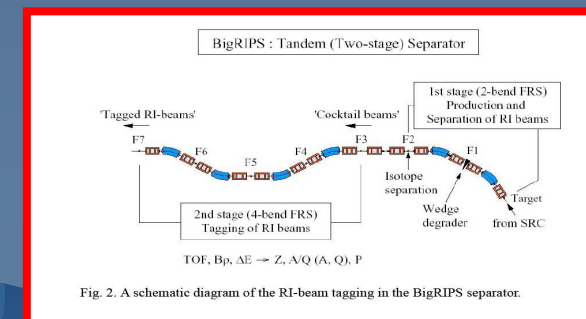
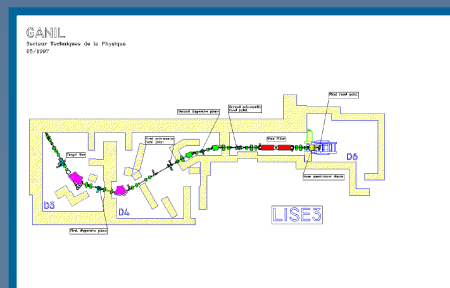
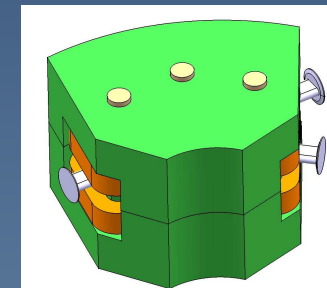
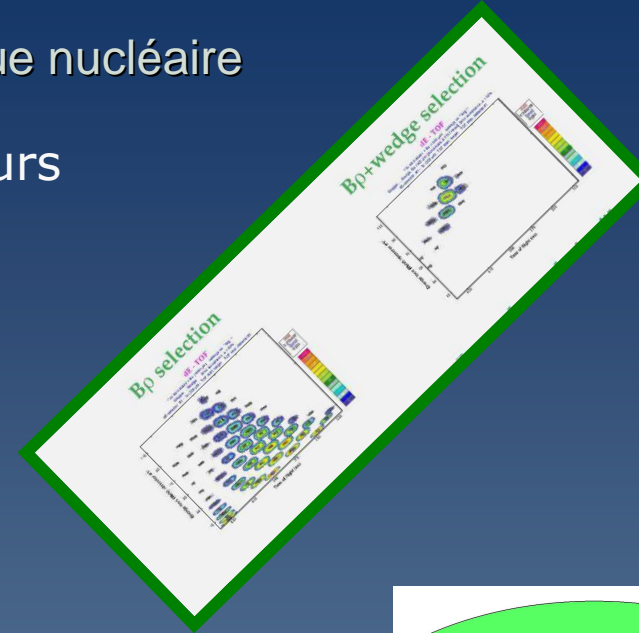


Spectromètres & séparateurs

en physique nucléaire

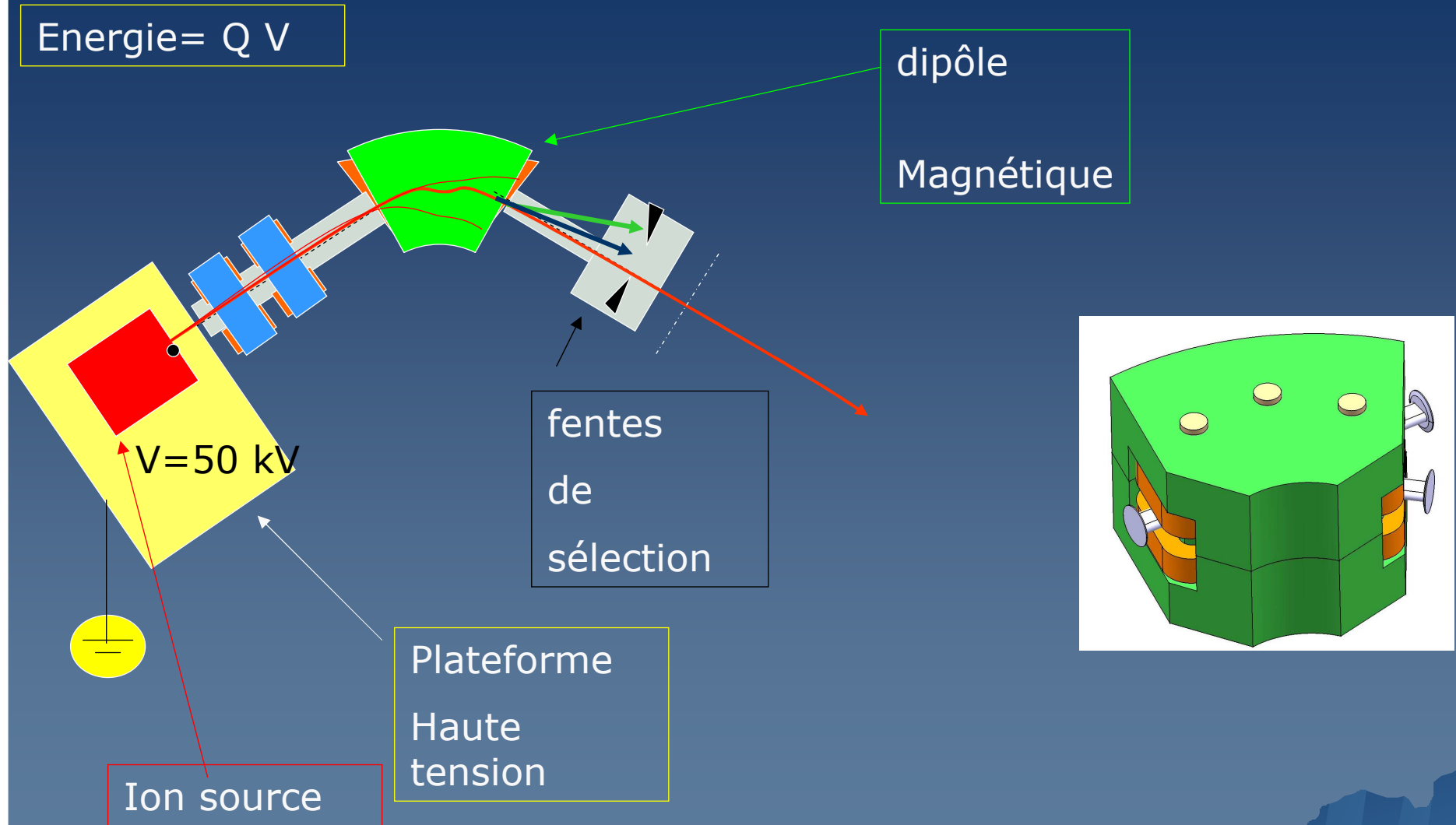
- 1) Quelques exemples de séparateurs
- 2) Quelques notions de base
- 3) spectromètres ($E < 500 \text{ keV}$)
à basse énergie
- 4) Spectromètres de recul
(1-20 MeV/A)
- 5) Séparateurs de fragments
(50 MeV/A-600 MeV/A)



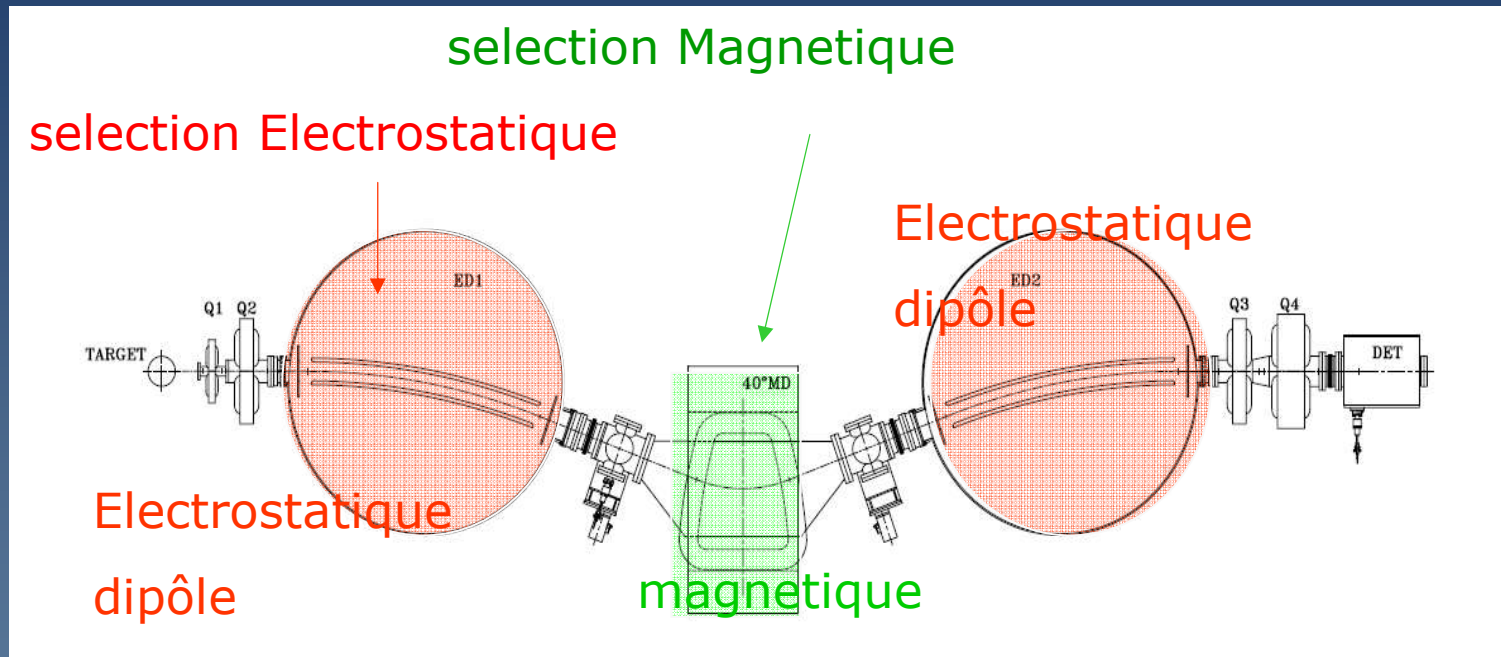
Ecole Joliot Curie 2008

exemple n°1 : spectromètres de basse énergies
 $E < 500 \text{ keV}$: Longueur #5m

Energie = $Q V$



Exemple N°2 : R_{ecoil} M_{ass} S_{eparator}
E# [1-5MeV/A] Longueur=12 m



Spectro « Emma »,
Vancouver (Canada)

Exemple n°3: séparateur de fragments @Riken(Japan)

E#300-500 MeV/A L=77m

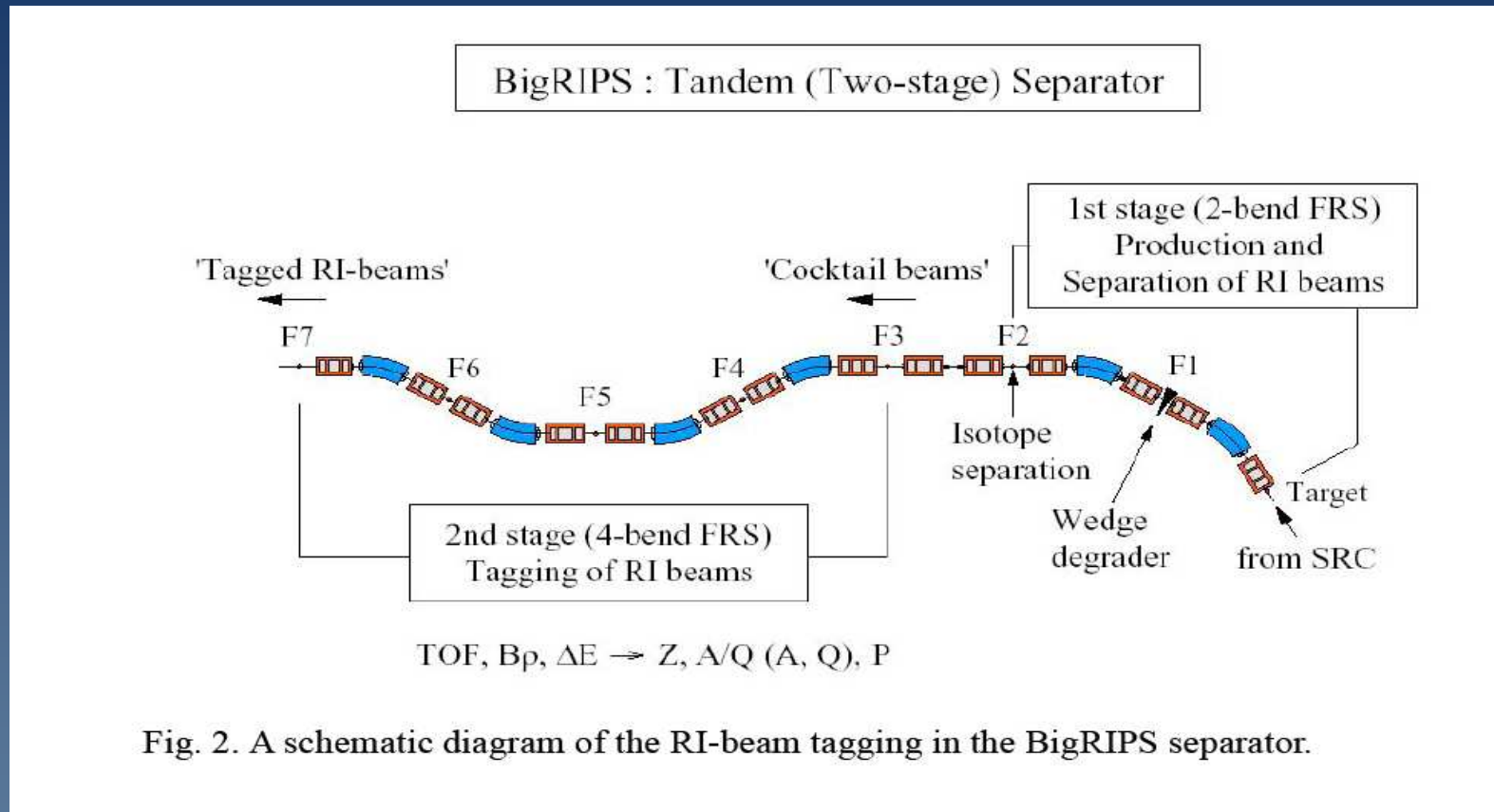
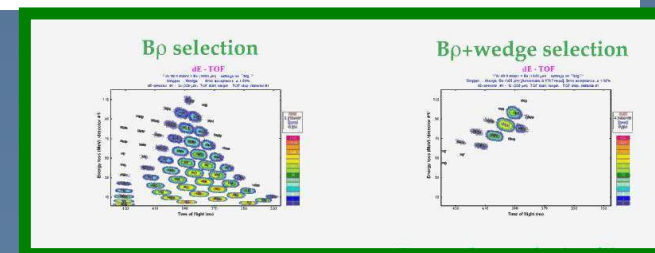


Fig. 2. A schematic diagram of the RI-beam tagging in the BigRIPS separator.

Sélection des fragments
produits par l'interaction
D'une cible rotative et d'un
intense faisceau primaire

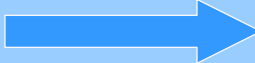


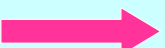


Quelques notions de base

- ◆ La rigidité magnétique : le B ρ ($B\rho$)
- ◆ Focalisation avec quadripôles
- ◆ Les coordonnées des particules
- ◆ Les équations dans les champs \vec{B} et \vec{E}
- ◆ description avec les Matrices
- ◆ Sélection Optimale pour un spectromètre
- ◆ La notion d'emittance

Ecole Joliot Curie 2008

Les fonctions d'un spectromètre

- Rejection du faisceau primaire  séparateur
- Sélection de certain ions (vitesse, P/q , M/Q)
- **Mesure du moment (P/q)**  **Spectromètre magnétique (B)**
- **Mesure de l'énergie ($\gamma Mv^2/q$)**  **Spectro Electrostatique (E)**
- **Mesure de la masse (M/q)**  **Spectro E+B**
- **Mesure de la vitesse (V)** **Mesure du temps de vol**

Les performances et propriétés :

Rejection (faisceau primaire+produits non désirés)

Résolution (à mi-hauteur, « au pied »...)

Acceptance angulaire, Transmission

Acceptance en Bro, Ero

Bromax, Eromax , Imax (Faisceau incident)

Le grandissement, la dispersion, angle de la focale

Equations du mouvement d'un ion dans un champ magnétique B :

$$\vec{F} = q (\vec{v} \times \vec{B})$$

$$\frac{d}{dt} [\gamma m \vec{v}] = \vec{F}$$

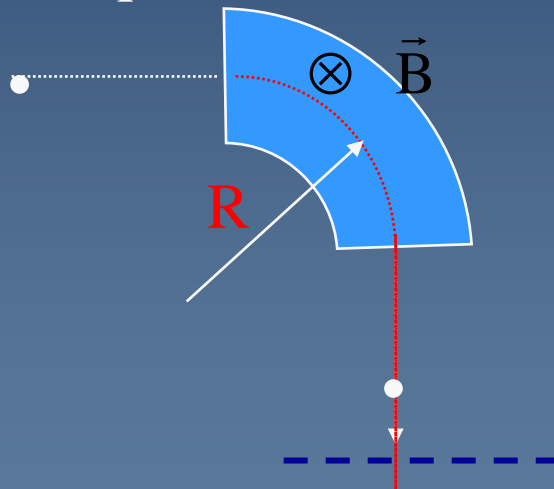
Facteur relativiste :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

La **Trajectoire** d'un ion dans un champ magnétique B d'un dipôle est un cercle de rayon R : $|\frac{d\vec{v}}{dt}| = v^2/R$

$$R = \gamma \frac{mv}{q B}$$

(m, q, v)



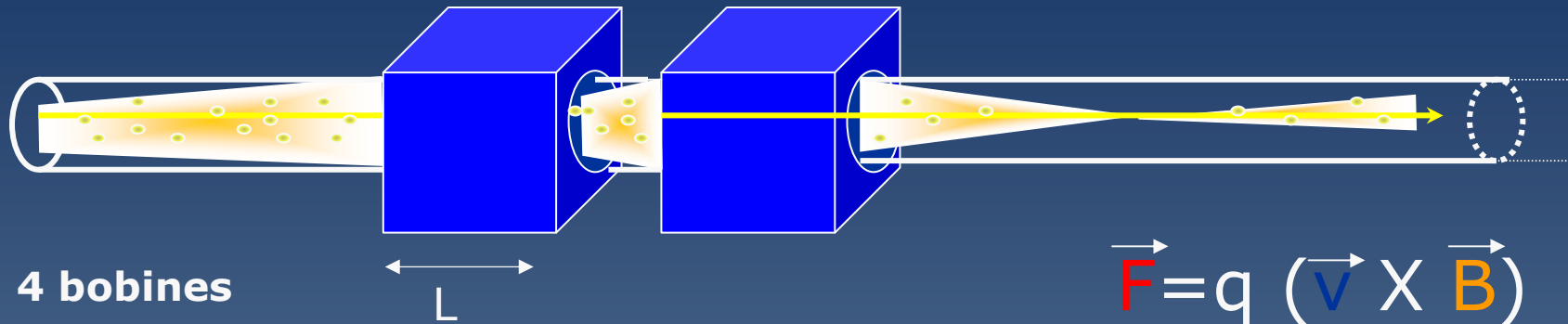
On définit la **rigidité magnétique** $B\rho$

$$B\rho \stackrel{def}{=} \gamma \frac{mv}{q}$$

Le rayon R de courbure de la trajectoire dans un champ B est donné par $B\rho / B$

$$R = \frac{B\rho}{B} = \gamma \frac{mv}{q B}$$

focalisation avec les quadripôles magnétiques



4 bobines

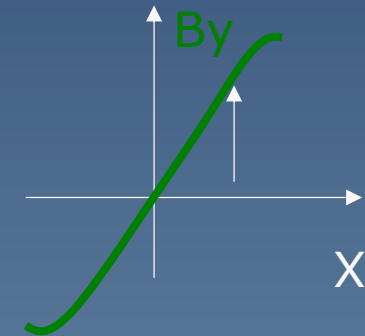
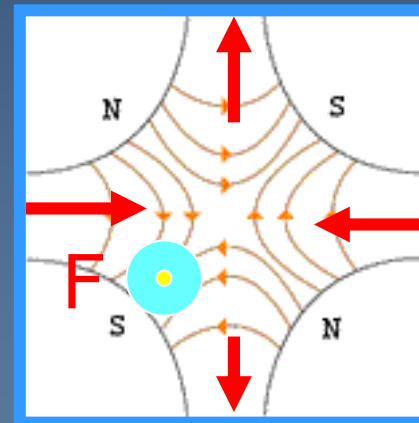
+4 poles hyperboliques

$$B_x = G y$$

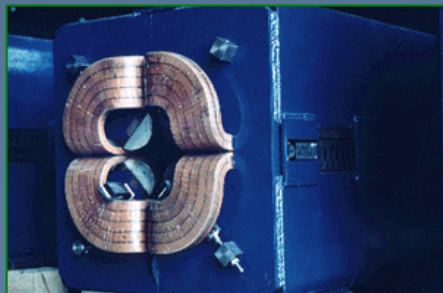
$$B_y = -G x$$

$$B_s = 0$$

G est le gradient de champ [Tesla/m]

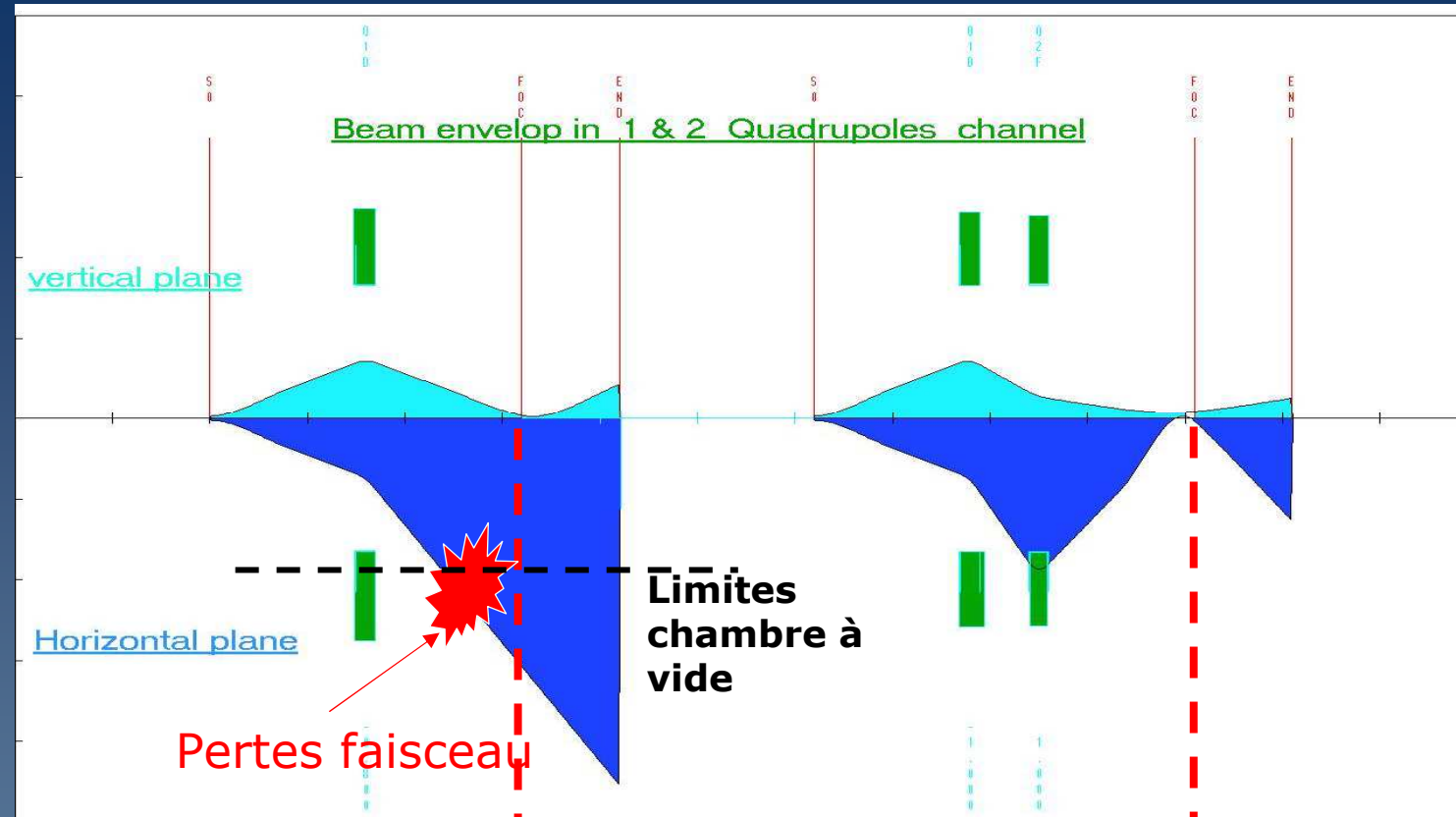


$$G = dB_y/dx$$



L'effet d'un quad est proportionnel à $(G L / B_p)$

Focalisation

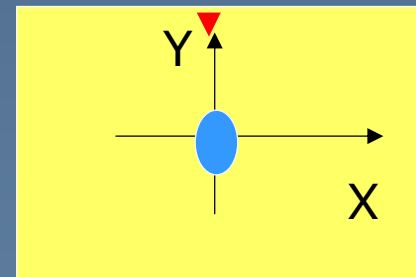
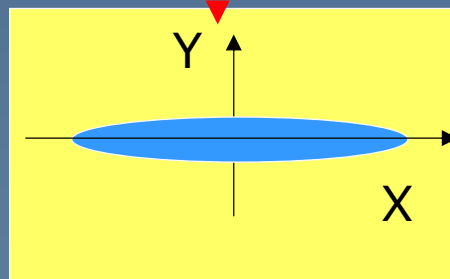


la force focalisation des quadripôles dépend de

$$K = \text{Gradient} \times L / B\rho$$

Pertes faisceau

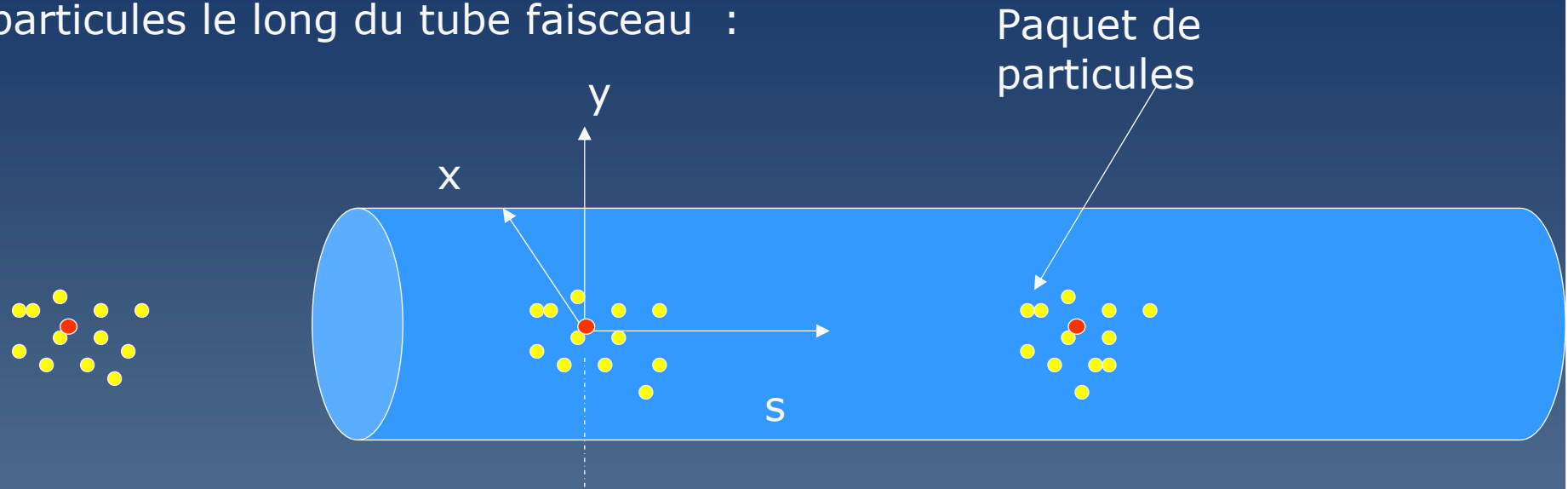
Limites chambre à vide



Focalisation en X et Y : au moins 2 quads sont requis

Optique de faisceau

Comment décrire les coordonnées des particules le long du tube faisceau :



1 un point s_0 , une particule est décrite par 6 coordonnées:

X, Y

+ 2 angles X', Y'

+ $Br_0 = Br_{0_0} (1 + \delta)$

+ $(t - t_0)$

s_0

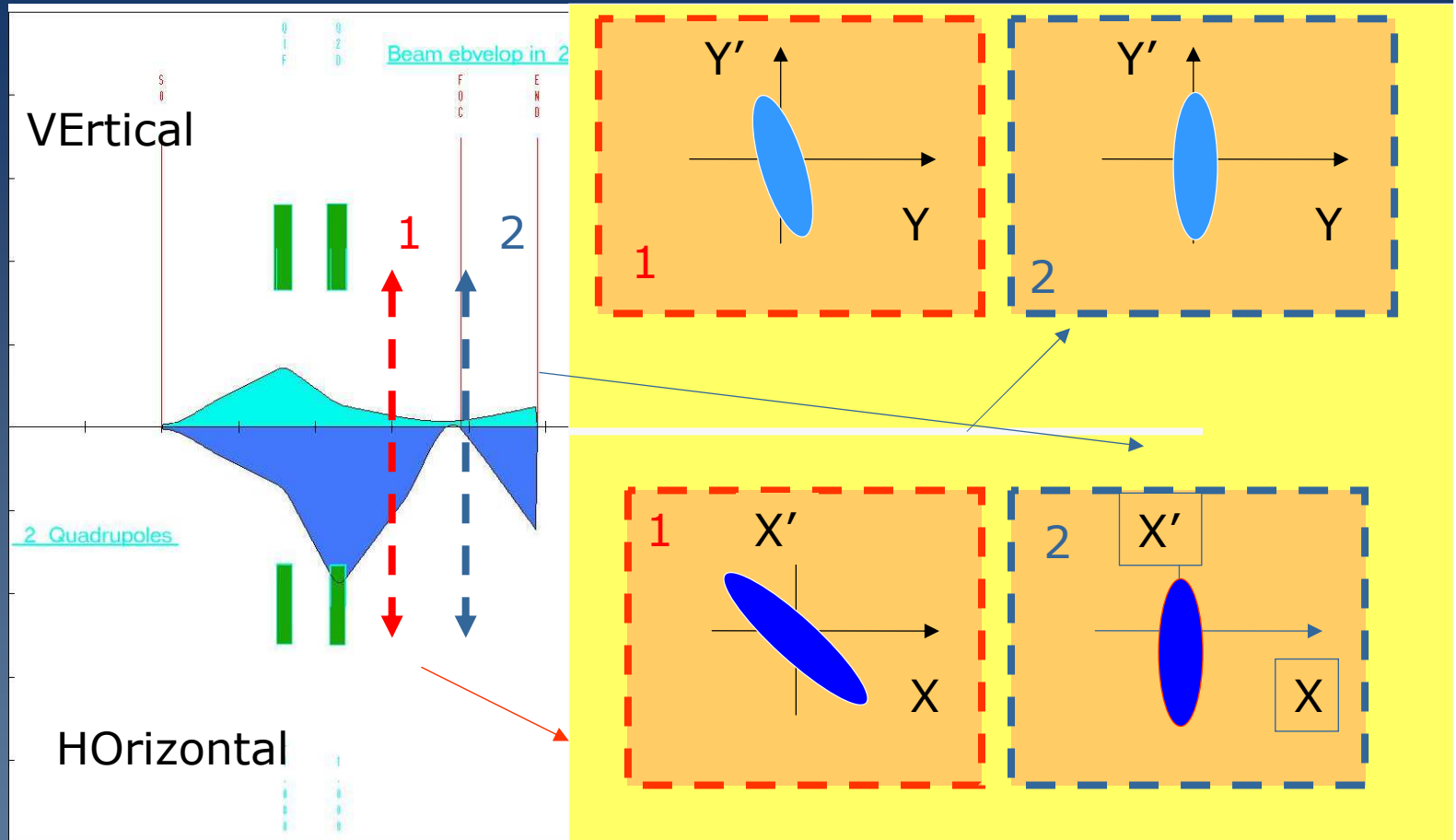
L' angle dans le plan Horizontal plan

$$X' = dx/ds$$

L' angle dans le plan vertical

$$Y' = dy/ds$$

L'enveloppe faisceau & espaces des phases



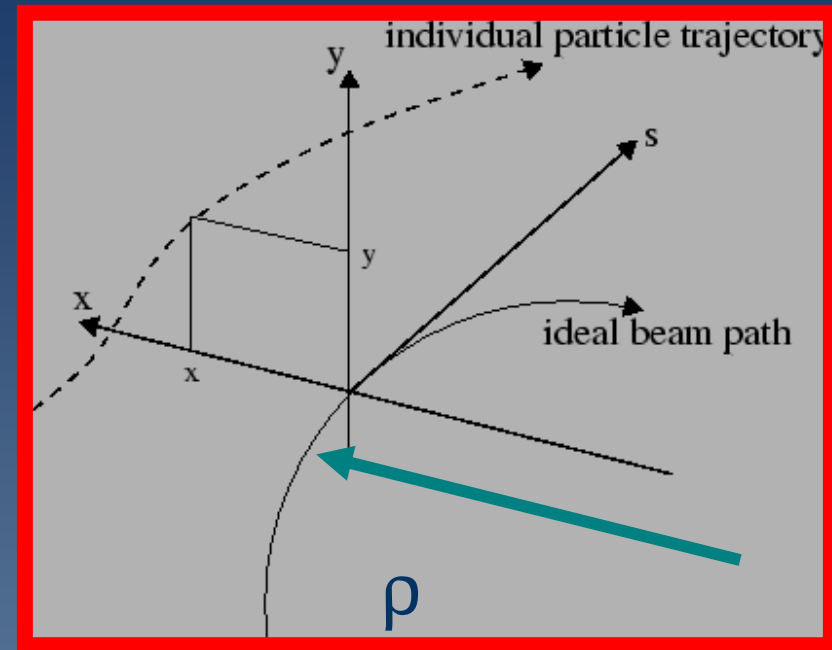
L'angle HORIZONTAL $X' = \tan(\theta) \# \theta$ (approximation linéaire)

L'angle VERTICAL $Y' = \tan(\phi) \# \phi$

Les équations du mouvement (1)

Comment calculer $x(s), y(s)$ d'une particule dans une ligne de faisceau

Utilisons le Référentiel curviligne suivant la trajectoire de référence ($\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_s$)



au cours du temps t , ($\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_s$) varie si la trajectoire de REFERENCE n'est pas rectiligne, \mathbf{e}_y est constant

$$\frac{d}{dt} [m \gamma \mathbf{v}] = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Les équations du mouvement

$$\frac{d}{ds} \left[m\gamma \dot{x} \right] = m\gamma \dot{s} \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) + q(t' E_x + y' B_s - \dot{s} \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \cdot B_y)$$

$$\frac{d}{ds} \left[m\gamma \dot{y} \right] = q(t' E_y + \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \cdot B_x - x' \cdot B_s)$$

$$\frac{d}{ds} \left[m\gamma \dot{s} \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \right] = -\frac{m\gamma \dot{x}}{\rho} + q(t' E_s + x' \cdot B_y - y' \cdot B_x)$$

$$\frac{d}{dt} = \dot{s} \frac{d}{ds}$$

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \frac{ds}{dt} \frac{dx}{ds} = \dot{s} x'$$

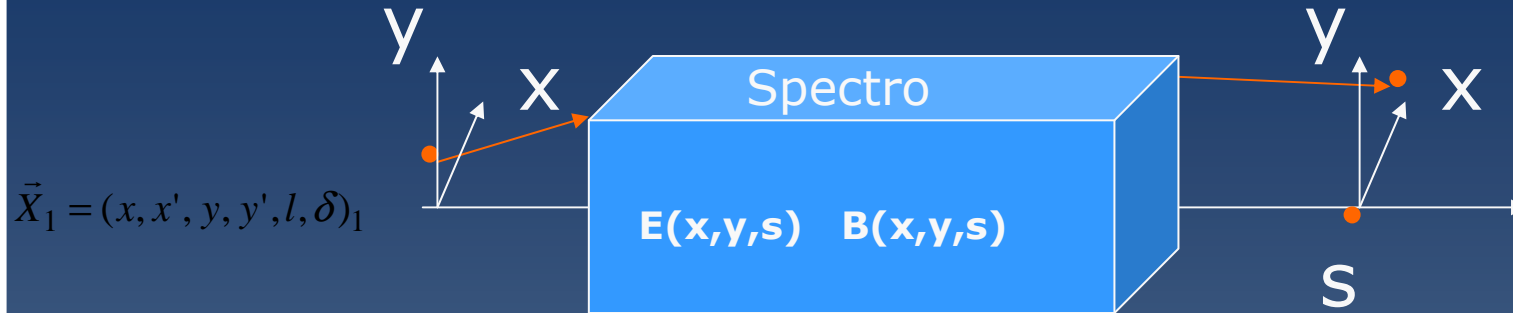
$$\ddot{x} = \dot{s}^2 x'' + \ddot{s} x'$$

Pour simuler les trajectoires des particules chargées :

- 1) Connaître $B(x,y,s)$ et $E(x,y,s,t)$ [cartes de champ 3D]
- 2) Intégrer les équations du mouvement
(ordinateur+ Runge-kutta)

Il existe un approche simplifiée : l'approche matricielle

Optique de faisceau avec L'approche matricielle



$$\begin{aligned} \vec{X}_2 &= f_{1 \rightarrow 2} (\vec{X}_1, B, E, l, \dots) \\ &= R_{1 \rightarrow 2} \cdot \vec{X}_1 + 0(\vec{X}_1 \cdot \vec{X}_1) + \dots \\ &\approx R_{1 \rightarrow 2} \cdot \vec{X}_1 \end{aligned}$$

Dynamique exacte (non linéaire)

Development de Taylor

Dynamique linéaire (matrices)

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ l \\ \delta \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} & R_{26} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{51} & R_{52} & R_{53} & R_{54} & R_{55} & R_{56} \\ R_{61} & R_{62} & R_{63} & R_{64} & R_{65} & R_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ l \\ \delta \end{bmatrix}_1$$

$$\begin{aligned} l &= v_0(t - t_0) \\ \delta &= \frac{B\rho - B\rho_0}{B\rho_0} \end{aligned}$$

La Matrice R de transport de calculer

Les coordonnées d'une particule la sortie d'un spectromètre

Connaissant ses coordonnées à l'entrée.

$$\vec{X}_{in} = (x, x', y, y', l, \delta)_0 \quad \text{à l'entrée}$$

$$\vec{X}_{out} = (x, x', y, y', l, \delta)_1 \quad \text{à la sortie}$$

$$X_{out} = R \cdot X_{in}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ l \\ \delta \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} & R_{26} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{51} & R_{52} & R_{53} & R_{54} & R_{55} & R_{56} \\ R_{61} & R_{62} & R_{63} & R_{64} & R_{65} & R_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ l \\ \delta \end{bmatrix}_0$$

$$l = v_0(t - t_0)$$

$$\delta = \frac{p - p_0}{p_0}$$

Interprétation de R

$$R_{ij} = \left(\frac{\partial X_i^{out}}{\partial X_j^{in}} \right)$$

ex :

$$R_{11} = \left(\frac{\partial X_1}{\partial X_1} \right) = \left(\frac{\partial x^{out}}{\partial x^{in}} \right) \quad R_{12} = \left(\frac{\partial X_1}{\partial X_2} \right) = \left(\frac{\partial x^{out}}{\partial x'^{in}} \right)$$

$$R_{16} = \left(\frac{\partial X_1}{\partial X_6} \right) = \left(\frac{\partial x^{out}}{\partial \delta^{in}} \right)$$

La Matrice R de transport dépend

- de la géométrie du spectromètre
- du réglage des quadripôles

La matrice R d'un spectromètre

Un spectromètre dans la plupart des cas:

- A) Commence par un point de focalisation
- B) Finit par un point de focalisation ($R_{12}=R_{34}=0$)
- C) Le spectromètre est dispersif (R_{16} est non nul)

La matrice typique d'un spectro:

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ l \\ \delta \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{16} \\ R_{21} & R_{22} & 0 & 0 & 0 & R_{26} \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{43} & R_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & L/\gamma^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ l \\ \delta \end{bmatrix}_0$$

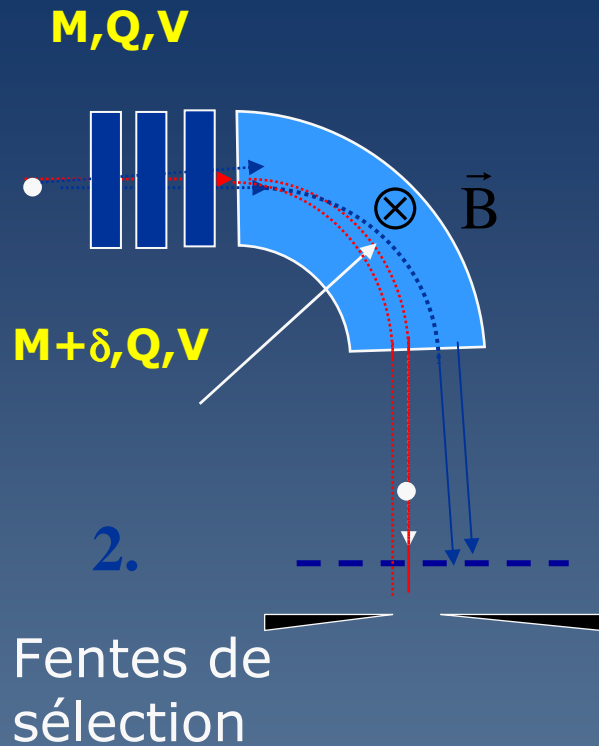
Coordonnées
Au plan focal(détecteurs)

Coordonnées à
la cible

R_{16} est
appelé
dispersion

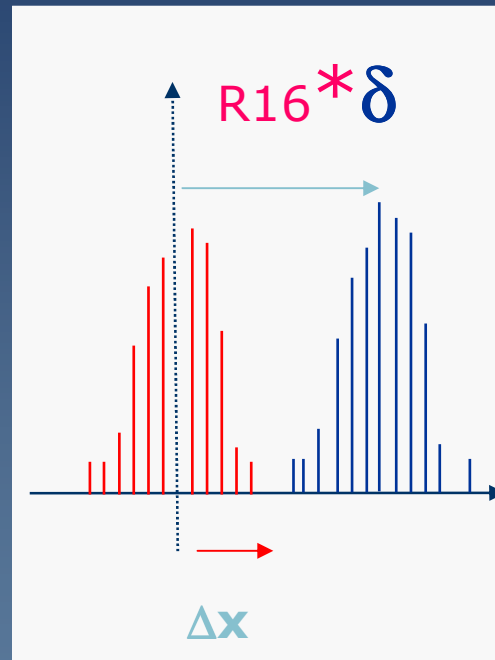
R_{11} est appelé
grandissement
en x

La résolution d'un séparateur magnétique



Les particules sont séparées

Si $R16 * \delta > 2 \Delta x$

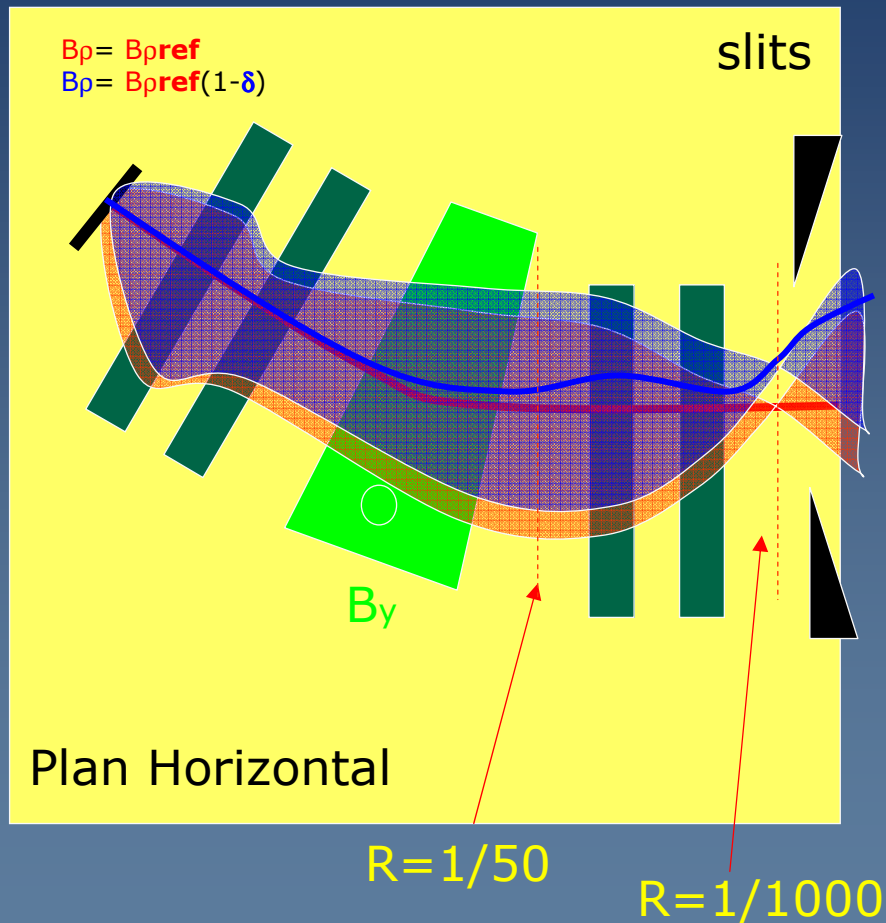


$$\text{Résolution} = 2\Delta x / R_{16}$$

=écart en bro minimum ,pour
séparer 2 faisceaux

Un spectro caractérisé par une dispersion $R16=2 \text{ m}(=2\text{cm}/\%)$ et $\Delta x=1\text{mm}$, possède une résolution $R=1/1000$ en bro

La Resolution (separation) est optimale au point de focalisation (Δx est minimal)



Les faisceaux Avec

$$B\rho = B\rho_{ref}$$

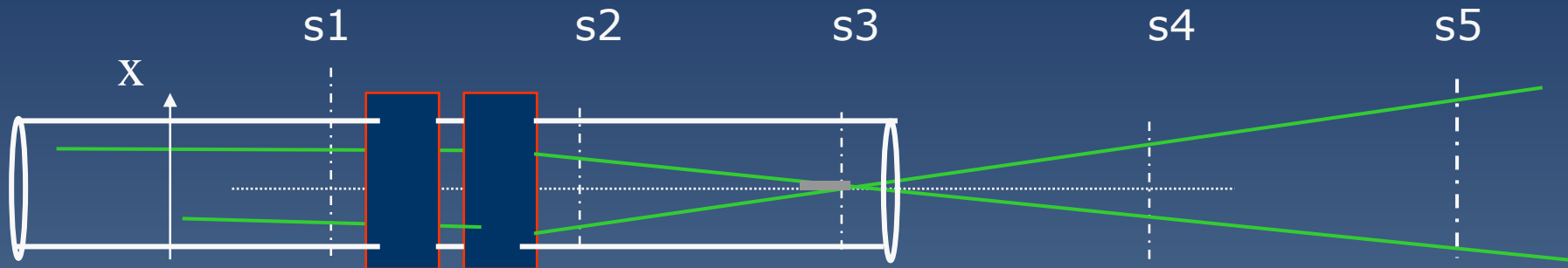
$$B\rho = B\rho_{ref}(1+\delta)$$

sont séparé « au plan focal »
du spectro, mais pas partout.

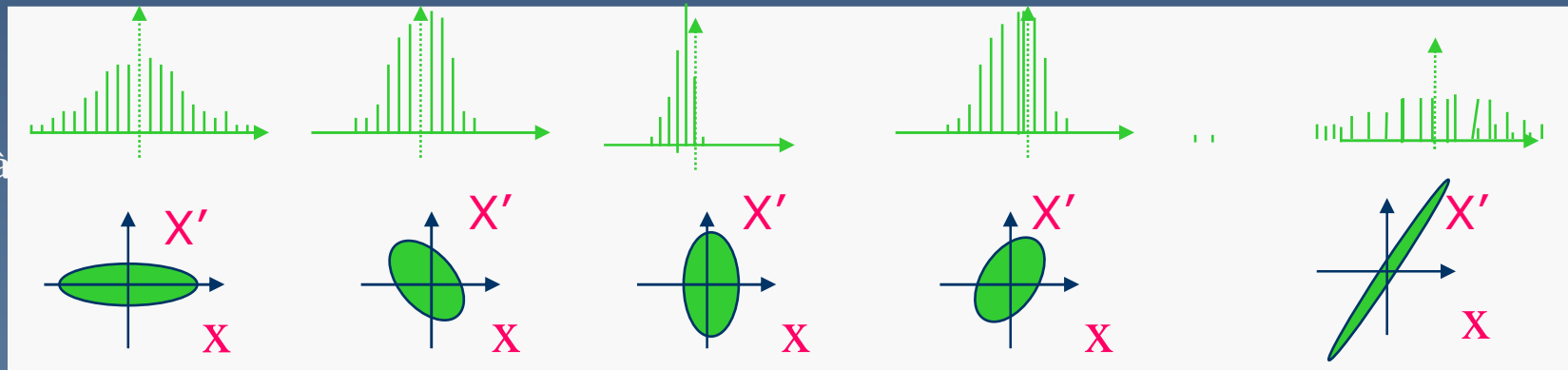
La résolution ($R=2\Delta x/R16$) est optimale
quant Δx est petit
mais $R16$ (dispersion) grand

Le concept d'émittance transverse

Evolution des faisceaux dans une ligne :



Mesure du faisceau sur un Profileur à fils



À un point de focalisation l'émittance transverse est :

$\varepsilon = \text{cte}$ si $E = \text{cte}$

Emittance = $\pi \Delta x \cdot \Delta x' = \text{surface de l'ellipse}$

L'emittance d'un faisceau : (# qualité optique)

L'emittance Est une mesure du volume occupé par une ensemble de particules dans l'espace des phase à 6 dimensions.

Théorème de Liouville :

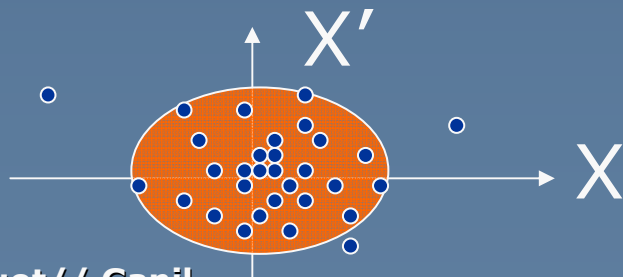
...forces conservatives, pas de frottement => densité de l'espace des phases conservée

Pour des raisons pratiques on utilise les mesures dans 3 sous-espaces des phases

Emittance Horizontale : surface du faisceau dans (x,x')

Emittance Verticale : surface (y,y')

Emittance longitudinale : surface (l,δ) ou (t,E) suivant les notations



$$\varepsilon_{rms} = 4 \left(\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2 \right)^{1/2}$$

ε = surface de l'ellipse qui

correspond à x% de l'intensité²⁰

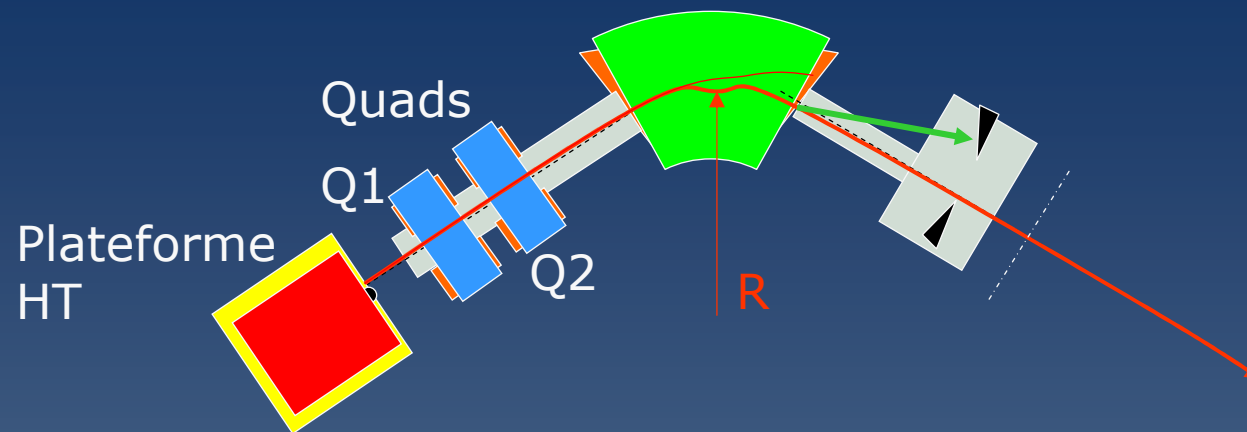
Fin partie 1

Partie 2

- Spectromètre à basse énergie
- Spectro de recul
- Séparateurs de fragments

Spectromètre magnétique à basse Energie

le principe de réglage



(0) choix d'ion (M, Q) et de V_{source}

(1) Calcul du $B\rho$

$$B\rho = \gamma \frac{Mv}{q} \approx \frac{Mv}{q}$$

$$\frac{1}{2}Mv^2 = qV_{source}$$

$$B\rho = \sqrt{\frac{2M V_{source}}{q}}$$

(2) réglage du dipôle $B_{dipole} = B\rho/R$

(3) réglage des quads : l'optique est en pratique une liste de gradients pour chaque quad et pour un B_{pref} .

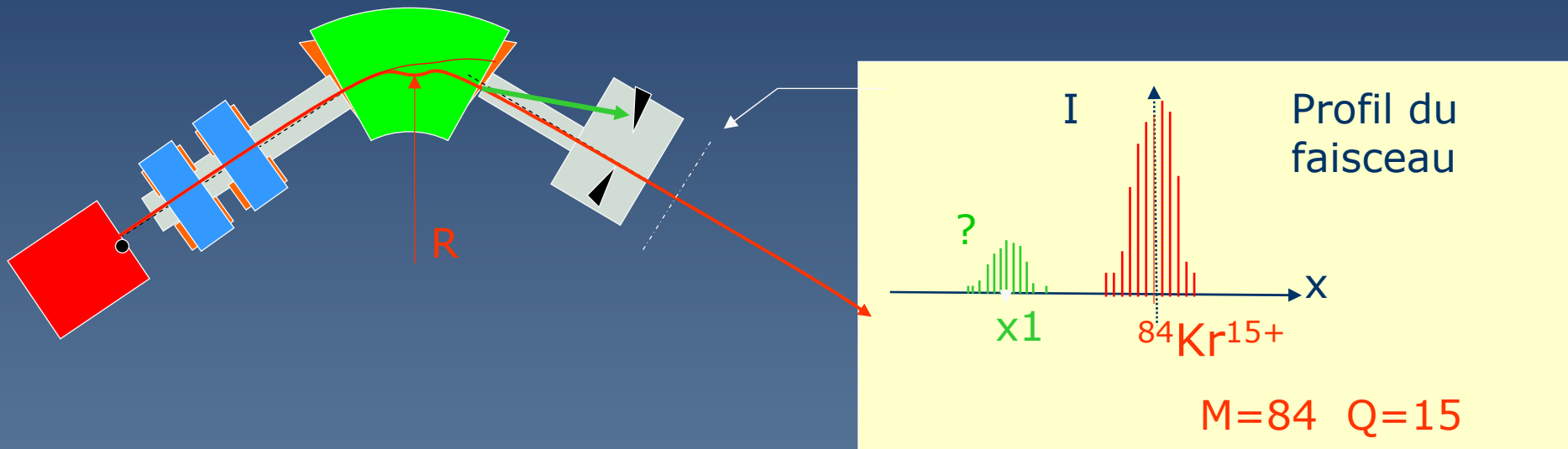
l'optique permet de focaliser le faisceau aux endroits voulus

$$\text{GradientQ1}(B\rho) = \text{GradientQ1}(B_{pref}) * [B\rho/B_{pref}]$$

Spectromètre magnétique à basse Energie

Un outil pour l'identification des ions et la purification

Sélection d'un type d'ion



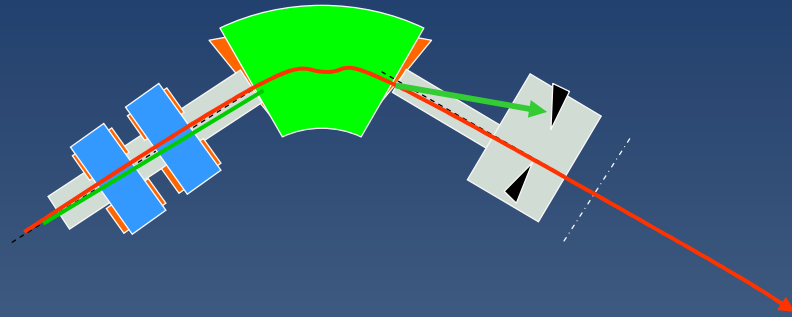
$$(B_{p1} - B_{p0}) / B_{p0} = X / R16 \quad \Rightarrow \quad B_{p1} = B_{p0} (1 + X1/R16)$$

(x1 mesuré) \Rightarrow

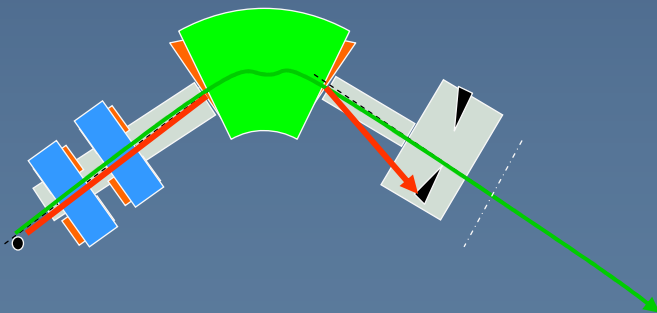
$$M1/Q1 \# Mo/Qo (1 + 0.5 X1 / R_{16})$$

Technique de base avec les spectromètres de basse énergie :

Etape A: réglage d'un ion de type A



Etape B: modif des paramètres pour laisser passer les ions de type B



$B\rho_A \neq B\rho_B$

$$B\rho = \sqrt{\frac{2M V_{source}}{q}}$$

Étape B:

2 méthodes sont utilisées
Pour les Changement d'ions

B1) « Scaling » de tous les champs (dipole,quad,..)

« chgt de Bro »

B2) « Scaling » de tous les champ E (V_{source} ,...)

« Bro=constant »

Les spectromètres de recul et leur « physique »

Filtre de vitesse

ship@GSI : 1MeV/A (lourds et superlourds)

Wien filter @ Lise-GANIL : 30-100 MeV/A
(fragmentation)

* RMS (Recoil Mass Spectrometer)

(fusion évaporation,...)

* Separateur à gaz (Dubna, Darmstadt, Berkeley, Jyvaskyla, Riken)

1-5MeV/A Fusion évaporation
lourds et superlourds)

* Large Acceptance & Ray tracing Spectrometer

Ganil (VAMOS) , Legnaro (Prisma), NSCL (S800)
(réactions Transfert, fission,fusion..)

Un problème récurrent à basse énergie : Les distributions d'état de charge pour les ions lourds

$^{238}\text{U}^{30+}$

@ 5MeV/A



Cible de réaction

1mg/cm²

Probabilité d'épluchage pour l'Uranium dans une feuille de carbone :

Q=59+ :12%

Q=60+ :16%

Q=61+ :17%

Q=62+ :15%

Q=63+ :11%

Q=64+ :7%

Q=65+ :3%

Q=66+ :1%

La distribution en Q dépend

du Z de la cible

De l'énergie sortie de la cible

Du Z de l'ion incident

De l'épaisseur de la cible : à partir d'une certaine épaisseur (épaisseur d'équilibre) la distribution ne change plus

Il y a de grande chance

Qu'un état de charge du faisceau ait le même BRO que les fragments d'intérêts

La sélection magnétique n'est donc pas toujours suffisante
=> (utilisation de champ électrique, de gaz...)

R_{coil} M_{ass} S_{eparator}

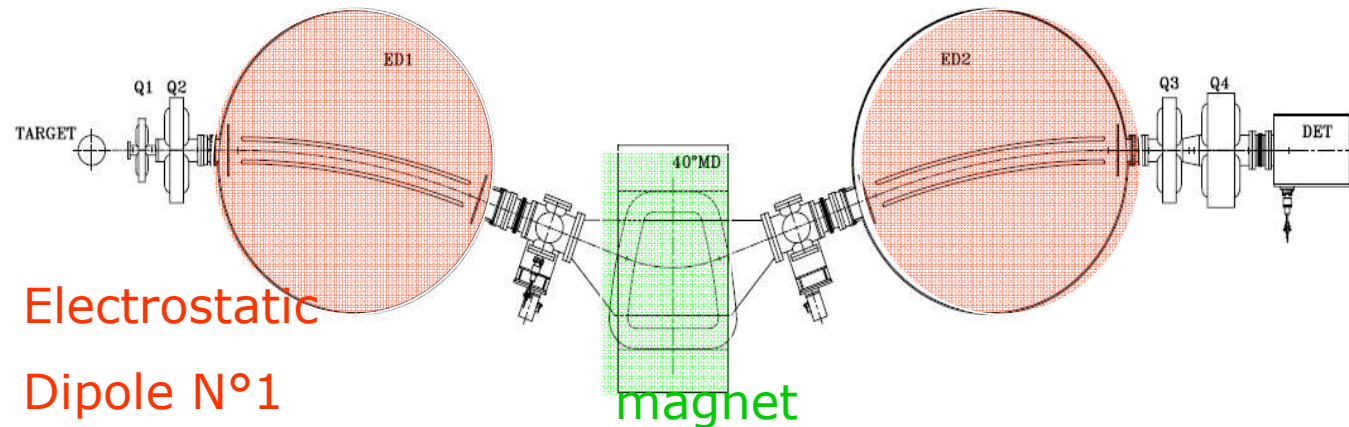
E# [1-5MeV/A] Length=12 m

Magnetic selection = $\gamma Mv/Q$

Electrostatic selection = $\gamma Mv^2/Q$

Electrostatic

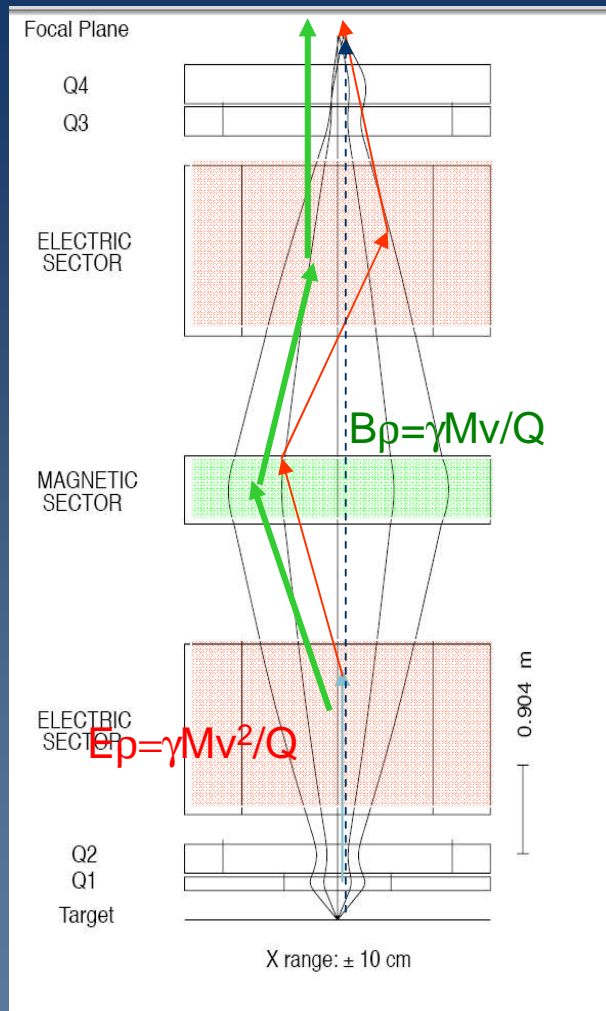
Dipole n°2



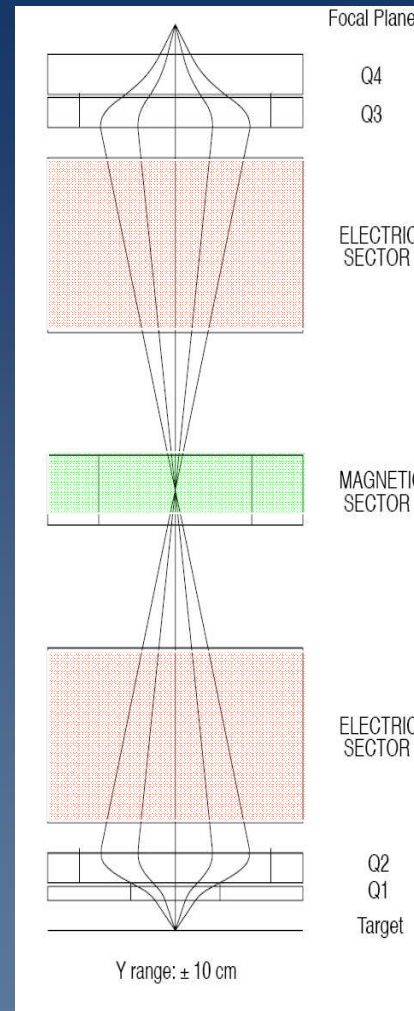
Implémenté dans 6 différents Laboratoires

(Oak ridge, Argonne, Legnaro, Jaeri, New Dehli, Vancouver) :

RMS (Recoil Mass Spectrometer) : L'optique



Horizontal plane



Vertical plane

--- M, Q, v₀

___ M, Q, v₀+δv

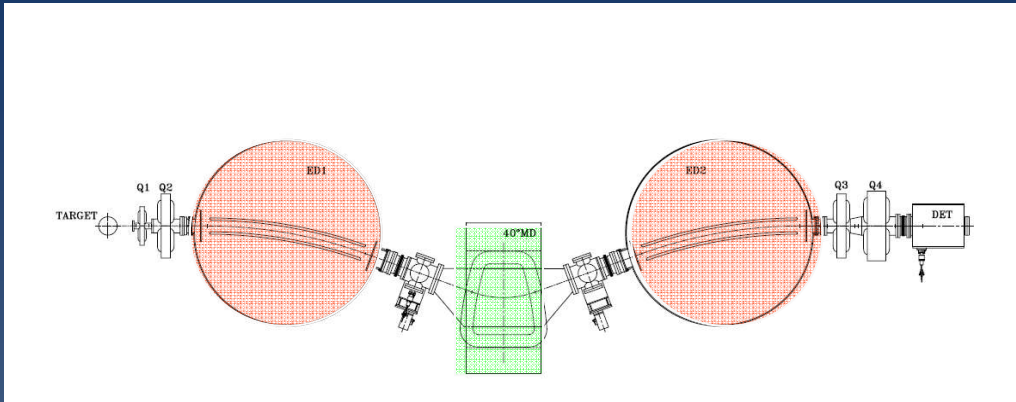
___ M1, Q, v₀

Avec E + B :
Sélection en M/Q
Resolution :
En M/Q=1/300

$$R = 2 \Delta x_{\text{focal}} / R_{16}$$

$$= 2 R_{11} \Delta x_{\text{cible}} / R_{16}$$

Les limitations d'un RMS : l'électrostatique



- Intensité faisceau primaire limité

(faisceau primaire perdu sur les électrodes => claquages)

=> diffusion (mauvaise rejection)

- Energie des faisceaux d'intérêt < 5 MeV/A [$V_{elec} < 300\text{kV}$]

La rigidité électrique est en Vitesse**2 : $E_{ro} = \gamma M v^2 / Q$

- L'identification est toujours un challenge $M > 100$ à #1 MeV/A!!!

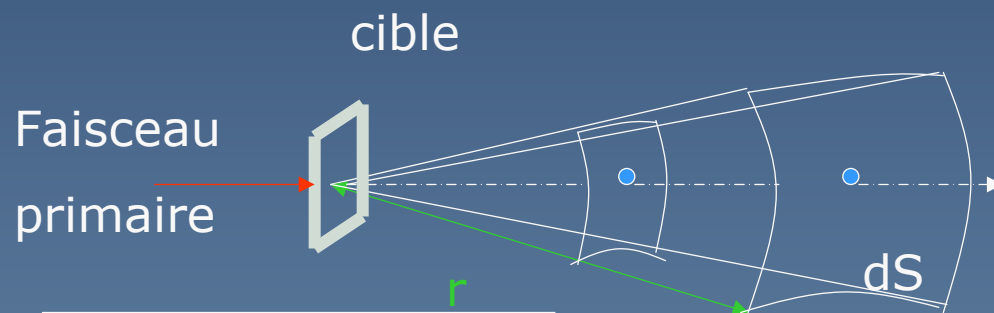
- L'acceptance* # 5 mstrd [$\pm 40\text{mrad}$ espace entre électrodes limité]

La notion d'acceptance* angulaire

Les produits de réaction émergent de la cible avec une certaine divergence angulaire.

Les limitations de la chambre à vide

induisent des pertes = la transmission chute



$$d\Omega(\text{strd}) = \frac{dS}{4\pi r^2}$$

l'acceptance du spectrometer se mesure en stéradian.

EXemple: Si les particules incluses dans $\pm 40\text{mrd}$ (Horizontal et vertical) sont transmises

Alors l'acceptance est

$d\Omega \# 5 \text{ mstrd}$

à $r=1000\text{mm}$

$dS \# 80\text{mm} * 80\text{mm} = 64000\text{mm}^2$

Le principe des spectromètres à gaz pour les ions lourds :

Aux énergies inférieures à 5 MeV, les ions émergent de la cible dans différents états de charges

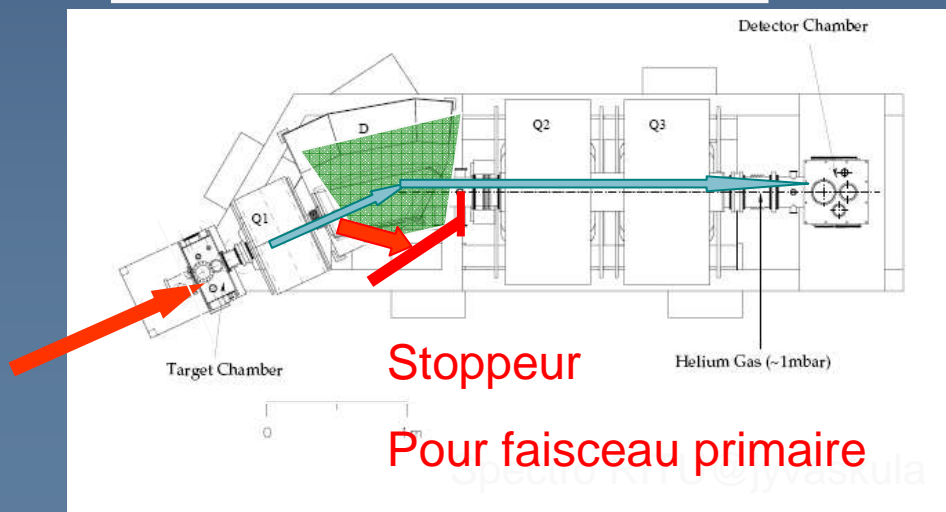
Un seul état de charge est transmis

dans les spectro standards => pertes

« Charge focusing » + sélection en Z + bonne rejection

$$B\rho = \frac{m}{\langle q \rangle} v \propto m Z^{-1/3}$$

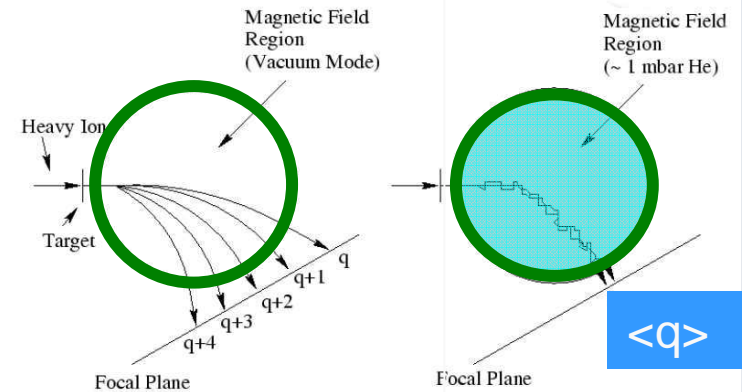
$$\langle q \rangle_{\text{gas}} \propto v Z^{1/3}$$



Pour faisceau primaire

$P=0\text{mbar} + B$

$P=1\text{mbar} + B$



Dans le gaz

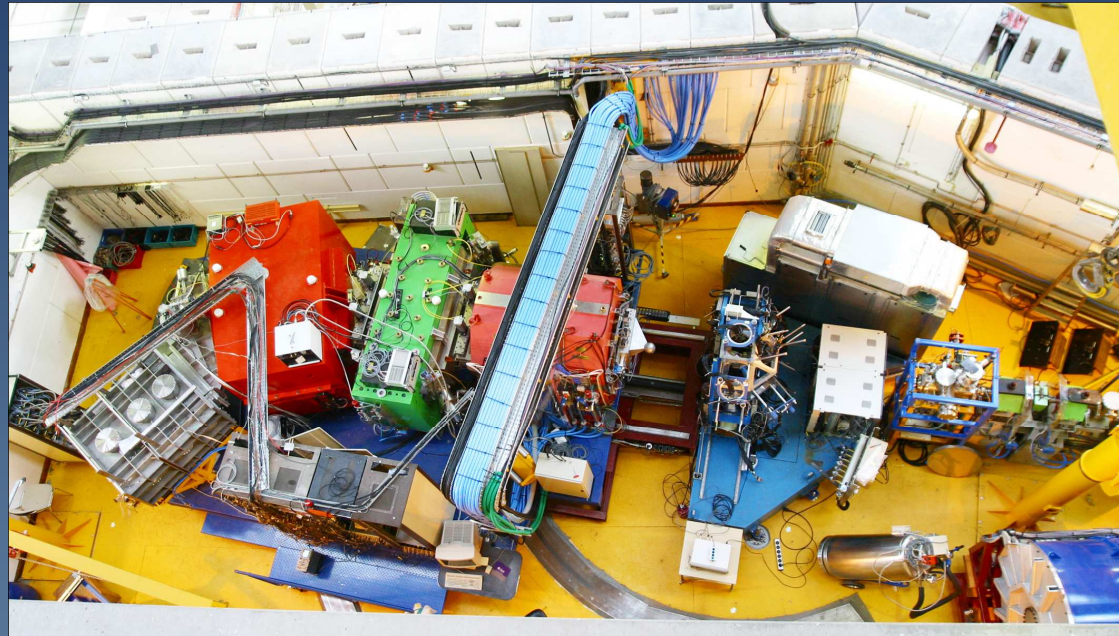
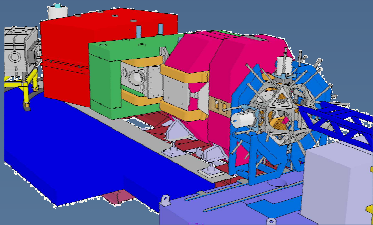
- Les collisions induisent des échanges de charges

- La trajectoire dépend du Q moyen $\langle q \rangle$

Avantages

- 1) Transmission de tous les états de charges dans le spectro à gaz
- 2) P#0 refroidit la cible

Les spectromètres à très grande acceptance angulaire et reconstruction de trajectoire VAMOS@GANIL, PRISMA@LEGNARO, S800@NSCL....



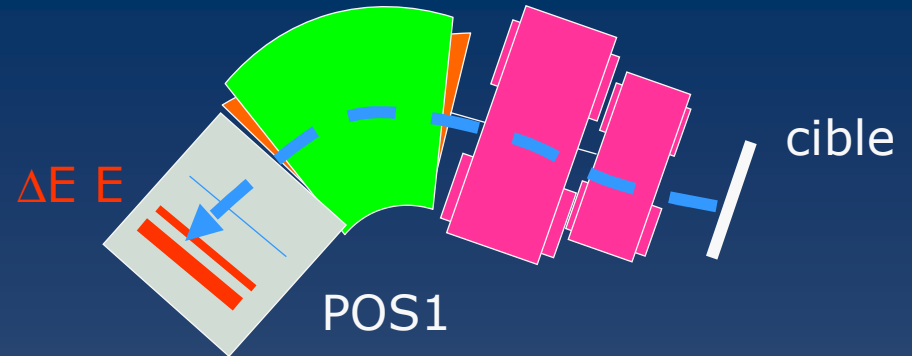
L'optique n'est plus linéaire

La position x d'une particule dans le plan focal après le dipôle ne permet pas le calcul du bras

Vamos@ganil
#70 mstrd

1) Pour les particules avec des angles petits
 $x', y' < 30$ mrd :

« l'optique est linéaire »



$$B_p = B_{p0} (1 + x_1/R_16)$$

$$M/q = B_{r0}/v = B_{r0} * TOF/L_0$$

Z # k ΔE → identification

$$A = E/v^2 \quad q = A/[M/q]$$

1) Pour les particules **avec**
 des grands angles
 $x', y' \gg 30$ mrd

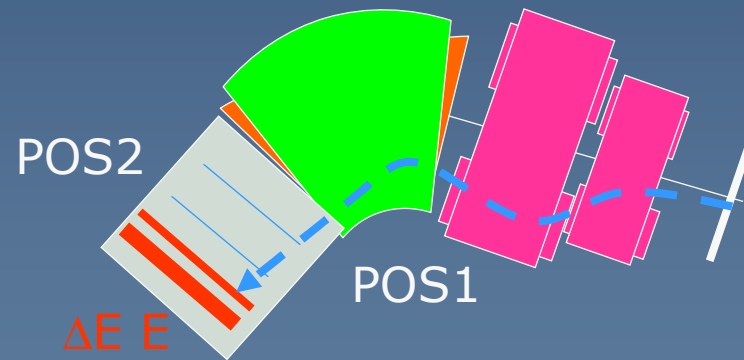
=> non linearités

$$B_p = F_1(B_{r0}, x, x^2, x'^2, x', y', \dots)$$

$$M/q = B_{r0}/v = B_{r0} * TOF/F_2(x, x', y, y')$$

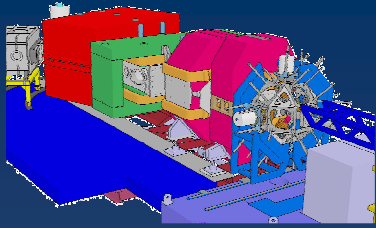
Z # k ΔE

F1 est un polynôme d'ordre 6



POS1+POS2

Permet de calculer les angles
 x', y'



Light/Fast Ion Detection Dispersive Plane of VAMOS

Drift Chamber

X: charge distribution
2 x 64 pads (6.3x50) mm

$X_{FWHM} \sim 200 \mu\text{m}$

Y: drift time

$Y_{FWHM} \sim 500 \mu\text{m}$

Ionisation Chamber

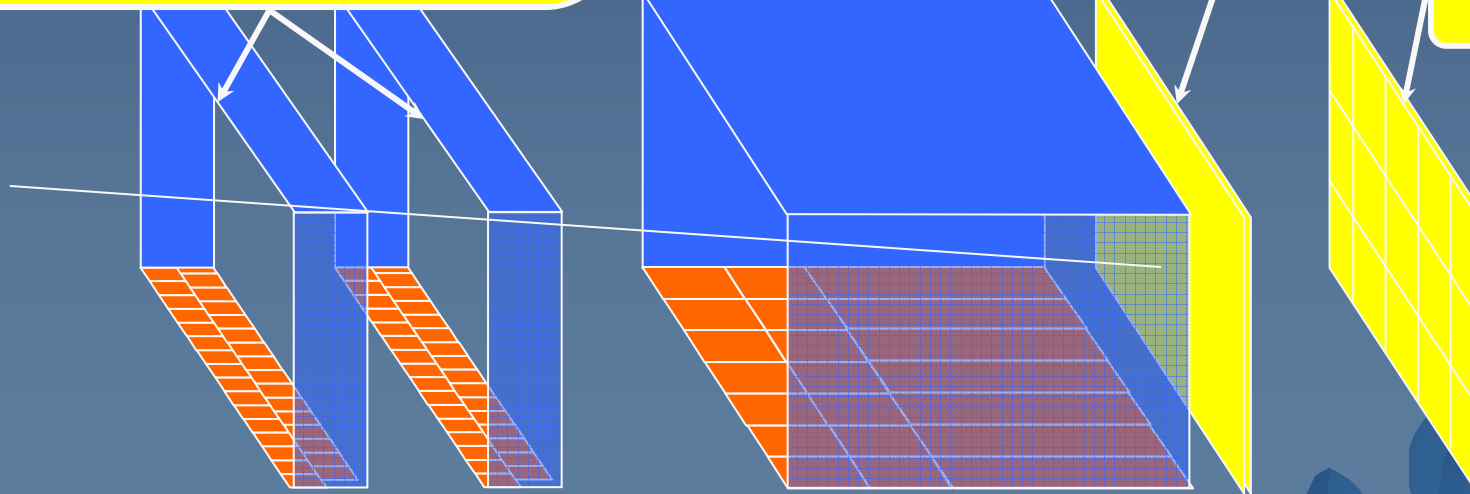
2 x 7 pads (50x50) mm
1 x 7 pads (50x 170) mm

$\Delta E_{FWHM} \sim 3\%$

Plastic Detector

$E_{FWHM} \sim 4\%$

Silicon Wall

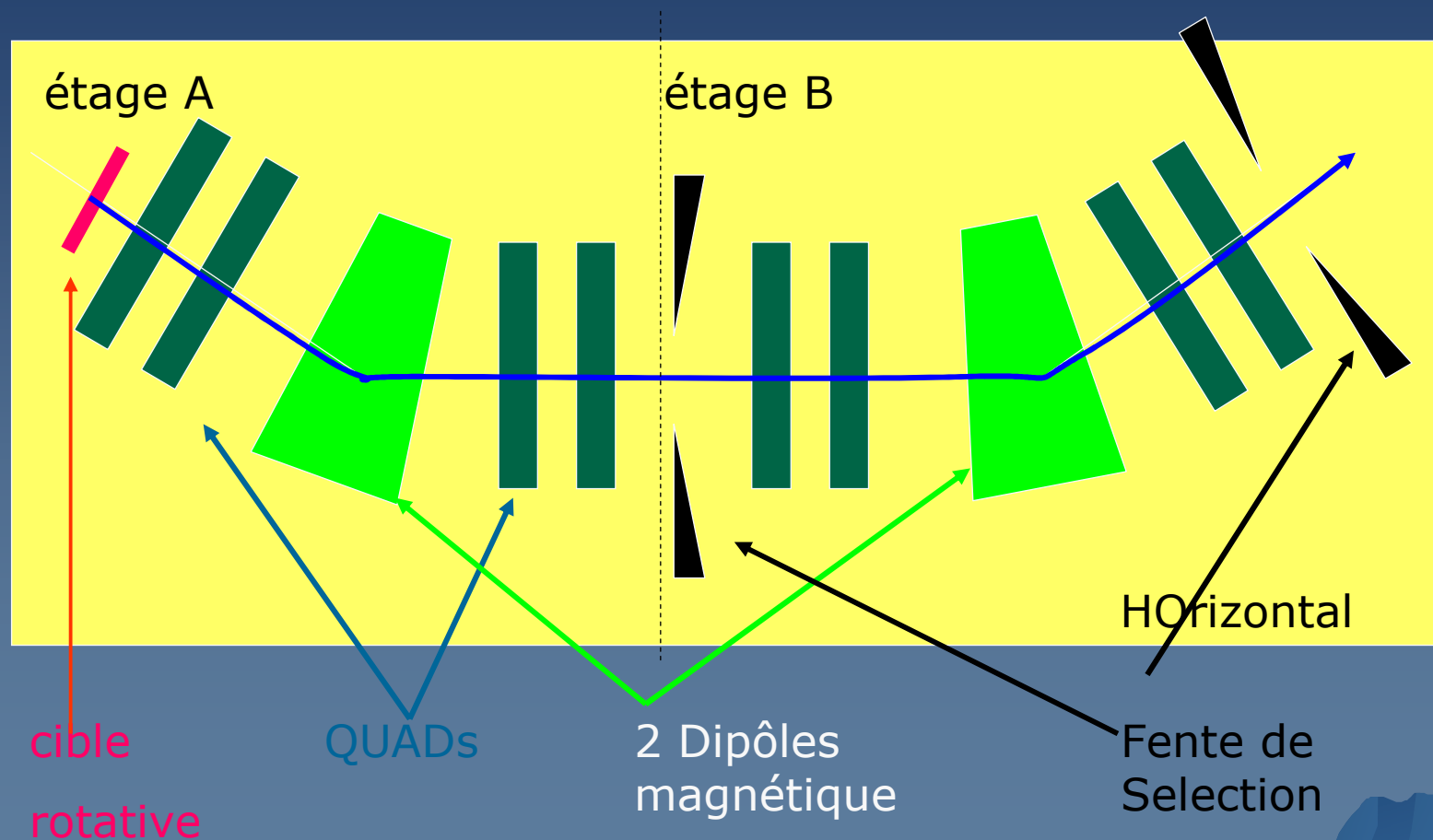


Les séparateurs de
fragments

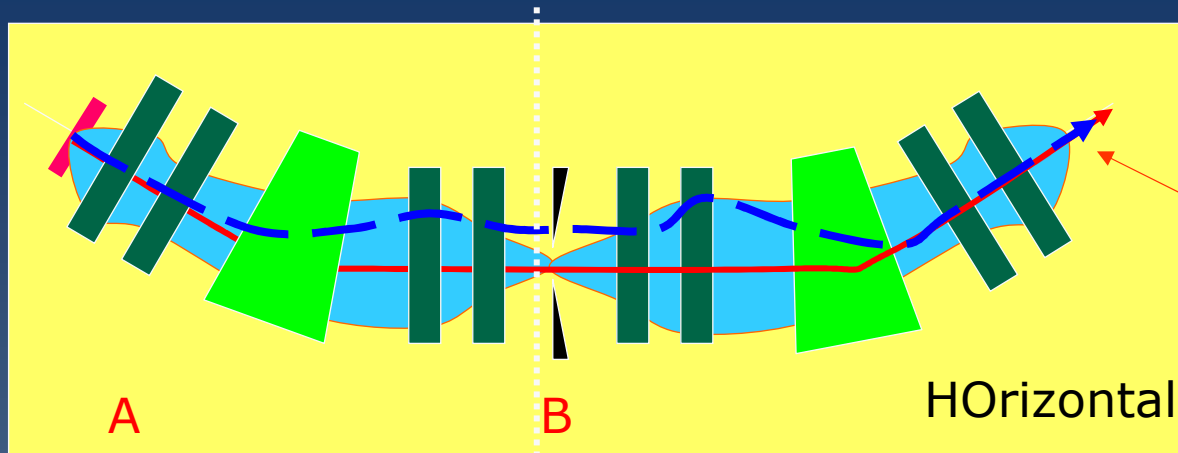
Shéma de base pour 1 séparateur de fragment :

2 spectromètres magnétiques : arrangement symétrique

Vue du dessus



Fragment séparateur : schéma de principe



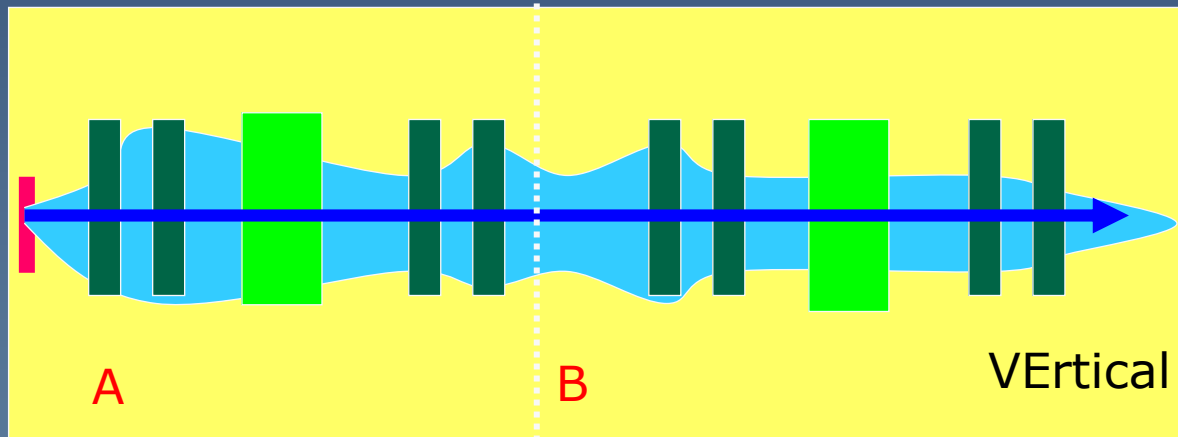
Beam envelop HO

$$R16_{(A+B)}=0$$

Mais

$$R16(A) \neq 0$$

$$R16(B) \neq 0$$



Beam envelop VE

A: 1^{er} étage

Bro selection

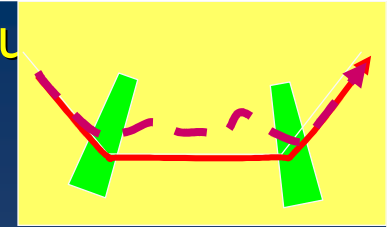
R16 #0

B: second étage

Bro compensation

R16=0 (achromatique)

Un séparateur de fragments est achromatique



Matrice total section A+B : $R(A+B) = R(A) \times R(B)$

Considérons une trajectoire $(x_0=0, x_0'=0, y_0=0, y_0'=0, l=0, \delta)$

Position x_A après étage A

$$\begin{aligned} X_A &= R_{11}(A) x_0 + R_{12}(A) x_0' + R_{16}(A) \delta \\ &= R_{16}(A) \delta \end{aligned}$$

Position x_B après second étage B

$$\begin{aligned} X_B &= R_{11}(B) x_A + R_{12}(B) x_A' + R_{16}(B) \delta \\ &= R_{11}(B) x_A + R_{16}(B) \delta \\ &= R_{11}(B) [R_{16}(A) \delta] + R_{16}(B) \delta \end{aligned}$$

hypotheses

$$X_0=0$$

$$X_0'=0$$

$$R_{12}(A)=0$$

$$R_{12}(B)=0$$

A la sortie X_A est indépendant de δ (achromatique) si

$$X_A=0 = R_{11}(B) [R_{16}(A) \delta] + R_{16}(B) \delta$$

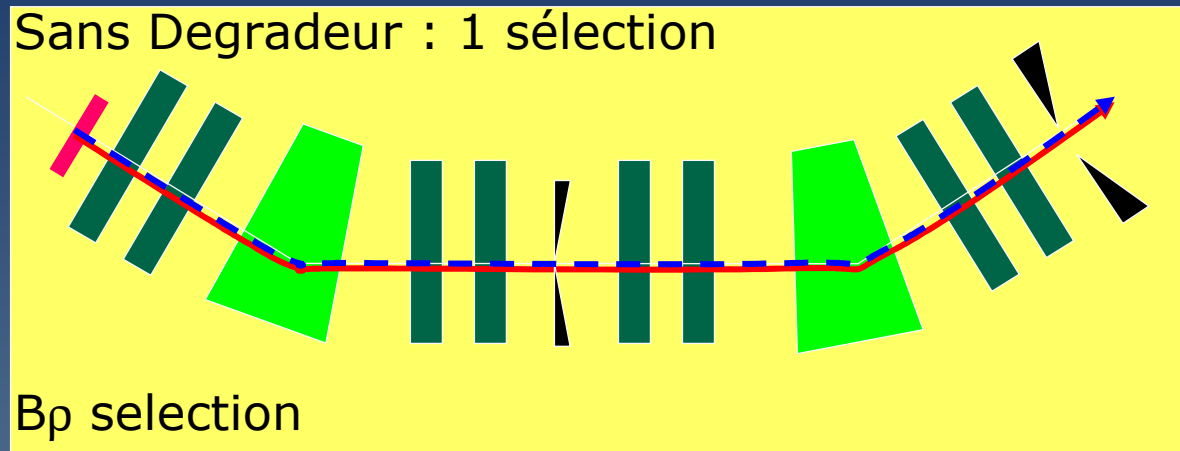
$$\text{Achromaticité if } R_{16}(B) = -R_{16}(A) R_{11}(B)$$

Spectromètre magnétique

« Achromatique » avec Degradeur => augmente la purification

considérons 2 isobares ($A=34, Z=14$) ($A=34, Z=15$) avec même $B\rho$

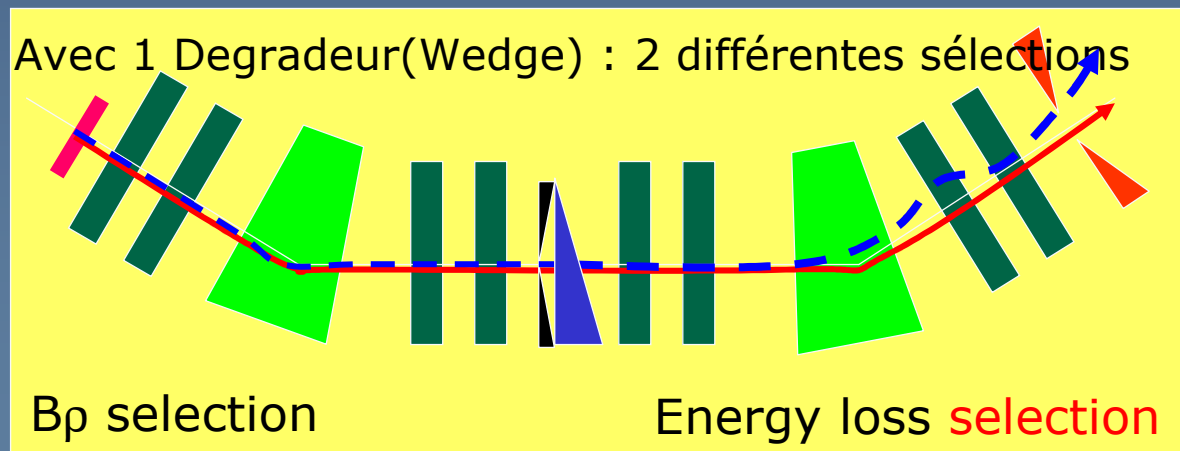
Sans Degradeur : 1 sélection



$B\rho$ sélection est indépendant de Z

$$B\rho = Mv/Q$$

Avec 1 Degradeur(Wedge) : 2 différentes sélections



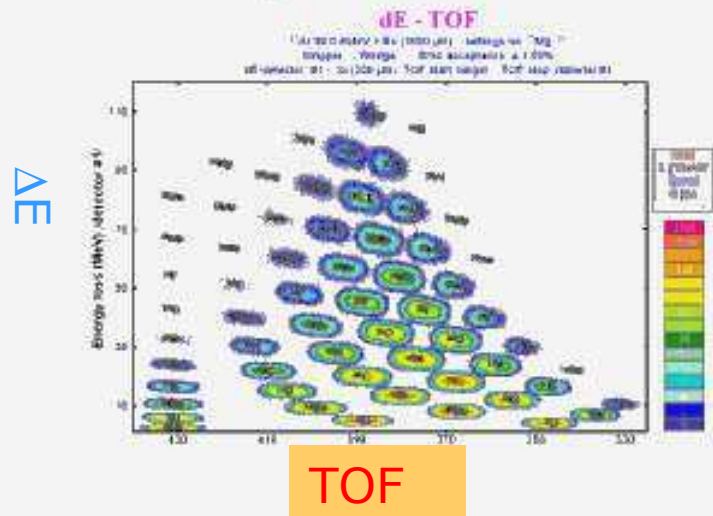
Sélection en perte d'énergie est « Z dépendant »

Bethe-Bloch formula

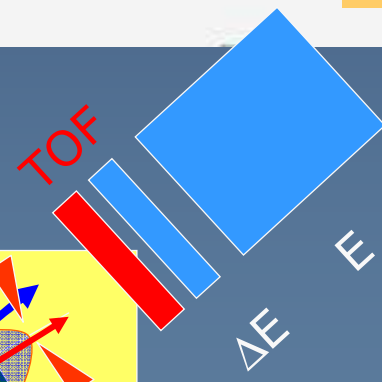
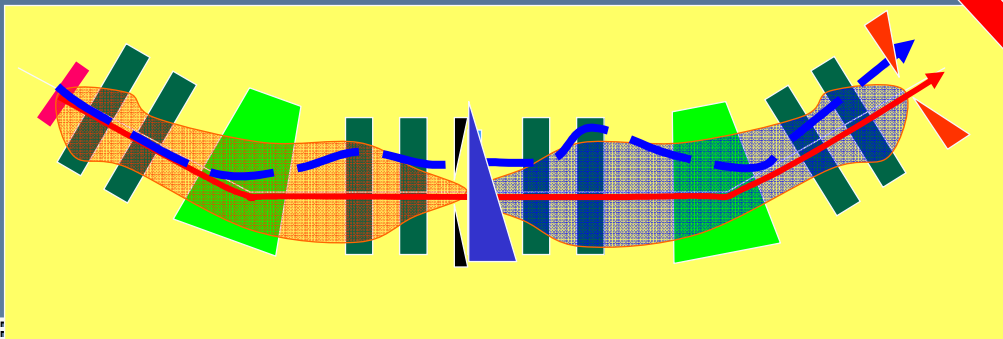
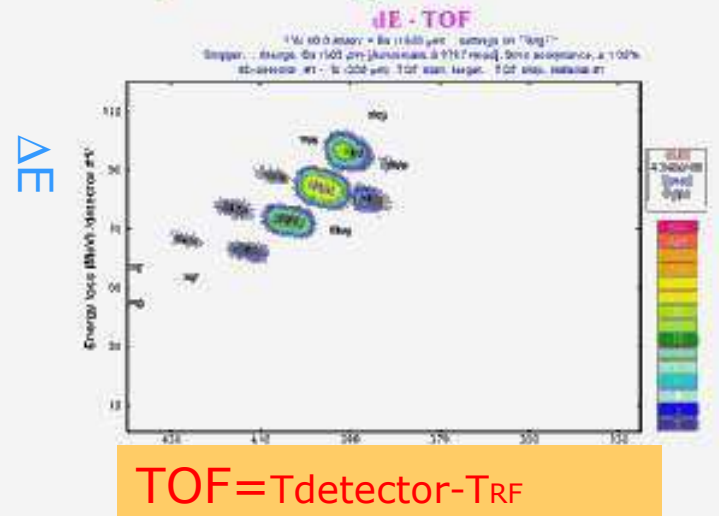
$$\Delta E = k \frac{Z^2}{A} * \Delta x$$

Sélection dans 1 séparateur de Fragments & identification

$B\rho$ selection



$B\rho$ +wedge selection



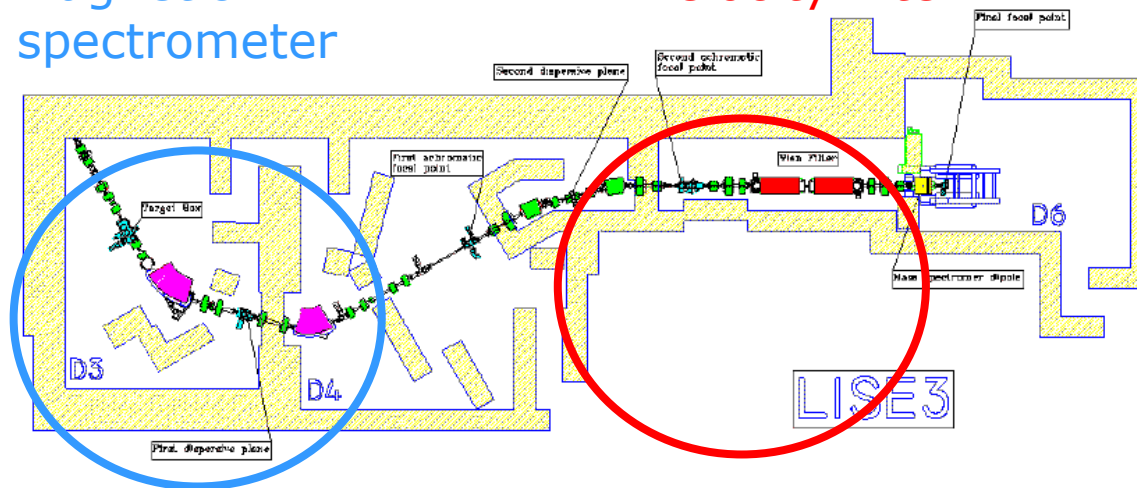
Le Séparateur LISE

GANIL

Secteur Techniques de la Physique
05/1997

Magnetic
spectrometer

Velocity filter



Specifications

$L=35\text{m}$

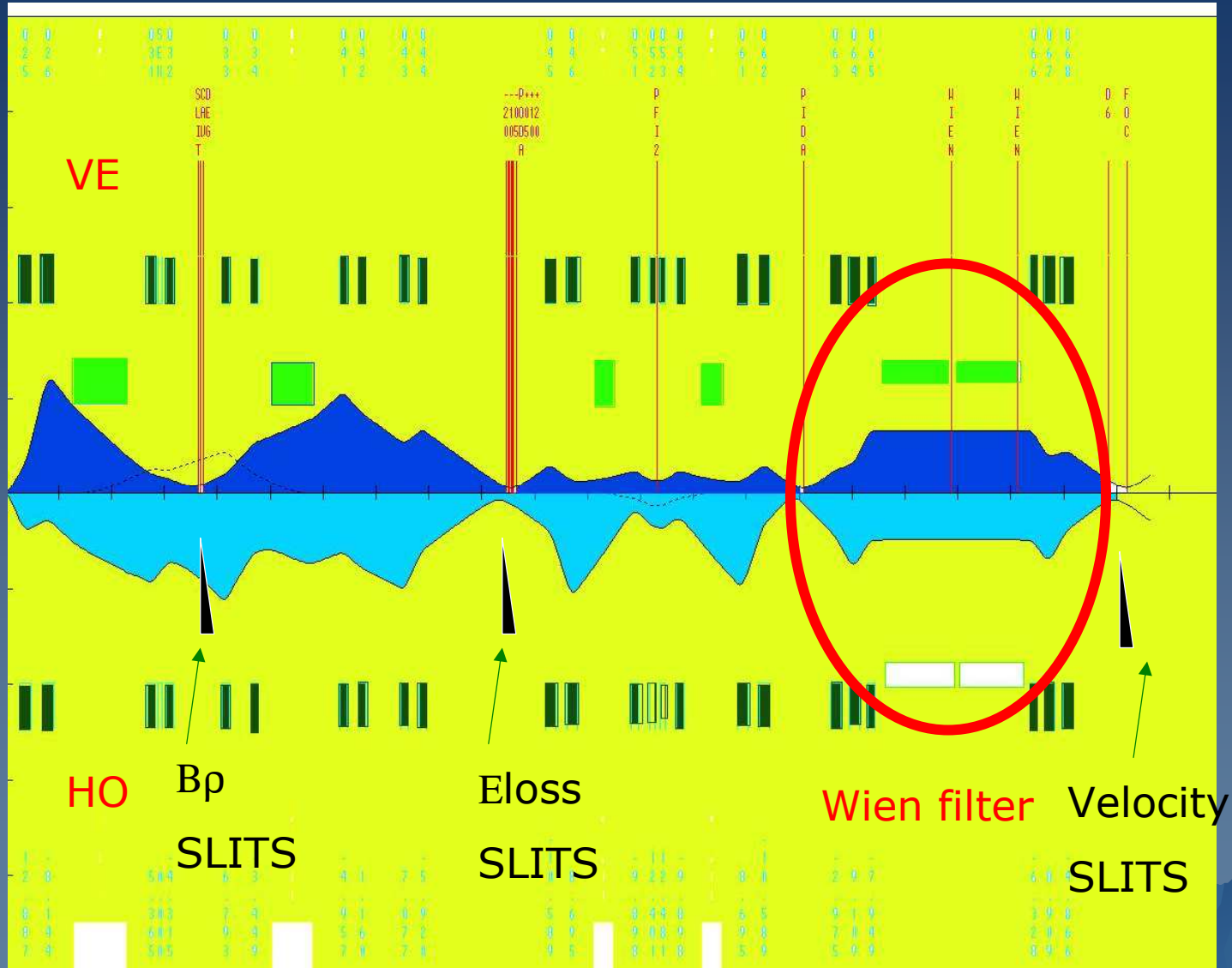
$Bp1_{\text{max}} = 4.3\text{Tm}$ // $Bp2_{\text{max}} = 3.2\text{Tm}$

$\Delta p/p = \pm 2.5\%$

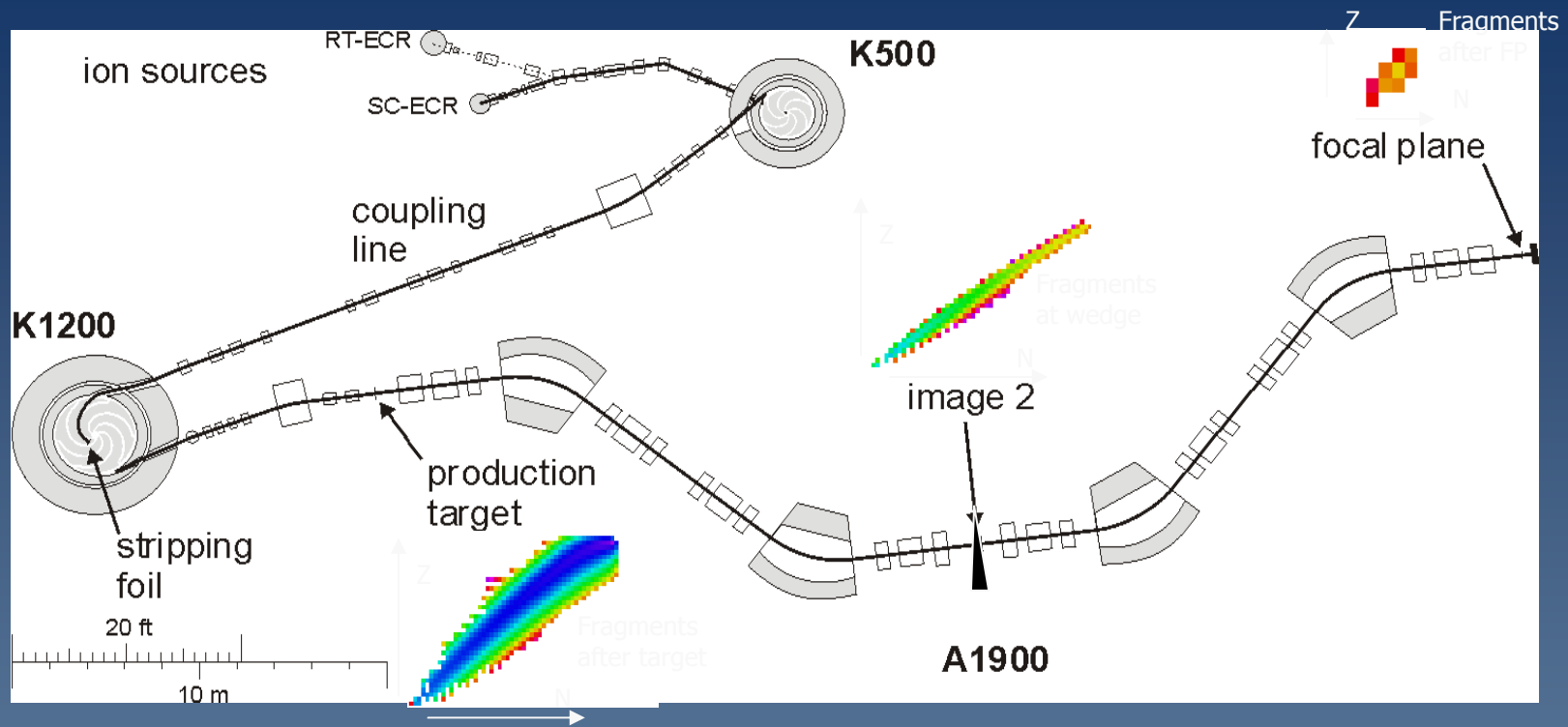
$\Delta x' = \pm 25\text{mrad}$

$\Delta y' = \pm 20\text{mrad}$

Lise : l'enveloppe faisceau (demi largeur au pied)



A1900@NSCL (Michigan State University)



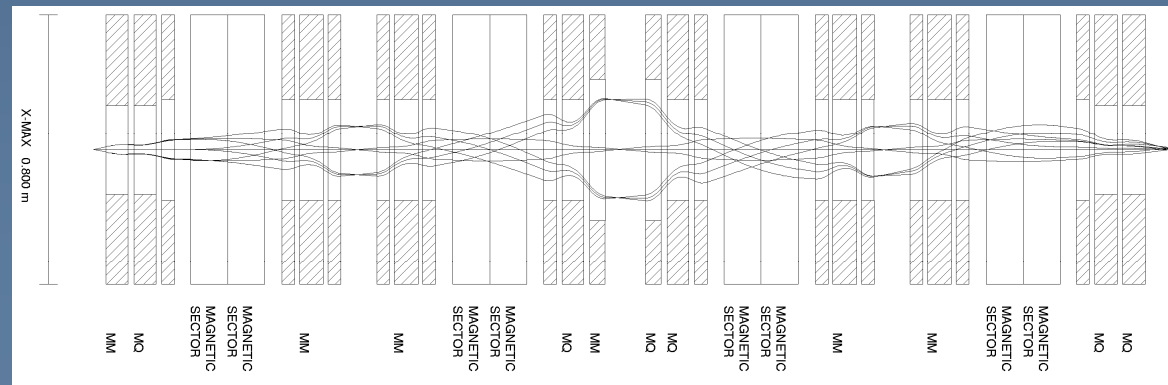
Specifications

$$B\rho_{\max} = 6\text{Tm}$$

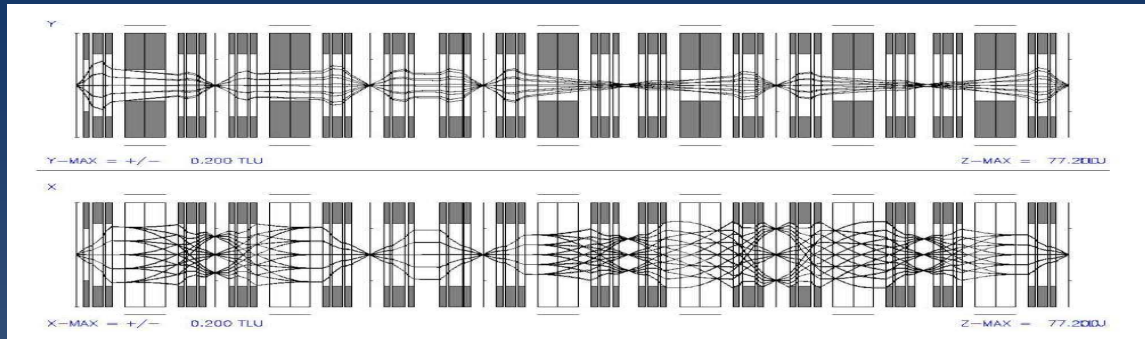
$$\Delta p/p = 5\%$$

$$\Delta x' = \pm 40\text{mrad}$$

$$\Delta y' = \pm 50\text{mrad}$$



BIG RIPS (Riken)



Specifications

$L=77\text{m}$

$B\rho_{\text{max}} = 7 \text{ Tm}$

$\Delta p/p = 6\%$

$\Delta\theta = \Delta x' = \pm 50\text{mrad}$

$\Delta\phi = \Delta y' = \pm 60\text{mrad}$

BigRIPS : Tandem (Two-stage) Separator

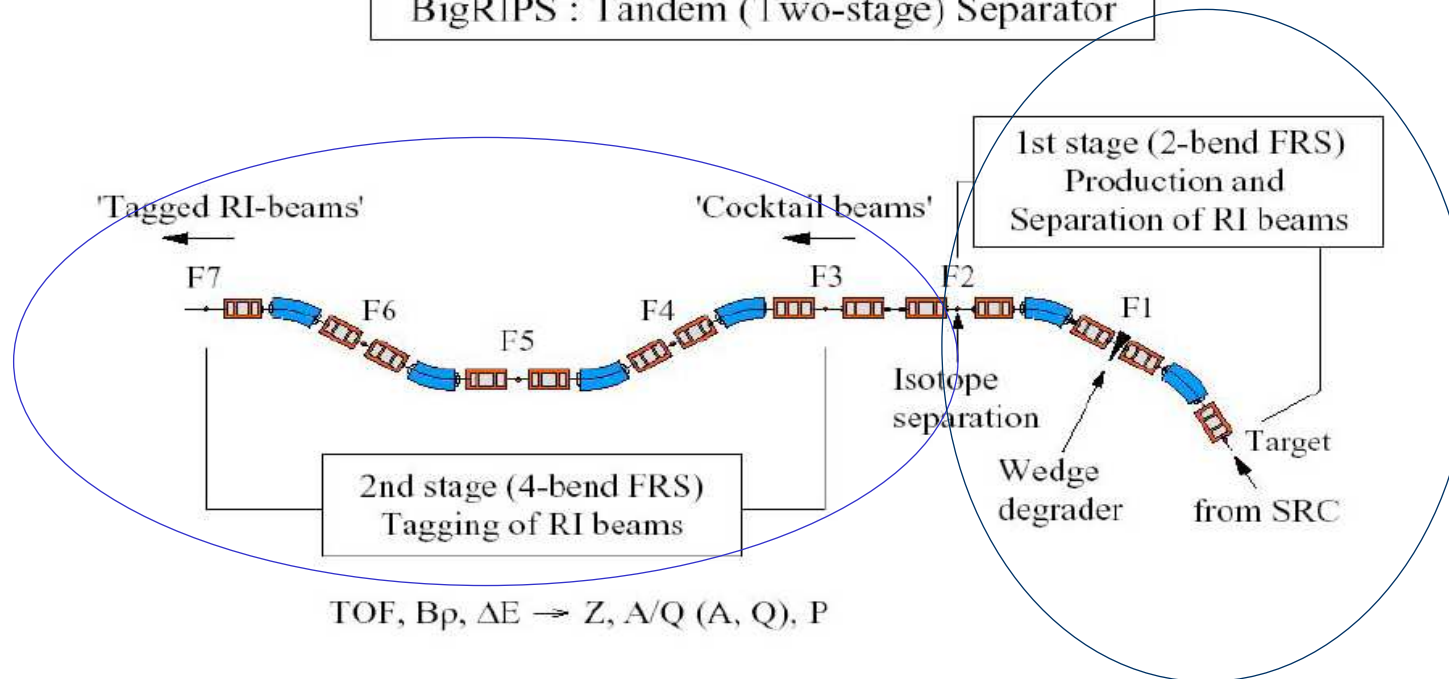


Fig. 2. A schematic diagram of the RI-beam tagging in the BigRIPS separator.

BIG RIPS (Riken)

Super-ferric quadrupole triplet

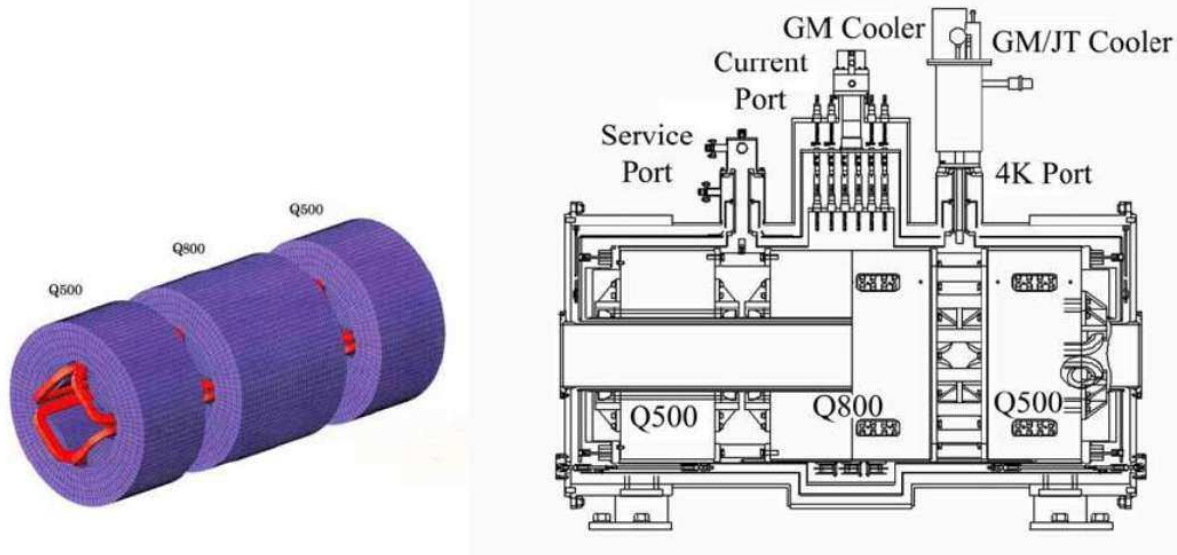


Figure 22: Schematic view of the RIKEN prototype quadrupole triplet (left side) and its installation into the cryostat (right side) [24].

- Supra-conducting coils
- M/Q poles : Raperture = 0.1m ; Bpole-max# 2 Teslas
GradientMax=2T/0.1m=20.T/m

Comparaison entre # Séparateurs de Fragment dans le monde

	Lise3 Ganil	FRS _{GSI} Mode1 or mode2	A1900 MSU //NSCL	BigRips Riken
Acceptance Angulaire	1.6mstrd	0.32mstrd or 3.4mstrd	8mstrd ±40* ±50mrad	10 mstrd ±50* ± 60mrad
Momentum Acceptance	±2.5%	± 2.0%	± 3.0%	± 3.0%
R16 (m=cm/%) pResolution Length	1.7 m 1/600 42 m	6.8m 1/1600 or 1/160 69m	5.95m 1/2900 35m	3.3 m 1/3300 77 m
Bromax	4.3T.m//3.2T.m	18T.m or 8.6T.m	6.3 T.m	9.T.m
Commen-taires	2 Dipôles + filtre de Wien	4 dipôles	4 dipôles	1 pre-separateur (2 dipôles) + 1 separateur (4 dipôles)

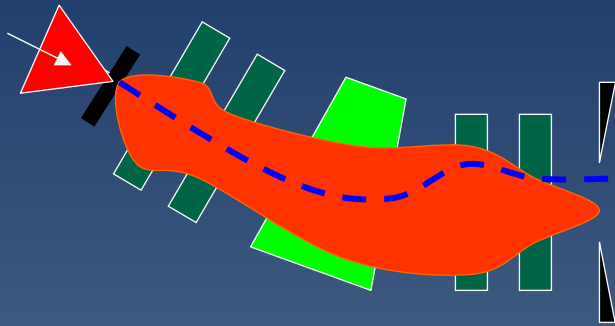
Fin partie 2

Annex

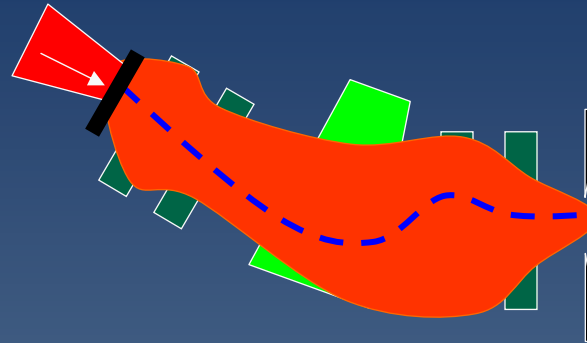
- How to optimise beam quality& Acceptance
- The Lise fragment separator & the wien filter
- Non linear effect in optical systems
- why the degrador thickness (Wedge) is not constant in a fragment separator ?
- Non linear effects in beam optics
- Global Perfomance of (spectrometer+detector)

how to optimise beam quality in fragment separator

Small spot : $\Delta x_0 = +/- 1\text{mm}$



big spot : $\Delta x_0 = +/- 10\text{mm}$



- 1) A small spot size on production target - maximise the transmission
- optimise the selection

After the production target : Emittance = $\pi \Delta x_0 \times \Delta x_0'$

Δx_0 is the size of primary beam on target => small Δx minimize Emittance

$\Delta x_0'$ is given by the nuclear reaction

2) For separation : increase the dispersion R16 while reducing $\Delta x_A = R_{11} \Delta x_0$

3) For angular transmission : increase the quad size

4) For bro transmission (momentum acceptance) :

reduce R16 AND/OR Increase Quad size in chromatic section

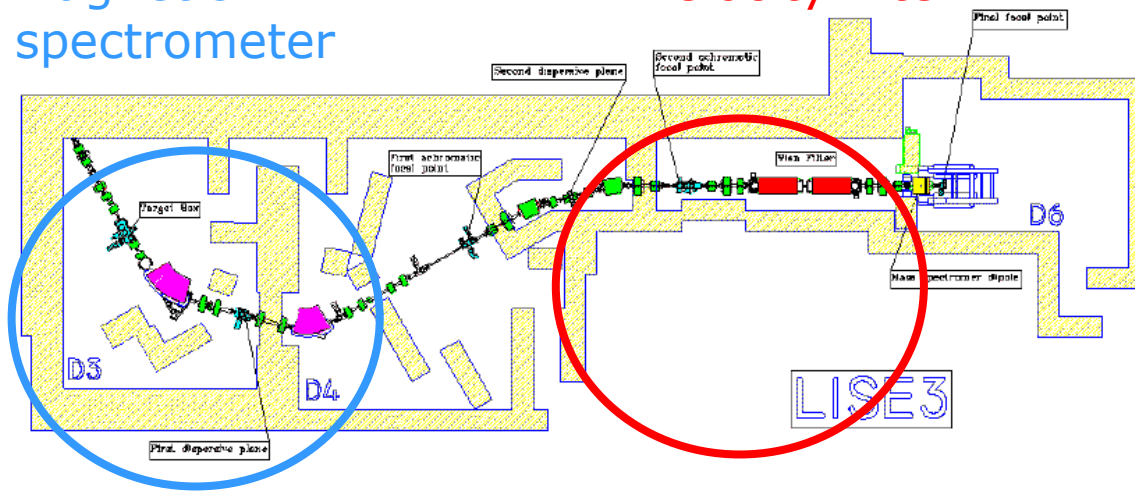
LISE separator with wien filter

GANIL

Secteur Techniques de la Physique
05/1997

Magnetic
spectrometer

Velocity filter



Specifications

$L=35\text{m}$

$Bp1_{\text{max}} = 4.3\text{Tm}$ // $Bp2_{\text{max}} = 3.2\text{Tm}$

$\Delta p/p = \pm 2.5\%$

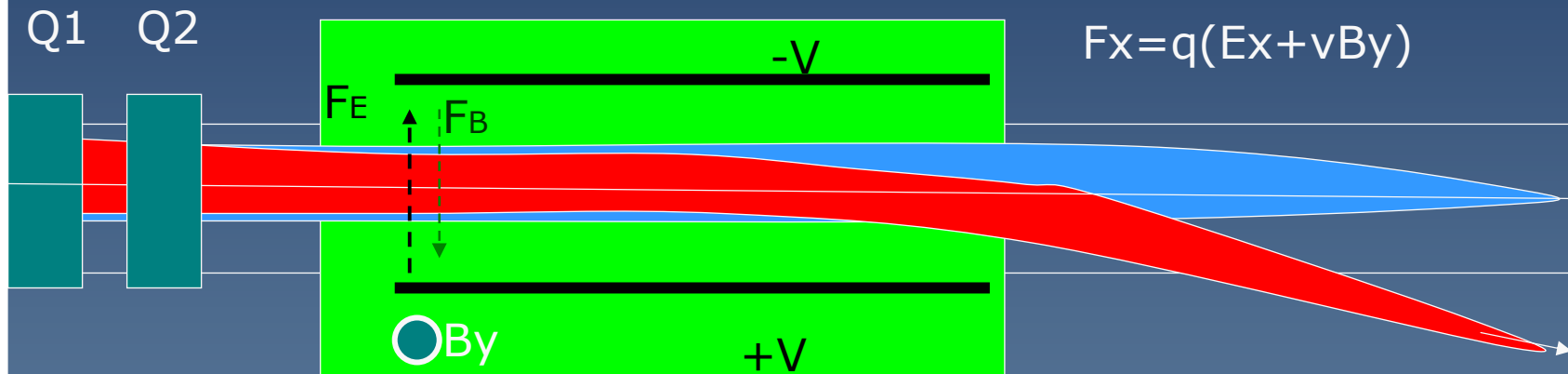
$\Delta x' = \pm 20\text{mrad}$

$\Delta y' = \pm 20\text{mrad}$

The velocity filter (so-called **Wien filter**)

The wien filter use Electric field
+ magnetic field

$$F = F_E + F_B = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



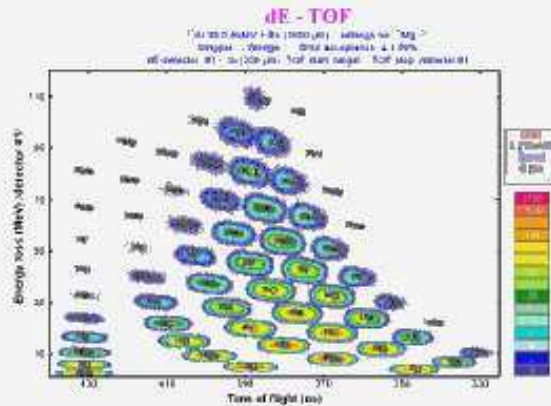
The particles with $v_0 = -E_x/B_y$ are not deflected ($F=0$)

The particles with a Large velocity deviation ($v \neq v_0$) are deflected

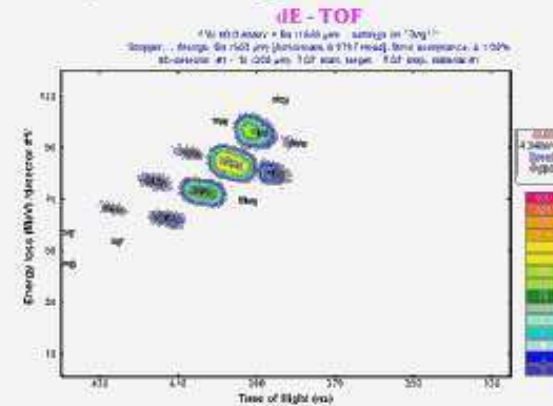
Nota : trajectories in Electric field depend on the « electric rigidity » of the particles : $E_p = \gamma M V^2 / Q$

$$\frac{1}{\rho_{trajectory}} = \frac{E_x}{E_p} - \frac{B_y}{B_p}$$

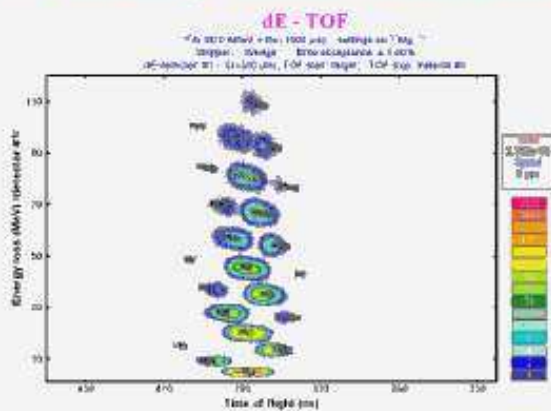
B ρ selection



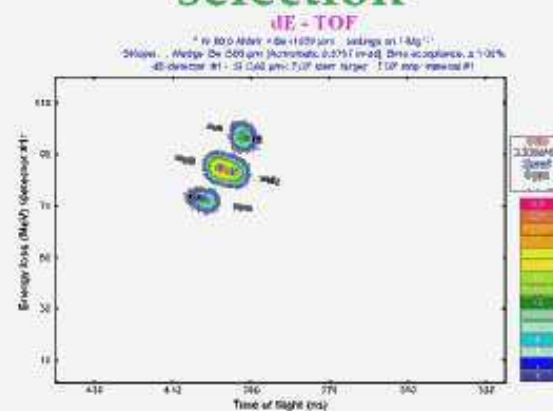
B ρ +wedge selection



B ρ +velocity filter selection



B ρ +wedge+velocity filter selection



Non linear effects in optical system

$$\vec{X}_2 = R \cdot \vec{X}_1 = \sum_{j=1}^6 R_{ij} \cdot \vec{X}_{1j}$$

for large angle, large bro deviation 2nd order, third order is required.

$$X_{2i} = \sum_{j=1}^6 R_{ij} \cdot \vec{X}_{1j} + \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^6 T_{ijk} X_{1j} \cdot X_{1k} + \dots$$

1st order 2nd order

Linear Approximation hold for small angle, small bro deviation... (#30mrad, δ=1%)

$$\vec{X}_1 = (x, x', y, y', l, \delta)_1$$

Effects of second order :

- Inclination of focal plane
- the Focusing strenght of quads is bp dependant
- Large angle particles are not well focused

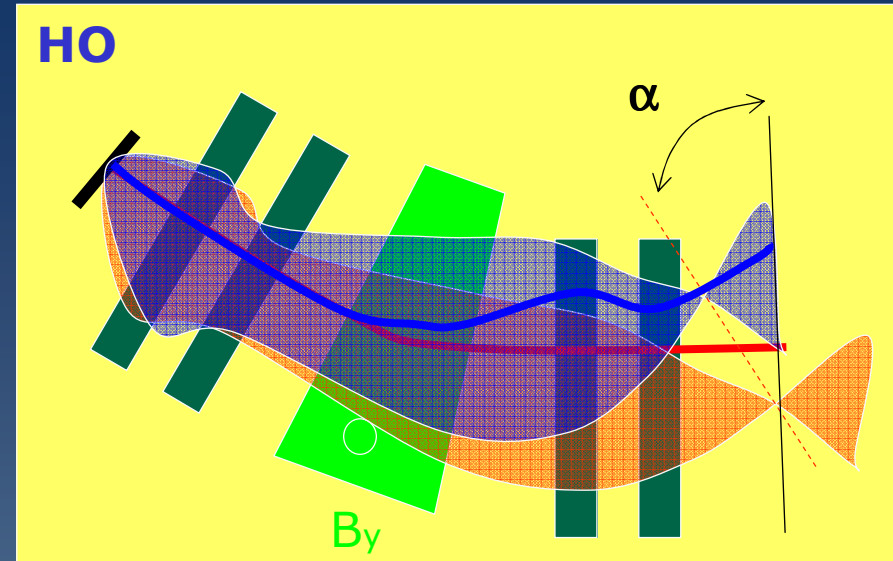
High orders come also with field defects in quads and dipoles

Non linear effects in optical system

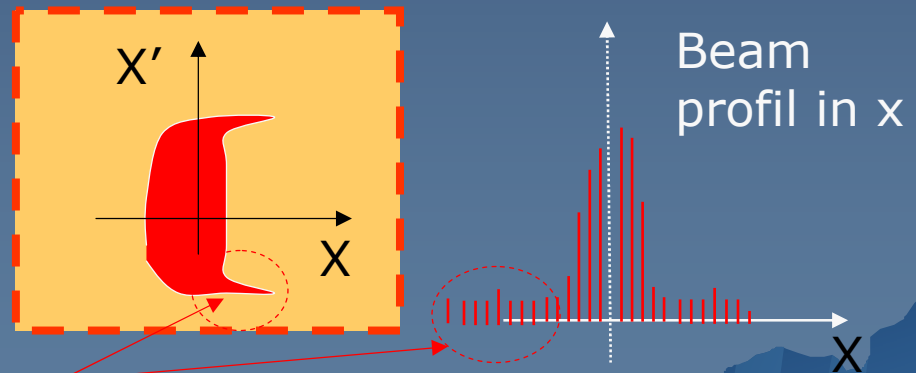
Ex1: Inclination α of the focal
in a spectrometer

$$\text{tg}(\alpha) = R_{16}/T_{126}.R_{11}$$

- Choice of the **dipole Angle**
- Magnetic sextupole has to be used for correction



Ex2: distorsion of beam ellipse
In phase space
Inducing Distribution wings

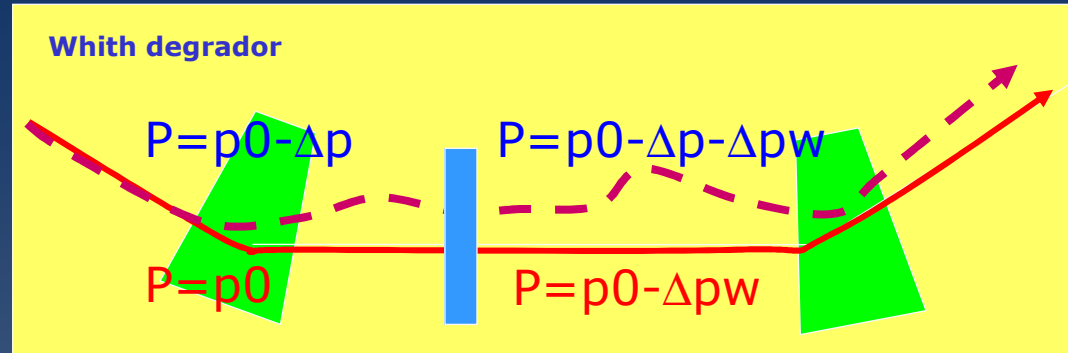
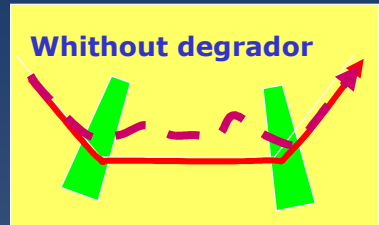


Optical aberrations (non linearities)

Why a degrador (wedge) is not uniform in x :

1)

2 particles
With same Z ,
but different
 B_p



Goal of the degrador :

- Separate the different particles (different Z)
- All the same particles should re-focus at end of the B stage whatever their bro (δ) => achromatic degrador (Wedge) : $R_{16}(A+B)=0$

Adding a uniform degrador makes the optics chromatics at the End

Before degrador δ_A , the momentum deviation of the 2 trajectories is $\delta_A = -\Delta p/p_0$

After degrador $\delta_B = [p_0 - \Delta p - \Delta p_w - (p_0 - \Delta p_w)] / [p_0 - \Delta p_w]$

$$\delta_B = [-\Delta p] / [p_0 - \Delta p_w] \quad \delta_A \neq \delta_B$$

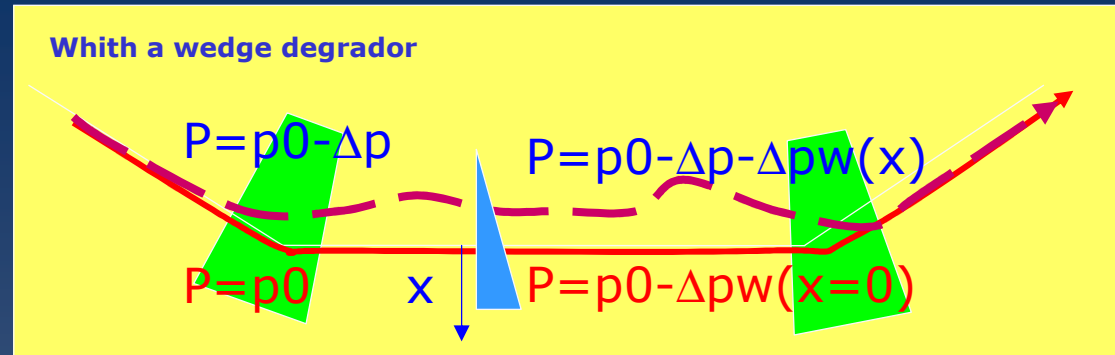
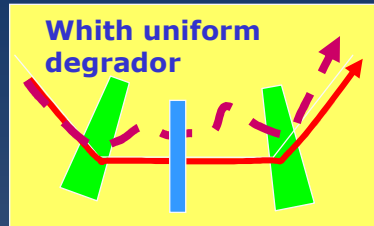
Optics is achromatic without degrador ($\delta_A = \delta_B$)

Optics will not be achromatic with degrador with $\delta_A \neq \delta_B$

Why a degrador (wedge) is not uniform in x

2)

2 particles
With same Z,
but different
 $B\rho$



Optics will be achromatic with degrador if $(\delta_A = \delta_B)$

The solution for having $\delta_A = \delta_B$: degrador thickness $T = T(x)$

$$\Rightarrow \Delta p_w = \text{fonction}(x)$$

Before degrador, the momentum deviation of the 2 trajectories

$$\delta_A = -\Delta p / p_0$$

After degrador

$$\begin{aligned} \delta_B &= [p_0 - \Delta p - \Delta p_w(x_A) - (p_0 - \Delta p_w(x_A=0))] / [p_0 - \Delta p_w(x_A=0)] \\ &= [-\Delta p - \Delta p_w(x_A) + \Delta p_w(x_A=0)] / [p_0 - \Delta p_w(x_A=0)] \end{aligned}$$

tricks : $\Delta p / p_0 = x_A / R_{16}$

$$(\delta_A = \delta_B) \Rightarrow \Delta p_w(x_A) \neq \Delta p_w(x=0) \times [1 + x_A / R_{16}(A)]$$

$$\text{Thickness of the Wedge} \neq K \times [1 + x_A / R_{16}(A)]$$

Global performance of a (spectro+detector)

efficiency $\varepsilon = \varepsilon_{\text{detector}} * \text{Transmission_spectro}$

selectivity = rejection by spectro *background supression by detector
(coincidence, identification)

Sensitivity= the smallest measurable cross section

Maximal intensity of incident beam

- thermal limit on target (rotative or not,....)
- maximal intensity on detection sytem
- beam losses in spectro (electrostatic sparking,....)
- radioprotection

References:

The historical paper for fragment separators:

[1] R.Anne, D.Bazin, A.C.Mueller, J.C.Jacmart and M.Langevin, "The achromatic spectrometer LISE at GANIL", NIM A257 (1987) 215-232.

More on wedge

[1] H.Geissel, G.Munzenberg, K.Riisager, "Secondary exotic nuclear beams", Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 45 (1995) 163-203.

Interesting details in : Kubo et Al, Bigrips NIM

Part of this lecture inspired by

H.Geissel : Lecture given in valencia about FRS@GSI

A.C. Villari : Course in Ganil

A. Savalle : Course in Ganil