

# CHAPITRE MI4

## Mouvement d'une particule chargée dans un champ électromagnétique

## ➤ Problématique

Comment créer et diriger un faisceau de particules de haute énergie nécessaire à l'irradiation de la tumeur en radiothérapie ?

- Mvt particules chargées
  - ❖ avec champ **électrique**
  - ❖ avec champ **magnétique**



FIGURE 1 : Appareil de radiothérapie

- Développement relativiste exclus

# 1 Force de Lorentz

force d'origine électrostatique  
+ force d'origine magnétique

## 1.1 Force électrostatique

### 1.1.1 Champ électrostatique

#### ➤ Relation entre champ et force

champ électrique : grandeur vectorielle  
perturbation des propriétés de l'espace



présence 1/plusieurs charges électriques fixes

## Loi de Coulomb

### force électrique

$$\vec{F}_{elec} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r = q\vec{E}$$



$$r = OM \text{ et } \vec{u}_r = \frac{\vec{OM}}{r}$$

Champ électrique créé par la charge  $q_0$

$$\vec{E} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r$$



### ➤ Caractéristiques du champ électrique

Ne dépend que de la **position de M** et de **t**

### Définitions :

- **Stationnaire** : indépendant du temps
- **Uniforme** : indépendant de la position

## 1.1.2 Énergie potentielle électrostatique

➤ Expression de  $E_{P,elec}$



$$E_{P,elec}(r) = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r}$$



➤ Potentiel électrique

Définition : **Potentiel électrique  $V(M)$**

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{OM} \quad (V)$$

Propriété

$$E_{P,elec}(M) = qV(M)$$



➤ Unité du champ électrique

[1] J.-M. Courty, É. Kierlik, Vols d'araignées au-dessus des océans, *Pour la Science*, n°497, p. 84-86, Mars 2019

## 1.1.3 Création d'un champ électrostatique uniforme

### ➤ Condensateur plan

Tension électrique :

$$U = V_A - V_B > 0$$

### ➤ Champ électrique créé

Propriété

$$E = \|\vec{E}\| = \frac{V_A - V_B}{d} = \frac{U}{d}$$



### ➤ Calcul de la norme du champ électrique

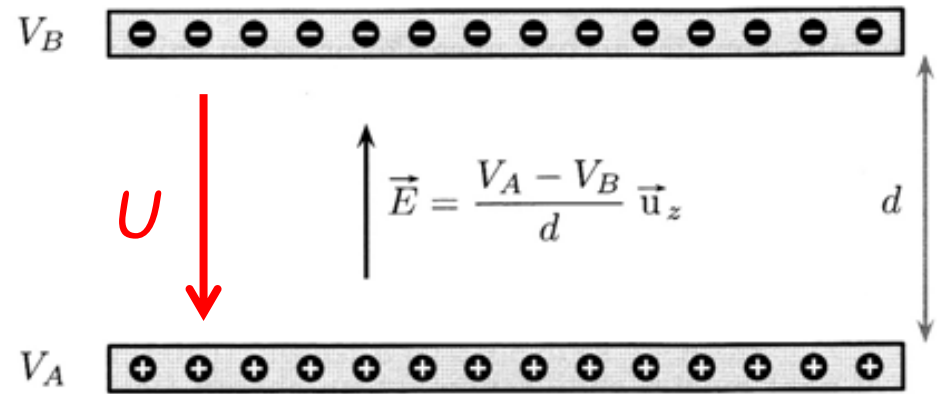


FIGURE 2 : Champ électrique créé par un condensateur plan

## 1.2 Force magnétique

### 1.2.1 Expériences

#### ➤ Expérience d'Oersted

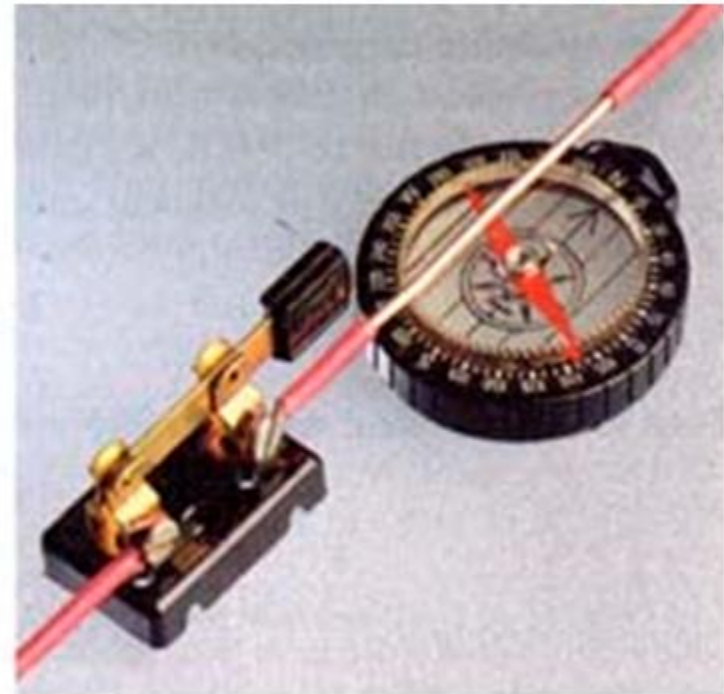
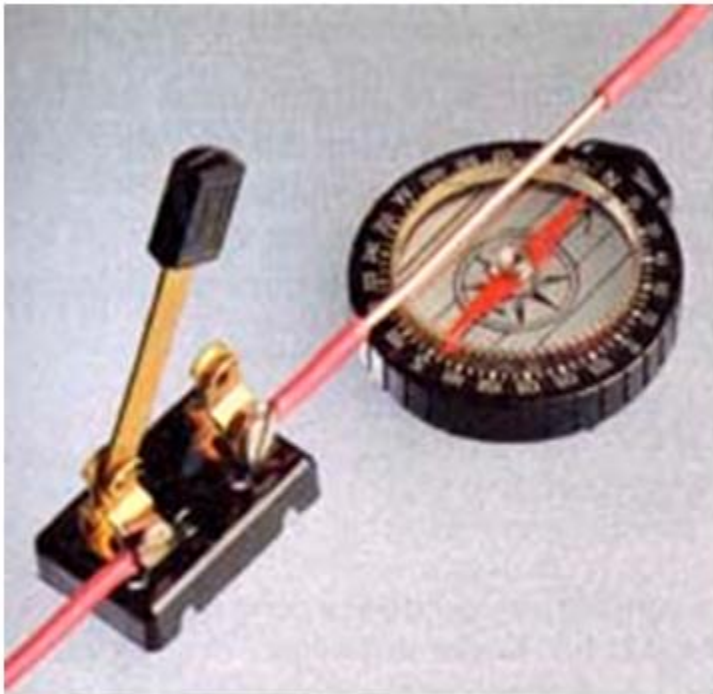


FIGURE 3 : Expérience d'Oersted (à gauche : pas de courant dans le conducteur ; à droite : courant dans le conducteur)



## 1 Force de Lorentz

## 1.2 Force magnétique

## 1.2.1 Expériences

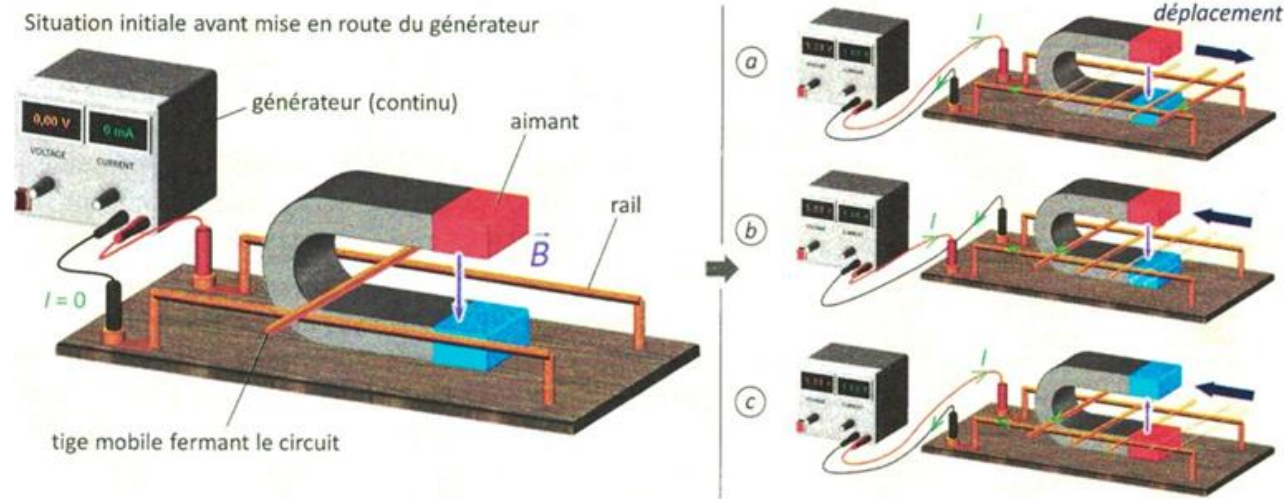
➤ Rail de Laplace

FIGURE 4 : Rails de Laplace

➤ InterprétationPropriété :

forces magnétiques :

interactions à distance entre charges mobiles➤ Remarque



## 1.2.2 Force magnétique

### ➤ Mise en évidence expérimentale

👁 Vidéo : YouTube / Chaîne Michel Bultingaire / Vidéos / Champ magnétique sur des électrons en mouvement Magnetic field on a moving charged particle (3'01s)

<https://www.youtube.com/watch?v=0itAgRKYouA>

### ➤ Expression de la force magnétique

#### Définition

$$\vec{F}_{\text{magn}} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

🔧 Outils mathématiques 6 : Vecteurs : produit vectoriel, produit mixte

### ➤ Caractéristiques de la force magnétique $\vec{F}_{\text{magn}}$

## 1.3 Expression de la force de Lorentz

➤ Système

➤ Forces

➤ Définition : force électromagnétique totale

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{elec}} + \vec{F}_{\text{magn}} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} \right)$$

## 1.4 Ordres de grandeur

Propriété :

**poids** d'une particule chargée tjrs **négligeable** dvt  
la force de Lorentz

## 1.5 Puissance de la force de Lorentz

➤ Expression de la puissance

➤ Conséquences

- Propriété :

Force magnétique ne peut que modifier la  
direction de la vitesse : **dévi**ation

- Propriété :

Force électrique peut modifier le vecteur vitesse  
en direction, sens et norme :  
**accélération, dévi**ation

## 2 Action d'un champ électrostatique uniforme sur une particule chargée

### 2.1 Équation du mouvement

$$\vec{r}(t) = \frac{q}{2m} \vec{E} t^2 + \vec{v}_0 t + \vec{r}_0$$

#### ➤ Conservation de l'énergie mécanique

$$E_m = E_C + E_{P,elec} = \frac{1}{2} m v^2 + qV$$

### 2.2 Champ parallèle à la vitesse initiale

#### ➤ Propriété

#### ➤ Application : accélérateur de protons

#### ➤ Application : canon à électrons



## 2.3 Champ orthogonal à la vitesse initiale

### ➤ Propriété

### ➤ Application : déflexion électrostatique

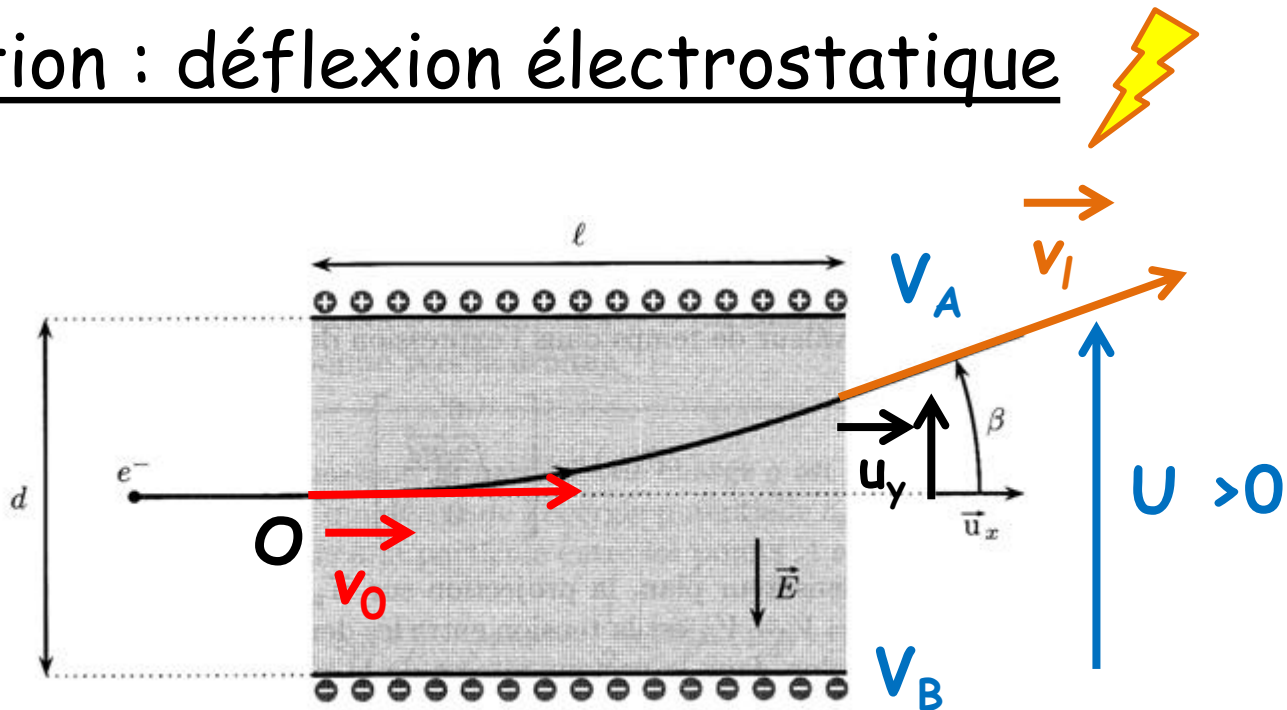


FIGURE 5 : Déviation d'un faisceau d'électrons par le champ électrique uniforme d'un condensateur plan

➤ Application de la déflexion électrostatique

## ❖ oscilloscope analogique, imprimante jet d'encre

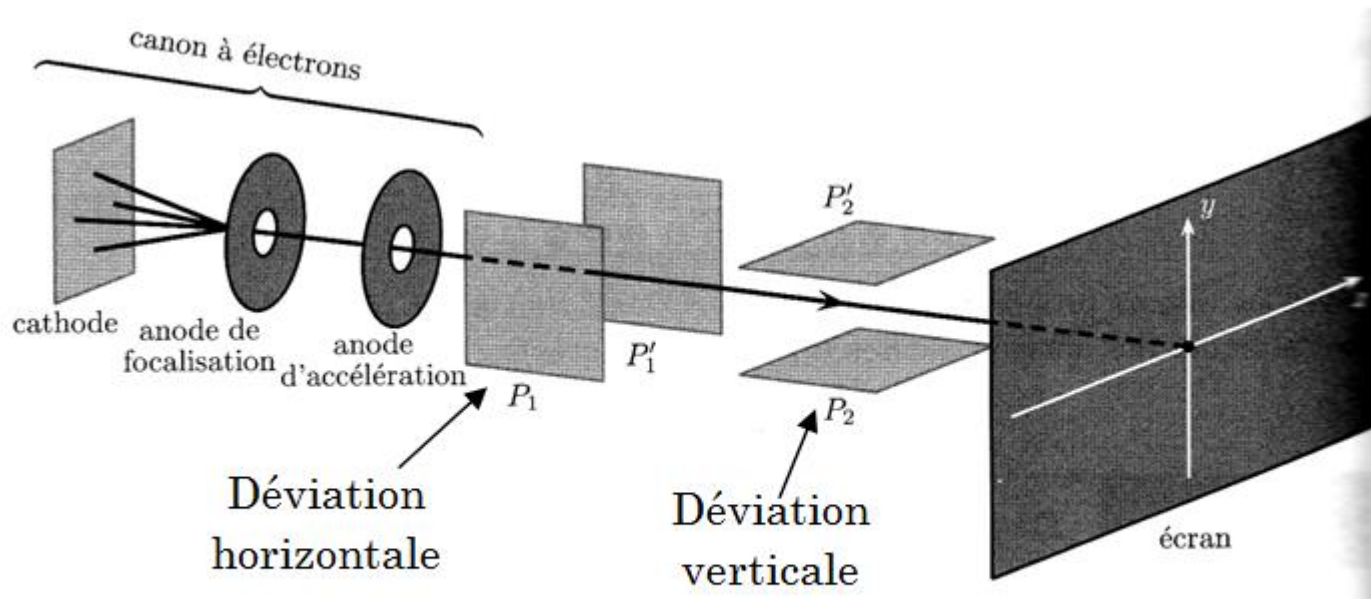


FIGURE 6 : Schéma de principe d'un tube cathodique d'oscilloscope

## ❖ spectromètre de masse

### 3 Action d'un champ magnétostatique uniforme

#### champ magnétostatique uniforme

- **solénoïde** infini parcouru par un courant constant
- **plaques planes** parallèles parcourues par des nappes de courant uniformes
- **bobines de Helmholtz**

#### 3.1 Aspect énergétique

➤ Th P.C.

Propriété :

mvt d'1 part. chargée ds chp magnétique : **uniforme**



## 3.2 Champ orthogonal à la vitesse initiale

- Trajectoire **circulaire**, dans le plan orthogonal à  $\vec{B}$
- Détermination du rayon de la trajectoire

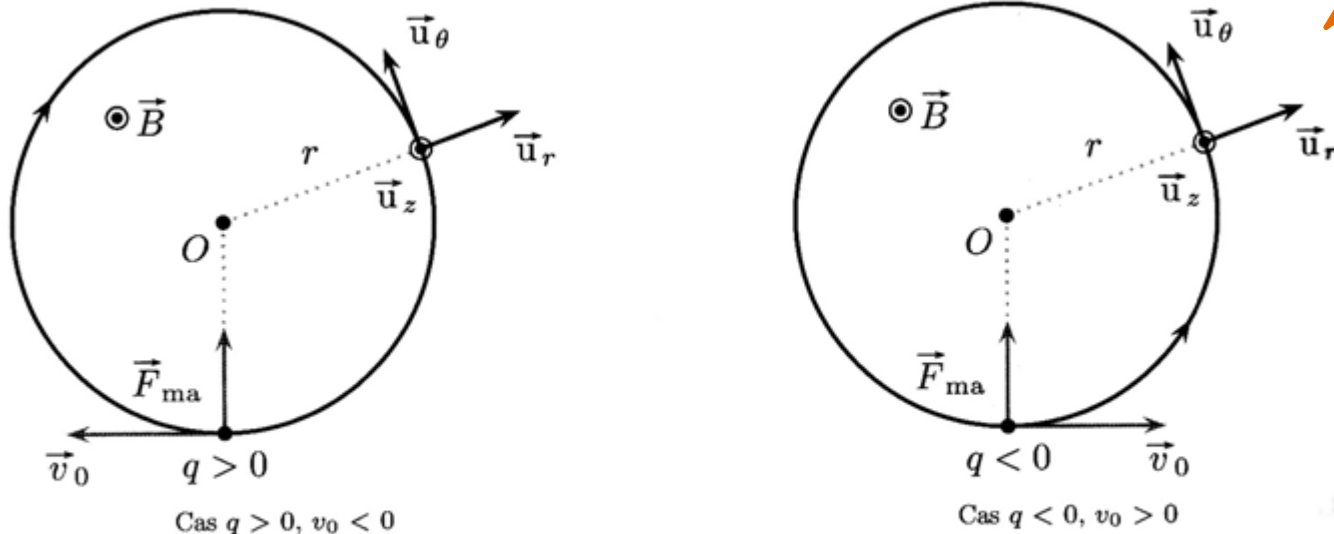


FIGURE 7 : Trajectoires circulaires d'un proton (à gauche) et d'un électron (à droite) sous l'effet d'un champ magnétique

- Sens de rotation

- Position de l'origine  $O$
- Vitesse de la particule

uniforme

$$v_0 = \left| \frac{qB}{m} r \right| = \omega_c r > 0$$

Définition : pulsation cyclotron

$$\omega_c = \frac{|q| \|\vec{B}\|}{m}$$

période de rotation

$$T = \frac{2\pi}{\omega_c} = \frac{2\pi m}{|q| \|\vec{B}\|}$$

- Remarques
- Ordre de grandeur

➤ Applications

## ❖ Cyclotron

LOJ(2001)

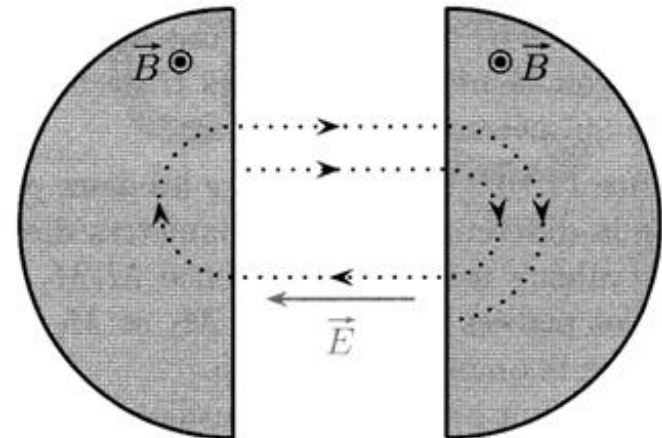
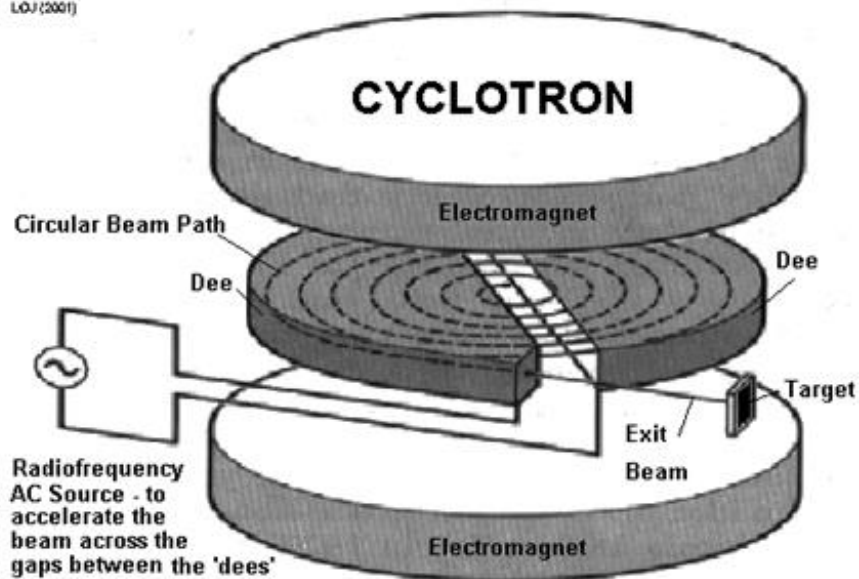


FIGURE 8 : Constitution d'un cyclotron (à gauche) et trajectoire d'un proton dans le cyclotron (à droite)

➤ Applications

## ❖ Spectromètre de masse

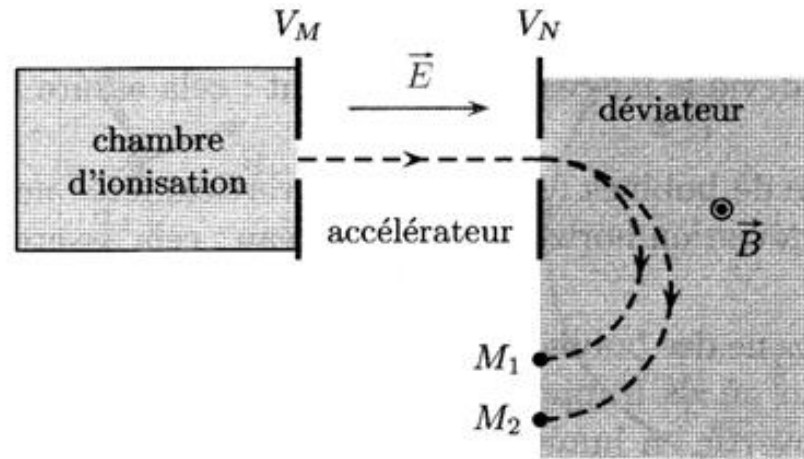


FIGURE 9 : Schéma de principe d'un spectromètre de masse

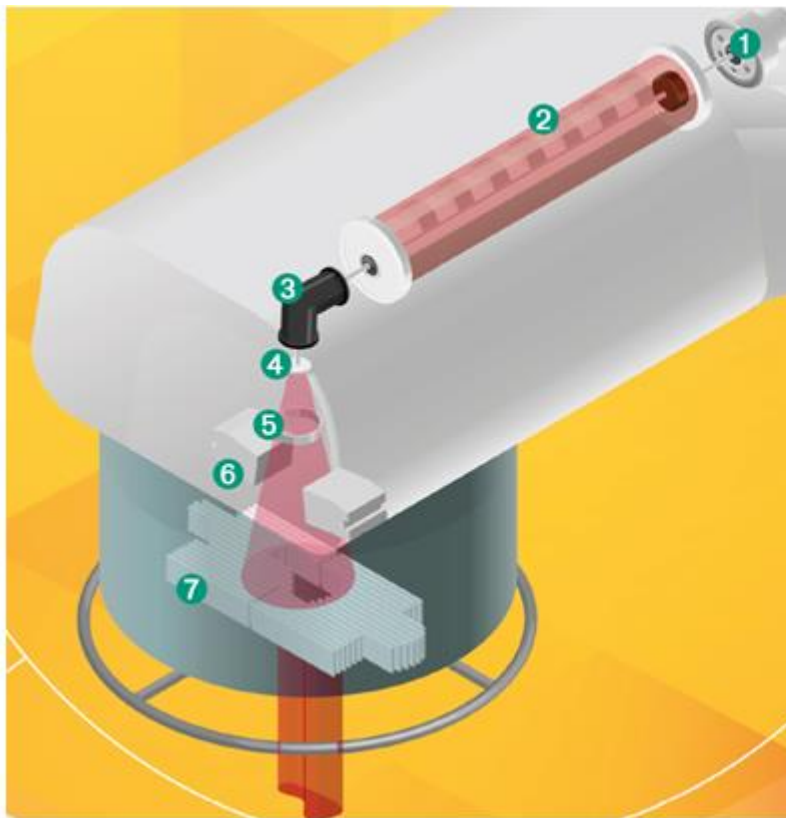
[2] A. Savalle *et al.*, Spiral2 : une sonde de nouvelle génération pour explorer la matière nucléaire, *Reflets de la Physique*, n°59, p. 11-18, Septembre 2018

[3] S. Bailly, De la supraconductivité à température quasi ambiante, *Pour la Science*, n°496, p. 8, Février 2019

## 4. Retour à la problématique

### ➤ Appareil de radiothérapie **Chp électrique**

**Chp magnétique**



- 1 Canon à électrons : source d'électrons ;
- 2 Section linéaire : accélération des électrons ;
- 3 Aimant de déviation des électrons : sélection et filtre de l'énergie souhaitée, focalisation du faisceau.
- 4 Cible en tungstène : transformation du faisceau d'électrons en faisceau de photons ;
- 5 Collimateur primaire : première mise en forme du faisceau de photons ;
- 6 Dosimètre/chambre de ionisation : contrôle du débit de dose délivré par la machine ;
- 7 Collimateur multi-lames (présent dans certains dispositifs) : adaptation de la forme du faisceau au volume de la tumeur à traiter, en temps réel au cours d'une séance.

FIGURE 10 : Fonctionnement de l'accélérateur de particules de l'appareil de radiothérapie