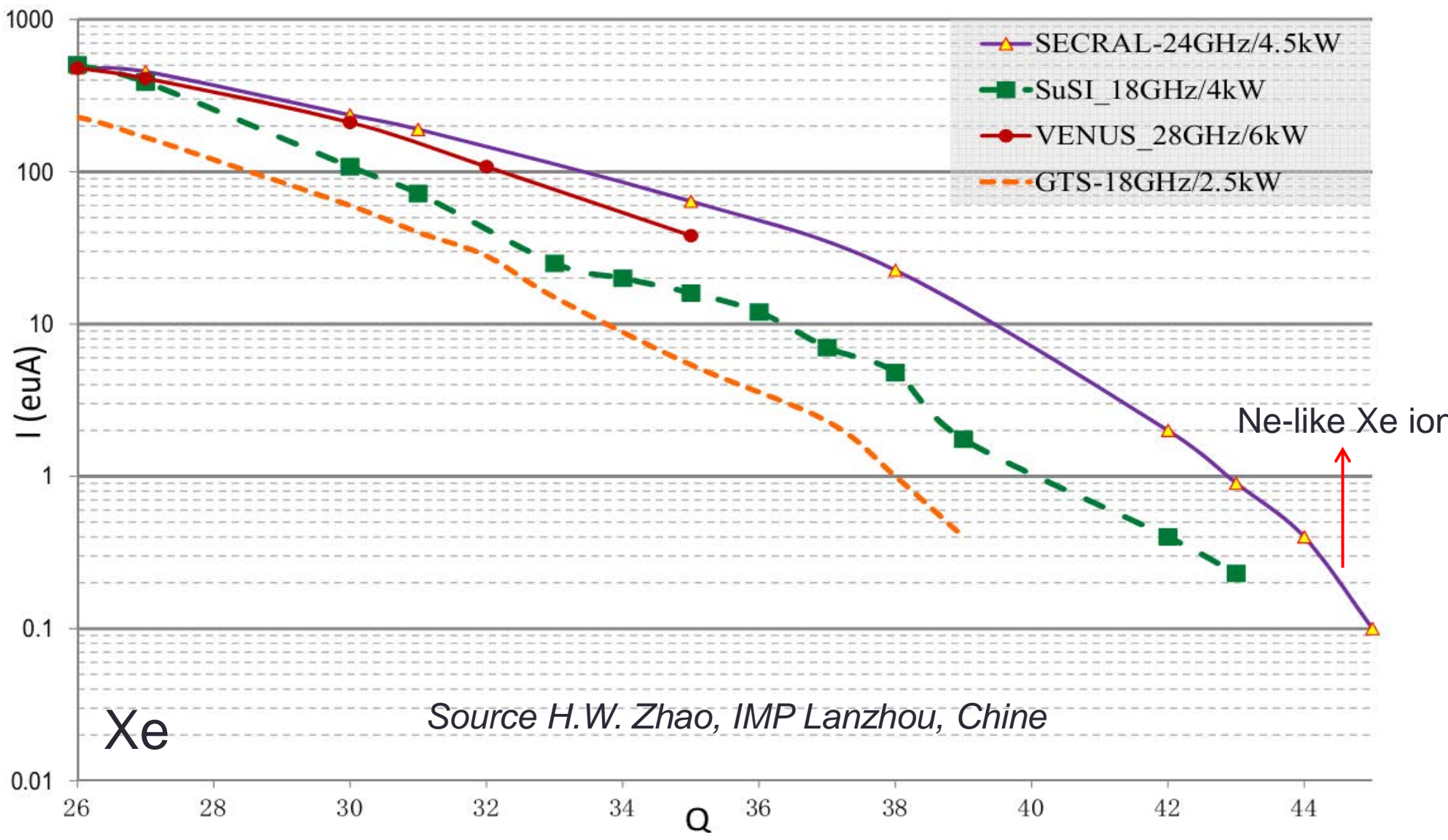


Source: G.Machicoane, MSU/NSCL, ICIS'11, modified



Sources supra  
De large volume  
ECRIS - G3

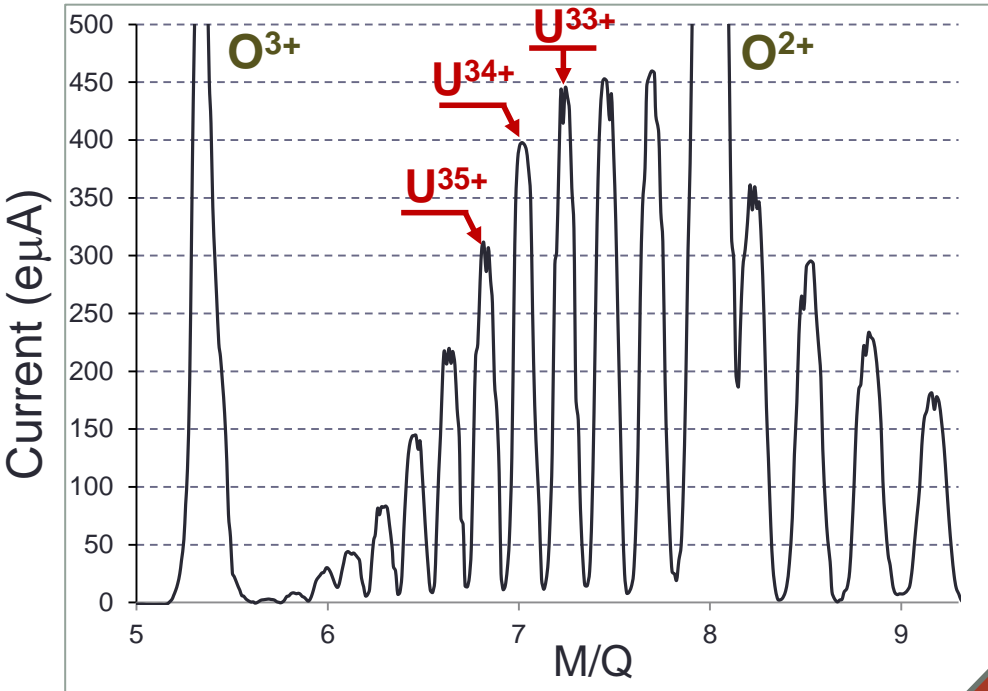
# Performance en Xenon



Xe

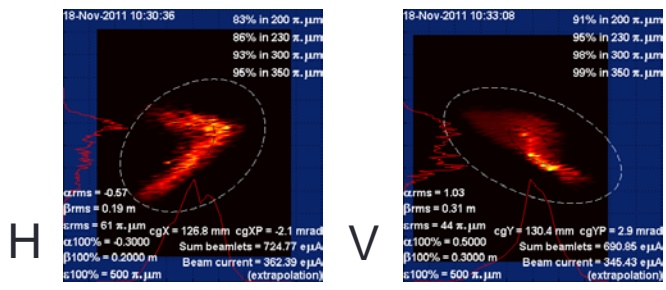
Source H.W. Zhao, IMP Lanzhou, Chine

# Performance en uranium (test VENUS LBNL+MSU)



- Spectre impressionnant!
- Four 2000°C avec un creuset en Rhenium
  - Consommation U ~9 mg/h
- 2 kW 18 GHz+6.5 kW 28 GHz
  - VENUS réglée à fond
- transmission LEBT limitée à 22 kV
  - drain HV 9 mA, CF tot~5mA
- Pas de limitation du côté source, qui répond à la HF et à la température four

• Emittance compatible avec les spécif. de FRIB

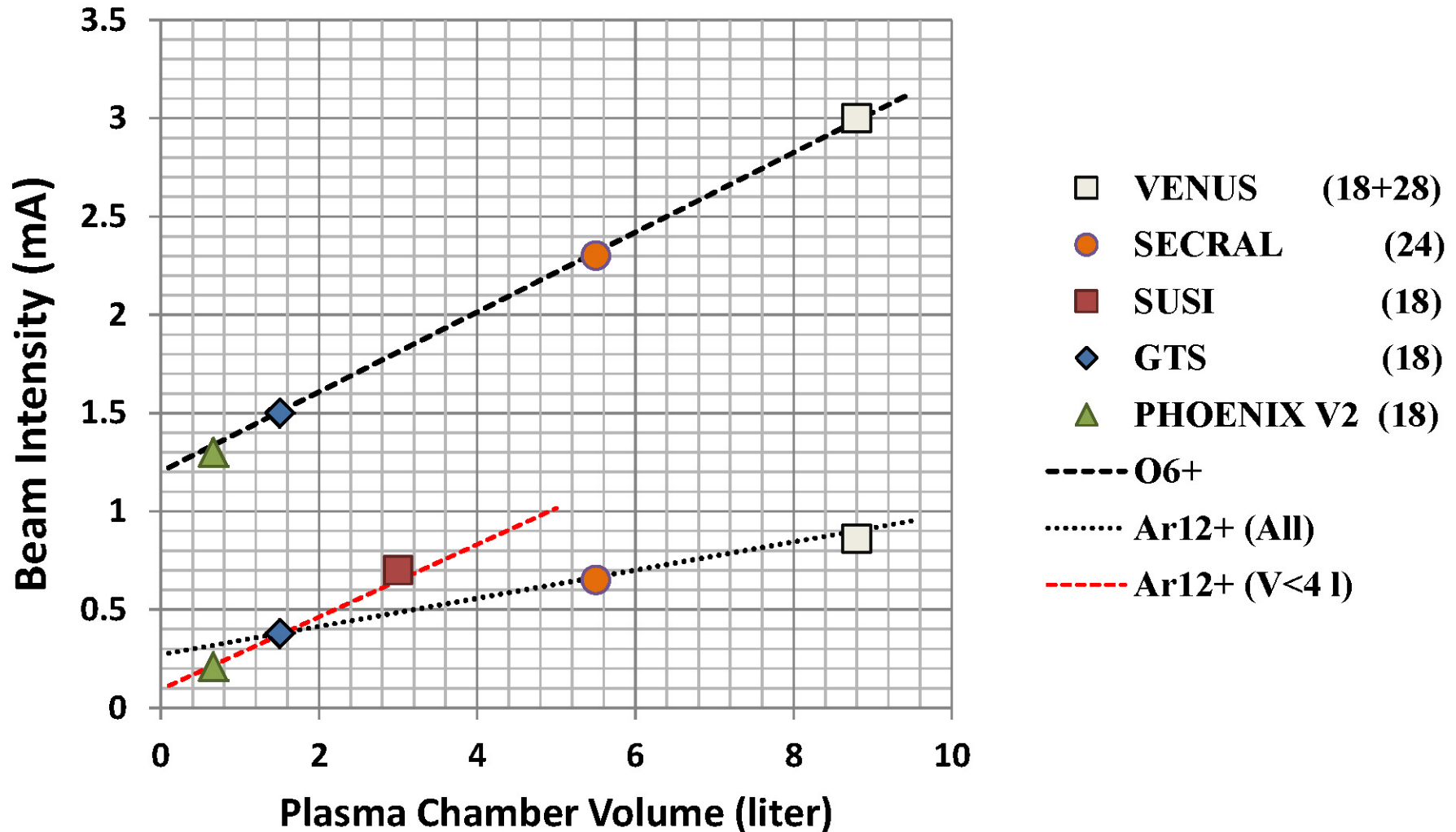


Valide l'operation de FRIB avec 220 µA U<sup>33+</sup> + 220 µA U<sup>34+</sup>

# Résumé des performances de VENUS (référence)

High Intensity or High Charge State Beams		
	Beam Current	Method
${}^4\text{He}^{1+}$	20000 $\mu\text{A}$	gas
${}^4\text{He}^{2+}$	11000 $\mu\text{A}$	gas
${}^{16}\text{O}^{6+}$	3000 $\mu\text{A}$	gas
${}^{16}\text{O}^{7+}$	925 $\mu\text{A}$	gas
${}^{40}\text{Ar}^{12+}$	860 $\mu\text{A}$	gas
${}^{40}\text{Ar}^{16+}$	133 $\mu\text{A}$	gas
${}^{40}\text{Ca}^{11+}$	400 $\mu\text{A}$	LoT Oven
${}^{124}\text{Xe}^{26+}$	432 $\mu\text{A}$	gas
${}^{124}\text{Xe}^{30+}$	211 $\mu\text{A}$	gas
${}^{124}\text{Xe}^{42+}$	1 $\mu\text{A}$	gas
${}^{138}\text{U}^{33+}$	450 $\mu\text{A}$	HiT Oven
${}^{138}\text{U}^{50+}$	13 $\mu\text{A}$	HiT Oven
${}^{209}\text{Bi}^{31+}$	300 $\mu\text{A}$	HiT Oven
${}^{209}\text{Bi}^{50+}$	5.3 $\mu\text{A}$	HiT Oven

# Effet de fréquence ou effet de volume?





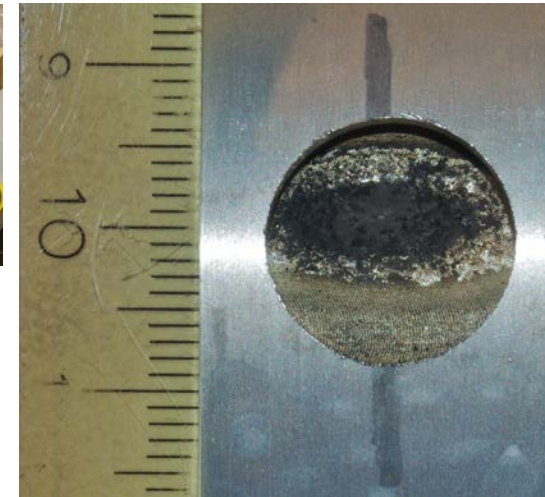
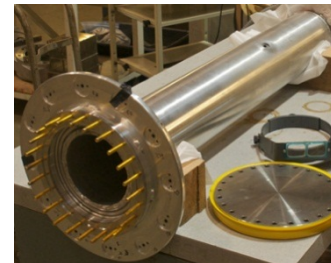
- INTRODUCTION AUX SOURCES ECR
- TECHNOLOGIE DES SOURCES ACTUELLES
- PERFORMANCES
- **LIMITATIONS**
- UNE SOURCE D'ION SUPRACONDUCTRICE POUR SPIRAL2

# Perforation chambre à plasma

- Phénomène observé dans tous les laboratoires
- A forte puissance
  - $P > 2-7$  kW selon dimension chambre à plasma, et pression de fonctionnement
- Les électrons chauds fuient prioritairement là où le champ magnétique est minimum
  - A la paroi en général
- Densité de puissance locale  $> 1 \sim 5$  MW/m<sup>2</sup>
  - L'eau se vaporise localement dans le circuit de refroidissement (malgré 15 bars/ 8-15 l/min)
    - La température de paroi monte au dessus de 100°C
    - Sur VENUS Température aluminium  $> 280^\circ\text{C}$  => recristallisation observée
    - Formation progressive d'un cratère puis d'un canal poreux => fuite d'eau
- On se rapproche doucement des soucis des Tokamaks...



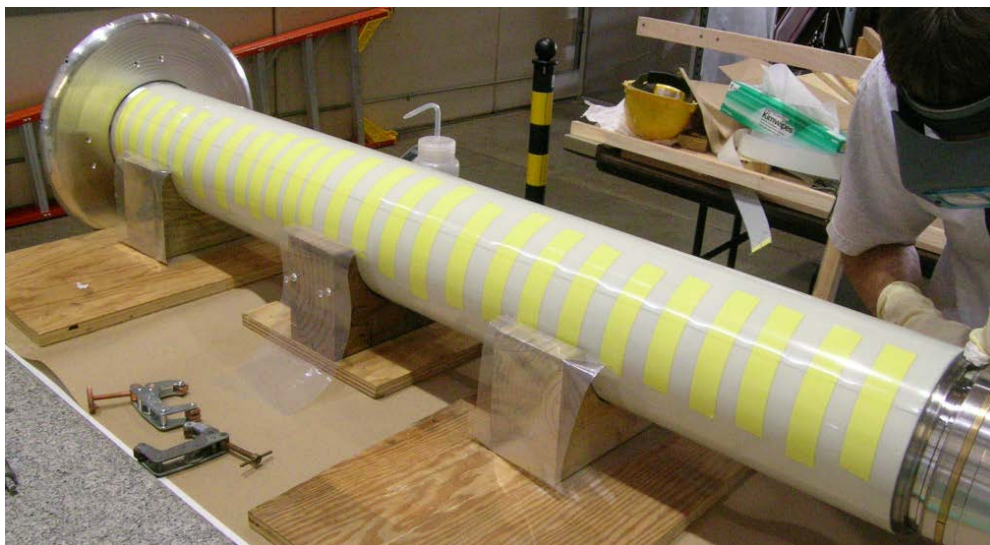
*Trou dans la chambre à plasmas de VENUS*



*Recristallisation Alu chambre interne VENUS*

# « Cuisson » de l'isolant haute tension

- Les électrons chauds génèrent un énorme flux de RX radial
  - Cuisson lente de L'isolant HT
- Ambiance autour de la source: 0.1-100 mSv/h !!
  - La source est activement blindée
  - La source est en zone d'accès contrôlé
  - La couleur de la zone dépend de la puissance HFinjectée...



*Chambre à plasma VENUS*

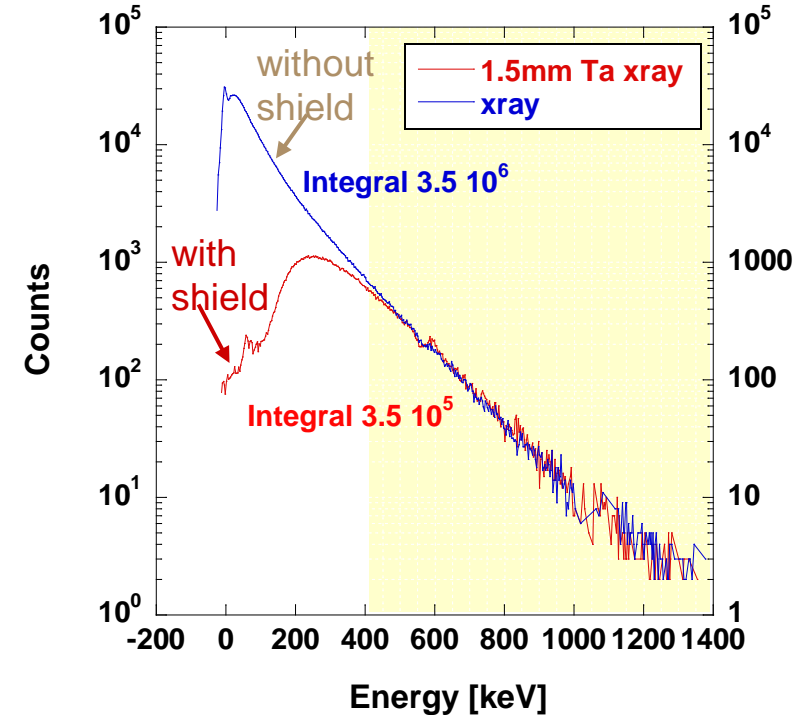
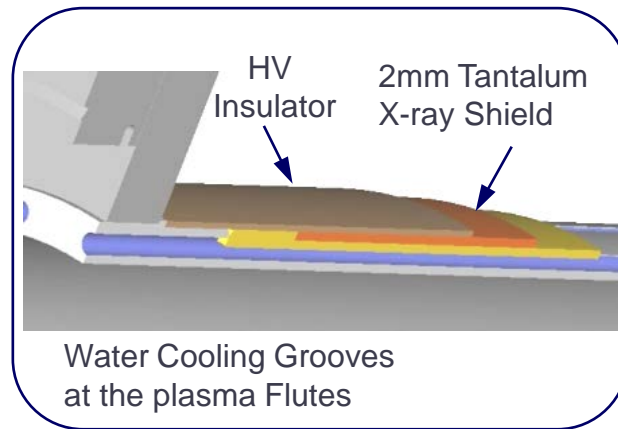


*Isolant HT (mylar) endommagé"*

*VENUS*

# Atténuation des RX par une feuille en Ta

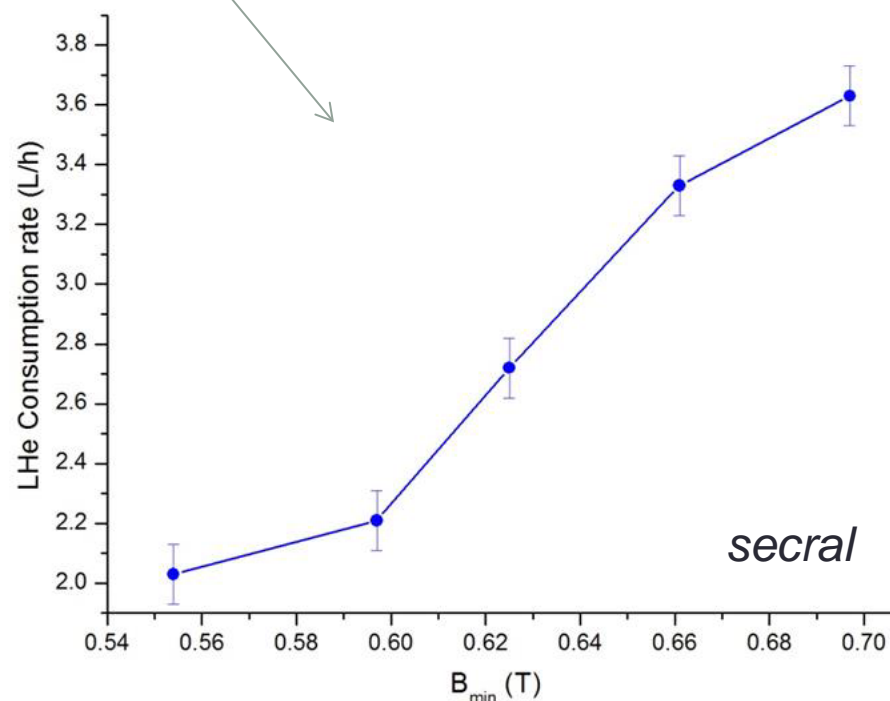
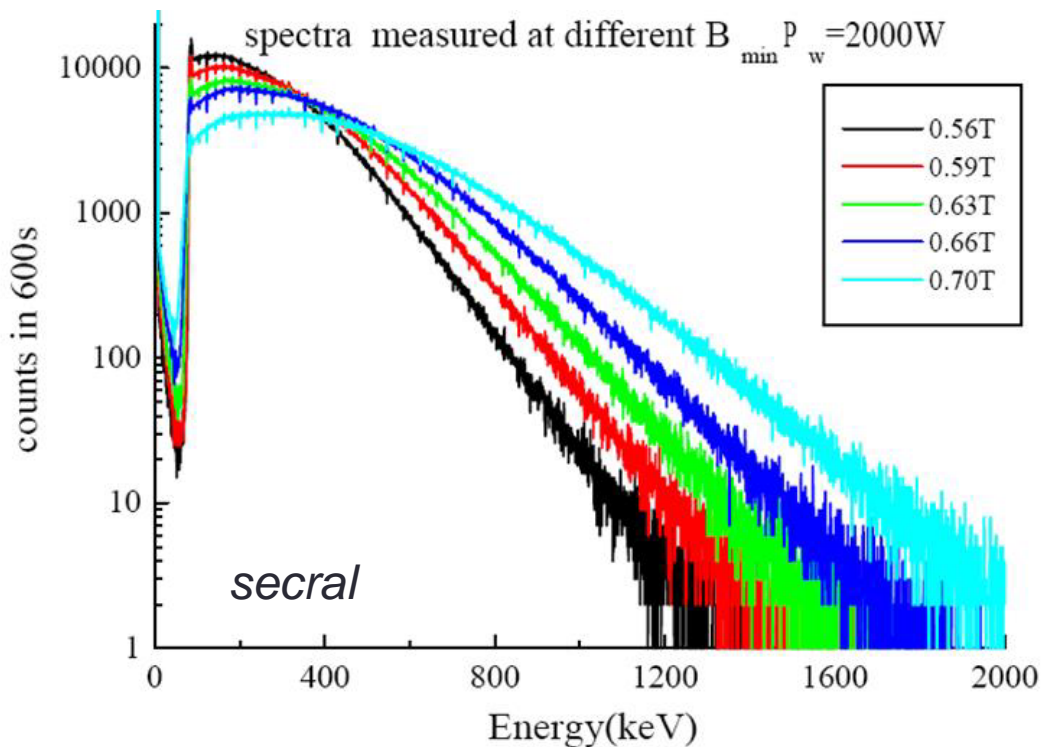
- Les RX sont atténués par une feuille en Ta de 2mm d'épaisseur enroulée autour de la chambre à plasma
- Le flux de RX est diminué d'un facteur de 5 to 10
- La puissance des RX arrêté est ~50%
- Ça n'empêche pas l'isolant de continuer à cuire sur un temps plus long...



*Chambre Plasma Aluminium*

# RX: Echauffement de la masse froide

- Le blindage en Ta n'arrête pas les RX de haute énergie
- Une partie du flux de RX est efficacement stoppée dans l'épaisseur de la masse froide (Fe, Cu, Nb, Ti, Al...)
  - Un échauffement non négligeable est observé, qui dépend de  $B_{\min}$  (épaisseur surface résonance ECR)
  - **1 W/kW à 28 GHz**
  - 0.2 W/kW à 18 GHz



## Absorption de RX dans la masse froide de VENUS à 28 GHz

Material	Thickness	Power absorbed	Power Transmitted	Flux stopped	Flux transmitted
Al	7 mm	9.6 %	90.4%	33%	67%
Ta	2 mm	<b>50.5%</b>	39.9%	54%	13%
HV insulator	3 mm	<b>0.37%</b>	39.53%	0.12%	12.88%
S.S. wall	1 mm	1%	38.53%	0.37%	12.51%
S.S. Thermal shield	1 mm	1%	37.53%	0.36%	12.15%
S.S. Hexapole support	20 mm	<b>14.8%</b>	22.73%	5.3%	6.85%
NbTi:Cu hexapole	24 mm	11.2%	11.53%	3.8%	3.05
Al axial coil support	58 mm	4.5%	7.03%	1.3%	1.75
Axial coils	25 mm	3.9%	3.13%	1.2%	<b>0.55%</b>

**34.4 % of power deposited in the cold mass**

- L'écran en Ta arrête 50% de la puissance des RX
- ~34% de la puissance des RX est arrêtée dans la masse froide

# Charge d'espace et émittance

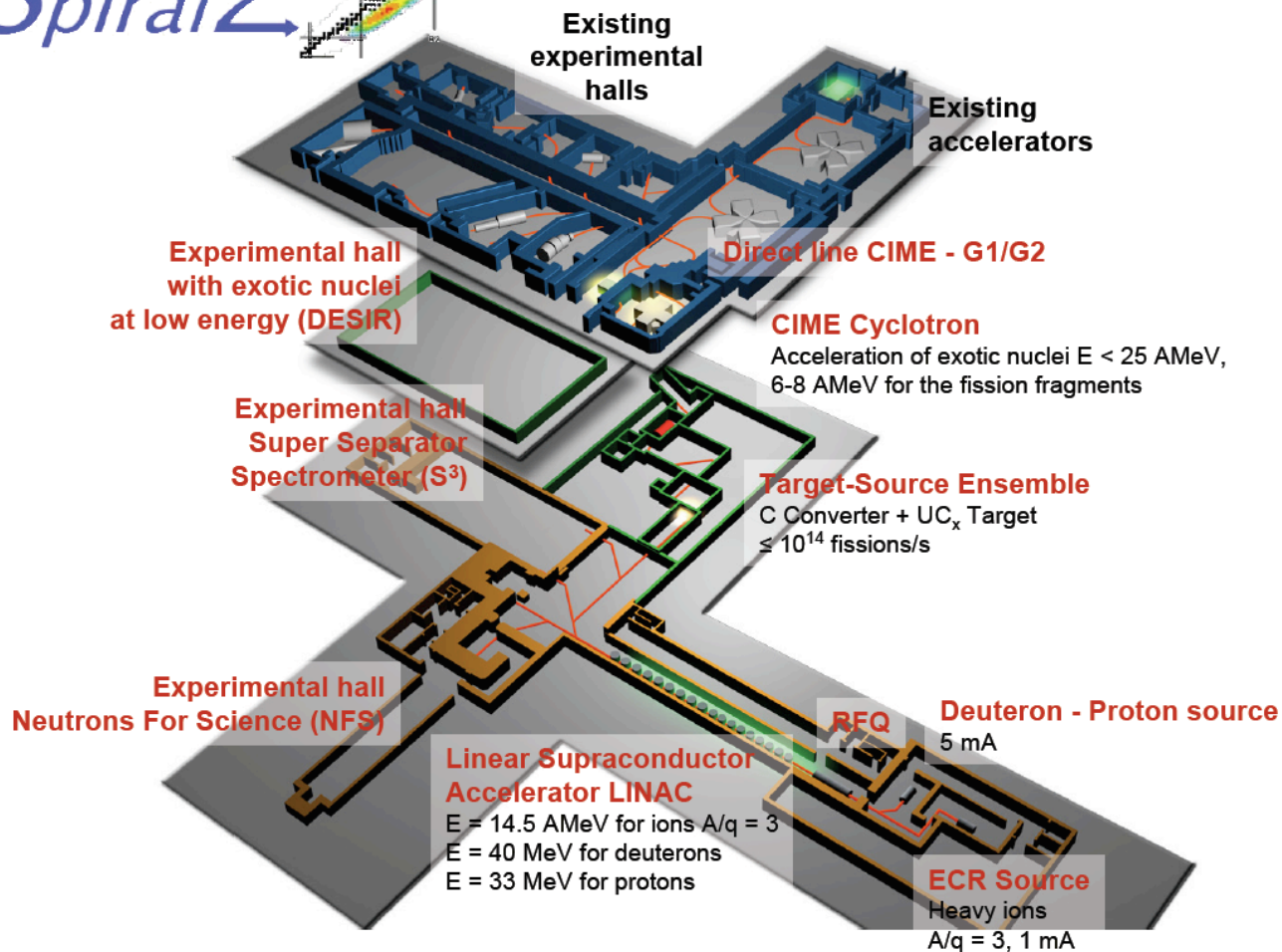
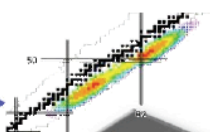
- Les intensités sortie source peuvent atteindre 10-20 mA
- Extraction et Transport de dizaines de faisceaux mélangés en régime de charge d'espace qui arrosent le tube faisceau
  - Ca chauffe dans la LEBT
- La pression résiduelle doit limiter l'échange de charge
  - $10^{-8}$  mbar
- Nécessité absolue d'une LEBT surdimensionnée (type Spiral2)
- Aucun code ne peut prédire l'extraction des ions multichargés
  - Source ECR fortement non-linéaire, paroi-dépendante, paramètre-dépendant
  - La Surface d'émission du plasma est inconnue et changeante
- Emittance : la composante magnétique augmente avec la fréquence ECR ( $f_{\text{ECR}} \sim B_{\text{ECR}}$ )
  - $\varepsilon_B^{xx'-rms-norm} = 0.032 r^2 B \frac{1}{M/q}$ 
    - $B$  champ magnétique à l'électrode plasma,  $r$  rayon électrode (mm) ,  $M/q$  masse sur charge
- La plupart des « cartons » des sources supra sont **INUTILISABLES** avec leurs accélérateurs

- INTRODUCTION AUX SOURCES ECR
- TECHNOLOGIE DES SOURCES ACTUELLES
- PERFORMANCES
- LIMITATIONS
- **UNE SOURCE D'ION SUPRACONDUCTRICE POUR SPIRAL2**



# Le projet Spiral2

*Spiral2*



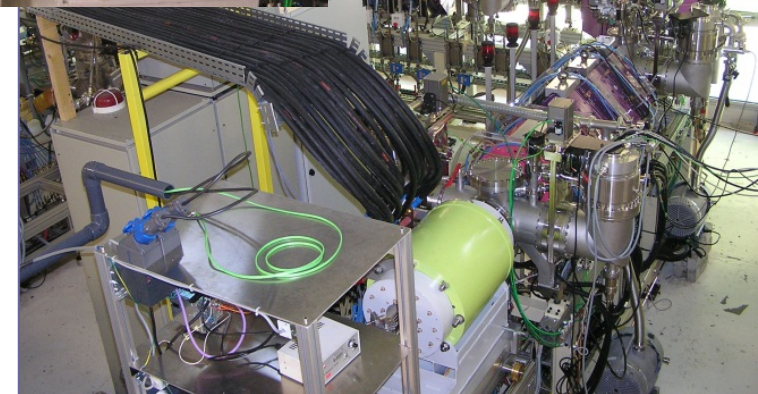
- Une extension du GANIL pour produire des ions radioactifs (RIB)
  - 5 mA Deutons sur cible Uranium
  - Ré-accélération des RIB dans un cyclotron du GANIL
- Programme de physique des ions lourds avec le LINAC
  - Super Separator Spectrometer (S<sup>3</sup>)
  - Neutron for Science (NFS)

## Challenge pour la source ECR:

- Produire 1 mA  $A/Q=3$  beams jusqu'à  $M=40$  à 60 kV
- Produire des hautes intensités d'ions métalliques (Ni, Ca, S, Si, C...)
- Emittance  $1\sigma$  norm.  $RMS < 0.4 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$

# Source ECR $A/Q=3$ et validation LEBT

- Source et LEBT validées au LPSC, Grenoble
  - Excellente transmission ( $T > 90\%$ )
- Source de démarrage PHOENIX V2
  - Source chaude 18 GHz
  - **OK** pour le commissioning au GANIL et les 1ères expériences
  - Emittance **OK**
- Mais une source haute performance doit être construite (et financée) pour répondre pleinement au cahier des charges



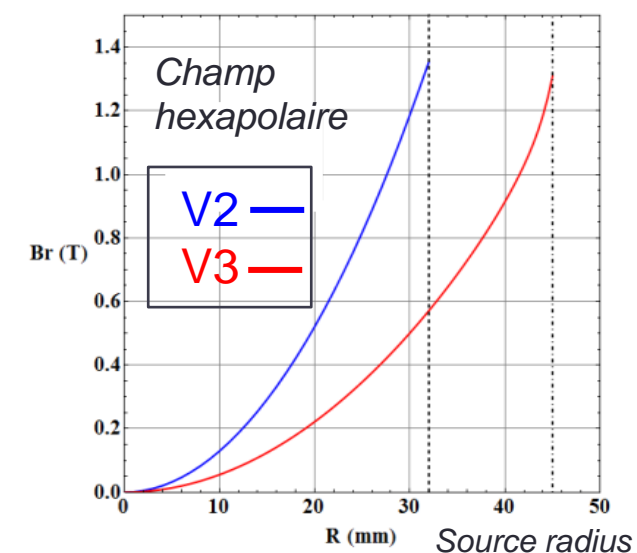
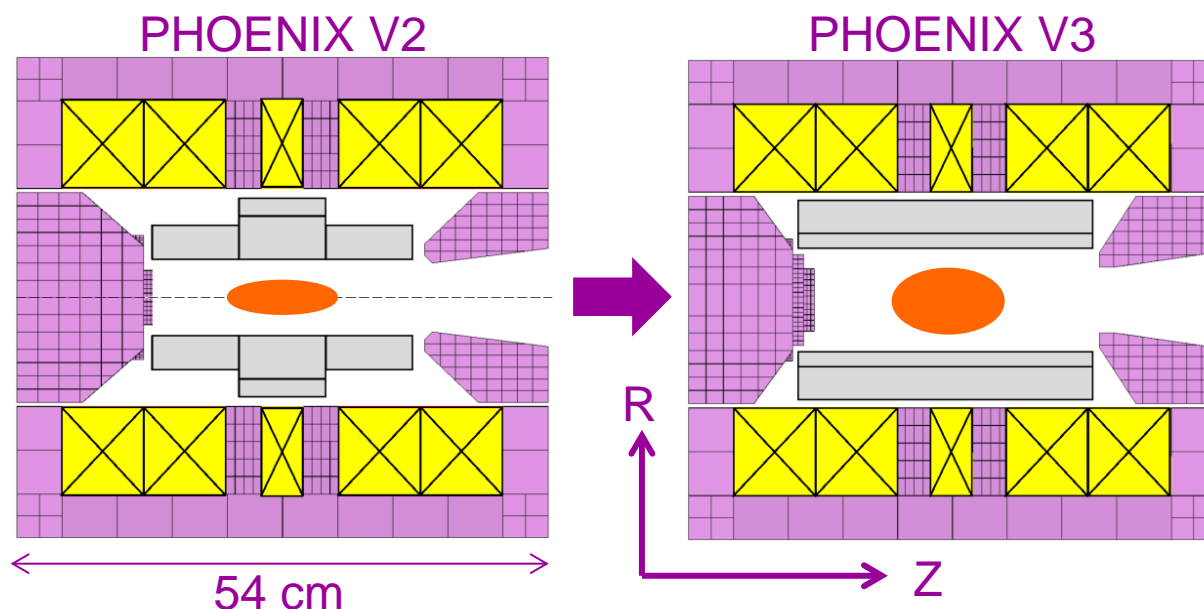
Ion	Required ( $\mu\text{A}$ )	PHOENIX V2 ( $\mu\text{A}$ )	World record ( $\mu\text{A}$ )	Ref.
$\text{O}^{6+}$	1000	1300	3000	VENUS
$\text{S}^{12+}$	240	55	-	-
$\text{Ar}^{14+}$	420	50	514	VENUS
$\text{Ca}^{16+}$	160	16	70	SECRAL
$\text{Ni}^{19+}$	57	19	50	SUSI

Heavy ion LEBT @ LPSC

# Amélioration des performances avec PHOENIX V3

## • PHOENIX V2 → PHOENIX V3

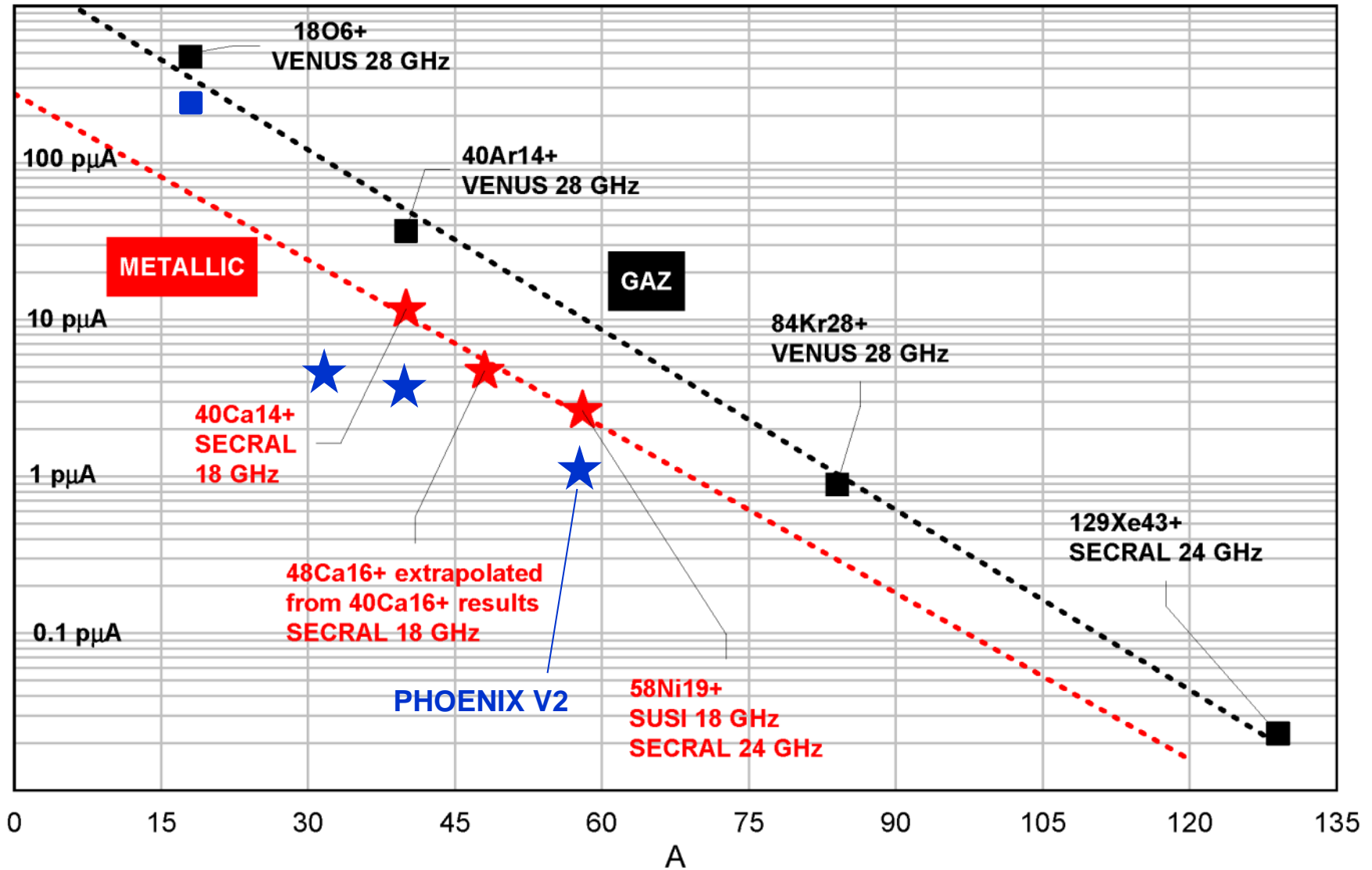
- Augmenter le volume de chambre à plasma: 0.7 → 1.4 litre
- Confinement magnétique conservé
- Décalage des états de charge: Gain espéré +50-100% sur le  $A/Q=3$
- En cours de conception, sera assemblé et testé en 2014



## • Amélioration à long terme: concevoir et réaliser une source 28 GHz

- Pas de financement à ce jour

# Performances en $Q/A=1/3$



# Besoin d'une source d'ions supraconductrice

- Les intensités requises nécessitent une chambre plasma de grand volume
  - Pour garantir un haut confinement des ions favorisant les  $Q/A=1/3$
  - $V \sim 8-10$  litres
- Les intensités requises nécessitent une double fréquence de chauffage à 18+28 GHz (5-8 kW)
- Une structure magnétique générée par des aimants supraconducteurs est préférée
  - Afin de pouvoir optimiser le réglage du champ magnétique radial

# Cahier des charges approché de l'aimant visé

Diamètre libre intérieur de l'aimant (warm bore)	170-180 mm
Intensité du champ magnétique hexapolaire (à Ø160 mm)	$\geq 2.2$ T
Champ magnétique axial côté injection RF et atomes	$\geq 4$ T
Champ axial minimum au centre	0.5 T
Champ axial côté extraction des ions	$\geq 2.5$ T
Variation indépendante des 4 valeurs de champ magnétique, nécessaire pour l'optimisation de la production des ions	$\sim 50\%$ de $B_{\max}$
Longueur pic à pic du miroir axial magnétique	De 500 à 700 mm
Dynamique de refroidissement à 4.2 K (selon la charge en RX)	8 à 10 W