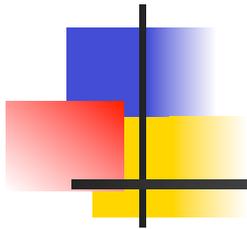


# CHAMPS & PARTICULES

# INSTRUMENTS



Alain Bouquet

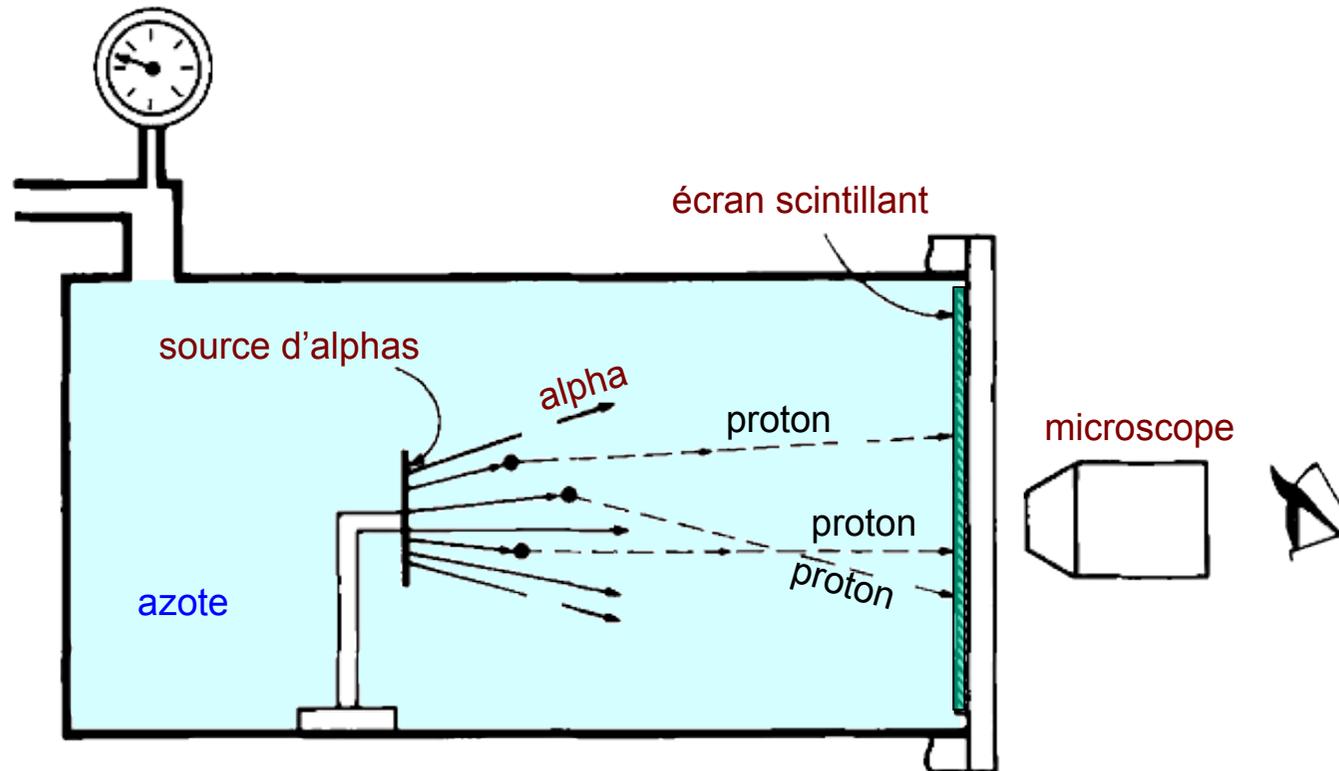
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

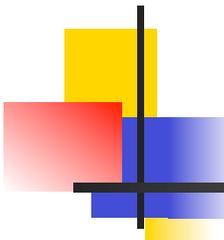


## Au commencement était Rutherford...

- Collisions de rayons  $\alpha$  sur des noyaux d'azote  $\rightarrow$  protons



- Inconvénients : flux et énergie des projectiles limités



# Sources et cibles

---

## ■ Sources

### ■ Alphas

- Radium 226 [4.9 MeV] et Radon 222 [5.6 MeV]
- Polonium 210 [RaF alphas 5.4 MeV [sans rayonnement parasite](#)]

### ■ Électrons (bêtas) mais énergie continue

### ■ Rayons X

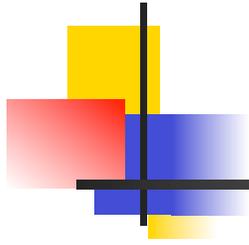
### ■ Rayons gammas [Th C'' = Tl 208, gammas de 2.6 MeV]

### ■ Inconvénients

- [intensité faible](#) (le plus souvent quelques mCi =  $3.7 \times 10^7$  Bq)
- [énergie limitée](#) à quelques MeV

## ■ Cibles et absorbants

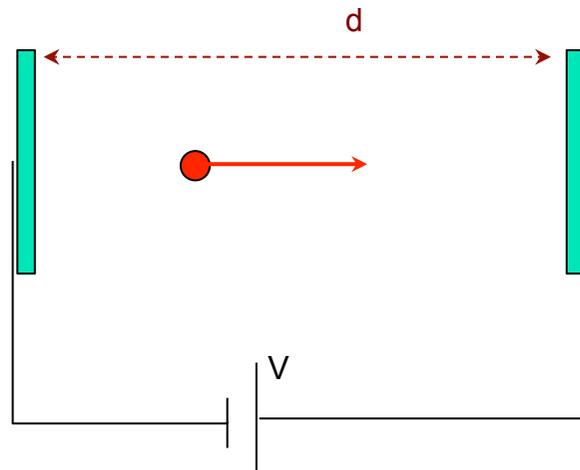
- Feuilles métalliques très minces (les alphas sont facilement absorbés) d'aluminium, ou d'or [ $\sim 100$  nm]
- Gaz raréfiés, ou sous pression : hydrogène, azote, fluor, argon, etc.
- Écrans de plomb ou de cuivre (absorbant), ou de paraffine (cible)



# ACCÉLÉRATEURS

# Accélération par un champ électrique

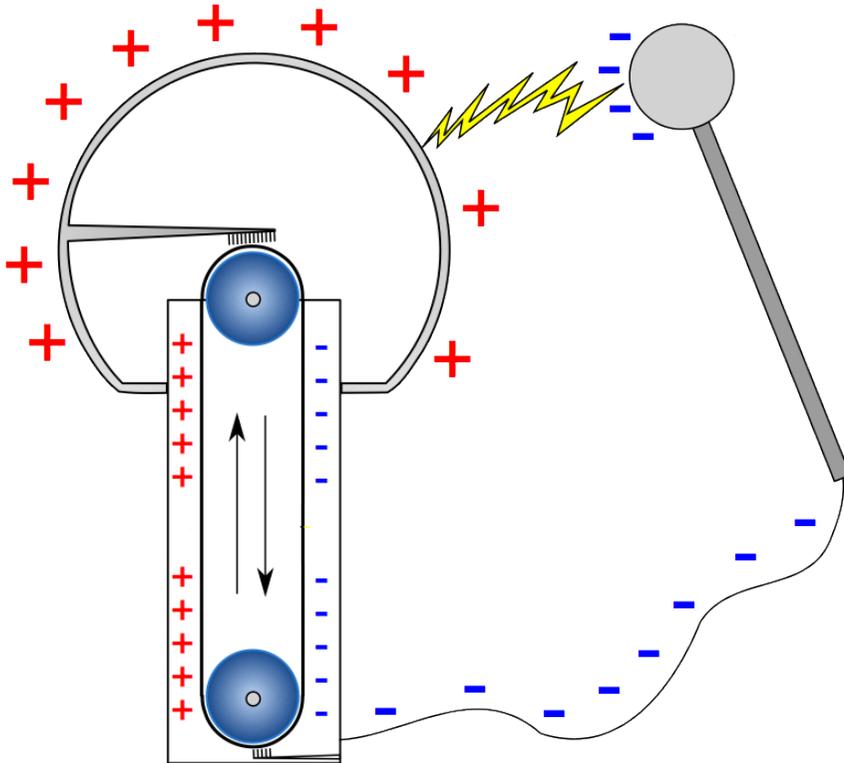
- Particule de charge  $e$  et de masse  $m$  dans un champ électrique  $E$
- $\rightarrow$  force  $F = e E$



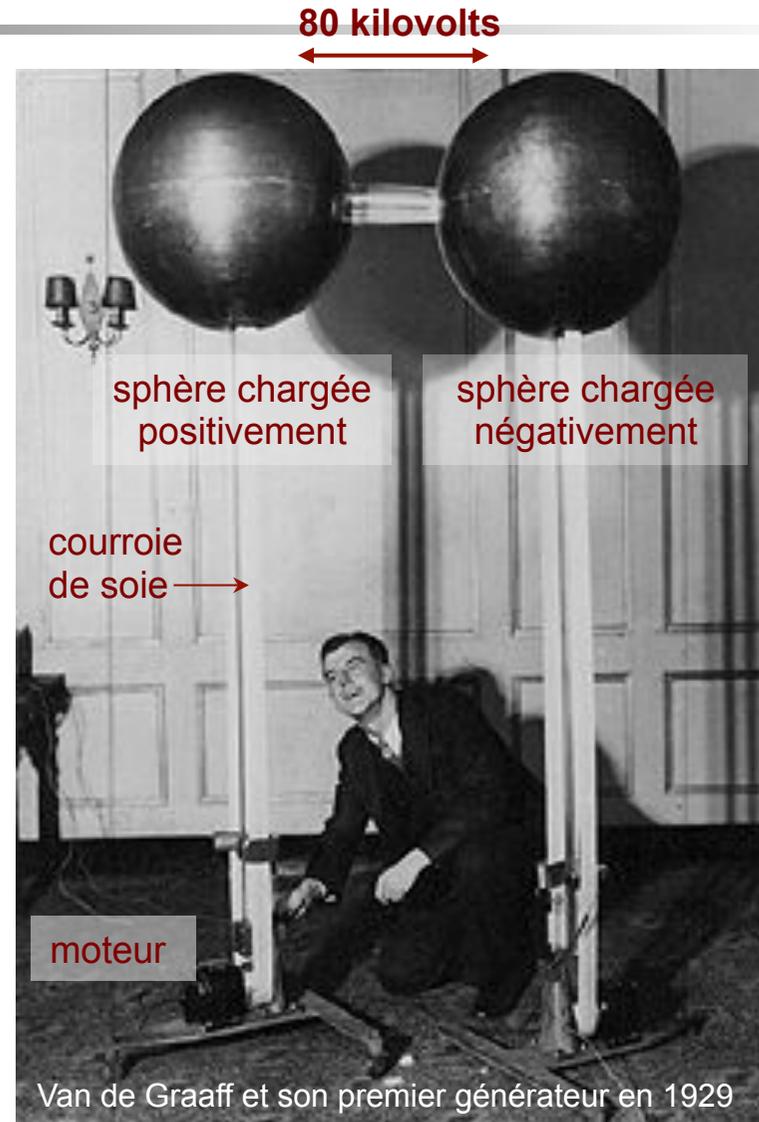
D'où la mesure des énergies par particule en électron-volts (eV)

- $\rightarrow$  énergie acquise sur une distance  $d$  :  $E_c = F d = e E d = e V$
- indépendante de la masse  $m$  et de la distance  $d$  parcourue
- mais directement proportionnelle à la différence de potentiel  $V$
- $\rightarrow$  recherche de très hautes tensions [ $\sim$  million de volts]

# Générateur Van de Graaff

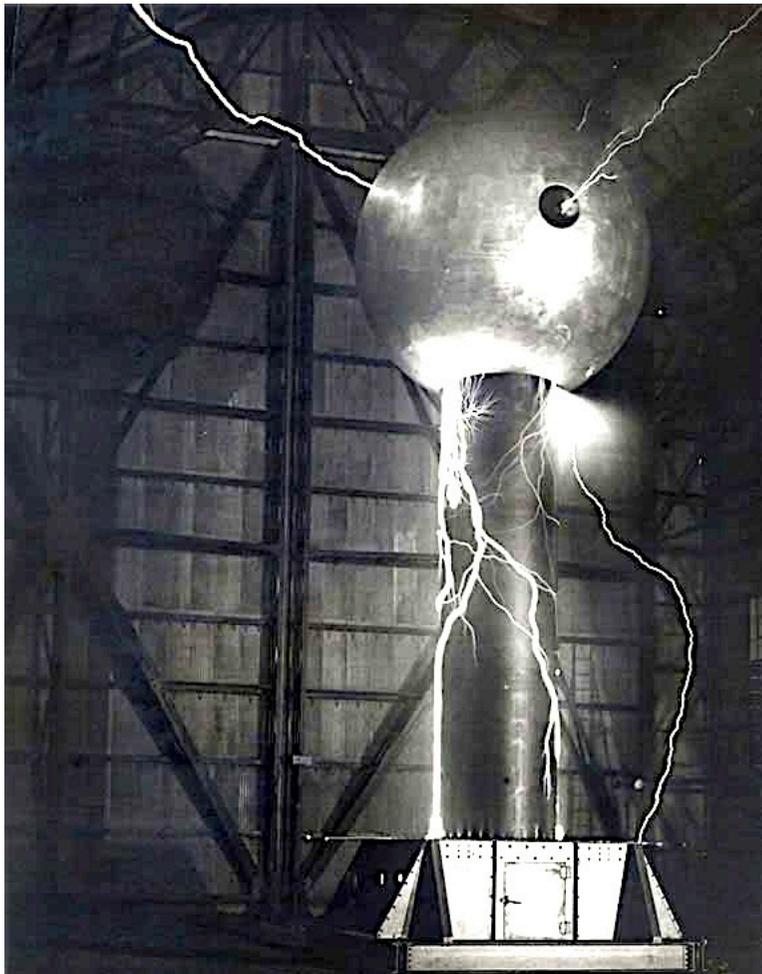


- Robert Van de Graaff (1901-1967) parvint à 1 MV en 1931, à 7 MV en 1933 (sphères de 5 m de diamètre à 7 m de hauteur)

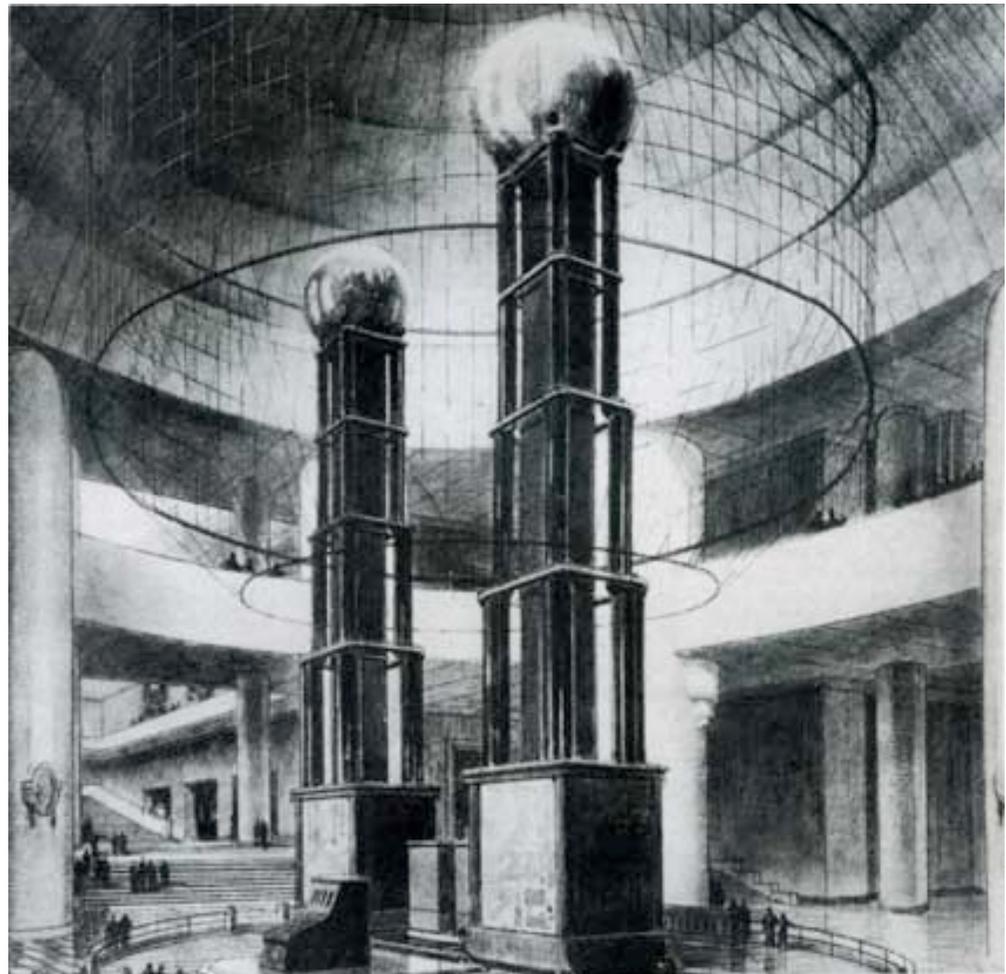


# Des machines spectaculaires

- MIT (1934)

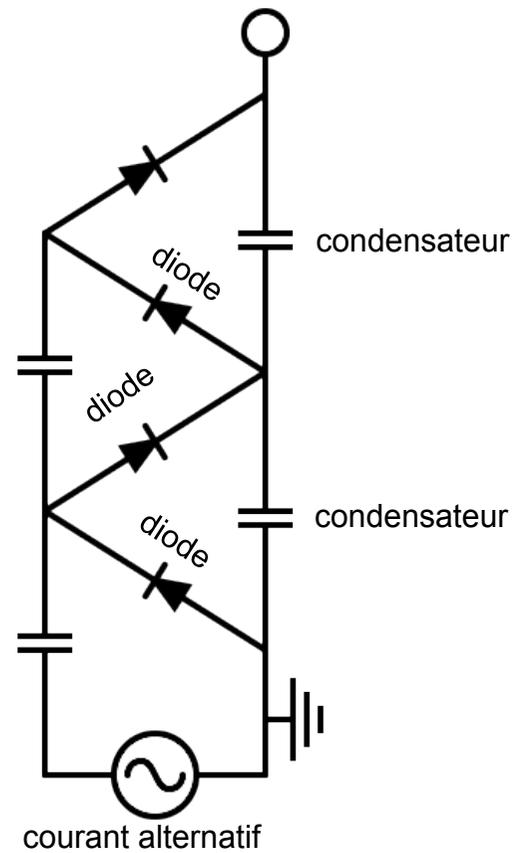


- Palais de la Découverte (1937)

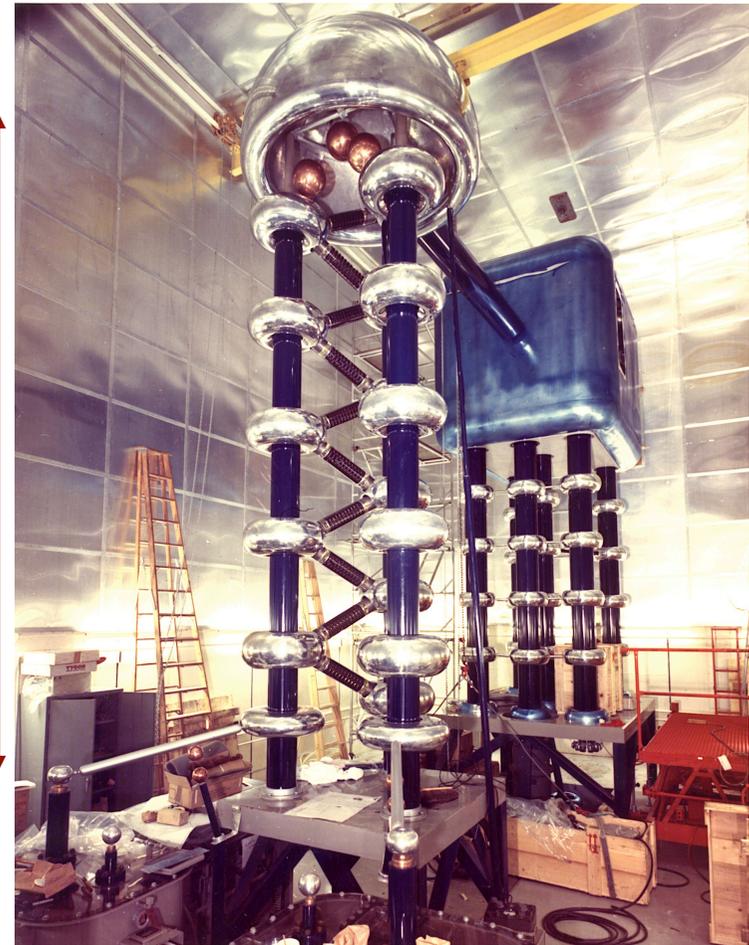


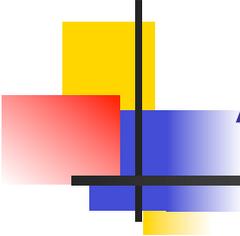
# Cockcroft & Walton au Cavendish

- 1928→1932 : une échelle vers les très hautes tensions
- 200 kV en 1930, 800 kV en 1932

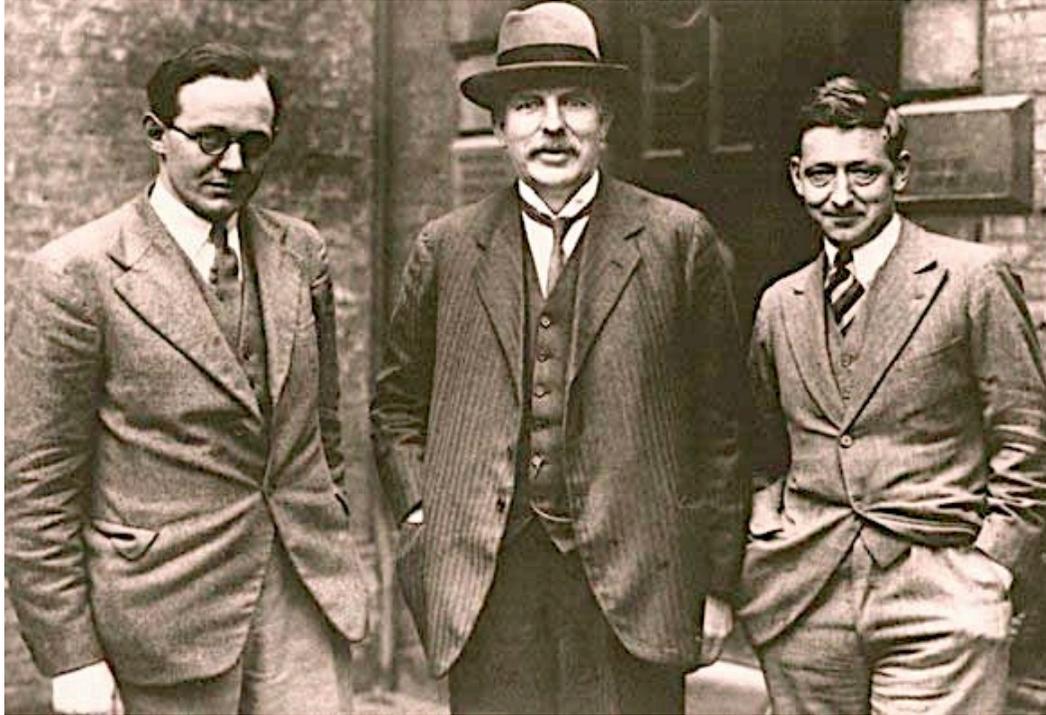


1 million de volts

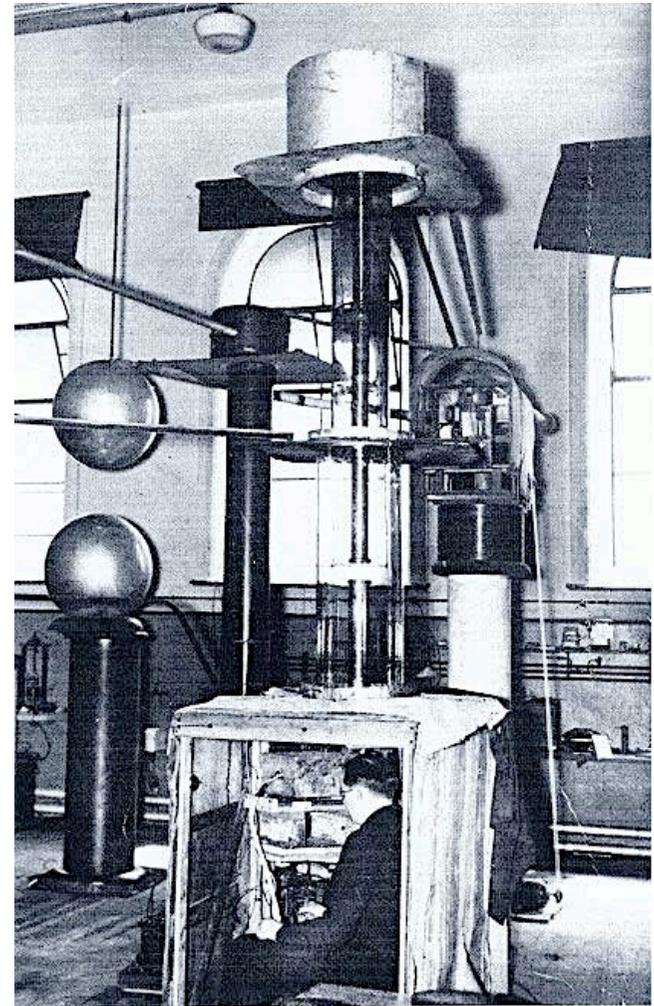




## Au Cavendish

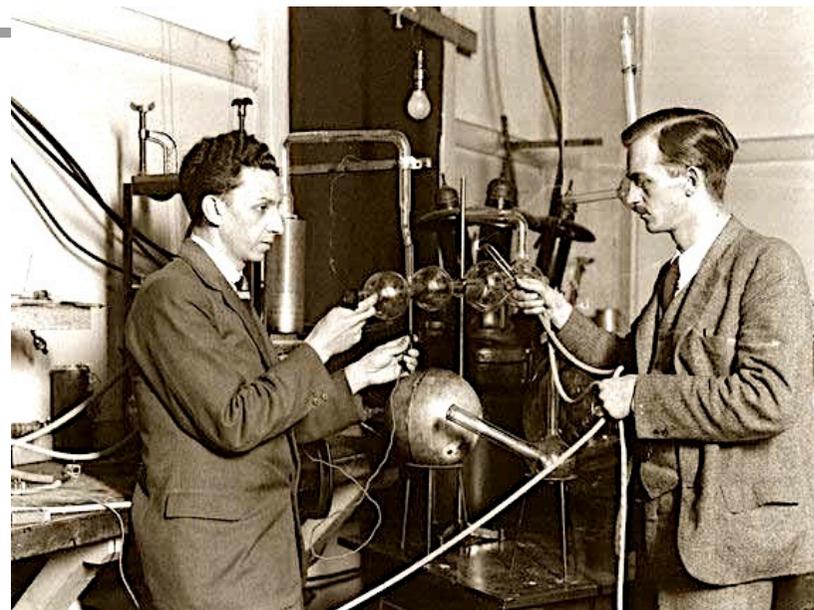
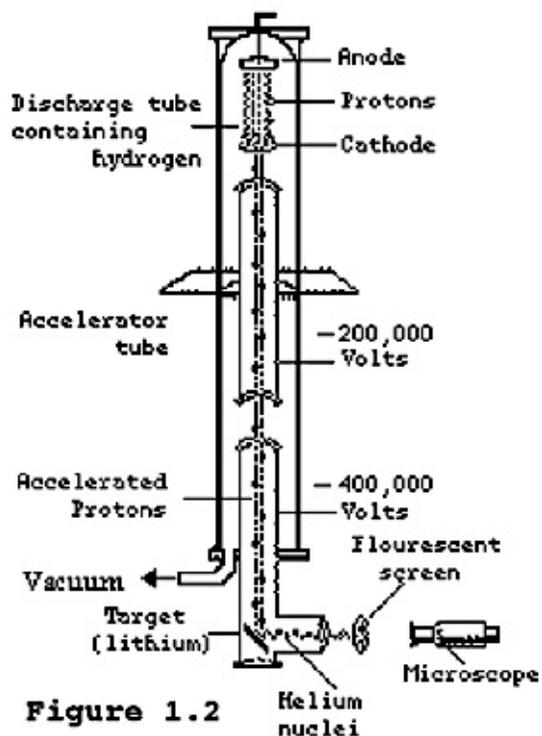


John Cockcroft, Ernest Rutherford et Ernest Walton

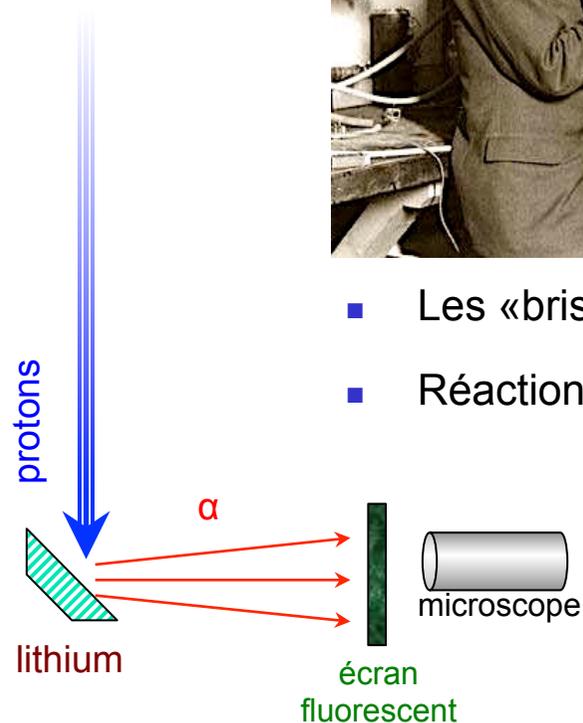


# Un ultimatum de Rutherford

- «Arrêtez de jouer, faites de la physique!»

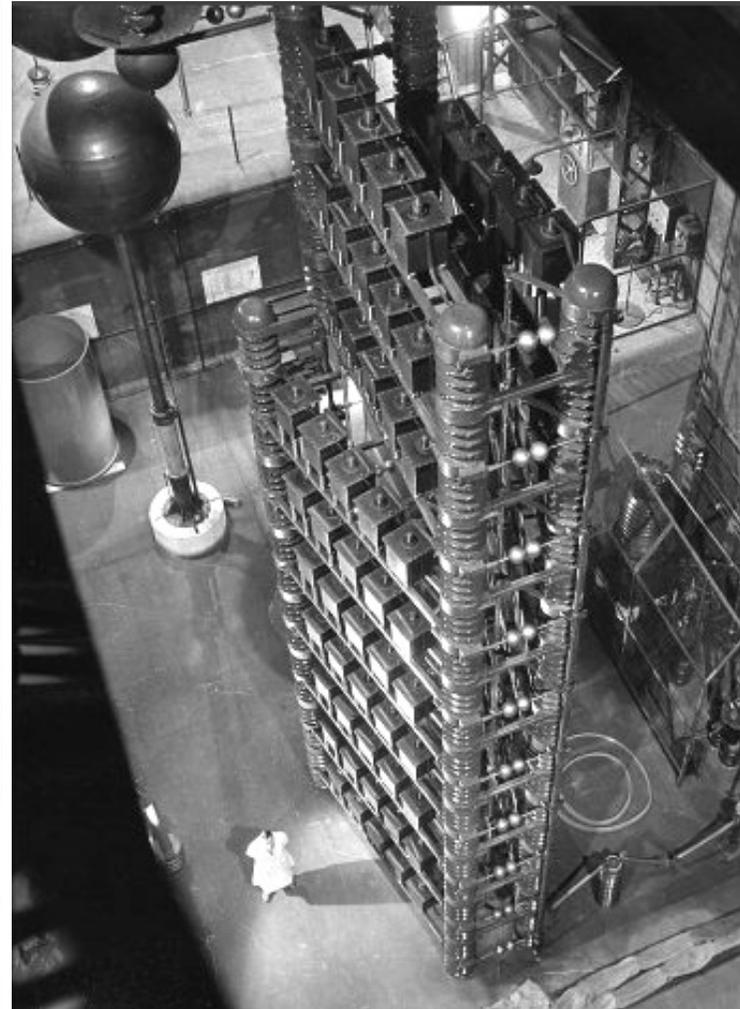


- Les «briseurs d'atomes»
- Réaction  ${}^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$



Le nombre d' $\alpha$  augmente rapidement avec l'énergie des protons (de 100 à 500 keV)  $\Leftrightarrow$  franchissement plus facile de la barrière coulombienne

# Le laboratoire de synthèse atomique d'Ivry



# Accélérateur linéaire

- Idée simple: utiliser des tensions (relativement) faibles **mais à plusieurs reprises**
- Idée avancée par Gustav Ising (1924)
- Prototype de Rolf Widerøe (1928)

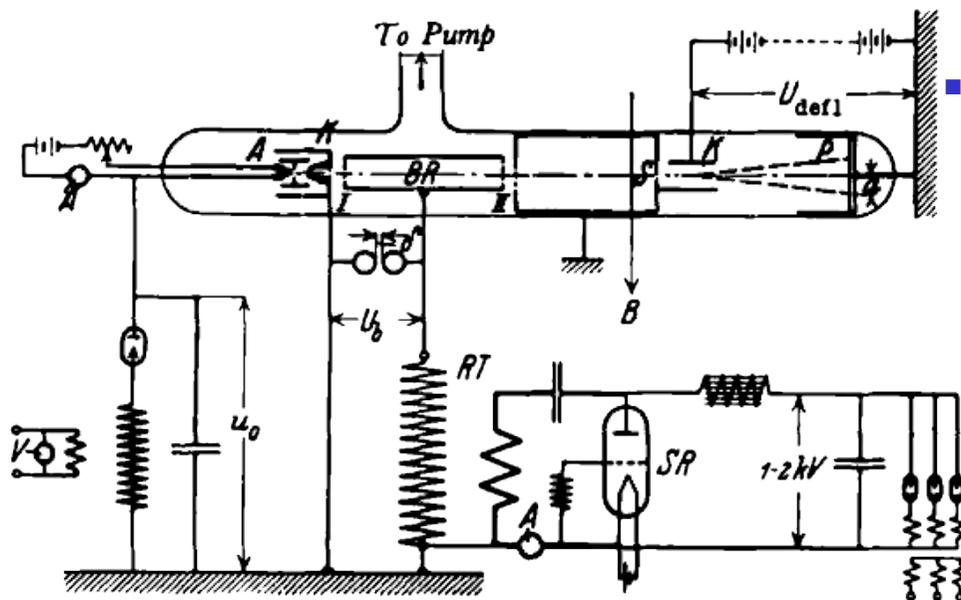


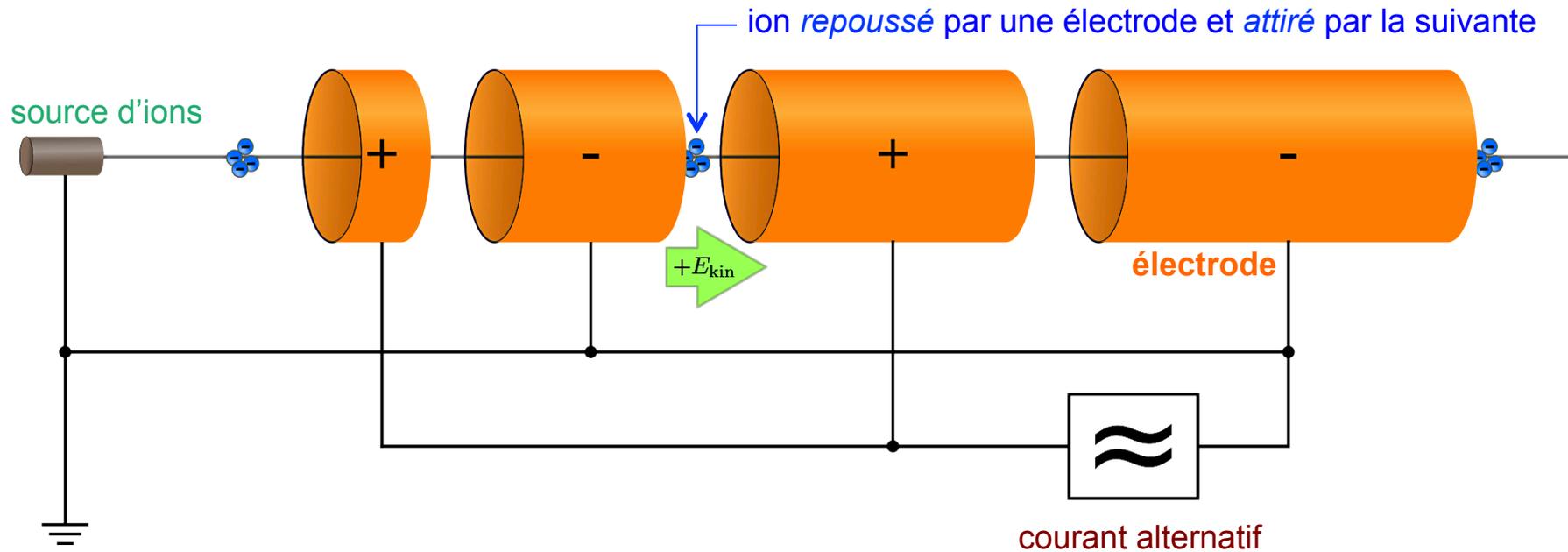
Diagram of prototype resonance accelerator of Widerøe in 1928

## ■ Difficultés techniques

- focalisation du faisceau
- réglage des tailles et espacements des cavités accélératrices
- pilotage des tensions alternatives
- **encombrement** (plusieurs mètres)
- ⇒ peu de réalisations pratiques avant les années 1950

# Accélérateurs linéaires « résonants »

- Principe



- Accélération ⇒ longueur et espacement grandissants des électrodes
- Longueur pour accélérer des *protons* (x 40 pour les *électrons*)

$$L \sim 10 \text{ m} [\text{Énergie}/1 \text{ MeV}]^{3/2} [100 \text{ MHz}/\text{fréquence}] [20 \text{ kV}/\text{Tension}]$$

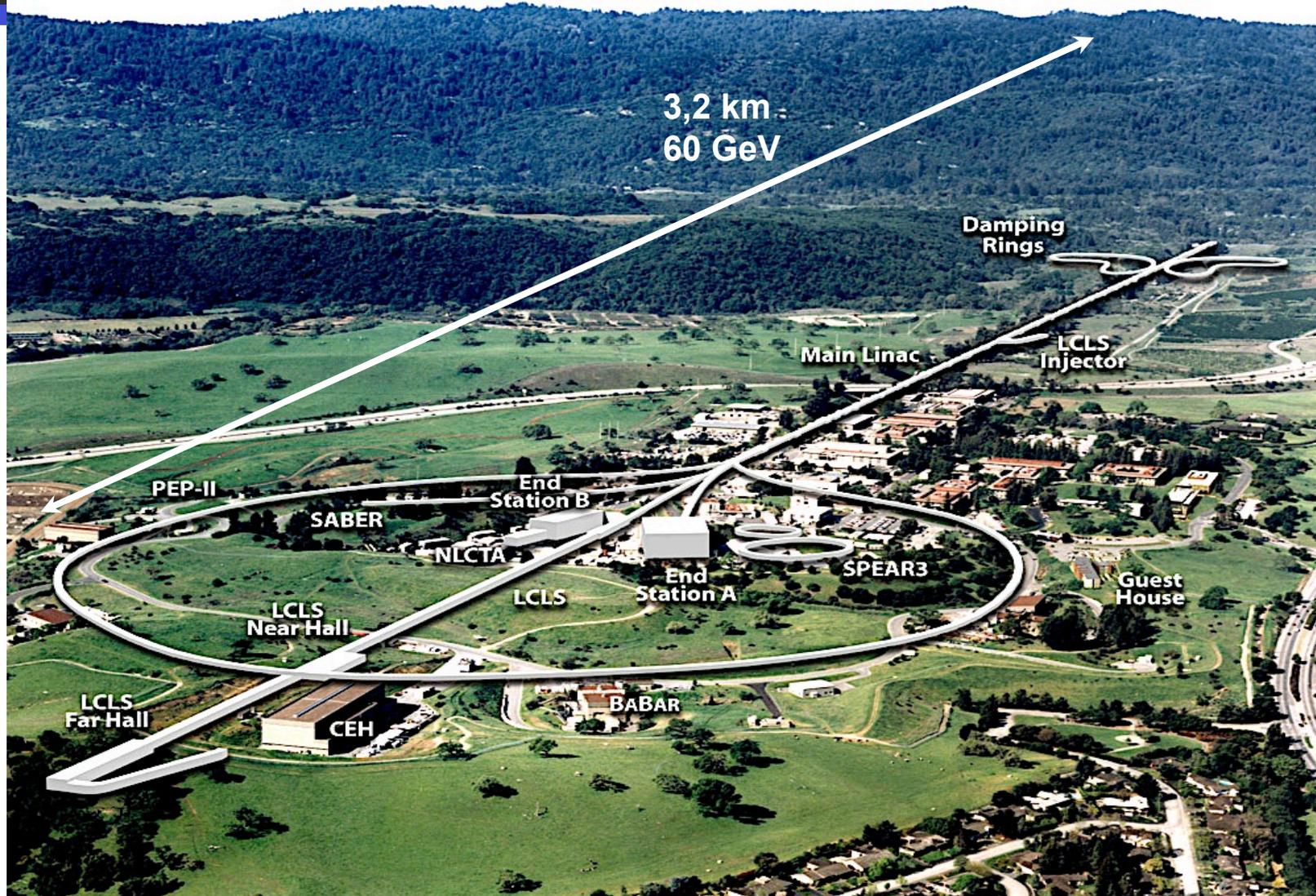
# Accélérateur linéaire à usage médical

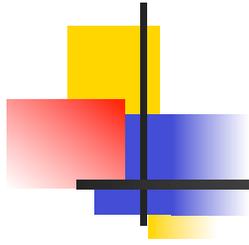
- Varian Clinac DHX
- Électrons (<22 MeV)
- Photons gamma (<25 MeV)



○ Hautes tensions et hautes fréquences → compacité

# SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)

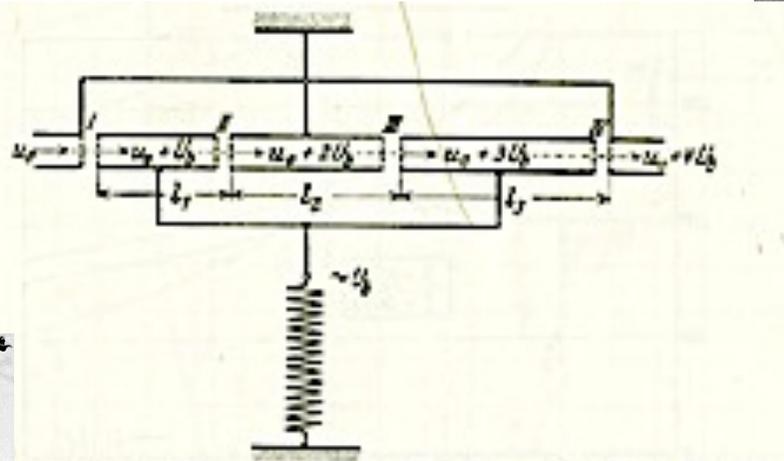




# CYCLOTRONS

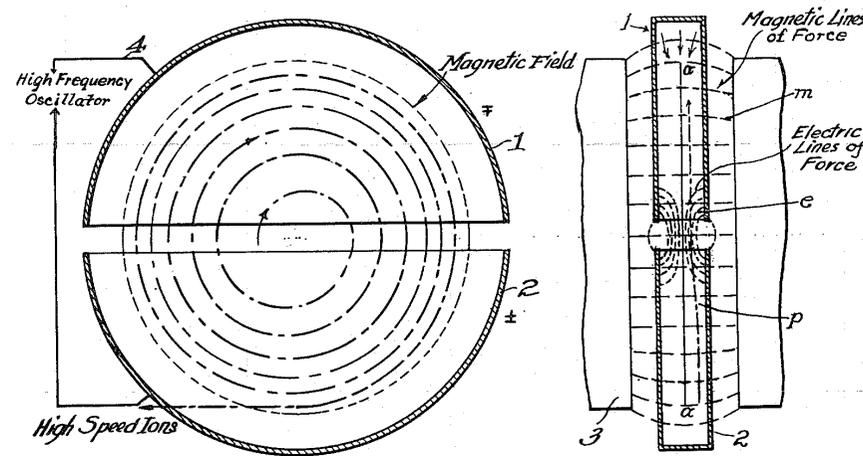
# Ernest Orlando Lawrence

- Inspiré par une figure de l'article de Widerøe



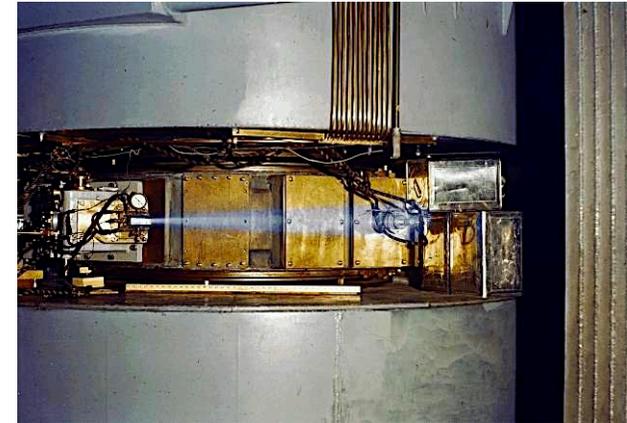
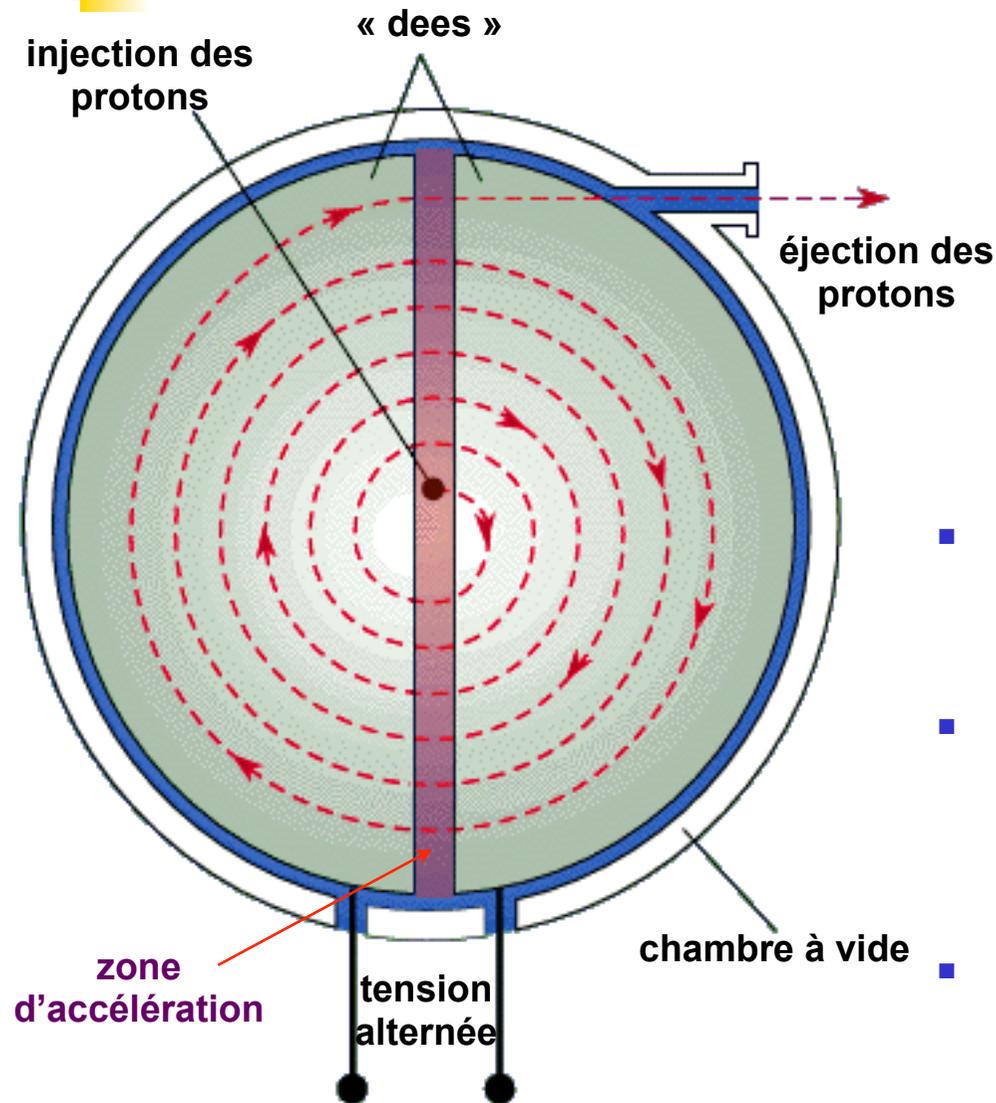
Prinzip der Spannungstransformation mit Potentialfeldern.

Not being able to read German easily, I merely looked at the diagrams and photographs of Widerøe's apparatus and from the various figures in the article readily realized understood his general approach to the problem - i.e. the multiple acceleration of the positive ions by application of radio frequency oscillating voltages to a series of cylindrical electrodes



Le brevet de Lawrence (1934)

# Fonctionnement du cyclotron

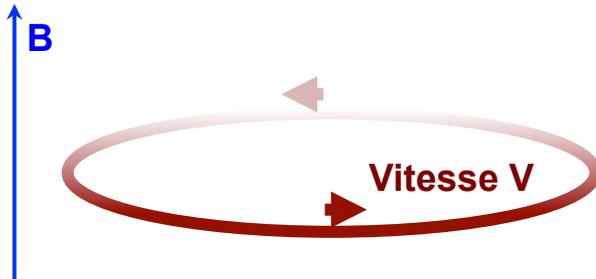


*Faisceau de protons ionisant l'air*

- La chambre à vide est placée entre les pôles d'un électro-aimant  $\Rightarrow$  les protons tournent en cercle
- Les protons sont accélérés par la différence de potentiel dans l'intervalle entre les « dees »  $\Rightarrow$  le rayon de giration augmente
- Mais la vitesse augmente  $\Rightarrow$  durée de giration constante

# Un brin de physique

- Rayon de giration (Larmor)



- $R = mV/eB$
- $\Leftrightarrow$  Vitesse  $V = e B R / m$
- Pour un proton
  - $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
  - $m = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
  - $\Rightarrow V = 95\,000 \text{ km/s } [B/1 \text{ T}] [R/1 \text{ m}]$
- ( $\rightarrow$  rayon  $\gg$  pour un électron)

- Énergie  $E = \frac{1}{2} m V^2$

- $\Rightarrow E = \frac{1}{2} e^2 B^2 R^2 / m$

- Pour un proton

- $E = 4,8 \text{ MeV } [B/1 \text{ T}]^2 [R/1 \text{ m}]^2$

- $\Rightarrow$  pour augmenter l'énergie
  - augmenter le champ magnétique (difficile)
  - $\Rightarrow$  **augmenter le rayon**

- Limitations

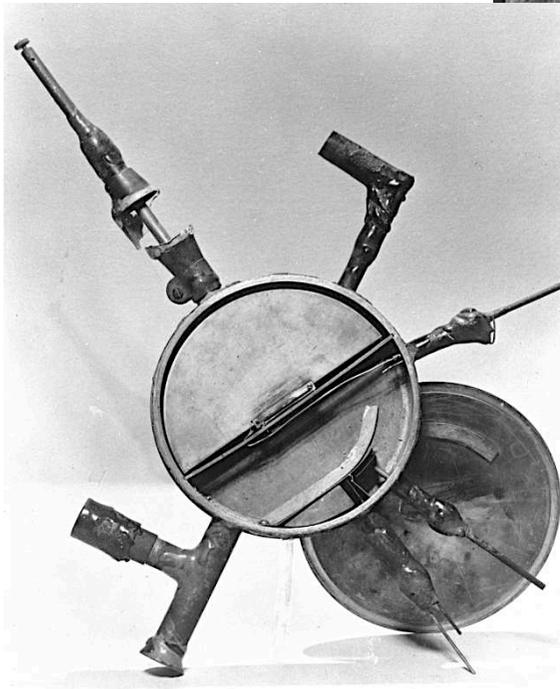
- **financières**
- pertes d'énergie (Bremsstrahlung)
- effets relativistes  $\rightarrow$  synchrocyclotron et synchrotron

# Une rapide évolution

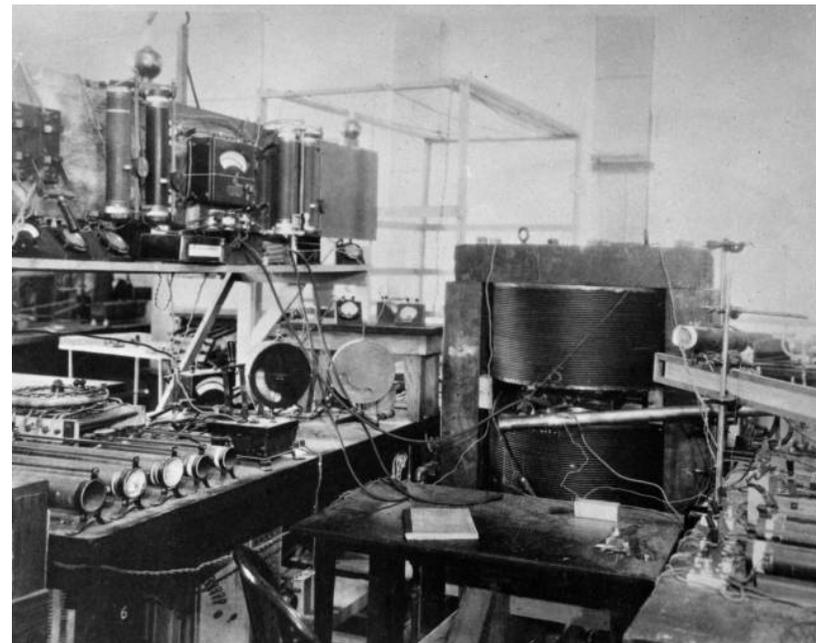


$$E = 4,8 \text{ MeV} [q/e]^2 [m_p/m] [B/1 \text{ T}]^2 [R/1 \text{ m}]^2$$

- ☞ augmenter la *charge* de l'ion ( $p \rightarrow \alpha$ )
- ☞ diminuer la *masse* de l'ion
- ☞ augmenter le champ magnétique
- ☞ **augmenter le diamètre de la chambre**
- ☞ *dissocier cavités accélératrices et aimants de courbure*

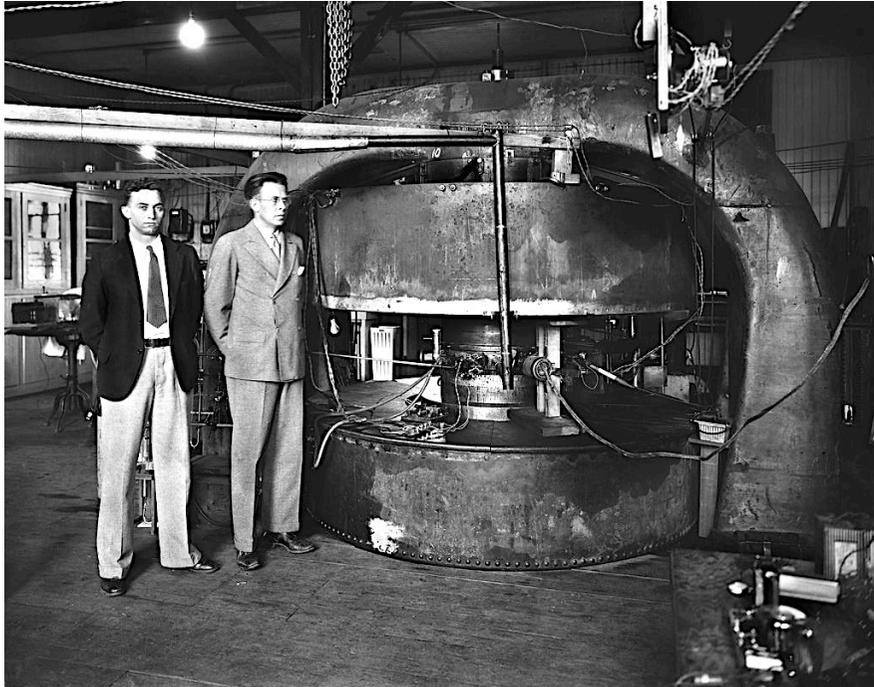


Cyclotron de 5 pouces 1930  
Tension 2 000 V  
Énergie 80 keV



Cyclotron de Lawrence et Livingston en 1931 : 1,2 MeV

## Une rapide évolution

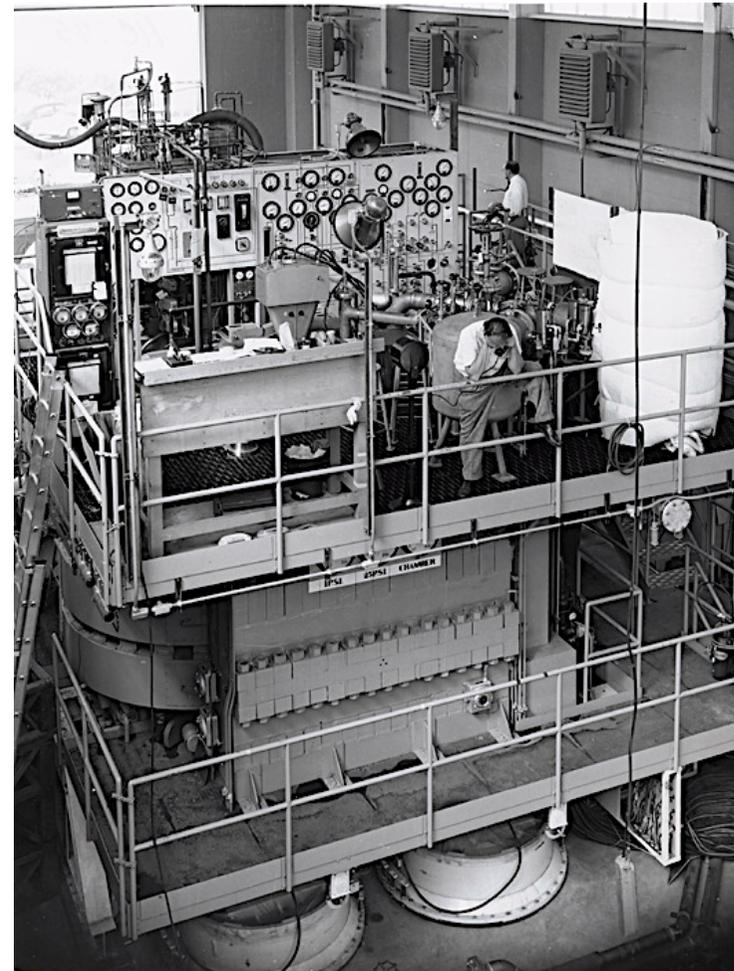


Cyclotron de 27 pouces et son aimant de 80 tonnes en 1934 (Livingston à gauche, Lawrence à droite). Protons de 1 MeV, puis deutérons de 5 MeV.

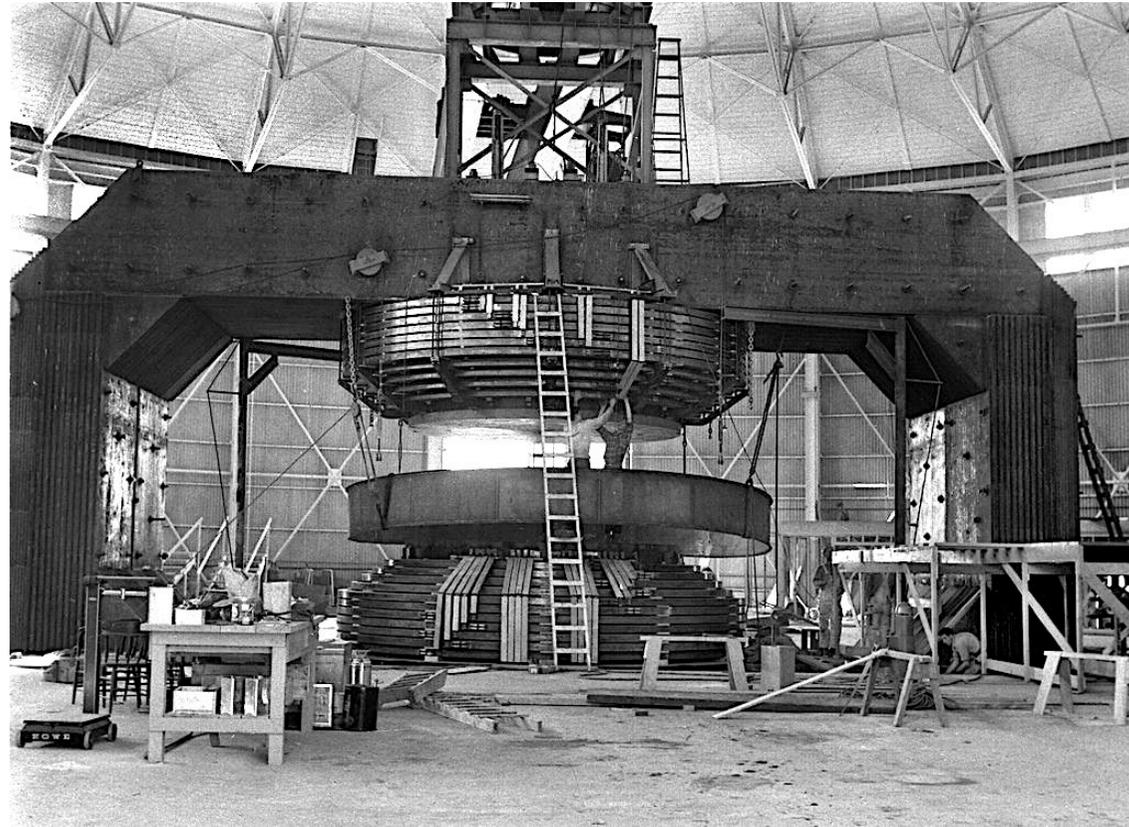
Le RadLab de Berkeley aurait pu

- découvrir la radioactivité artificielle
- effectuer les expériences de Fermi bien plus efficacement

Cyclotron de 60 pouces (1939) : deutérons de 20 MeV et  $\alpha$  de 40 MeV (Lawrence et McMillan aux commandes)



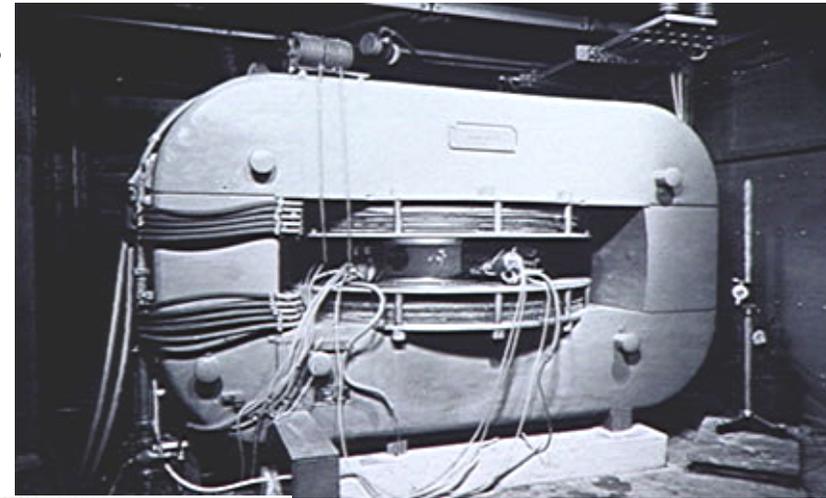
## Une rapide évolution



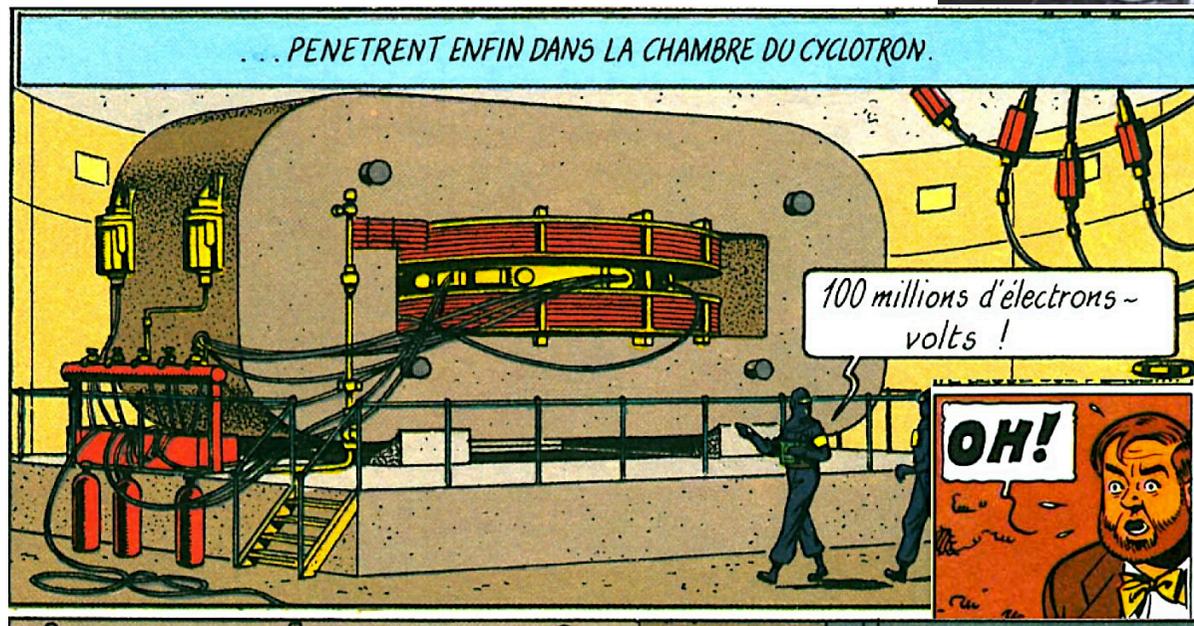
*Lawrence en 1942 devant le bâtiment du cyclotron de 184 pouces*

# Le cyclotron superstar

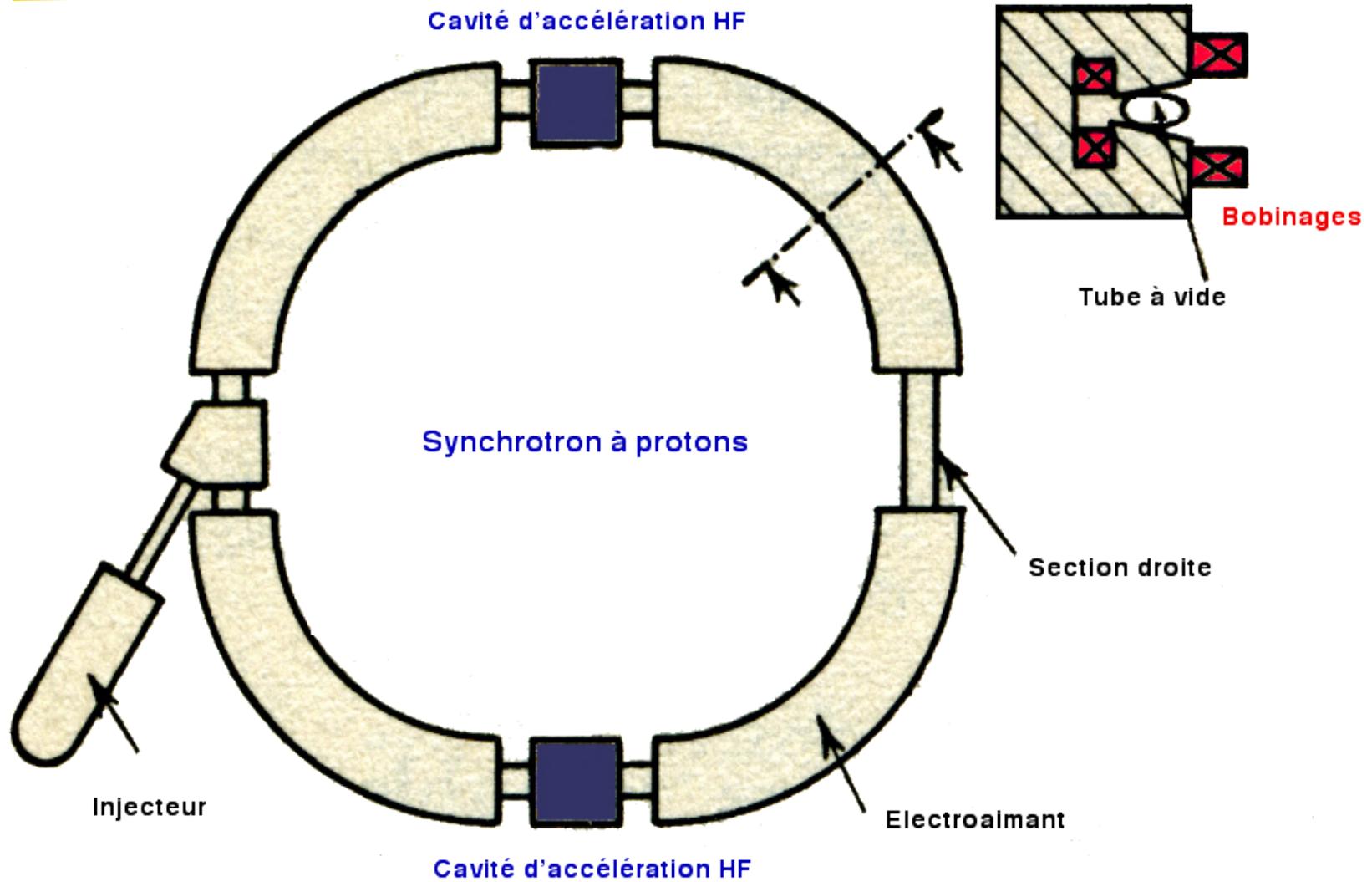
Le cyclotron de Joliot au Collège de France en 1942



Le cyclotron du « Secret de l'Espadon », E.P. Jacobs (1946-1953)



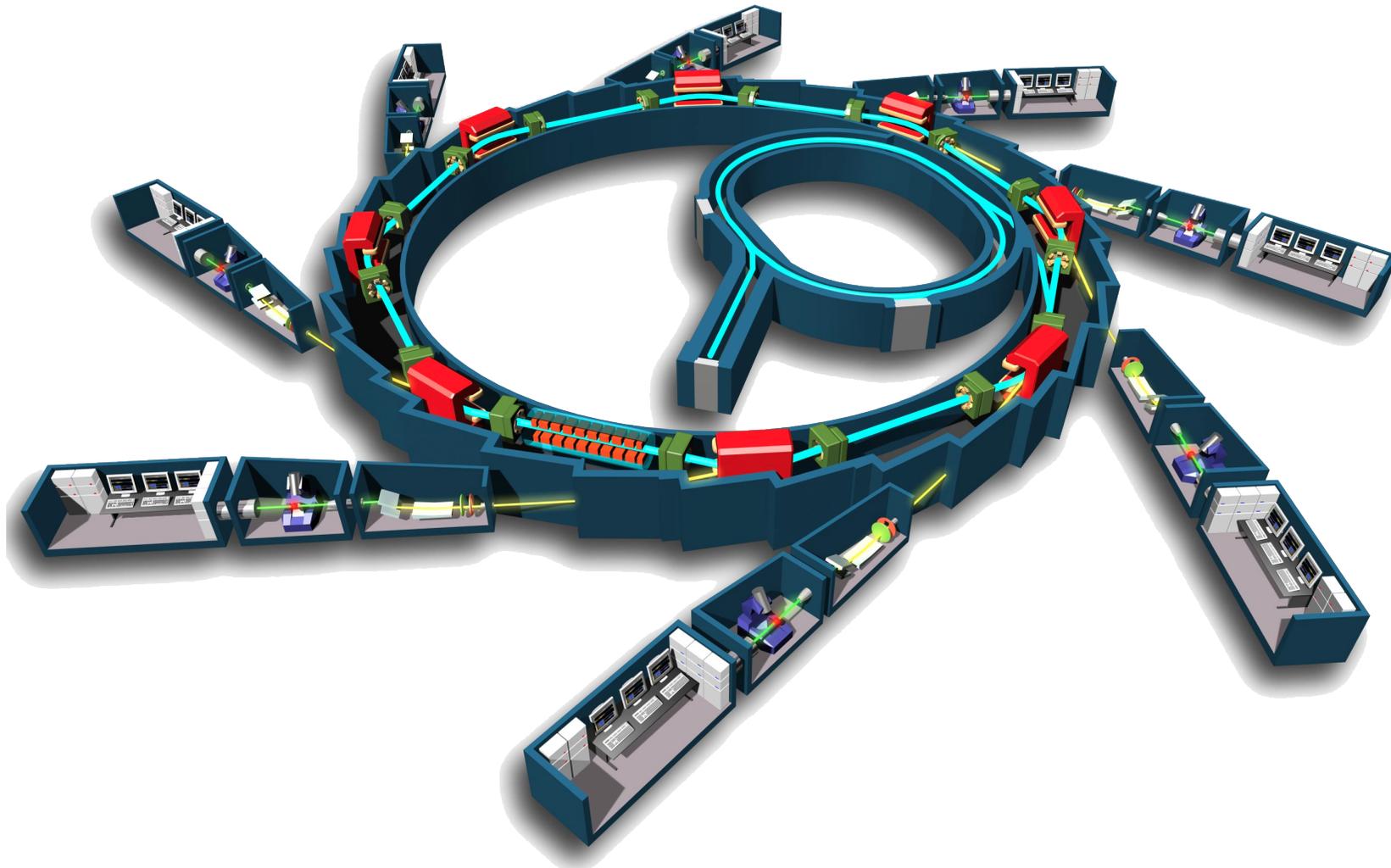
# Synchrotron



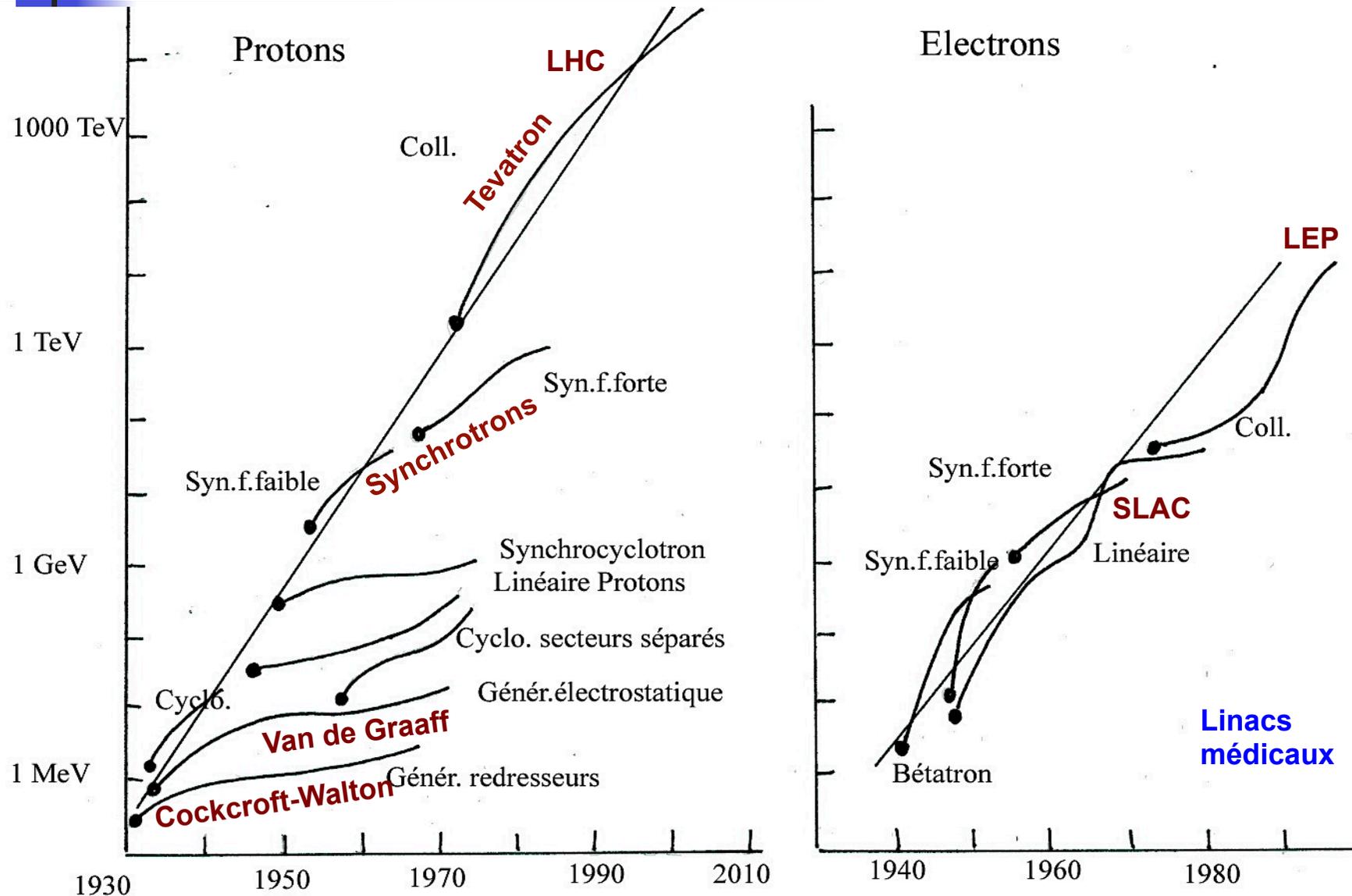
# Le Large Hadron Collider (LHC) au CERN

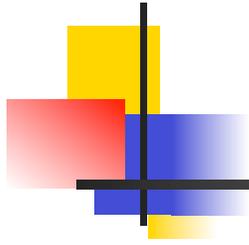


# Un synchrotron à électrons : Soleil



# Les accélérateurs de particules

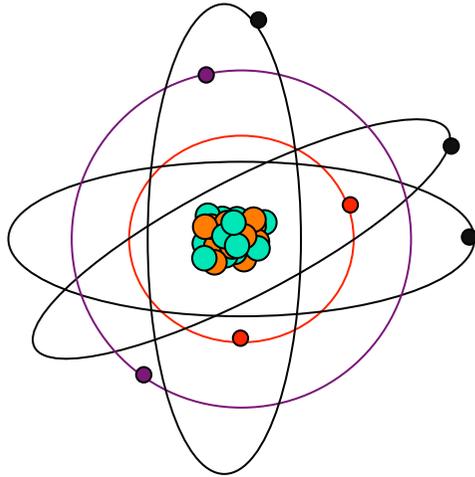




# DÉTECTEURS

# Ionisation

- Atome d'azote (par exemple)
  - Noyau : 7 protons + 7 neutrons
  - → 7 électrons



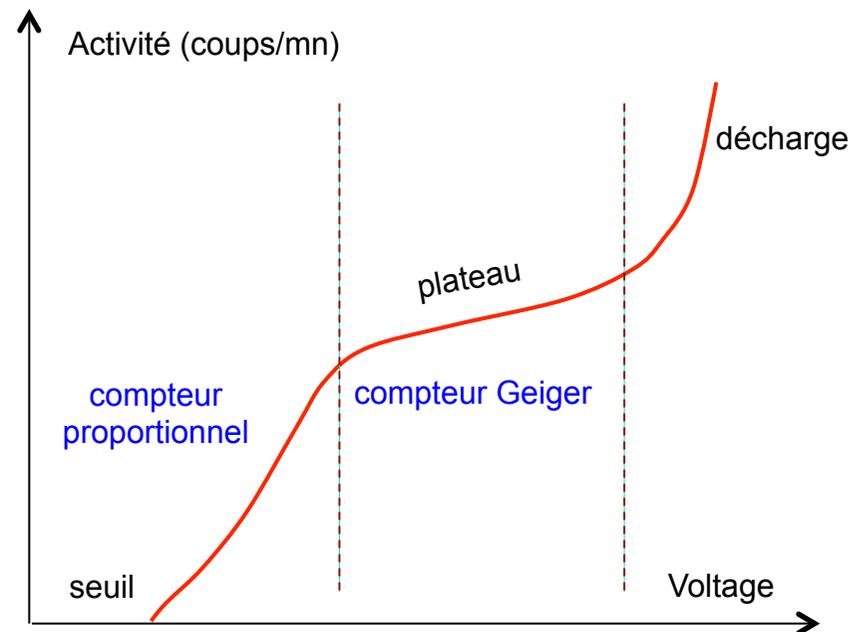
- Ionisation : perte de 1, 2, 3... électrons  
⇔ apport d'énergie
- Ionisation de l'azote : 14,5 eV

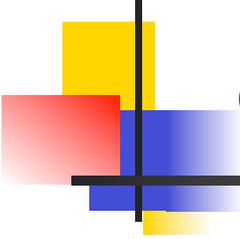
- Comment ioniser ?

- Onde électromagnétique
  - micro-ondes ⇔ 1 meV
  - visible ⇔ 1 eV
  - rayons X ⇔ 1 keV
  - rayons  $\gamma$  ⇔ 1 MeV
- $E > 10 \text{ eV} \Leftrightarrow \lambda < 100 \text{ nm} \Leftrightarrow \text{UV, X, } \gamma$ 
  - effet photoélectrique
  - effet Compton (déplace un électron, lequel ionise)
  - production de paires  $e^+e^-$
- Particule chargée:  $e^-$ ,  $p^+$ ,  $\alpha$
- Neutron : met un proton en mouvement, lequel ionise

# Détection d'un rayonnement ionisant

- Énergie d'ionisation  $\sim 10$  eV
  - hydrogène 13,6; azote 14,5; oxygène 13,6 pour la 1<sup>o</sup> ionisation
  - la 7<sup>o</sup> pour l'azote est à 667 eV et la 8<sup>o</sup> pour l'oxygène à 871 [normal car  $\propto Z^2$ ]
- $\Rightarrow$  une particule ionisante de 1 MeV ionise  $10^4$  à  $10^5$  atomes sur son trajet
- $\Rightarrow 10^4$  à  $10^5$  ions et électrons secondaires
- $\Rightarrow$  courant d'ionisation si on peut collecter ces charges
- $\Rightarrow$  anode + cathode et différence de potentiel
- Ions attirés par la cathode mais lourds et lents
- Électrons secondaires [de  $\sim 10$  eV] attirés par l'anode
- $\Rightarrow$  cascade (avalanche de Townsend)





# Compteurs

---

## ■ Compteur proportionnel

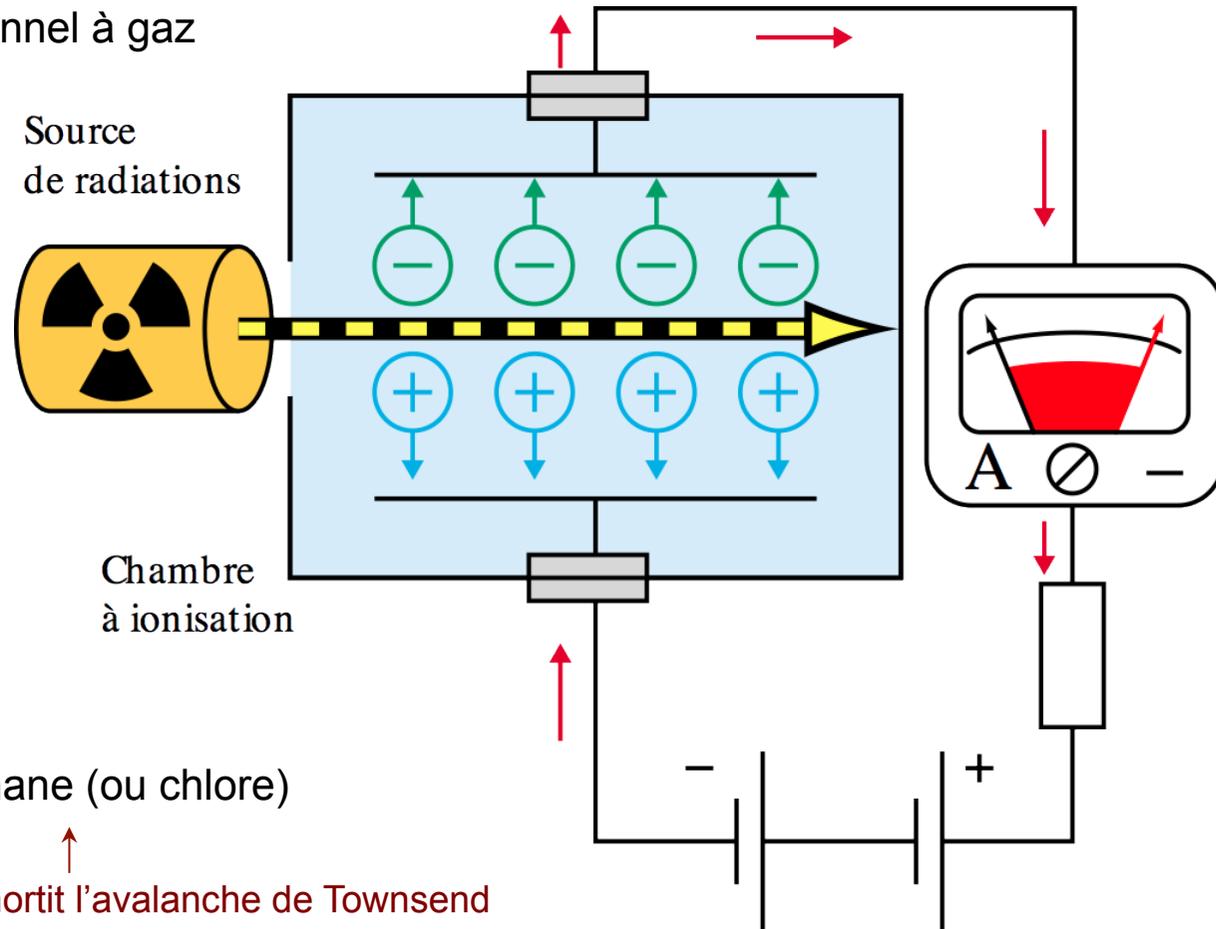
- Tensions 100 à 500 V
- Gaz inerte (Ne, He ou Ar) sous faible pression (0,1 atm)
- +10% méthane pour le *quenching* (absorption des photons de désexcitation lors de la recombinaison)
- Intensité du courant  $\sim$  proportionnelle à l'énergie de la particule incidente
- $\Rightarrow$  compte le nombre et l'énergie des particules ionisantes (sans vraiment les identifier)

## ■ Compteur Geiger

- Tensions  $> 500$  V
- $\Rightarrow$  avalanche de Townsend
- $\Rightarrow$  très sensible
- Mais ne distingue pas  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$
- Et ne mesure pas leur énergie (tout ou rien)
- Temps mort  $\sim 200 \mu\text{s}$   $\Rightarrow$  comptage limité à 500 cps
- Fenêtre en mica  $\rightarrow$  laisse passer les  $\alpha$
- Fenêtre en verre  $\rightarrow \beta > 2,5$  MeV et  $\gamma$

# Chambre d'ionisation / compteur proportionnel

- Compteur proportionnel à gaz



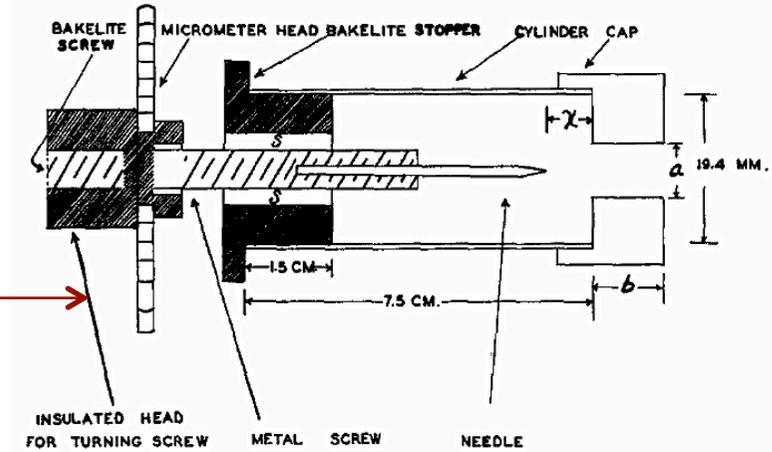
- Air  $\rightarrow$  argon + méthane (ou chlore)



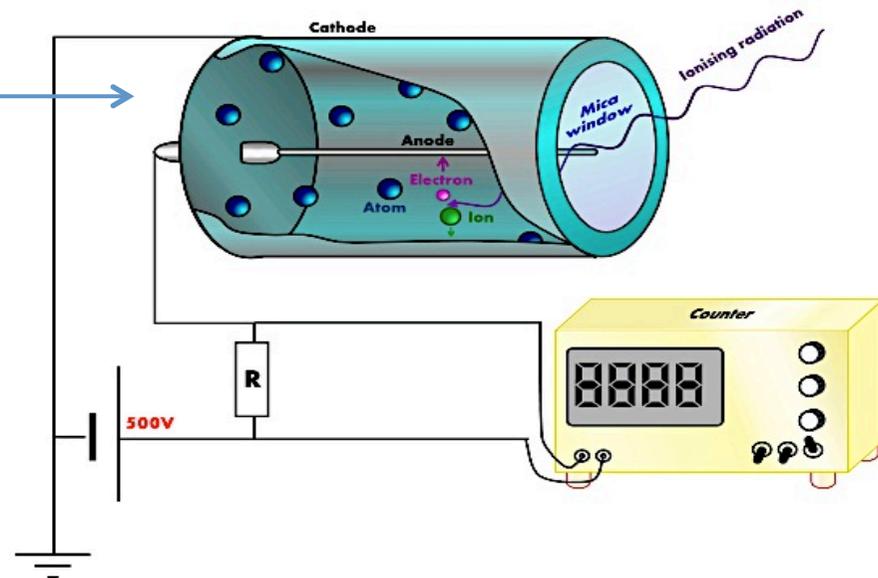
facilement ionisé par effet Compton

# Compteur(s) Geiger

- 1908 : compteur d' $\alpha$  avec Rutherford
- 1912 : compteur de  $\beta$
- 1913 : compteur à pointe, sensible aux  $\beta$  et aux  $\gamma$  mais d'utilisation très délicate
- 1928 : compteur Geiger-Müller à basse pression, plutôt utilisé pour  $\beta$  et  $\gamma$  ( $\alpha$  à la rigueur)



Geiger et Rutherford à Manchester

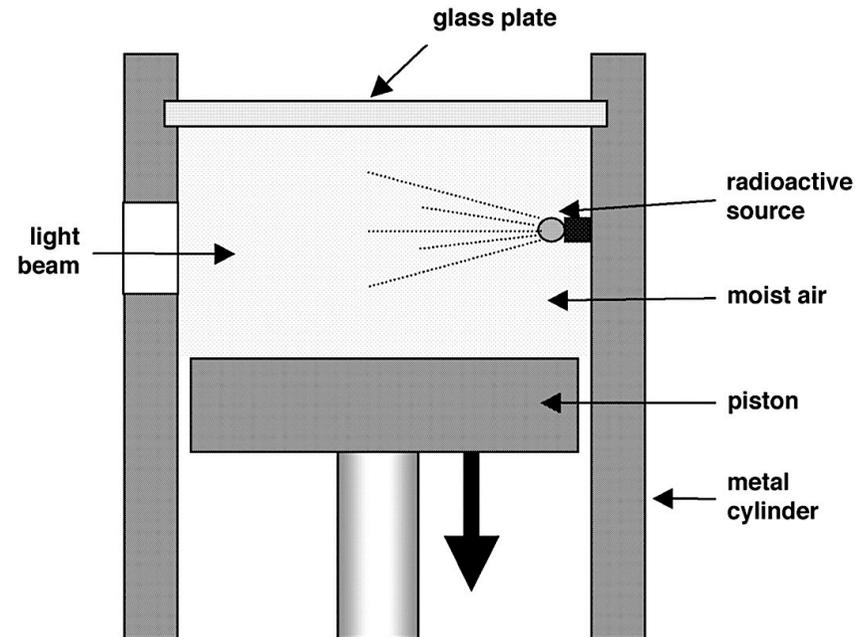


# La chambre à brouillard

- La chambre de Wilson, ou chambre à brouillard, (*cloud chamber*) mise au point au Cavendish à partir de 1911 [Nobel 1927]
  - Permet de photographier les interactions
  - Sensible à toute particule chargée
  - La forme et l'épaisseur des traces permet de distinguer électrons, protons ou ions
  - La courbure des traces (dans un champ magnétique) donne la vitesse des particules

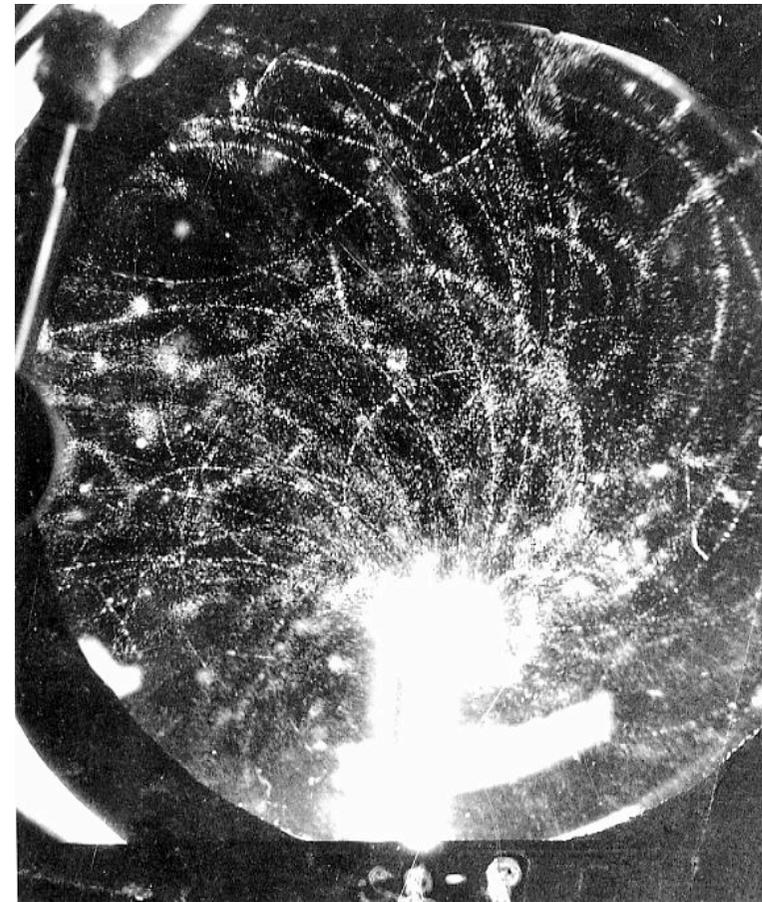
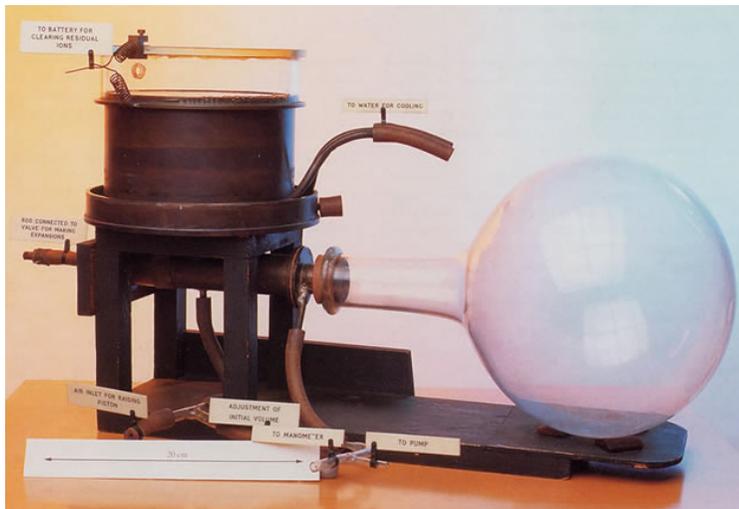
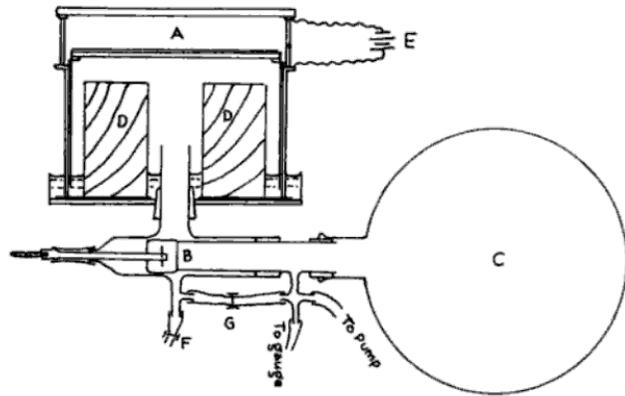


C.T.R. Wilson (1869-1959)



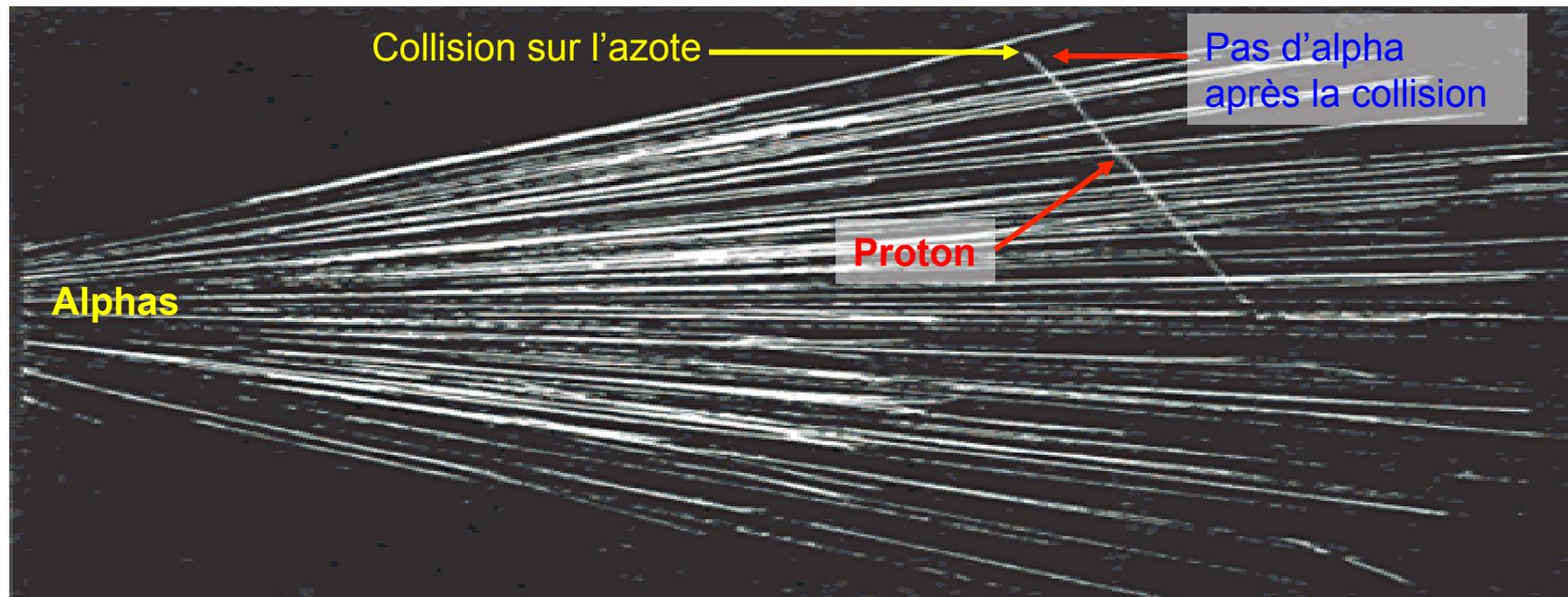
# La chambre à brouillard

- La vapeur d'eau **sursaturée** se condense sur les poussières, ou **sur le passage d'une particule chargée** ➡ traînée de gouttelettes



## Expérience de Rutherford : $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow \text{p} + ?$

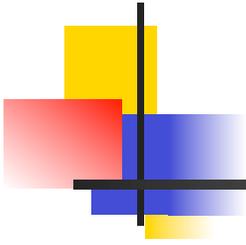
- Les clichés de Chadwick avec une chambre de Wilson montrèrent que l'alpha est *absorbé* par l'azote
- La réaction observée par Rutherford était en réalité
  - alpha + azote 14  $\rightarrow$  oxygène 17 + **proton**



# À la portée des enfants !

- Atomic Energy Lab (Gilbert 1950-1951)
- Électroscope
- Compteur Geiger-Müller
- Chambre de Wilson
- Spinthariscopes: écran au sulfure de zinc et loupe
- Minerais d'uranium
- Sources radioactives
  - Polonium 210 (→ alphas)
  - Plomb 210 (→ alphas et bêtas)
  - Rubidium 106 (→ bêtas)
  - Zinc 65 (→ gammas)





Merci de votre attention !

