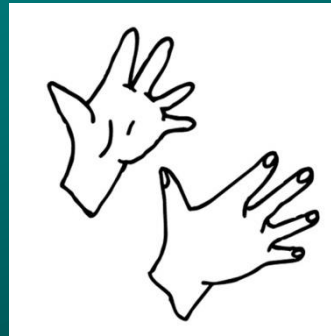


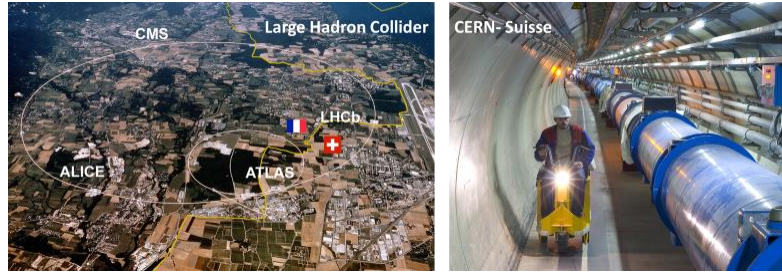
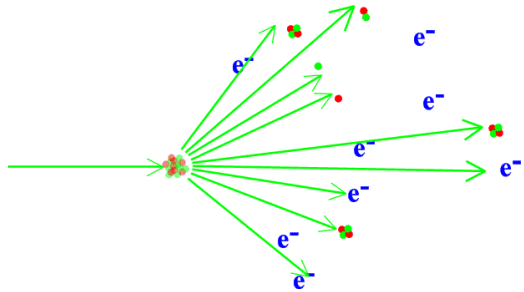
La Physique des Accélérateurs



... avec les mains

Un accélérateur pourquoi faire ?

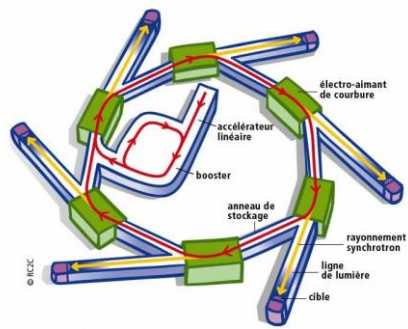
Etude de la matière → collisions



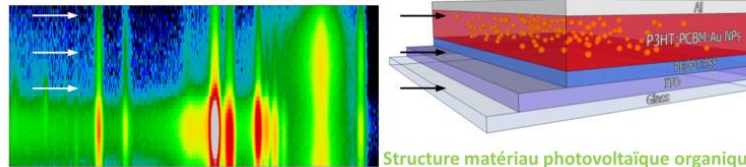
Communauté utilisateurs

- Physiciens des particules
- Physiciens nucléaires

Production rayonnement synchrotron

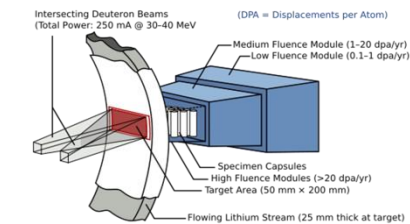


- Physiciens
- Chimistes
- Biologistes
- Ingénieurs
- Industriels
- Historiens
- Artistes



Structure matériau photovoltaïque organique

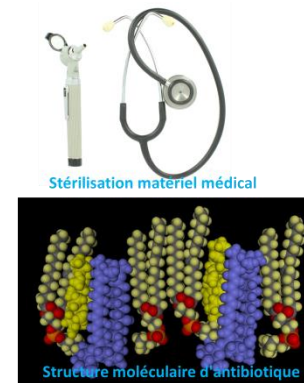
Irradiation



Etude nouveau matériau pour la fusion thermonucléaire



Destruction tumeurs



Stérilisation matériel médical

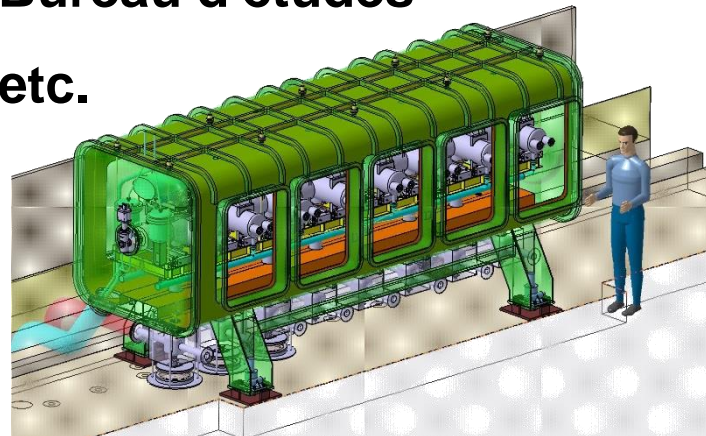
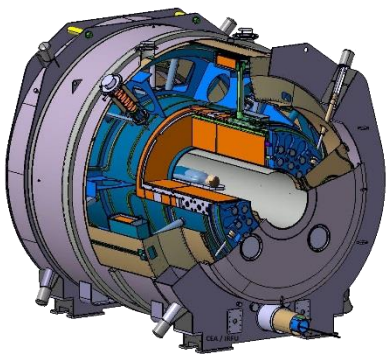
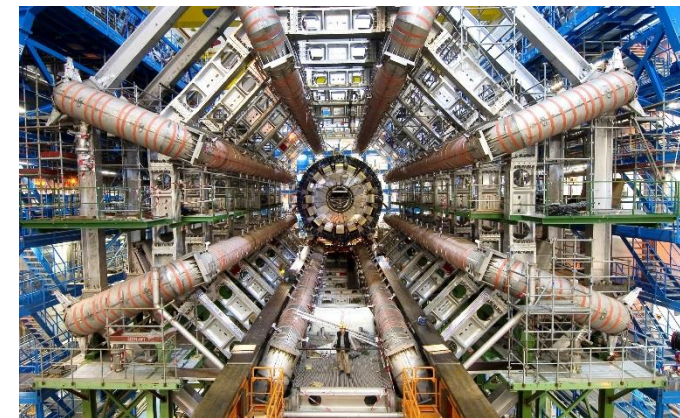
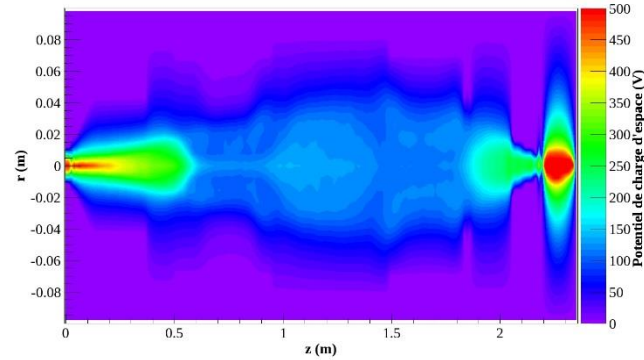
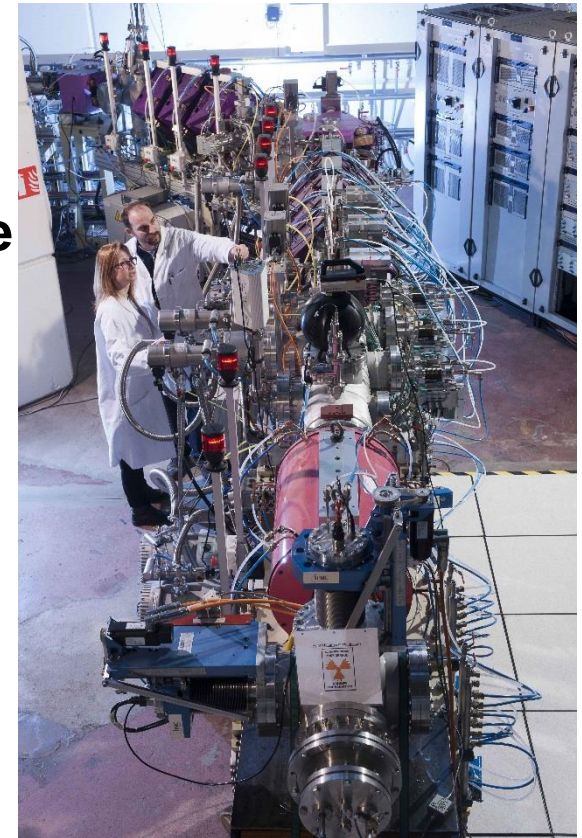
Structure moléculaire d'antibiotique

- Physiciens
- Biologistes
- Médecins
- Industriels

Les métiers impliqués dans les accélérateurs



- Physique du faisceau de particules
- Magnétisme
- Electromagnétisme, Radiofréquence
- Supraconductivité
- Cryogénie
- Chimie pour salle blanche
- Science des matériaux
- Techniques du vide
- Mécanique de précision
- Bureau d'études
- etc.



Où se trouvent les accélérateurs ?

Grands centres de recherche sur les accélérateurs ~100 personnes :
Europe, Amérique du Nord, Asie de l'Est, ...

Liste non exhaustive

- **France** : IRFU/SACM (Saclay), IPNO, LAL (Orsay), SOLEIL (Saint Aubin), GANIL (Caen), ESRF (Grenoble)
- **Suisse** : CERN (Genève), PSI (Villingen)
- **Allemagne** : DESY (Hamburg), GSI (Darmstadt), COSY (Julich), BESSY (Berlin), ANKA (Karlsruhe)
- **Royaume-Uni** : DIAMOND (Didcot), RAL (Oxford), STFC (Daresbury)
- **Suède** : MAX-Lab (Lund), ESS (Lund)
- **Italie** : ELETTRA (Trieste), INFN (Frascati, Legnaro, Catania)
- **Espagne** : ALBA (Barcelona), CIEMAT (Madrid)

- **Etats-Unis** : ALS (Berkeley), FNAL (Batavia), LANL (Los Alamos), SNS (Oak Ridge), ANL (Chicago), SLAC (Stanford), BNL (Upton), CHESS (Cornell)
- **Canada** : TRIUMF (Vancouver), CLS (Saskatoon)
- **Brésil** : LNLS (Campinas)

- **Japon** : SPring-8 (Sayo-cho), KEK (Tsukuba), J-PARC (Tokai-mura)
- **Chine** : SSRF (Shanghai), IHEP, BEPC (Beijing), HLS (Hefei), IMP (Langzhou)
- **Corée** : PAL (Pohang), PEFPP (Yueong)
- **Thaïlande** : SLRI (Nakhon Ratchasima)

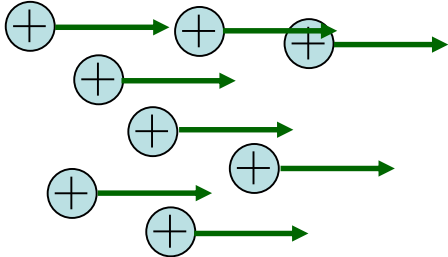
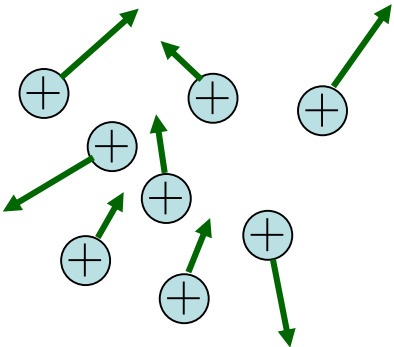
GANIL
GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS

GSi

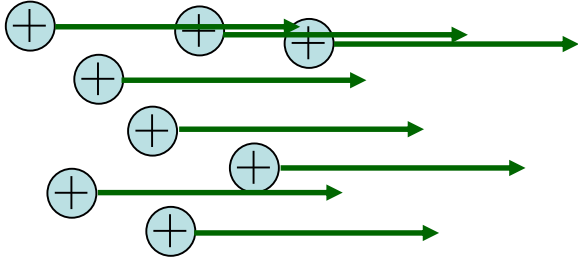


Faisceau accéléré

Faisceau : ensemble de particules **chargées** douées d'une **vitesse d'ensemble**

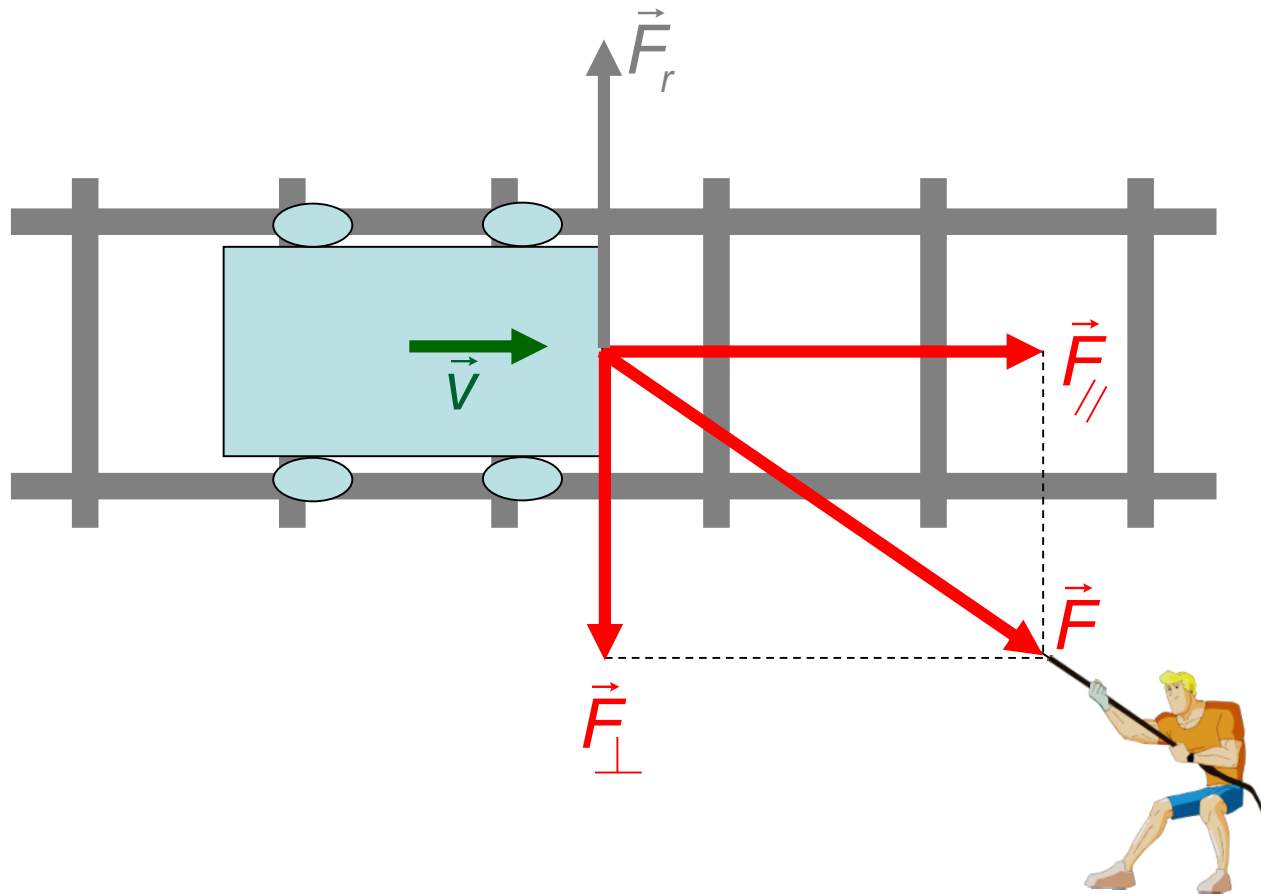


Accélérer : augmenter la vitesse d'ensemble



Jargon! : Energie \equiv Energie cinétique \equiv Energie liée à la vitesse

Accélération



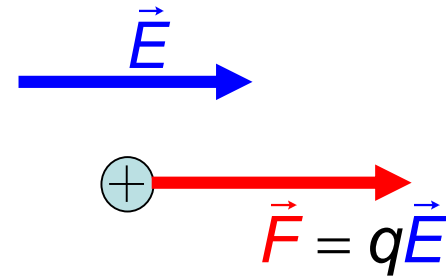
Force parallèle à vitesse : accélération → Energie augmente

Force perpendiculaire à vitesse : guidage, focalisation → Energie constante

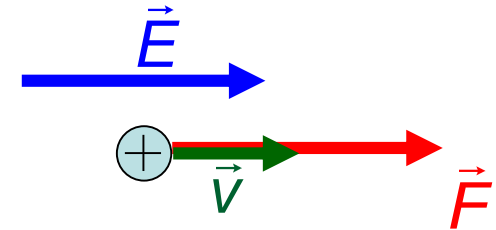
Jargon! : Un Accélérateur Ξ Un Créateur-Guideur-Focaliseur-Accélérateur

Champ Electrique

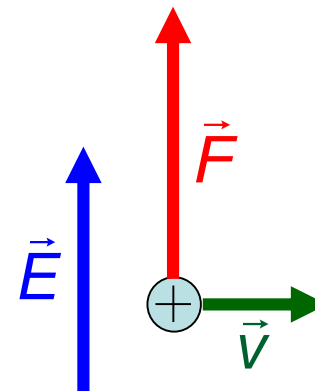
Charge dans un champs électrique \vec{E}



 Champ électrique accélérateur



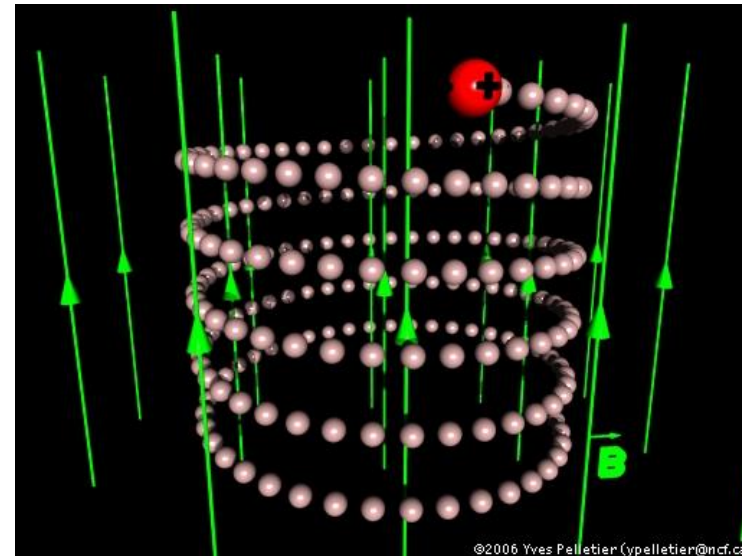
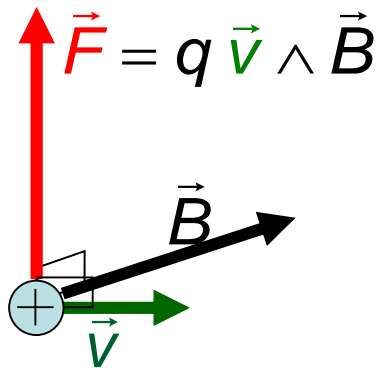
 Champ électrique guideur ou focaliseur



Champ Magnétique

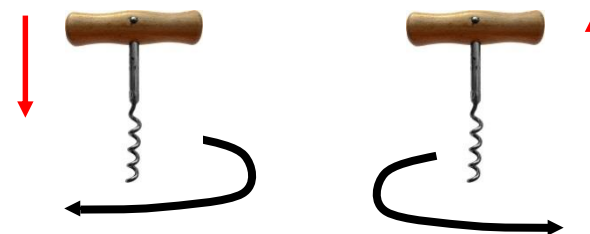
Charge dans un champs magnétique \vec{B}

Force **toujours** perpendiculaire à la vitesse



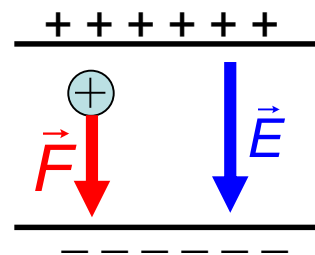
➔ Champ magnétique **uniquement** guideur ou focaliseur

Produit vectoriel : règle du tire-bouchon

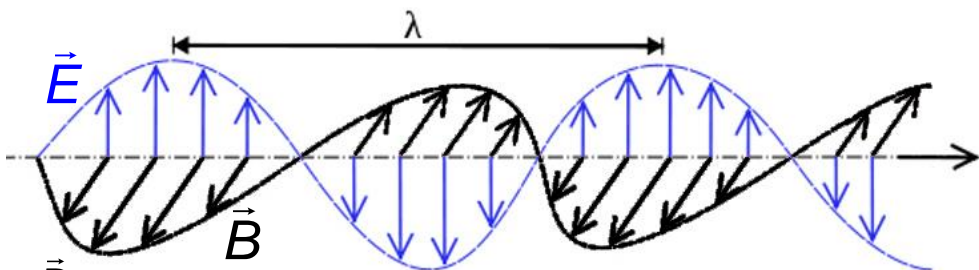


Pour produire un Champ Electrique

☀ 2 plaques électriques chargées + et -



☀ Onde électromagnétique RF

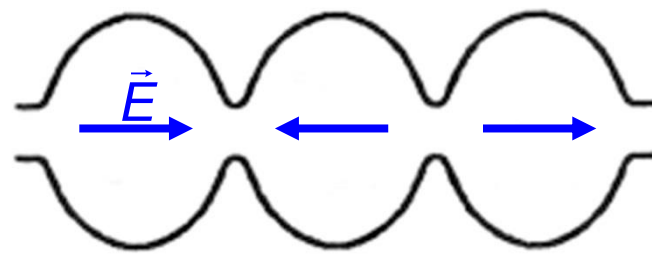


Loi de Maxwell avec les  : \vec{E} variable \leftrightarrow \vec{B} variable

Signal radio, télévision, téléphone, four micro-onde



☀ Onde électromagnétique RF piégée dans une cavité résonante



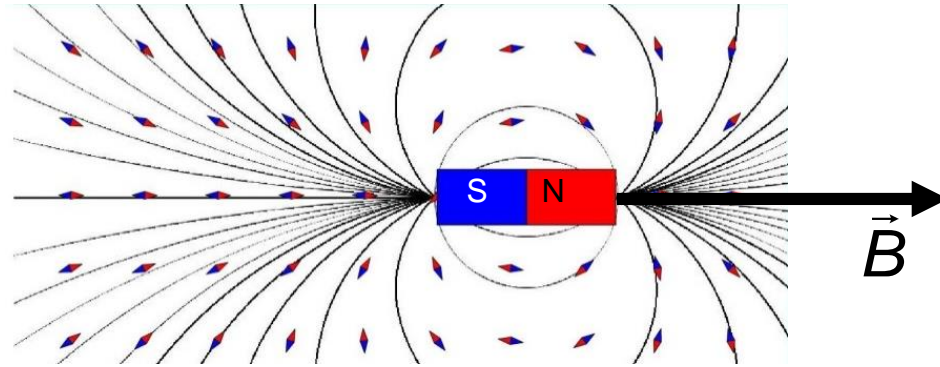
Ondes acoustiques piégées dans caisse de résonance d'instrument de musique



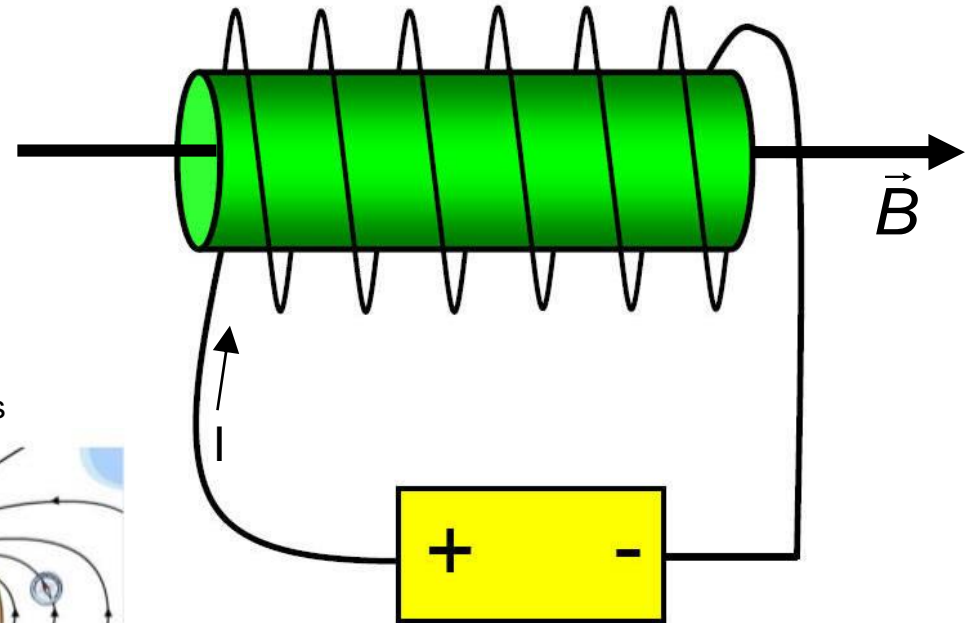
Pour produire un Champ Magnétique

Champ magnétique terrestre ~ 0.5 Gauss

Aimant permanent
1 - 10 000 Gauss



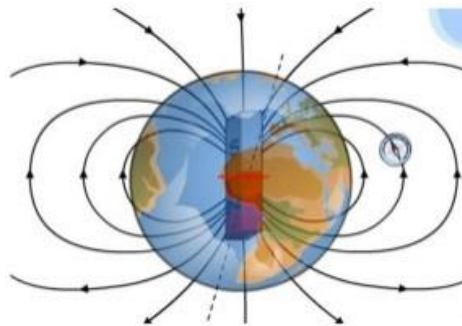
Bobine magnétique (Solenôïde)
Force variable

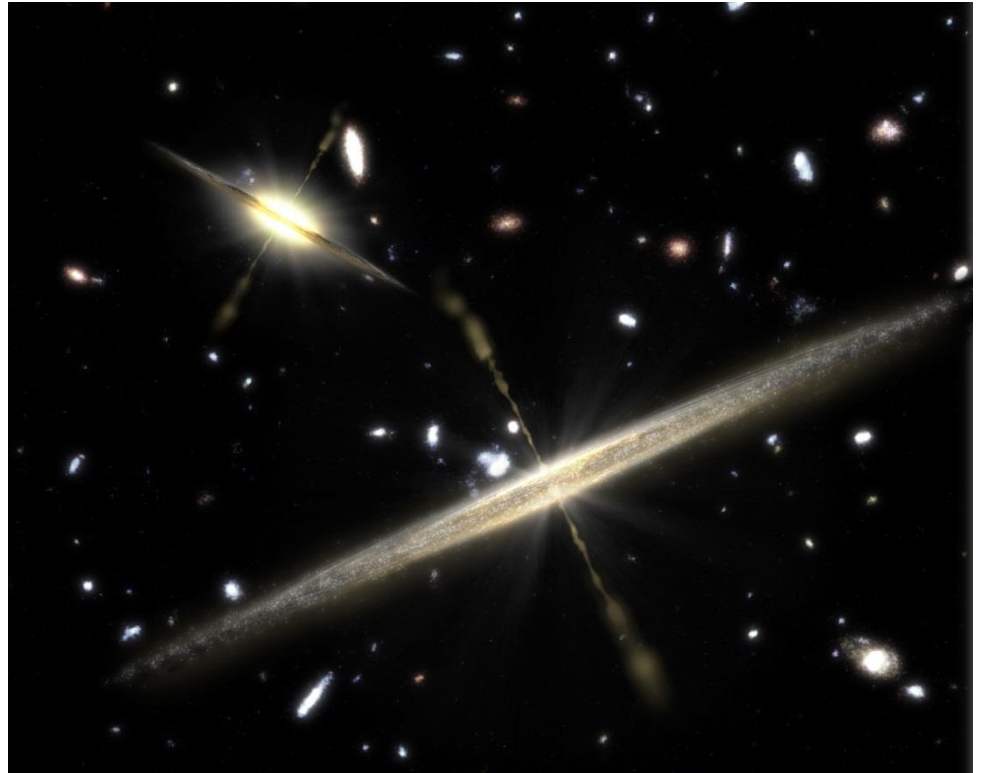
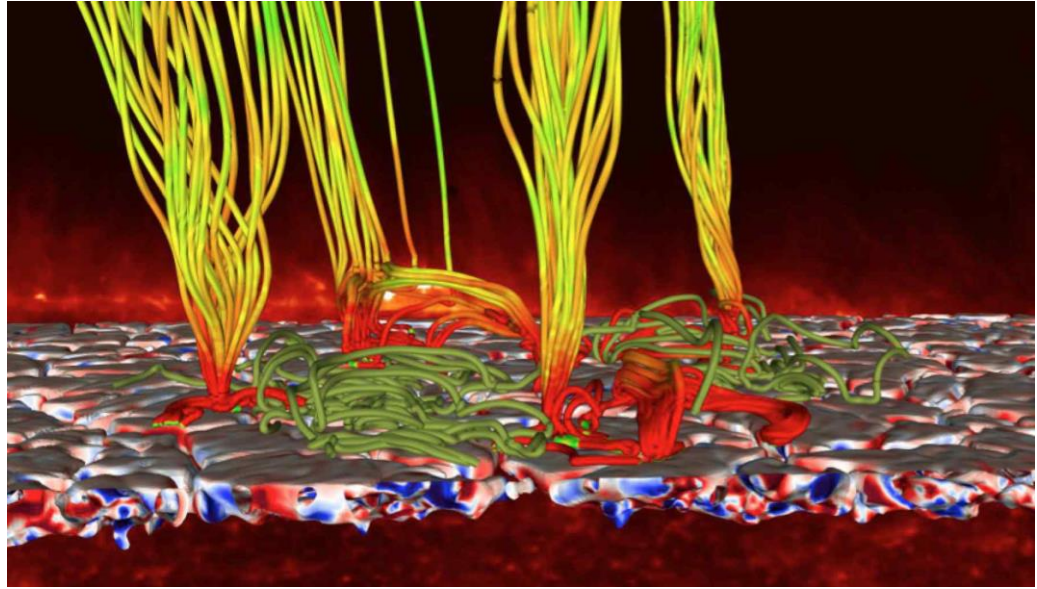
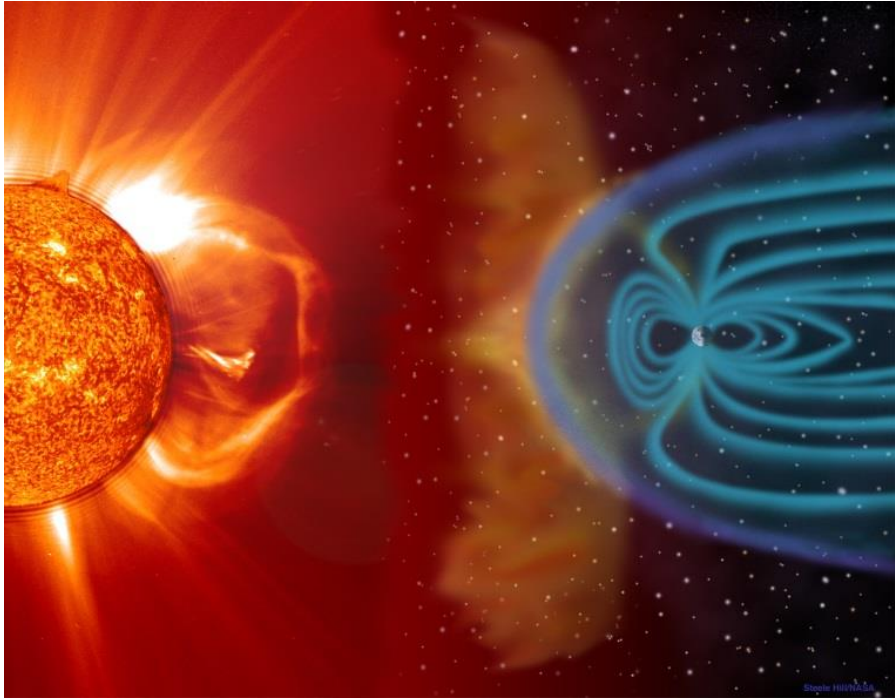


dynamo
vélo, EDF



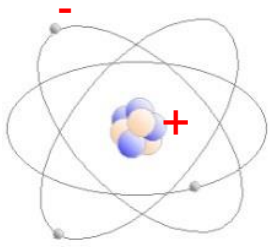
dynamo inverse
planètes, étoiles



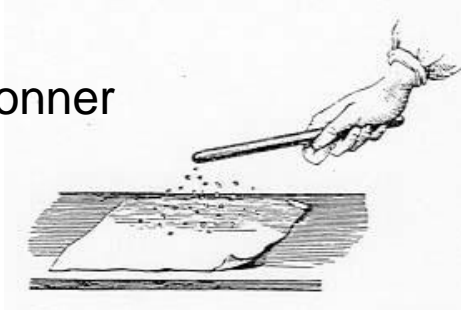


Création de particules chargée

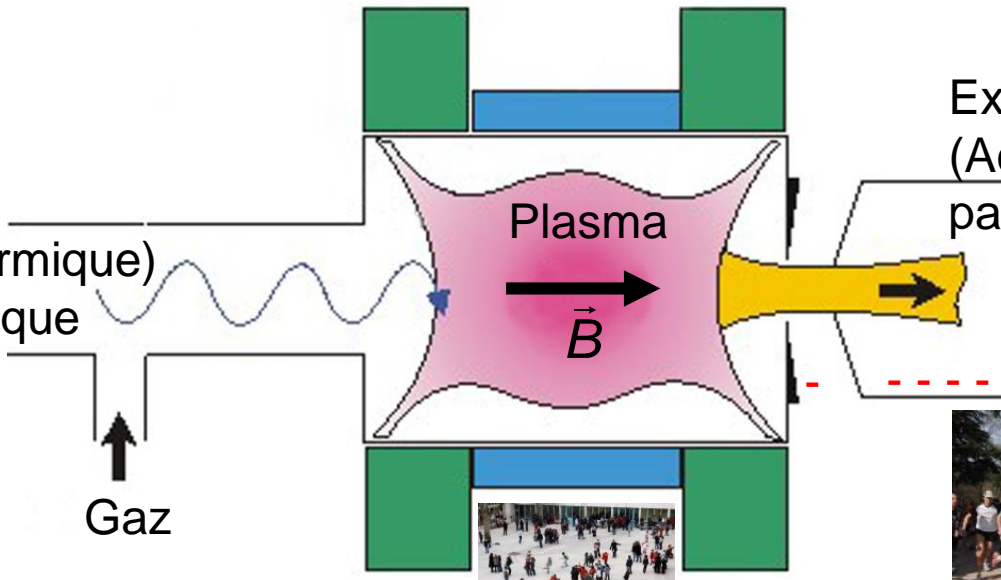
atome neutre → enlever 1 électron ou plus → particules chargées



→ Frotter, Chauffer, Collisionner



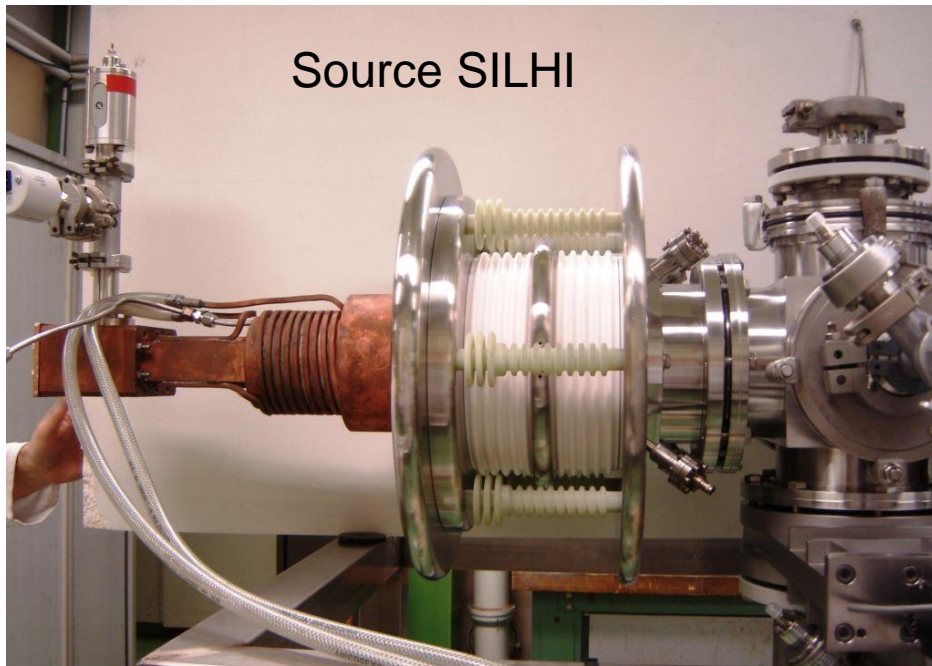
Chauffage (agitation thermique)
par onde électromagnétique



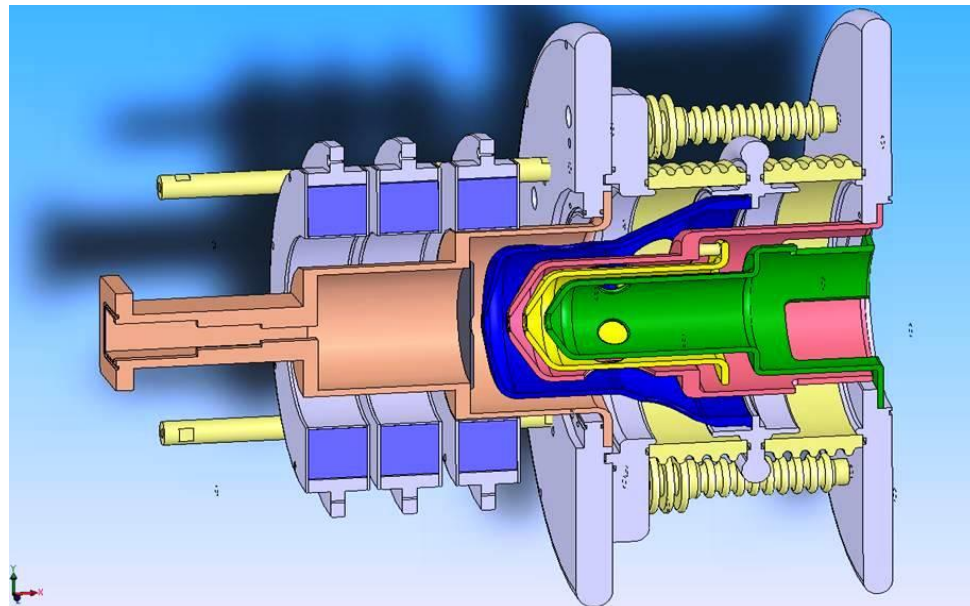
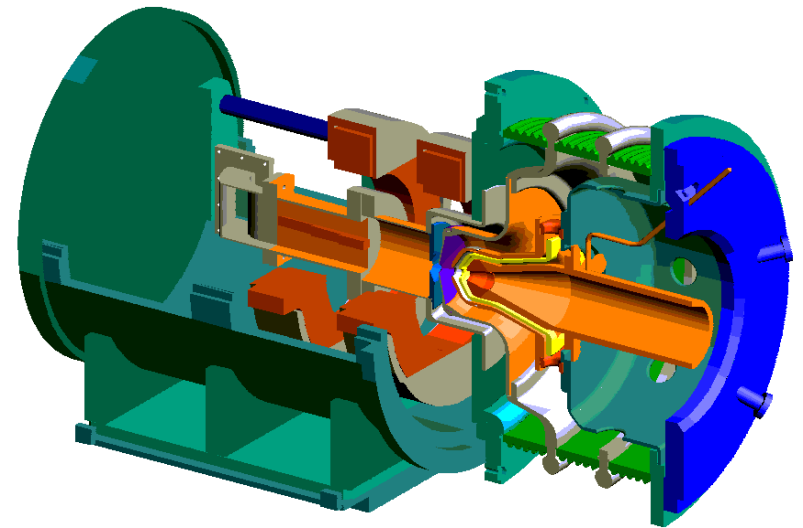
Bobines magnétiques
(ECR Resonance Cyclo Electronique)



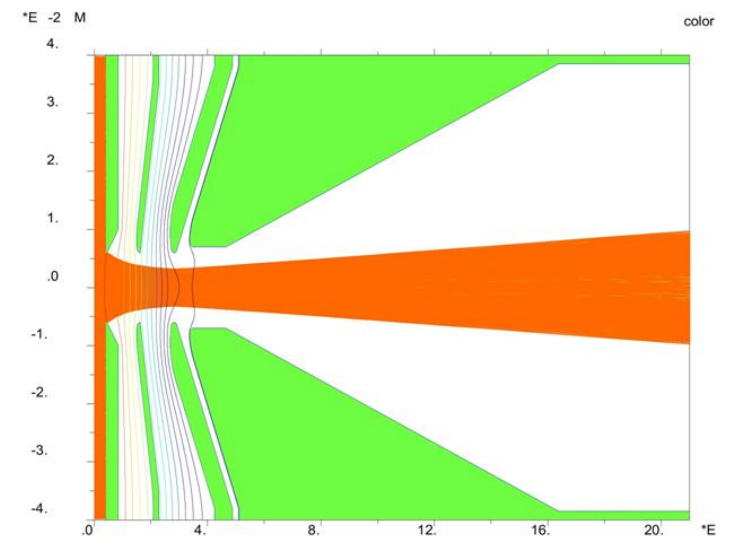
Source SILHI



Source IFMIF

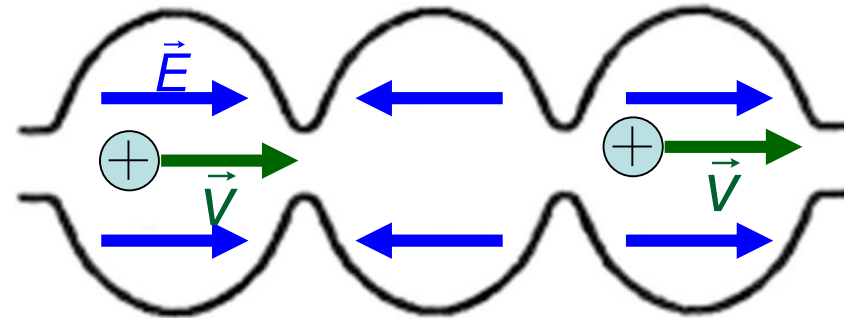


Extraction IFMIF

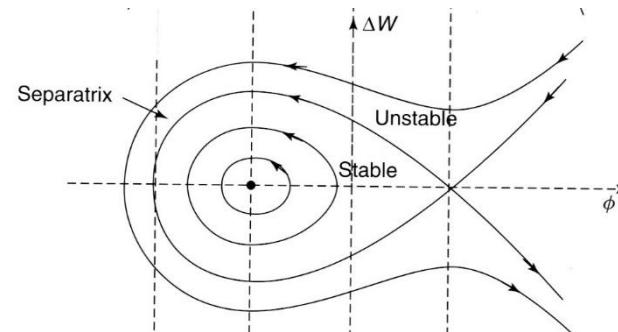
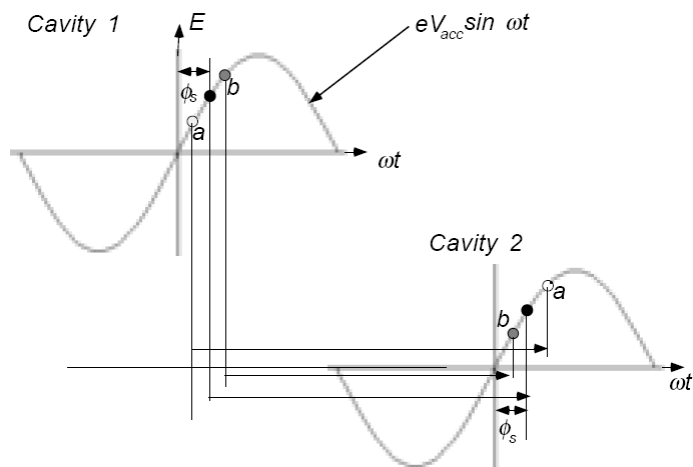


Accélération

Cavité RF



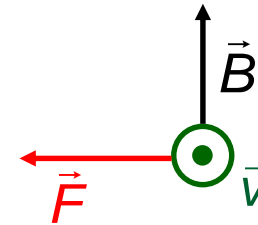
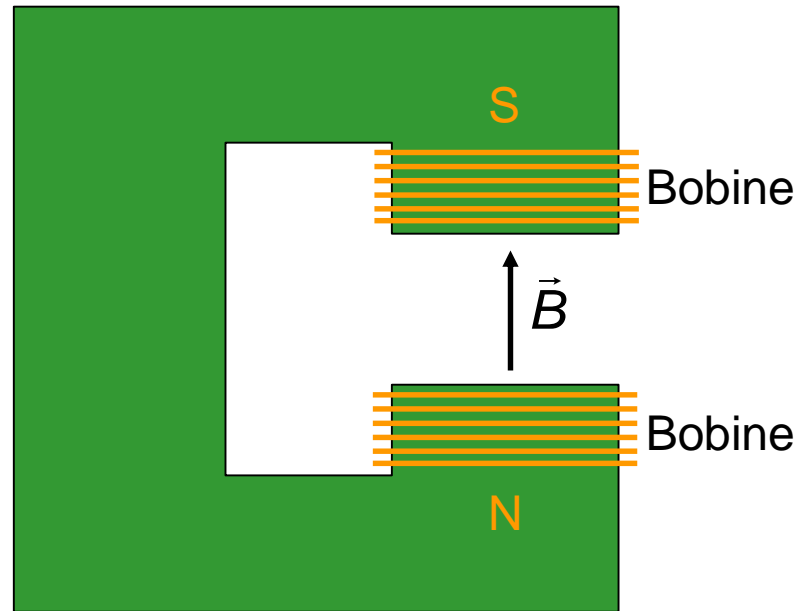
Accélération par \vec{E}_{RF} \Rightarrow Mise en paquets (focalisation longitudinale)



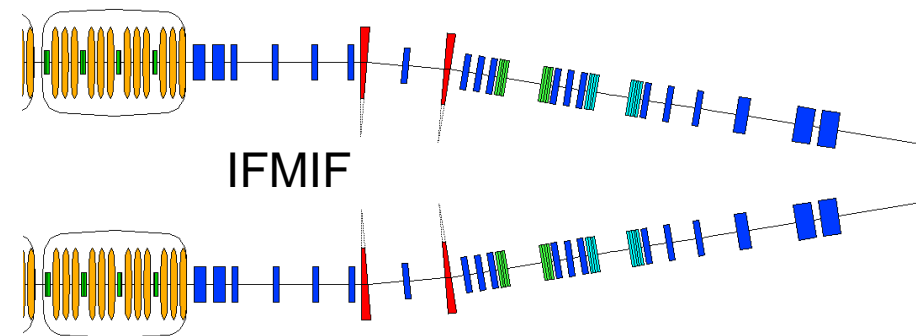
Oscillations longitudinales (synchrotron) avant-arrière

Guidage

Dipôle



SOLEIL

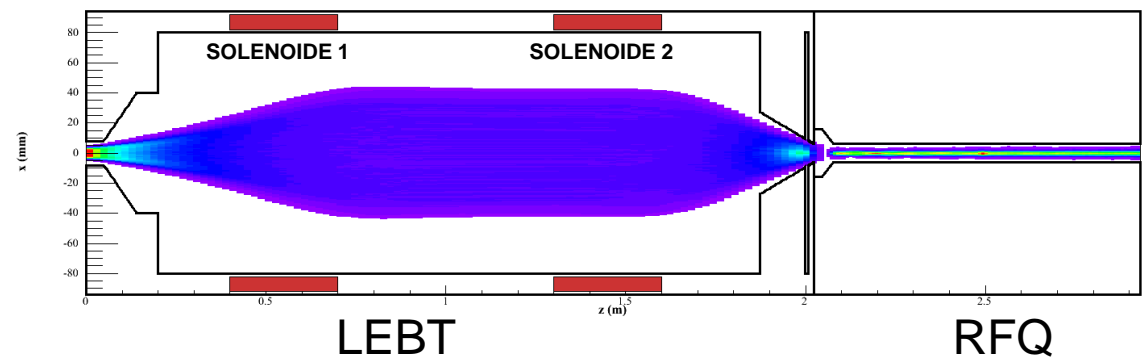
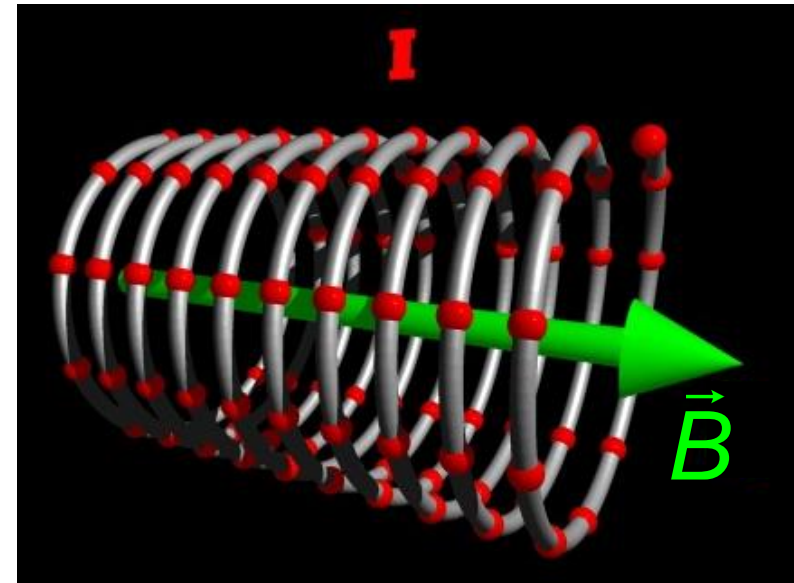
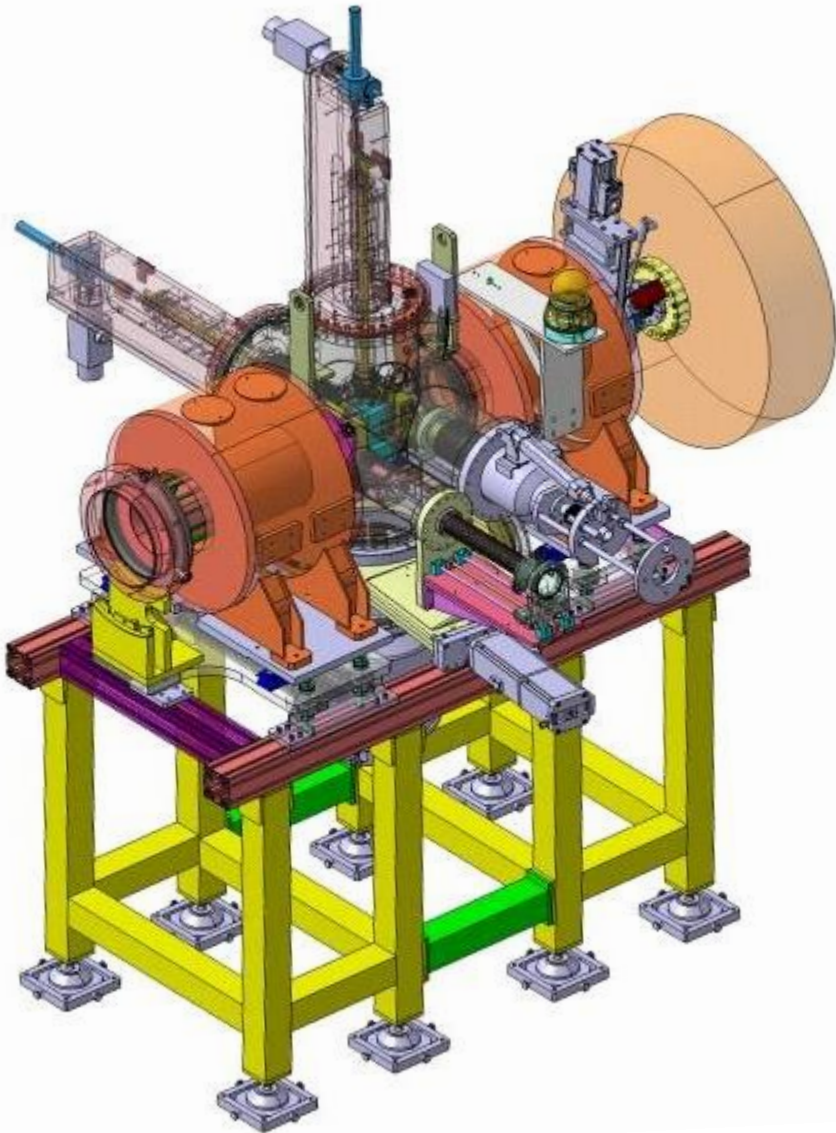


Guidage \Rightarrow Trajectoire de référence

Focalisation

Solenoides

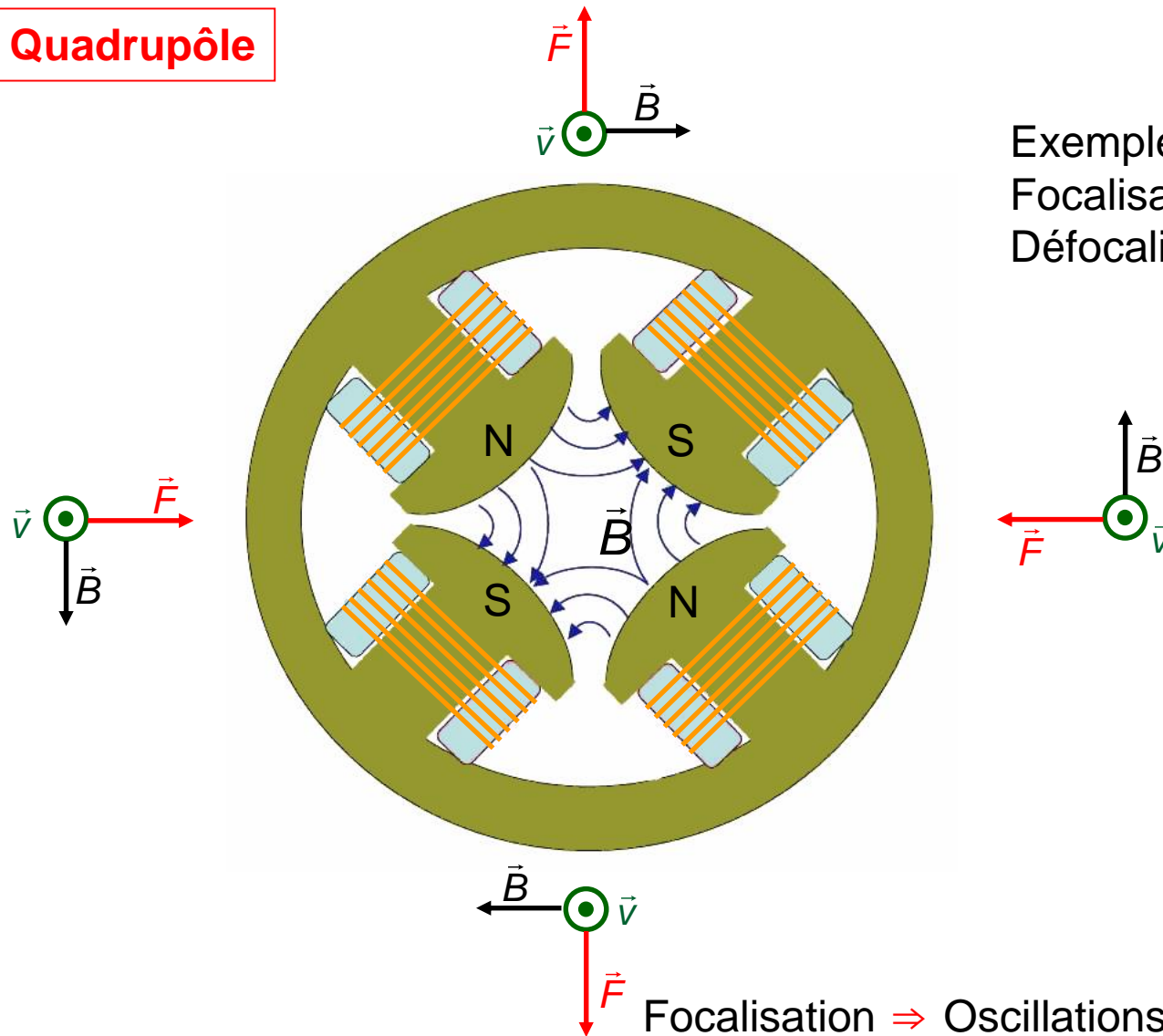
LEBT IFMIF



Focalisation \Rightarrow Oscillations transverses (betatron)

Focalisation

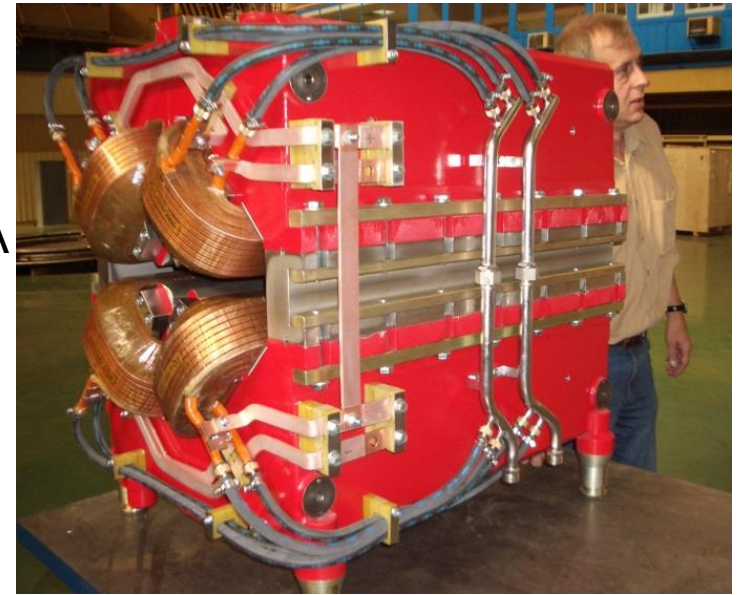
Quadrupôle



SOLEIL

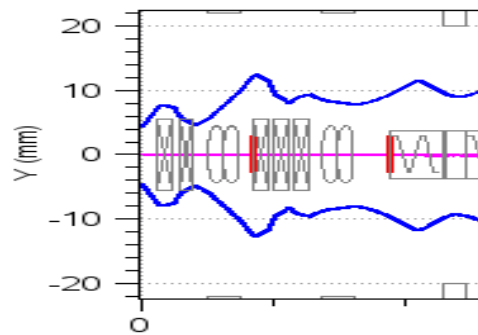
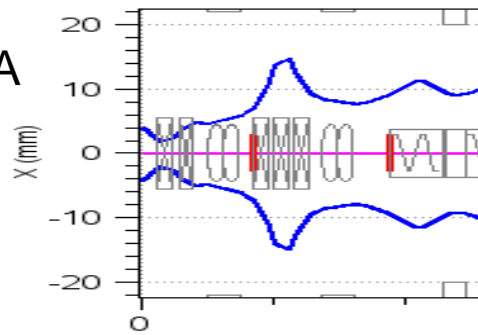


PETRA

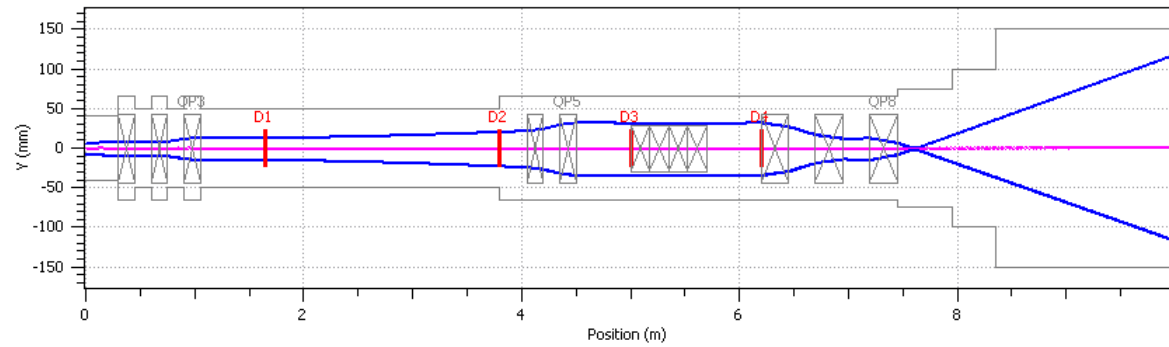
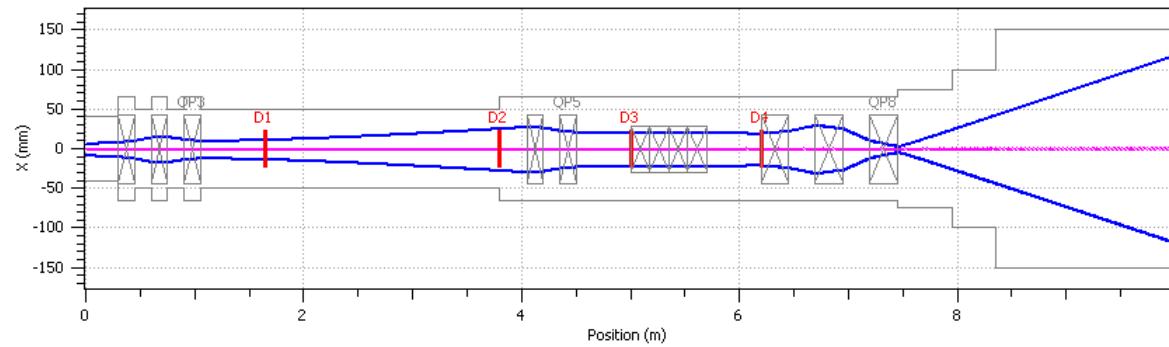


MEBT

IFMIF-EVEDA



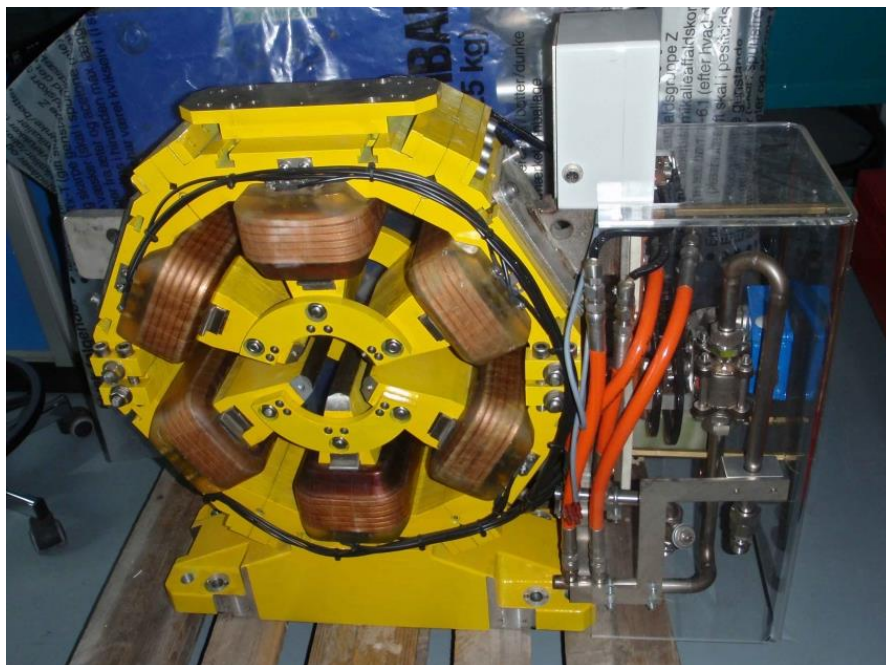
HEBT



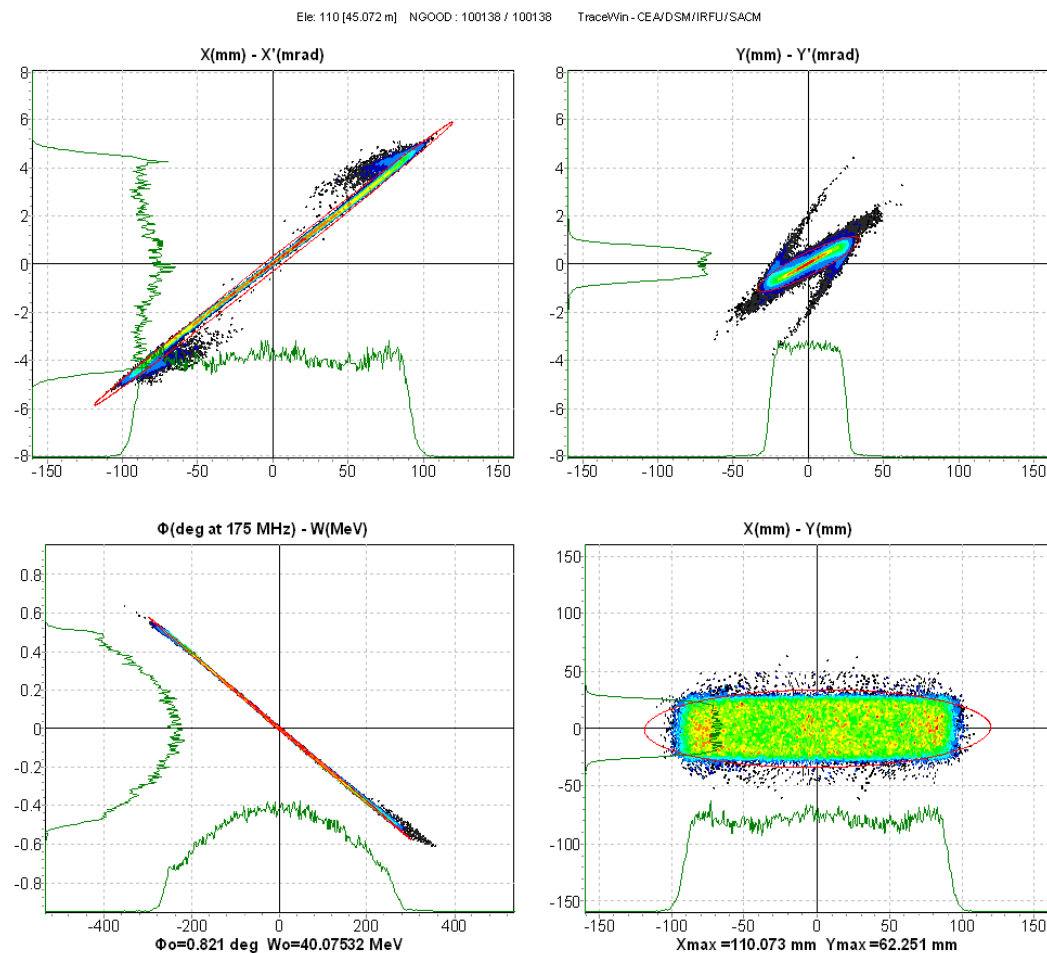
Sextupôle, Octupôle, Décapôle, Dodécapôle

Focalisation plus forte au bord qu'au centre

SOLEIL

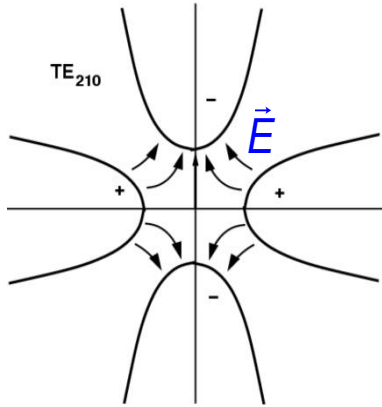


IFMIF
Tache Faisceau sur cible
avec 2 octupôles et 2 dodécapôles

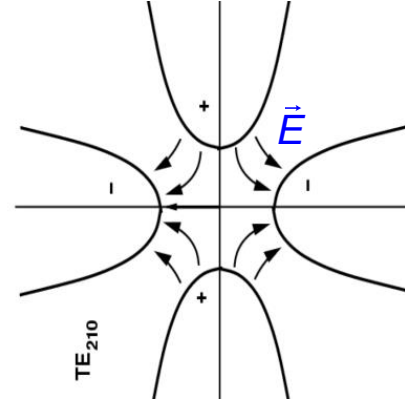


Accélération et Focalisation

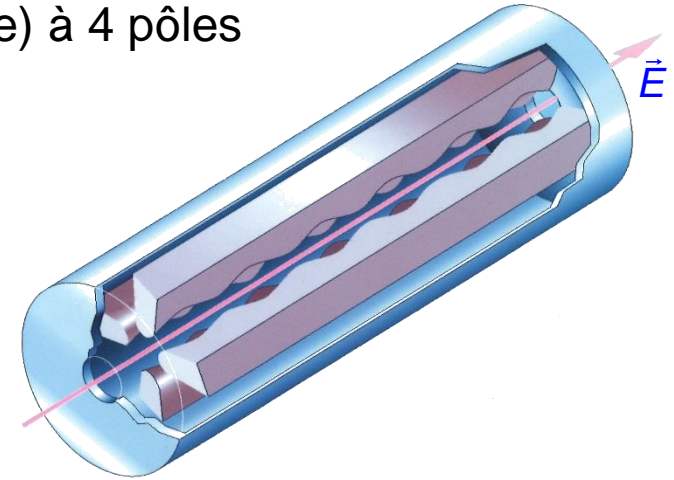
RFQ: Radio Frequency Quadrupole → Cavité RF (électrique) à 4 pôles



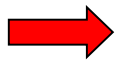
Focalisation en horizontal
Défocalisation en vertical



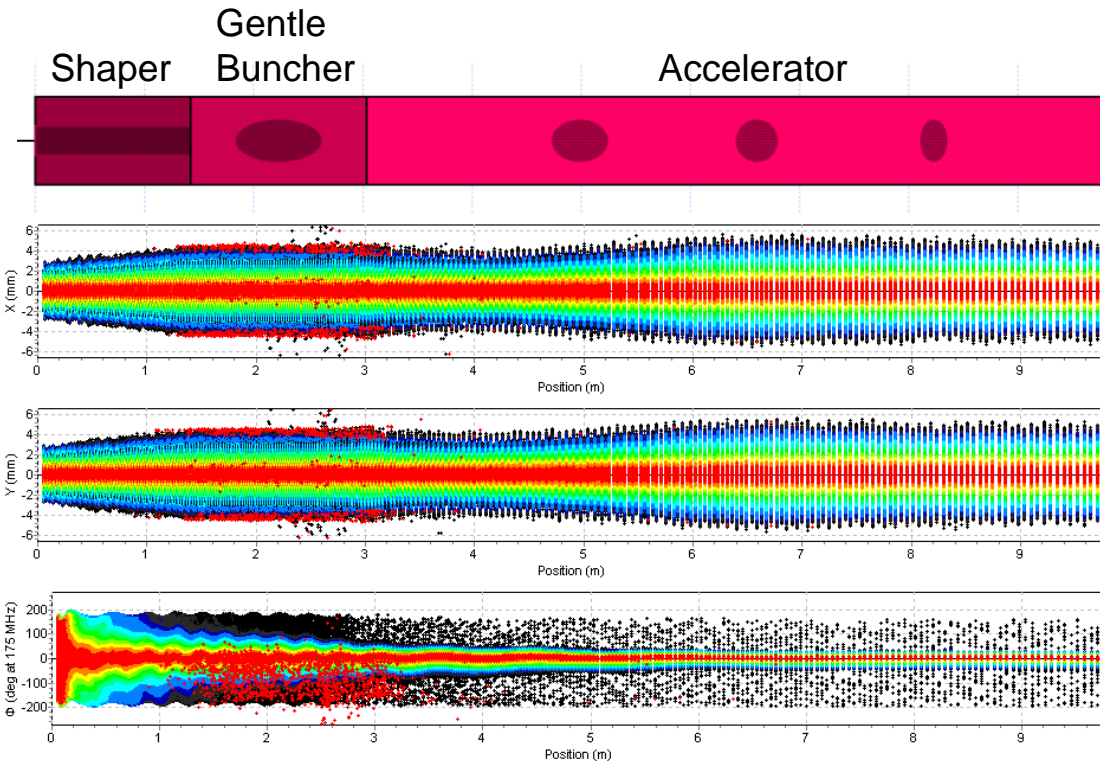
Défocalisation en horizontal
Focalisation en vertical



Modulation des pôles ⇒
Champ longitudinal accélérant

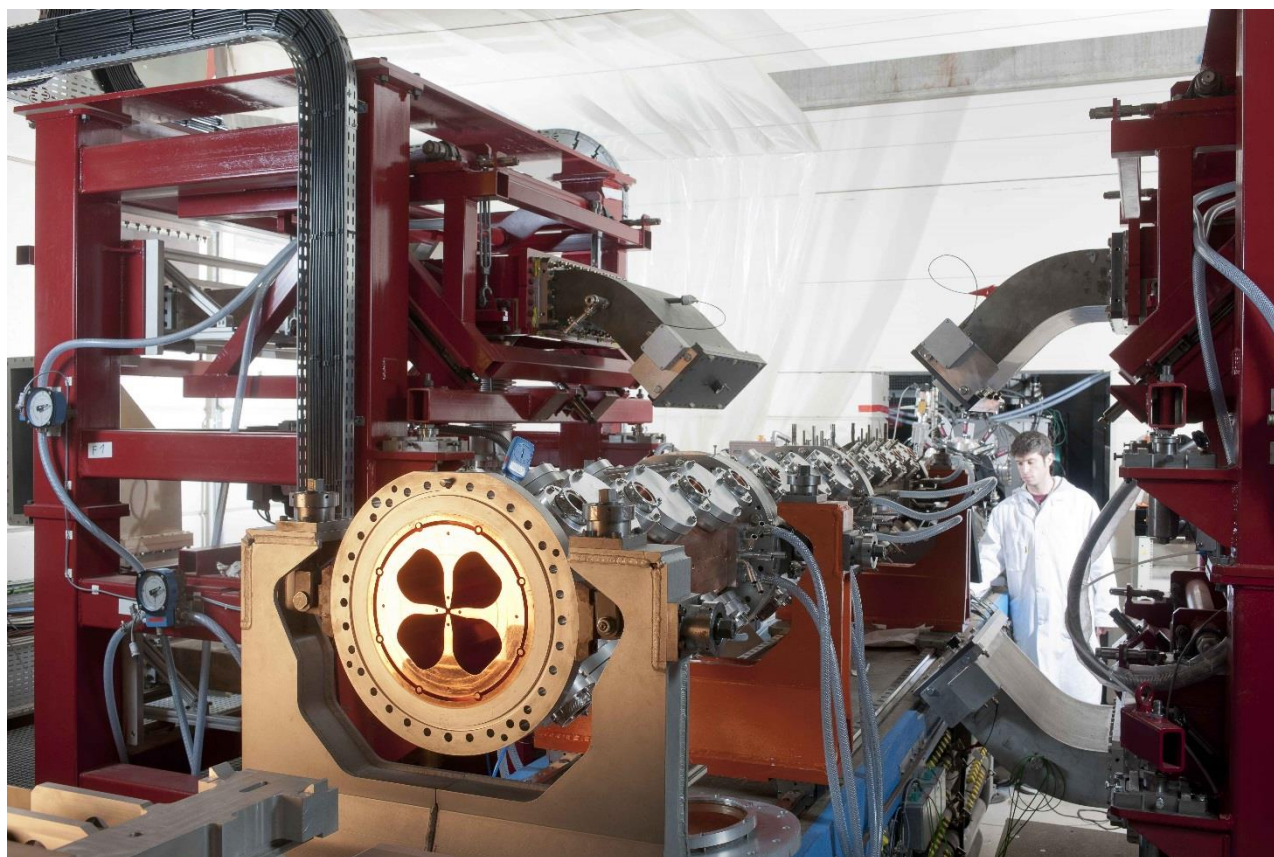
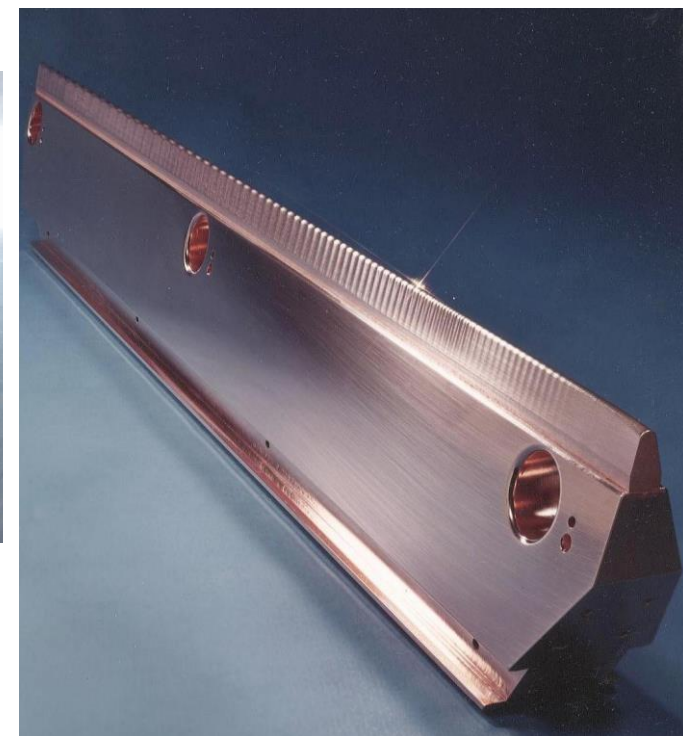
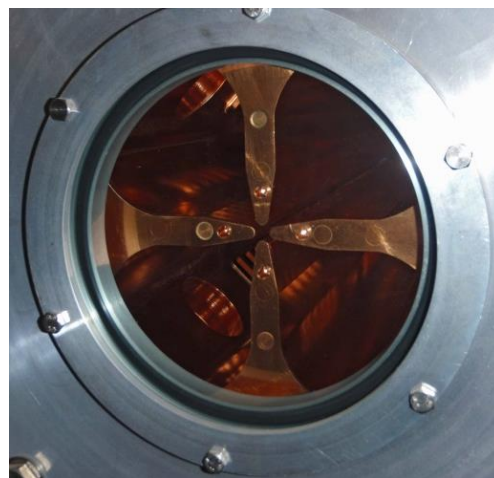
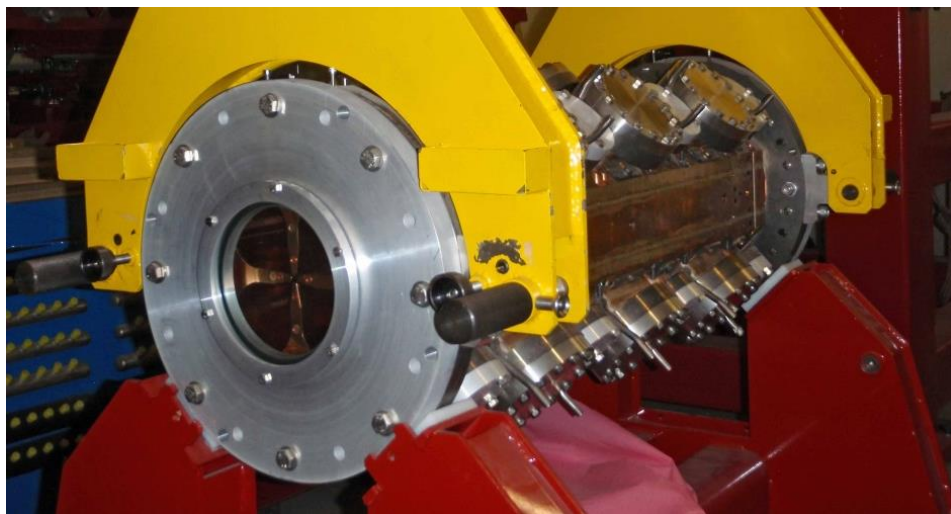


Accélère et focalise en même temps
Utile pour basse énergie
où la charge d'espace est la plus forte



RFQ IFMIF

RFQ IPHI

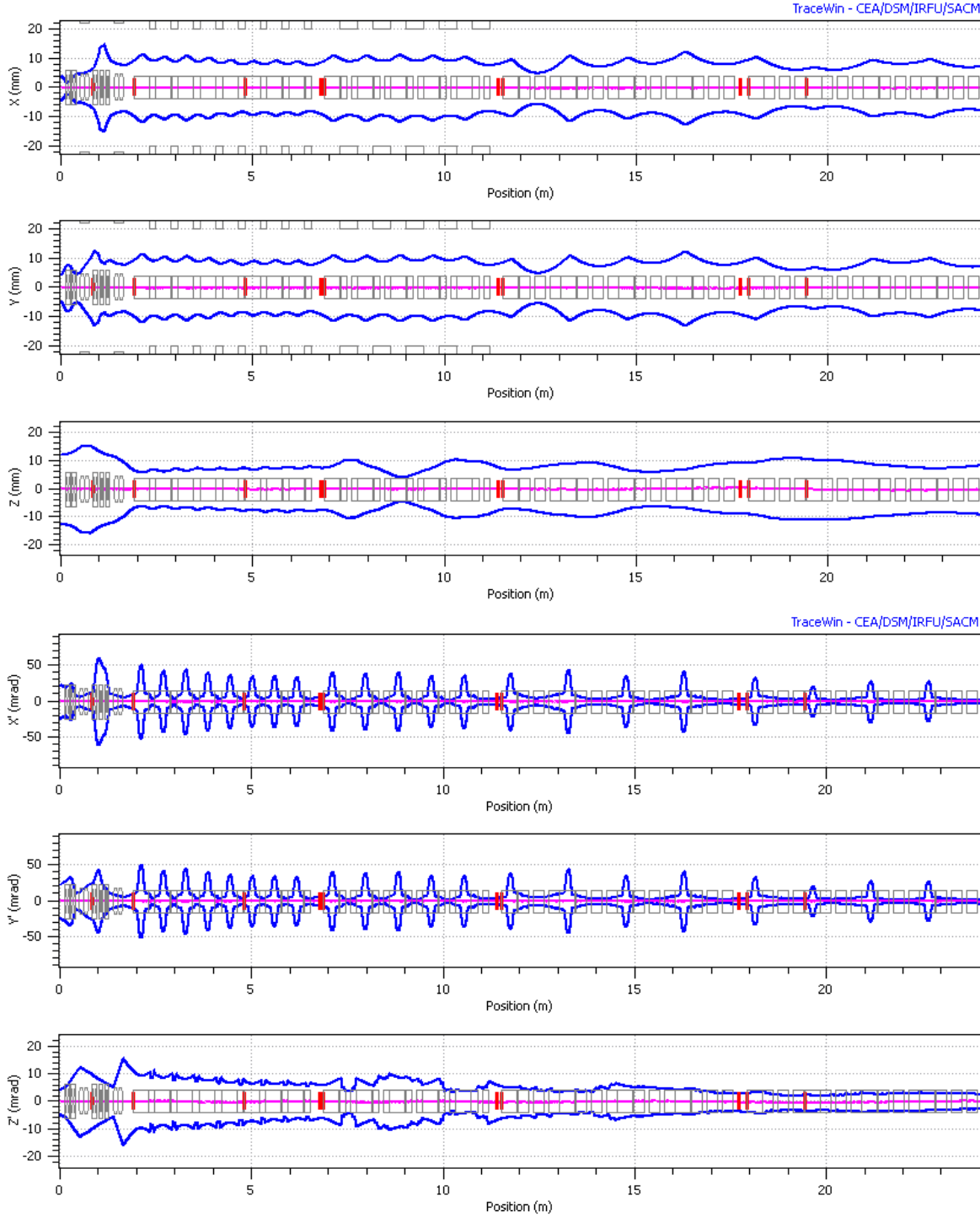


Faisceau à 6 dimensions

3 tailles + 3 angles



Variations des dimensions du faisceau, le long du MEBT + HWR-Linac

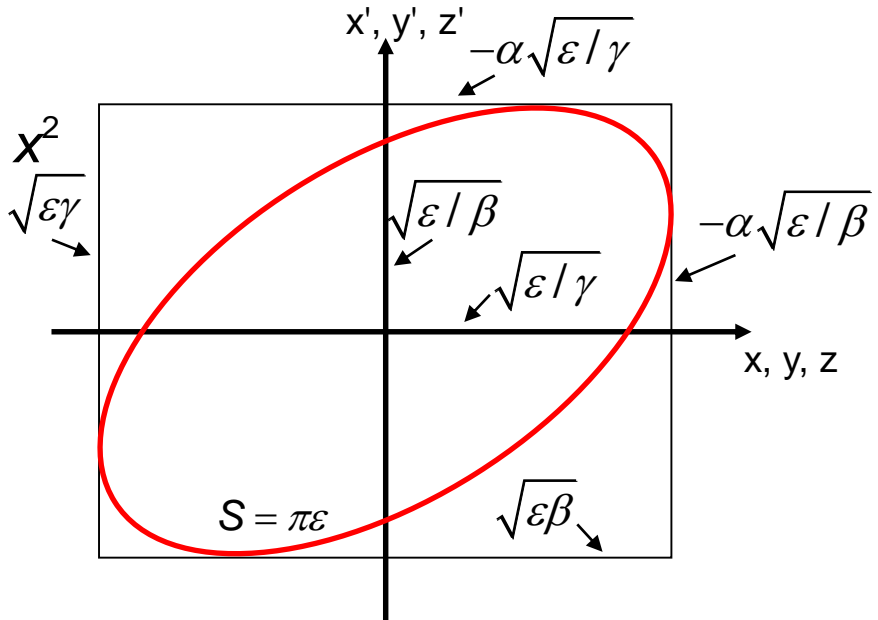


Espace de phase

Ellipse de phase → 3 paramètres : orientation, proportion, taille

Paramètres de Twiss : α, β, γ **et** Emittance ε

$$\alpha = -\frac{\beta'}{2} \quad \gamma = \frac{1 + \alpha^2}{\beta} \quad \varepsilon = \gamma y^2 + 2\alpha y y' + \beta y'^2$$



Ellipse de concentration

$$\langle x^2 \rangle = \varepsilon\beta$$

$$\langle x'^2 \rangle = \varepsilon\gamma$$

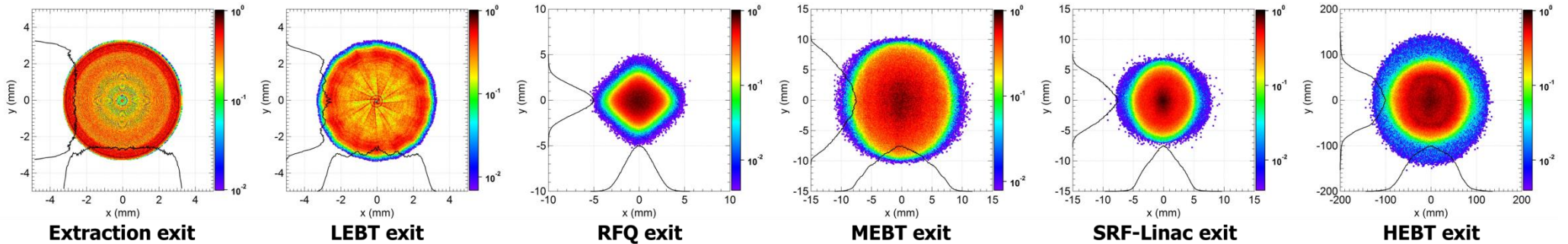
$$\langle xx' \rangle = \varepsilon\alpha$$

$$\varepsilon = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

Oscillations dans l'espace de phase à 6 dimensions !!

Physique du faisceau

Faisceau dans l'espace transverse le long de l'accélérateur IFMIF



Quelques problématiques

Acc. linéaire : faisceau très intense et puissant,
 \sim MWatt dans \sim cm³, pertes $< 10^{-6}$

Acc. circulaire : résonances et simplecticité
extrême finesse et grande stabilité

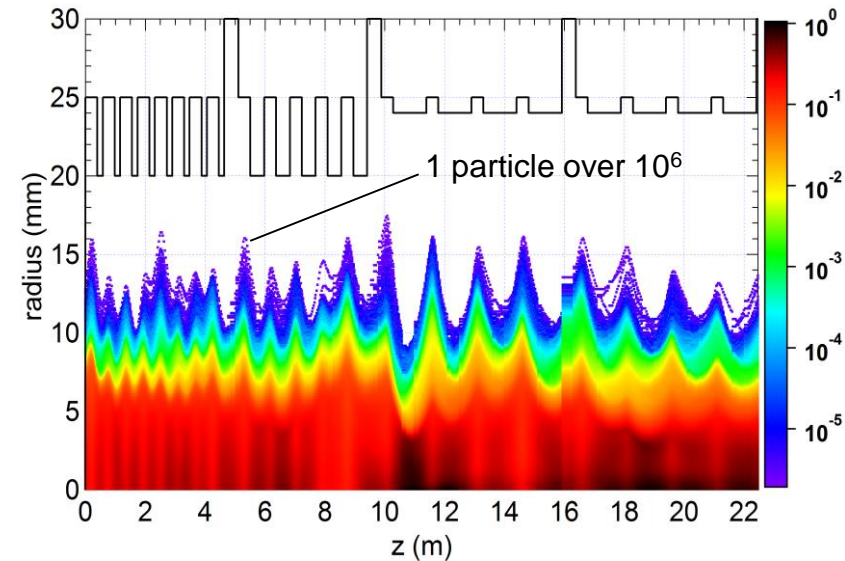
Quelques sujets de recherche

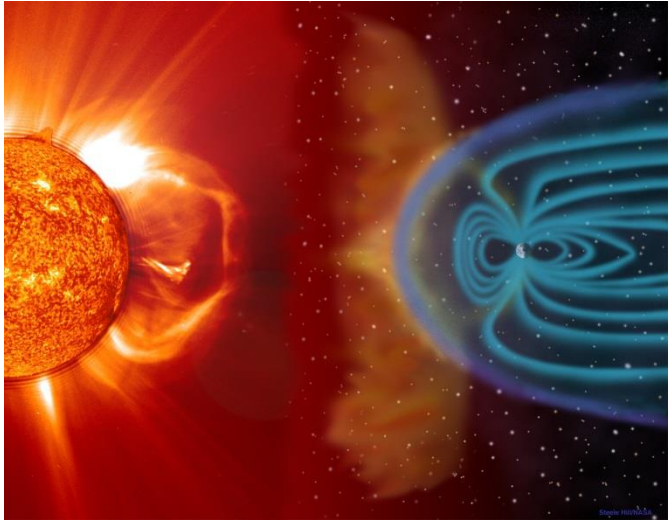
- Aspects fondamentaux du faisceau :

Charge d'espace et compensation, Formation de halo, Instabilités

- Design d'accélérateurs et élaboration de leurs Modèles Théoriques

Optimisation et réglage à 10^{-6} près, Simplecticité





Merci de votre attention

