

# Dynamique longitudinale

# L'accélération

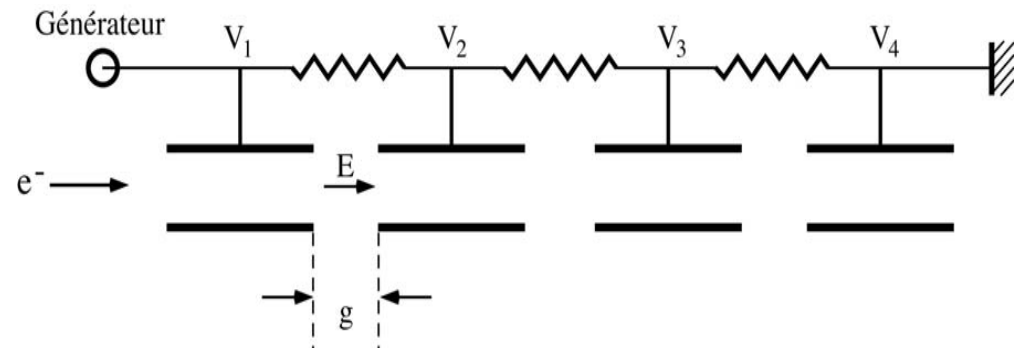
L'accélérateur doit fournir de l'énergie cinétique aux particules chargées et donc augmenter le momentum des particules. Pour ceci, nous avons besoin d'un champ électrique  $E$ , de préférence dans la direction du momentum

## Accélérateur électrostatique

Gain:  $n.e.\Delta V$

Limite:  $V_G = \sum V_i$

Décharges !

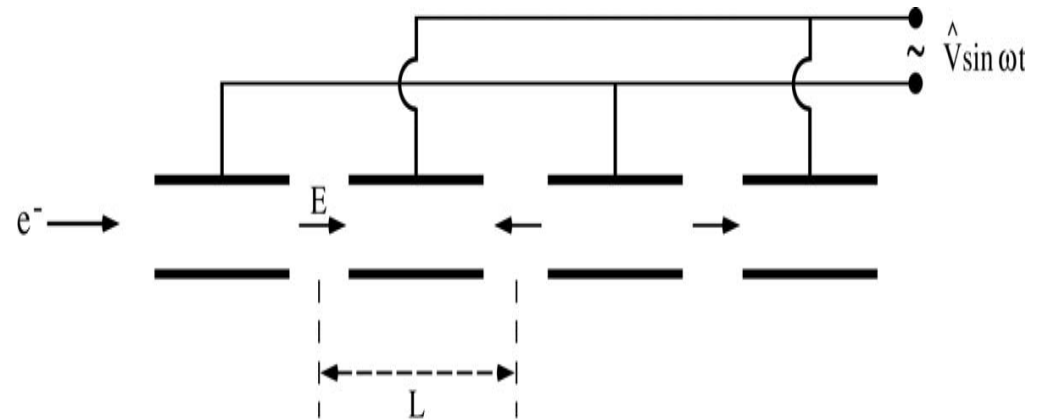


Préférable d'utiliser des champs RF !

# Champs accélérateurs RF:

## Structure Wideroe

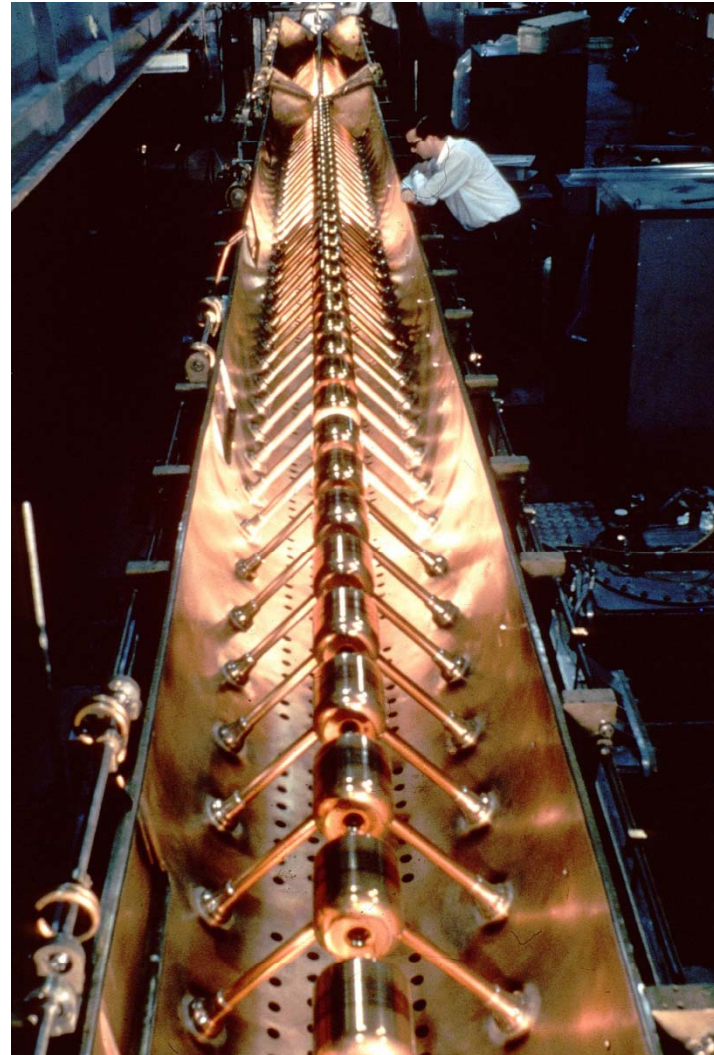
Synchronisme:  $L = vT/2$



Lorsque la vitesse des particules augmente, la longueur des tubes augmente! Efficacité.

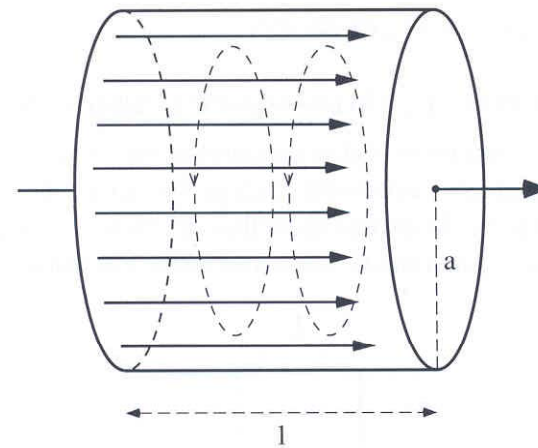
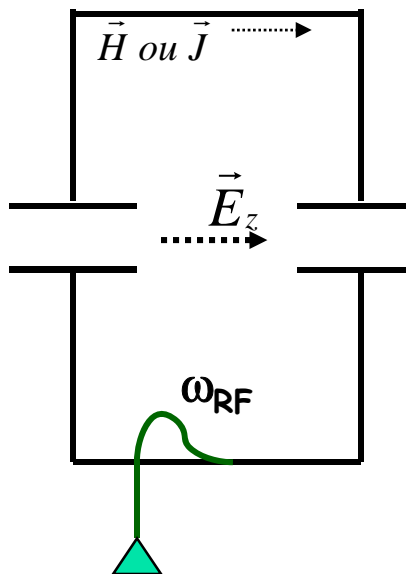
# Linac basse énergie

Structure  
linéaire utilisée  
au CERN



# Cavités résonnantes (1)

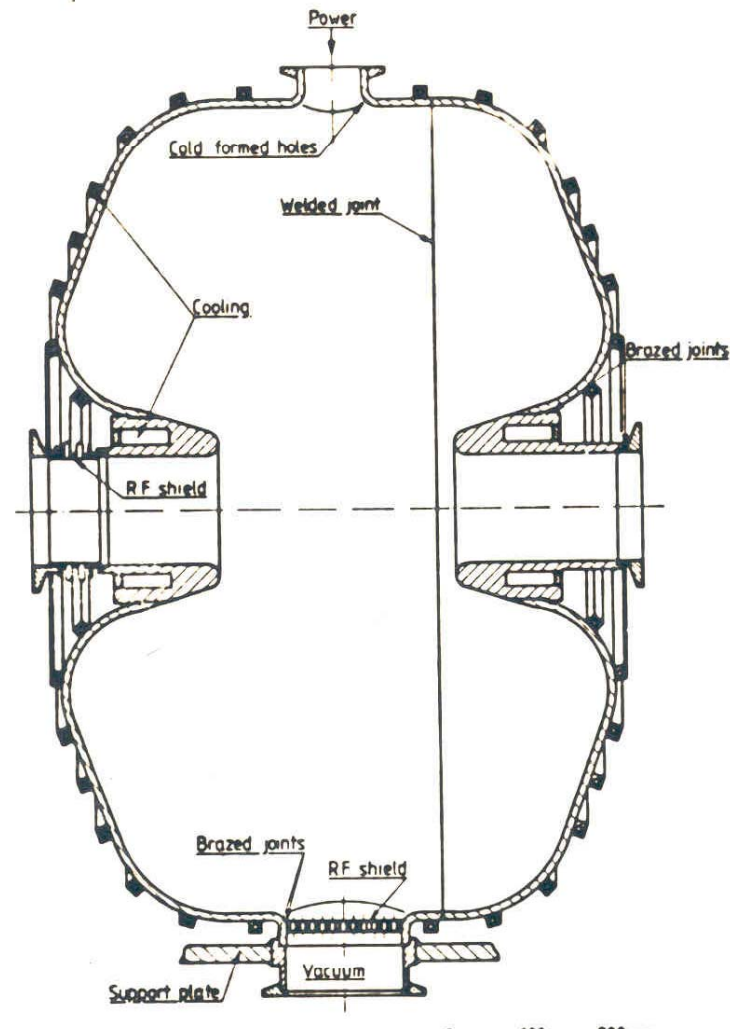
La fréquence de résonance de la cavité est adaptée a la fréquence du générateur RF.



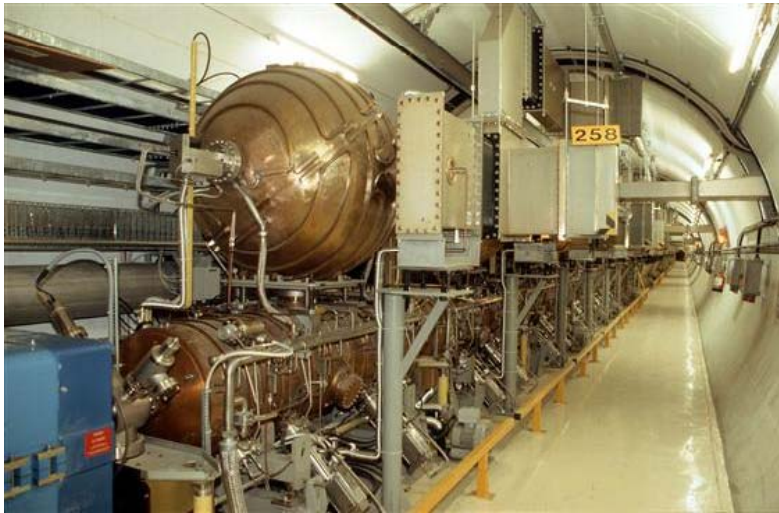
# Cavités résonnantes (2)

Géométrie plus sophistiquée pour améliorer les performances de la cavité.

Nez: E autour de l'axe  
Arrondi: pertes, multipacting



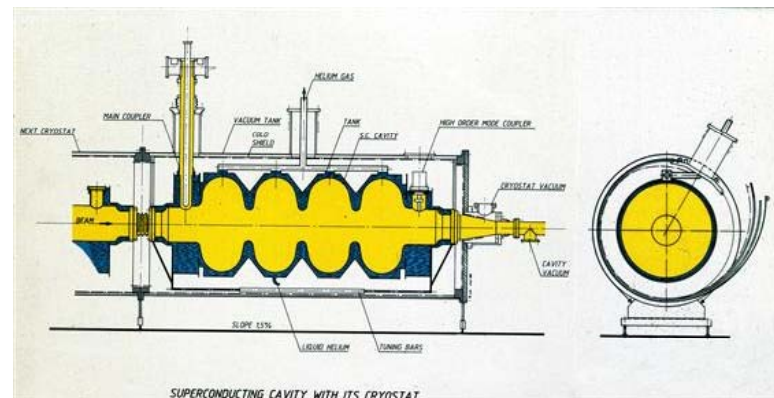
# Cavités RF:



LEP "NC"

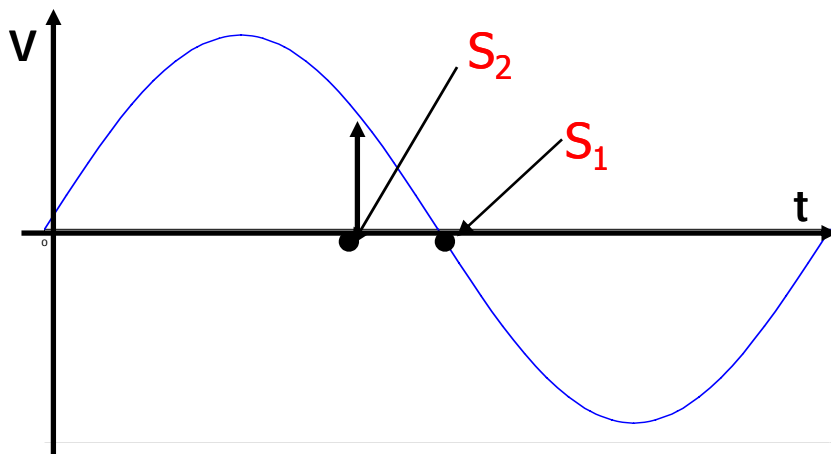


LHC "SC"



# Accélération ou compensation

- Nous devons donner de l'**énergie** aux particules soit pour les **accélérer** soit pour **compenser les pertes** survenues pendant une révolution.
- L'énergie n'est pas fournie par des plaques électrostatiques, mais par des **cavités RF**.
- La **particule idéale** doit arriver exactement au même moment dans la cavité après chaque tour (**particule synchrone**).



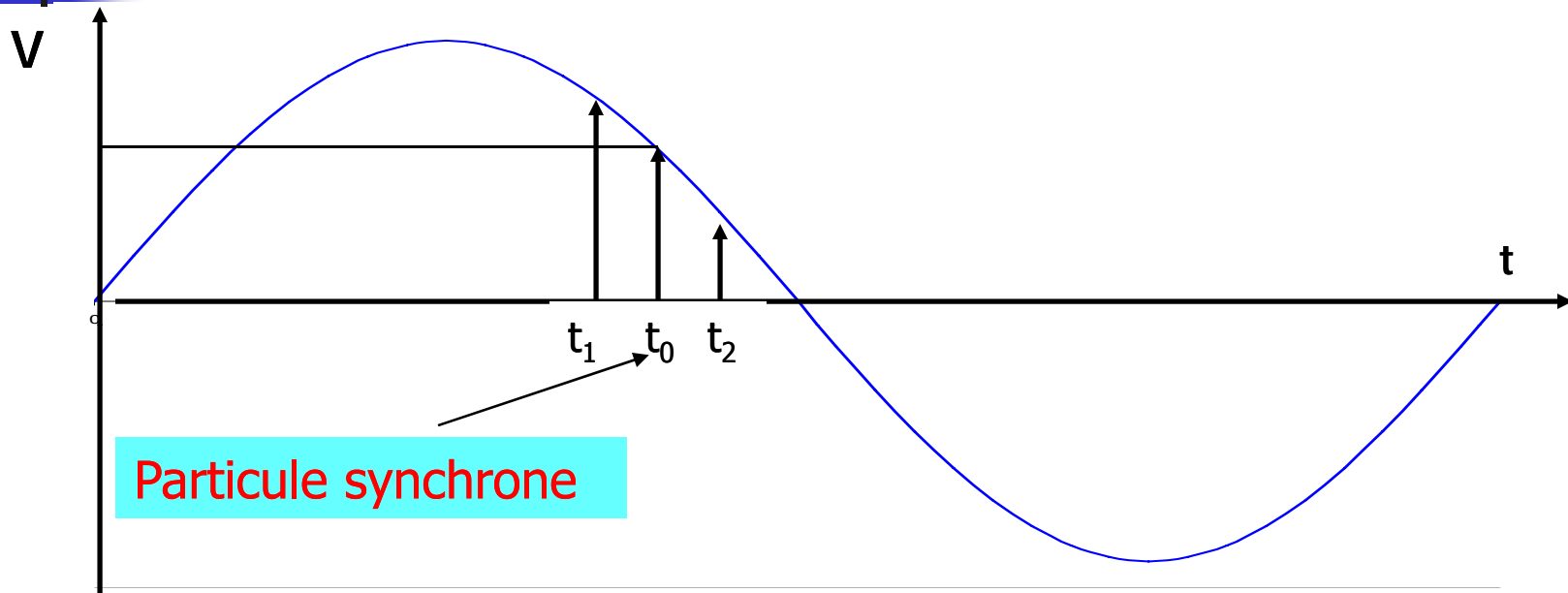
Equilibre:  $f_{RF} = h \cdot f_{rev}$

$$f_{rev} = (1/2\pi) \cdot (q/m\gamma) \cdot B$$

**Energie et champ magnétique sont liés !**



# Particules “off momentum”



Particule idéale arrive à  $t_0 \rightarrow V = V_0 \rightarrow$  o.k.

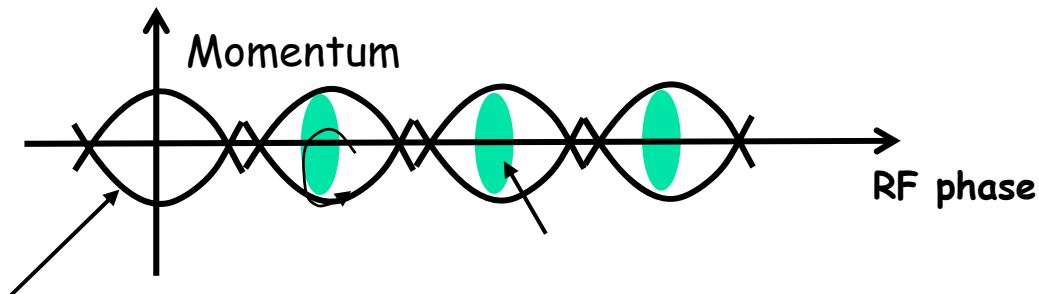
$\Delta p/p > 0$  chemin plus long  $\rightarrow$  arrive en retard,  $t_2 \rightarrow V_2 < V_0$

$\Delta p/p < 0$  chemin plus court  $\rightarrow$  arrive en avance,  $t_1 \rightarrow V_1 > V_0$

# Les paquets de particules (bunches):

Le système RF groupe les particules en paquets

Avec  $f_{\text{RF}} = h \cdot f_{\text{rev}}$ , il y a donc la possibilité d'avoir "h" paquets de particules dans la machine.

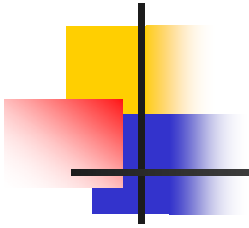


LHC:  $h = 35640$

$f_{\text{RF}} = 400 \text{ MHz}$

$V_{\text{RF}} = 16 \text{ MV}$

2808 paquets par faisceau



# La radiation synchrotron

# Radiation synchrotron $U_0$

- Particules chargées en mouvement dans un champ magnétique (courbure) émettent de la radiation synchrotron !

avec  $\gamma = E/E_0 = m/m_0$  et  $m_0$  est la masse au repos

Perte d'énergie:  
 $eU_0 = A \cdot \gamma^4/\rho$

$m_0$  proton = 0.938 GeV/c<sup>2</sup>  
 $m_0$  electron = 0.511 MeV/c<sup>2</sup>  
 $(m_{o-p}/m_{o-e})^4 = (1836)^4 \cong 10^{13}$

Collider	B (T)	E/beam (GeV)	$\gamma$	$eU_0$ (GeV)
LEP (e <sup>+</sup> e <sup>-</sup> )	0.12	100	196000	2.92
LHC (p-p)	8.3	7000	7500	0.00001

Cette puissance est bien réelle !

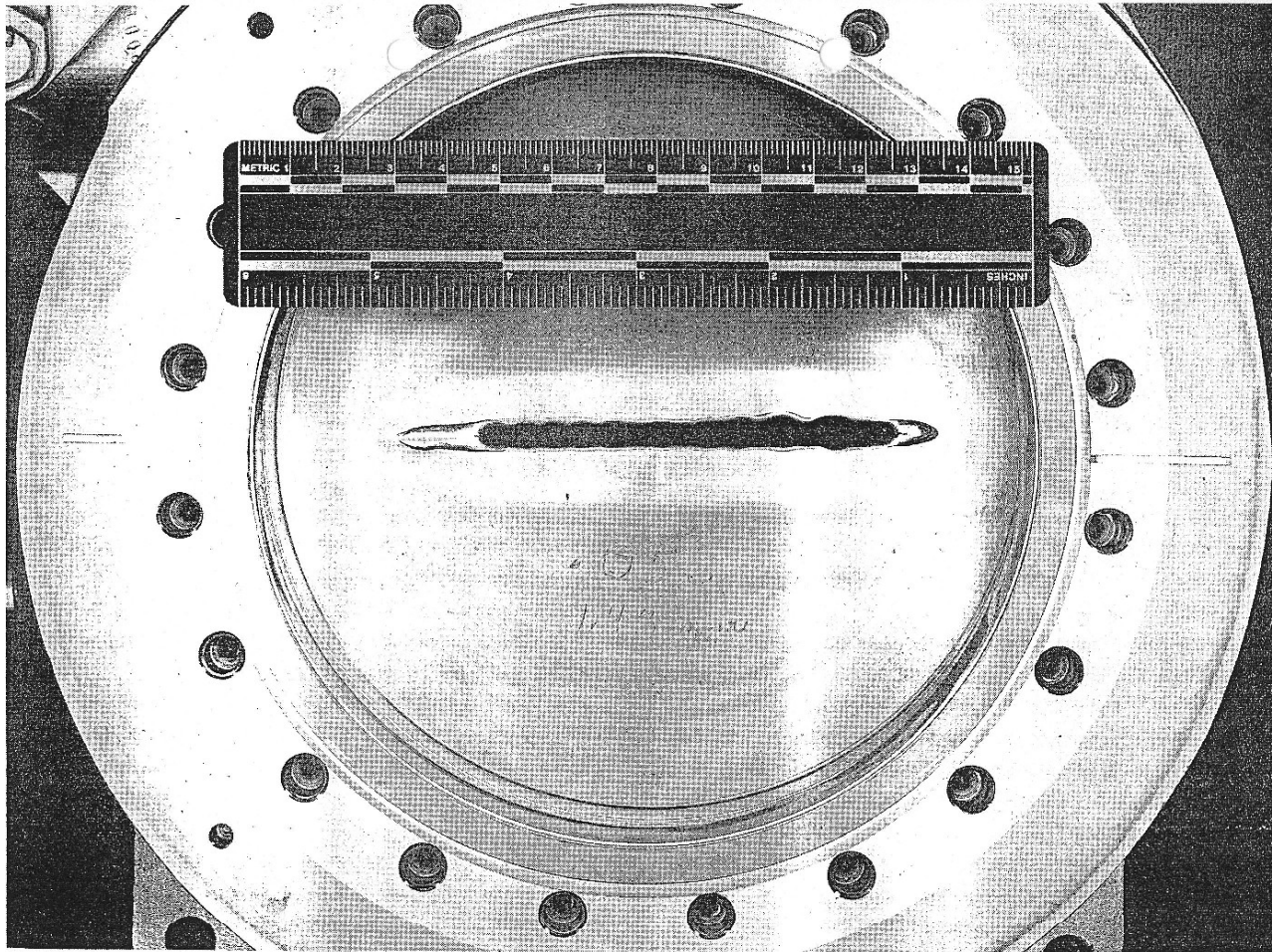
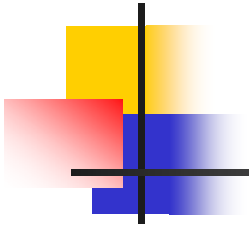


Fig. 12. Damaged X-ray ring front end gate valve. The power incident on the valve was approximately 1 kW for a duration estimated to 2–10 min and drilled a hole through the valve plate.

L. Rivkin  
CAS-Trieste2005



# La performance

# Collisionneur: la luminosité

$$dN/dt = L \times \sigma$$

$$[1/s] = [1/(cm^2 \cdot s)] \times [cm^2]$$

Taille du faisceau !

$$L = N_1 \cdot N_2 \cdot f \cdot k / (4 \cdot \pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y)$$

avec:

$N_{1,2}$  = Nombre de particules par paquet ( $1.15 \cdot 10^{11}$ )

$f$  = fréquence de révolution (11.245 kHz)

$k$  = nombre de paquets (2808)

$\sigma_{x,v}$  = dimension horizontale et verticale du faisceau (17  $\mu\text{m}$ )

$$\sigma = < 10^{-39} \text{ cm}^2$$

$$L = 10^{34} \text{ 1/(cm}^2 \cdot \text{s)}$$



# Performance optimale:

---

- Intensité maximale ( $N^2$ )
- Nombre de paquets
- Diminuer la taille du faisceau → **diminuer la fonction  $\beta$  !**

Création de régions spéciales autour des expériences:

**Les Insertions !**





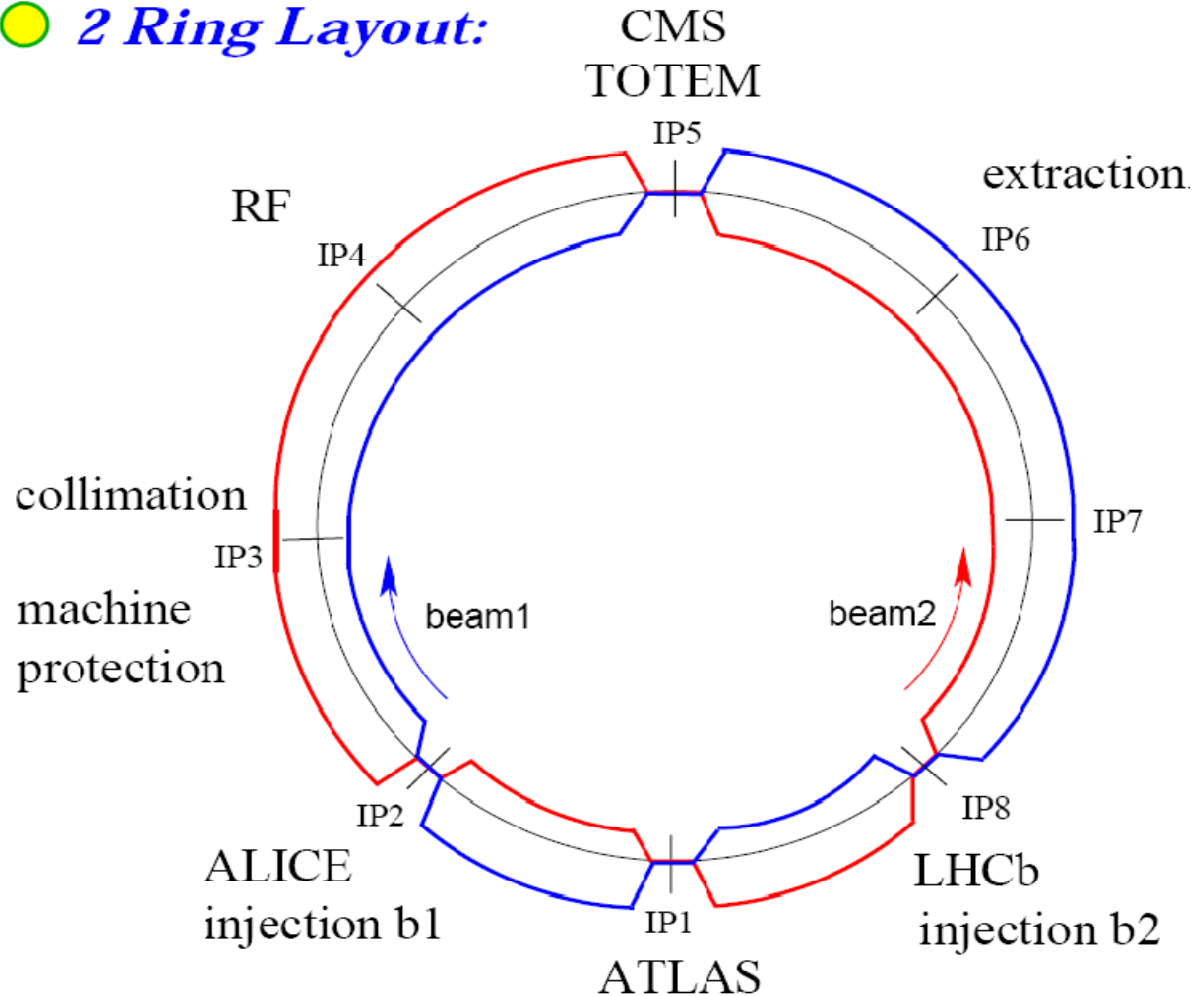
# Les insertions:

---

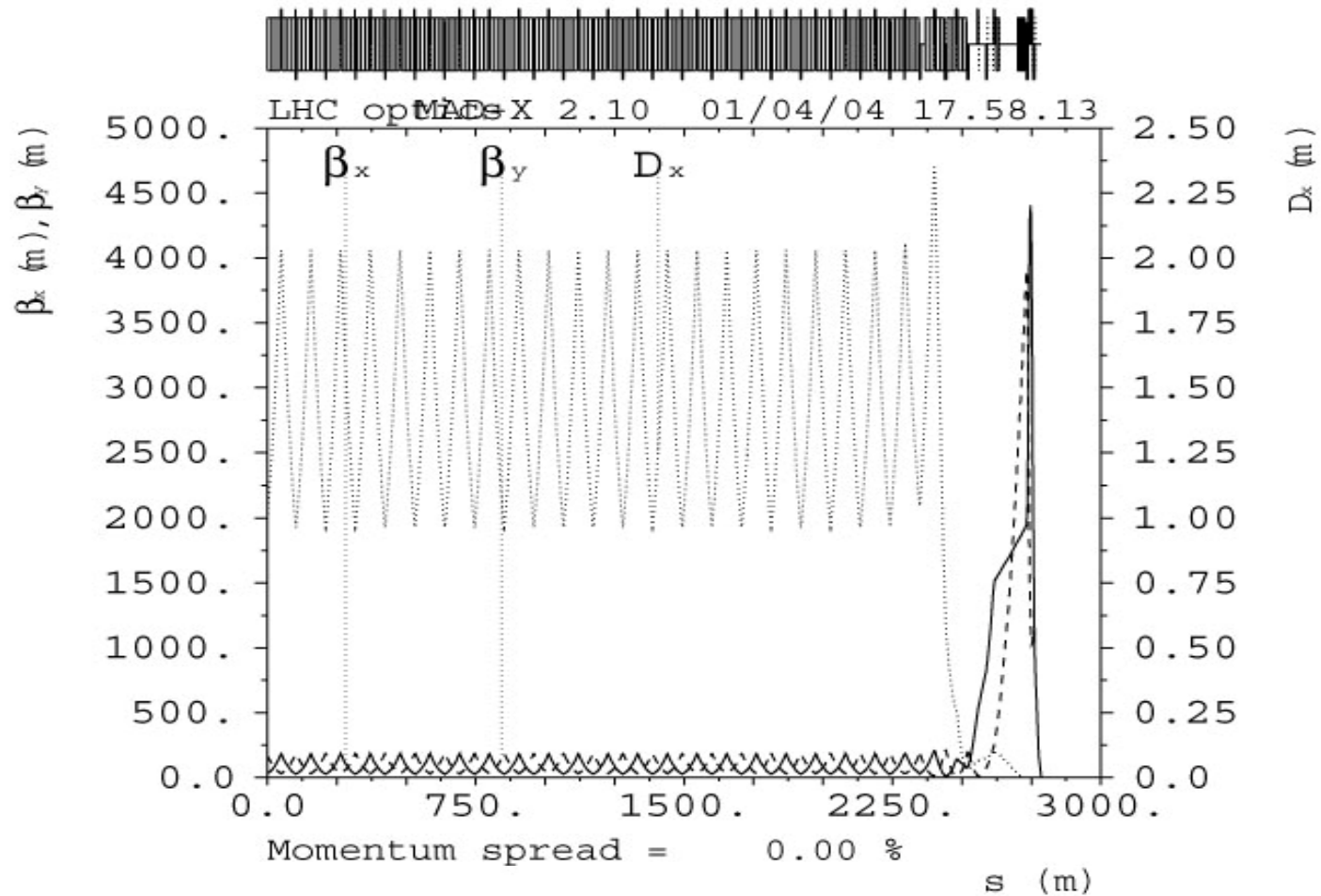
- Interrompre la structure périodique de l'arc en un endroit donné.
- « Insérer » une **section droite** avec l'expérience au milieu.
- Chaque section droite est composée de:
  - un suppresseur de dispersion (quelques dipôles et quadrupôles)
  - une section de quadrupôles pour **fortement** focaliser le faisceau

# Les insertions du LHC

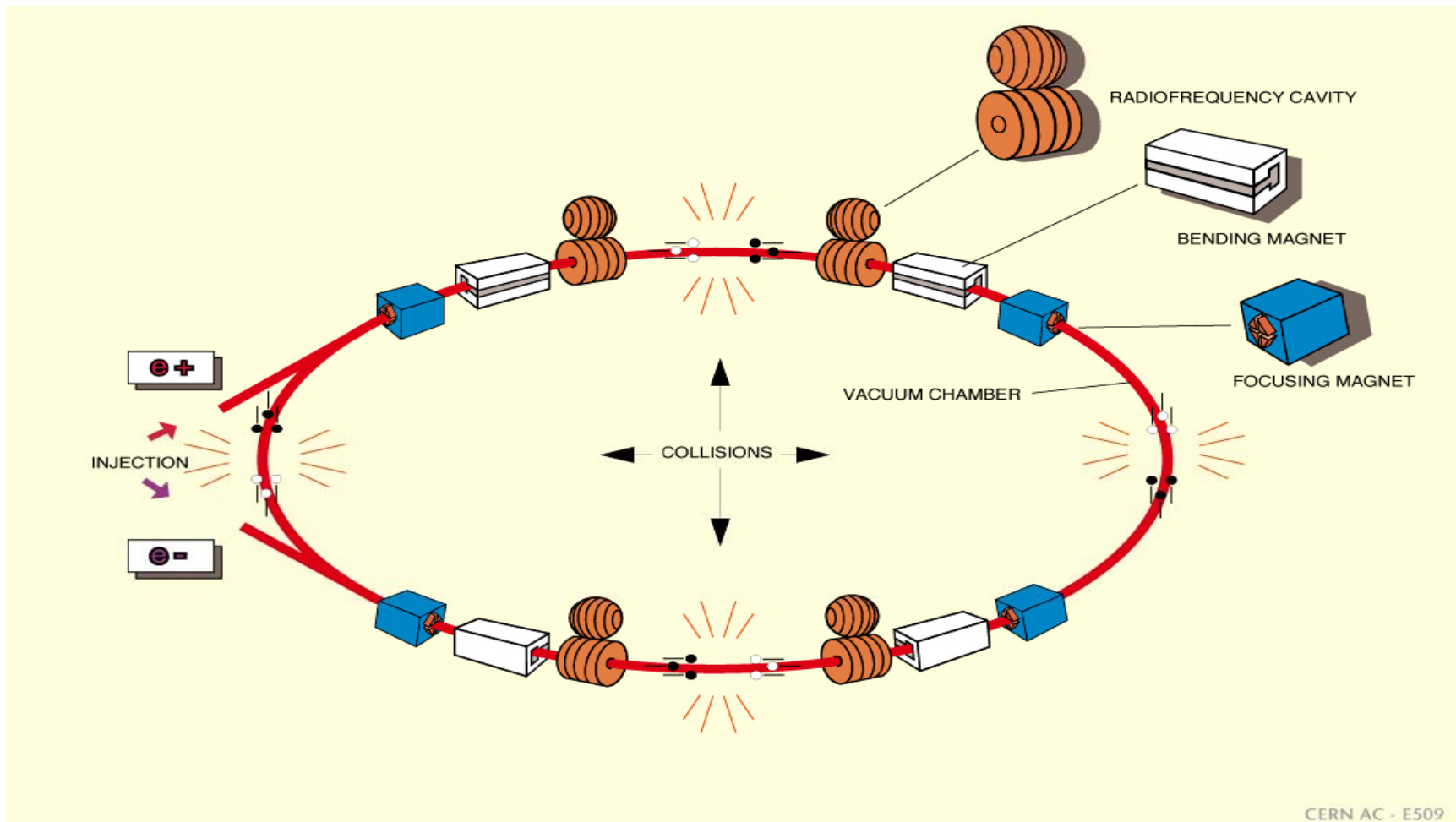
## ● *2 Ring Layout:*

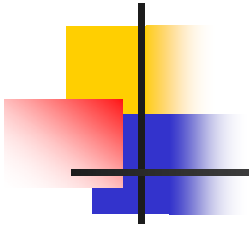


# Fonction $\beta$ dans le LHC



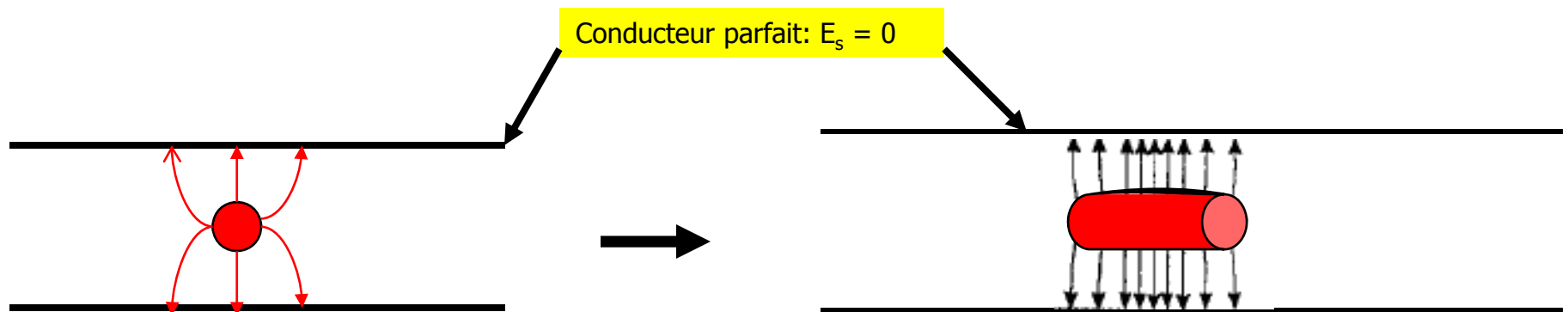
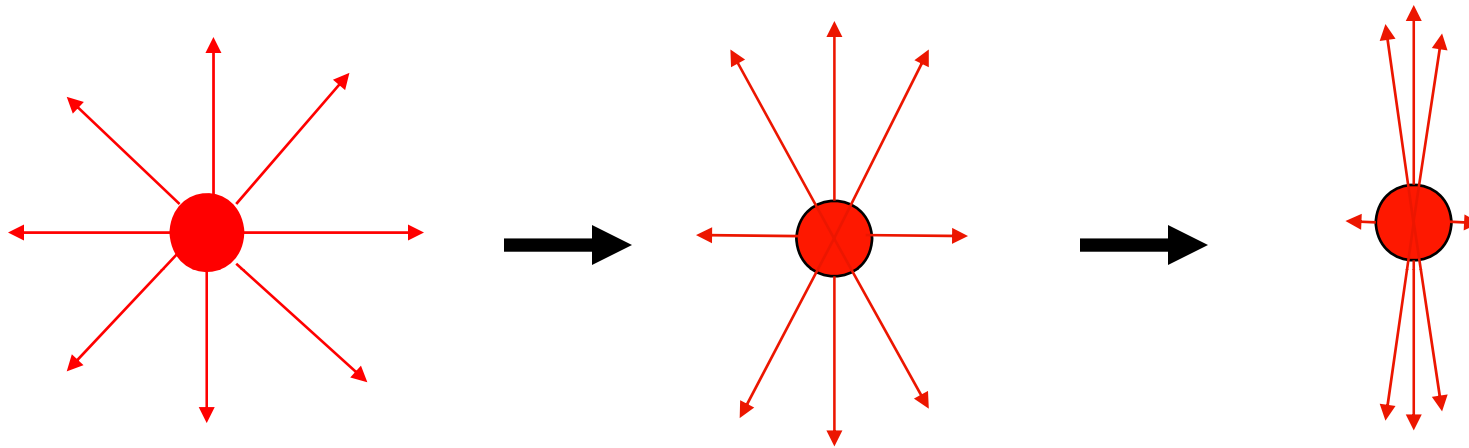
# Collisionneur haute énergie de base:





# Les effets collectifs

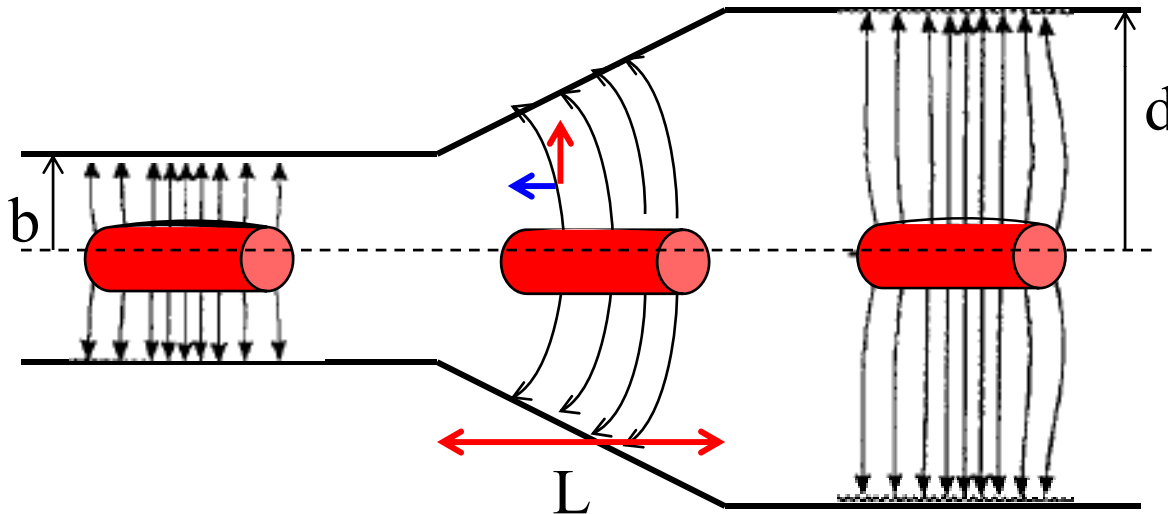
# Les effets multi-particules



M. Ferrario – CAS Baden 2005

# Le concept d'impédance $Z_L(\omega)$

- Si le conducteur n'est **pas parfait**, ou, pire encore, si  **$b \neq \text{const.}$**

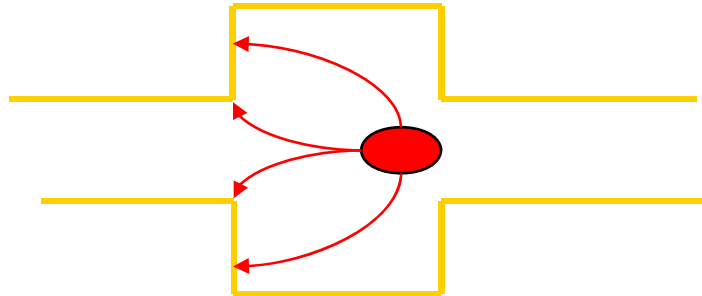


M. Ferrario – CAS Baden 2005

**$E_s \neq 0$**  => il y a une interaction entre le faisceau et la paroi !

# Impedance $Z(\omega)$

**Pire des cas:** changements abrupts de la section de la paroi:



M. Ferrario – CAS Baden 2005

Le faisceau perd de l'énergie (échauffement), mais les champs e.m. induits peuvent également interagir avec ce même paquet ou sur les paquets suivants:

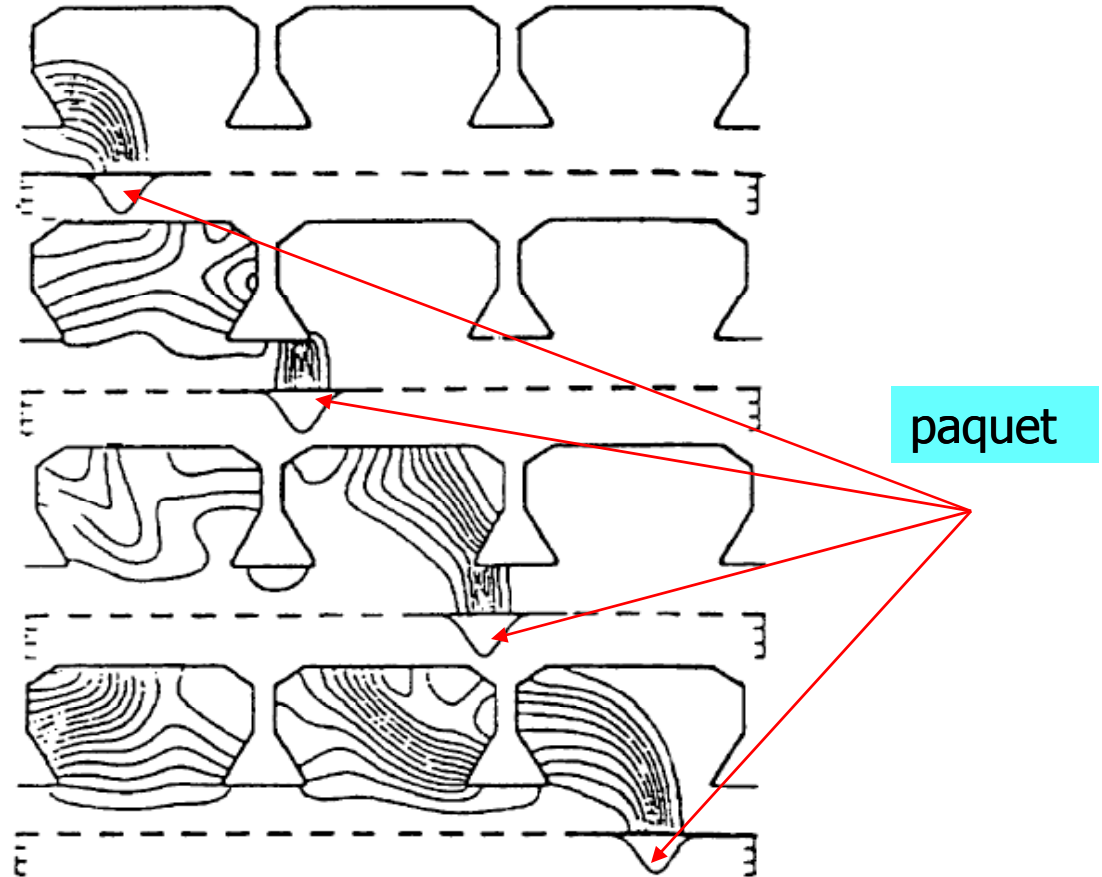
**=> Instabilités!**



# Champs induits dans les cavités RF

Champs e.m. induits dans les cavités RF pendant le passage d'un paquet.

Ces champs peuvent agir en retour soit sur le paquet lui-même, ou, soit sur les paquets suivants.



M. Ferrario – CAS Baden 2005



# Impedance $Z(\omega)$

---

Bien évidemment :  $I_{\max} \propto 1/Z(\omega)$  donc :

- Choix des **matériaux utilisés** est **vital**.
- Eviter tout **changement** non-imposé de la **géométrie**.
- Si des changements de sections sont inévitables, utiliser des **transitions douces** ( $\alpha \leq 15^\circ$ ).

# LHC "beam-Screen"

- Sans cette couche supplémentaire de cuivre, l'intensité nominale prévue pour le LHC ne pourrait pas circuler dans la machine!

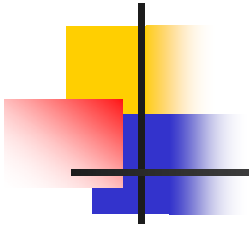


# L'impédance transverse $Z_T(\omega)$

- Dans certains cas, il est possible d'utiliser une relation très utile entre l'impédance longitudinale et l'impédance transverse:

$$Z_T(\omega) = (2R/b^2) \cdot |Z_L(\omega)/n| \quad [\Omega/m]$$

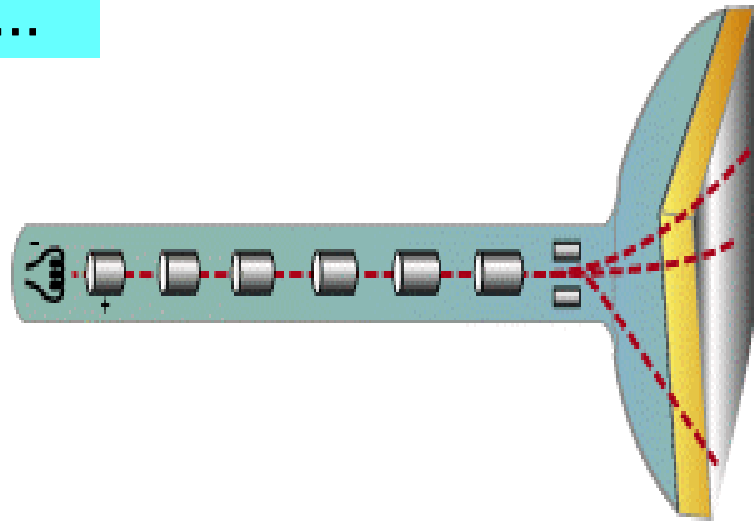
Source de discussions "animées" entre les physiciens des accélérateurs, les concepteurs d'aimants, les experts du vide et les responsables du financement du projet !



# Les applications

# Les applications domestiques

Votre téléviseur...



est un petit accélérateur !

# Les applications médicales

## PET Tomography

University Hospital Geneva



Teachers Programme



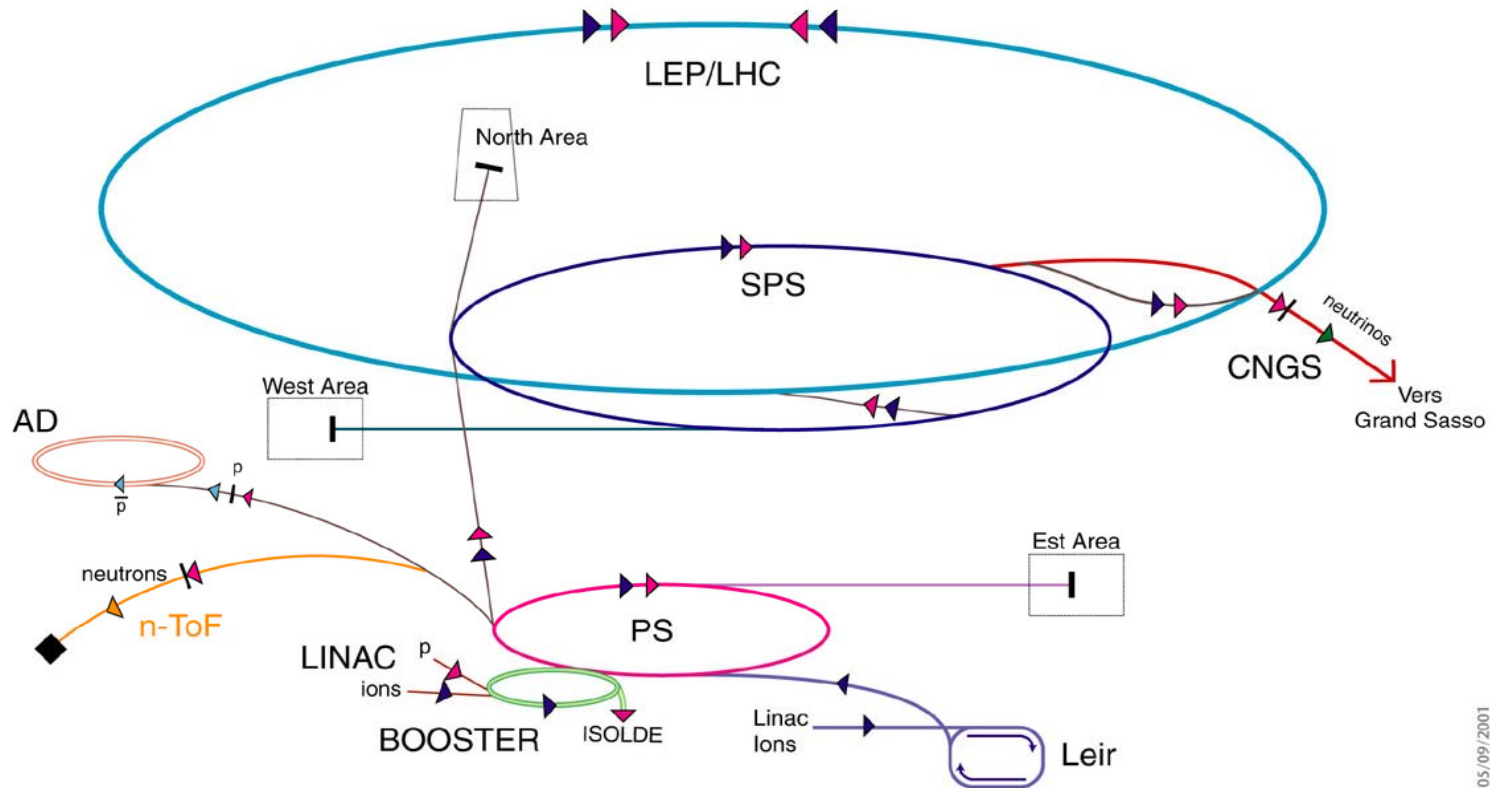
## Light Ion Cancer Therapy

Gantry at PSI, Villigen (CH)

Intro aux Accélérateurs

# Les Accélérateurs au CERN...

## Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



- ▶ p (proton)
- ▶ ion
- ▶ neutrons
- ▶  $\bar{p}$  (antiproton)
- ▶ proton/antiproton conversion
- ▶ neutrinios

- AD Antiproton Decelerator
- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron

- LHC Large Hadron Collider
- n-ToF Neutrons Time of Flight
- CNGS Cern Neutrinos Grand Sasso

CERN AC\_HF205\_V05/09/2001



# Accélérateurs dans le monde (2002)

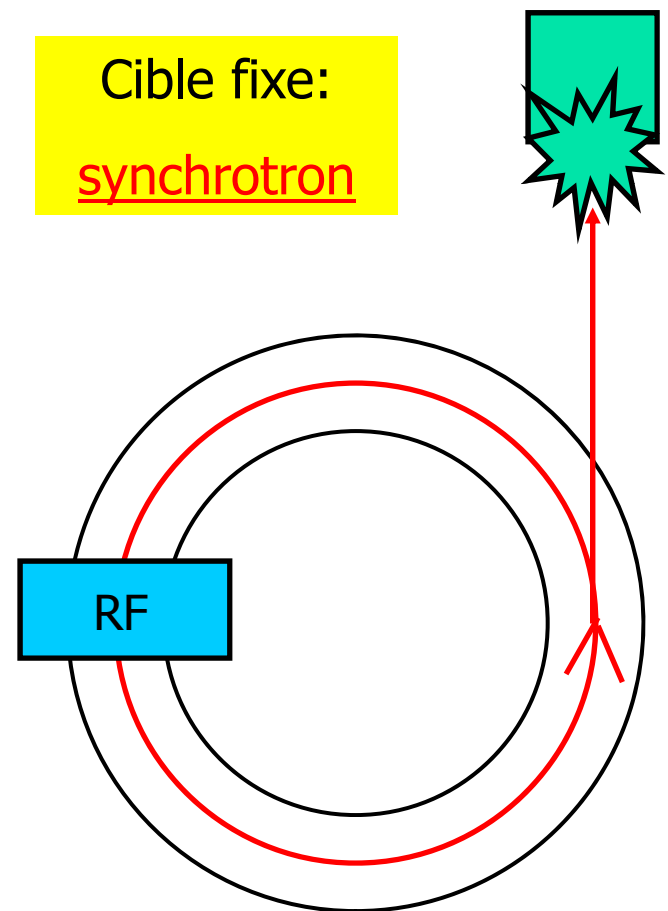
Basic and Applied Research		Medicine	
High-energy phys.	120	Radiotherapy	7500
S.R. sources	50	Isotope Product.	200
Non-nuclear Res.	1000	Hadron Therapy	20
Industry			
Ion Implanters	7000		
Industrial e- Accel.	1500	<b>Total:</b>	<b>17390</b>

Courtesy: W. Mondelaers JUAS 2004

# Quelques petites questions ...

Le LHC et la majorité de ses composants représentent un réel défi technologique. Pourquoi n'avons-nous pas opté pour des solutions plus conventionnelles ?

Pourquoi un collisionneur? Quelle serait l'énergie nécessaire pour un accélérateur travaillant en cible fixe?





# Quelques petites questions ...

---

Pourquoi des aimants supraconducteurs ?

En utilisant des aimants résistifs (max. 2 T) pour le même domaine d'énergie, quelles seraient les dimensions de la machine ?

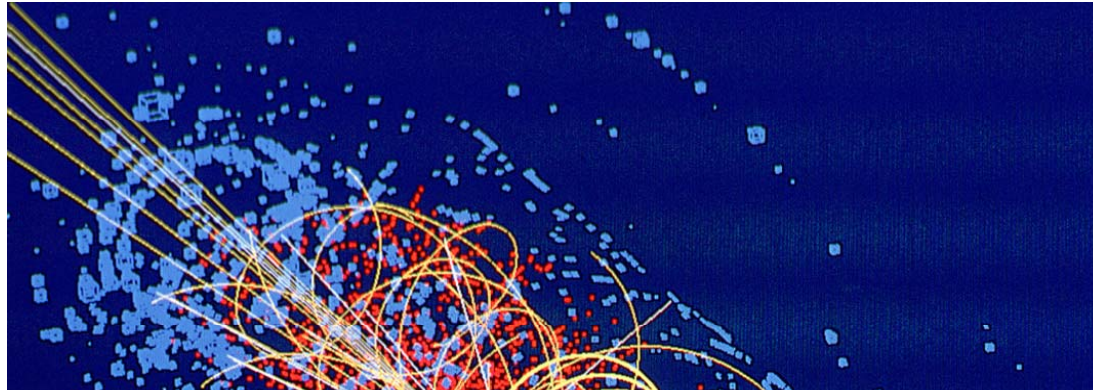
Pourquoi p – p ?

➤  $p^+ - p^-$  : intensité  $p^-$  atteignable → luminosité

➤  $e^+ - e^-$  : radiation synchrotron → pertes par tour !



Pour votre prochaine visite...



Merci beaucoup pour votre attention !

