

PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

11 – TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

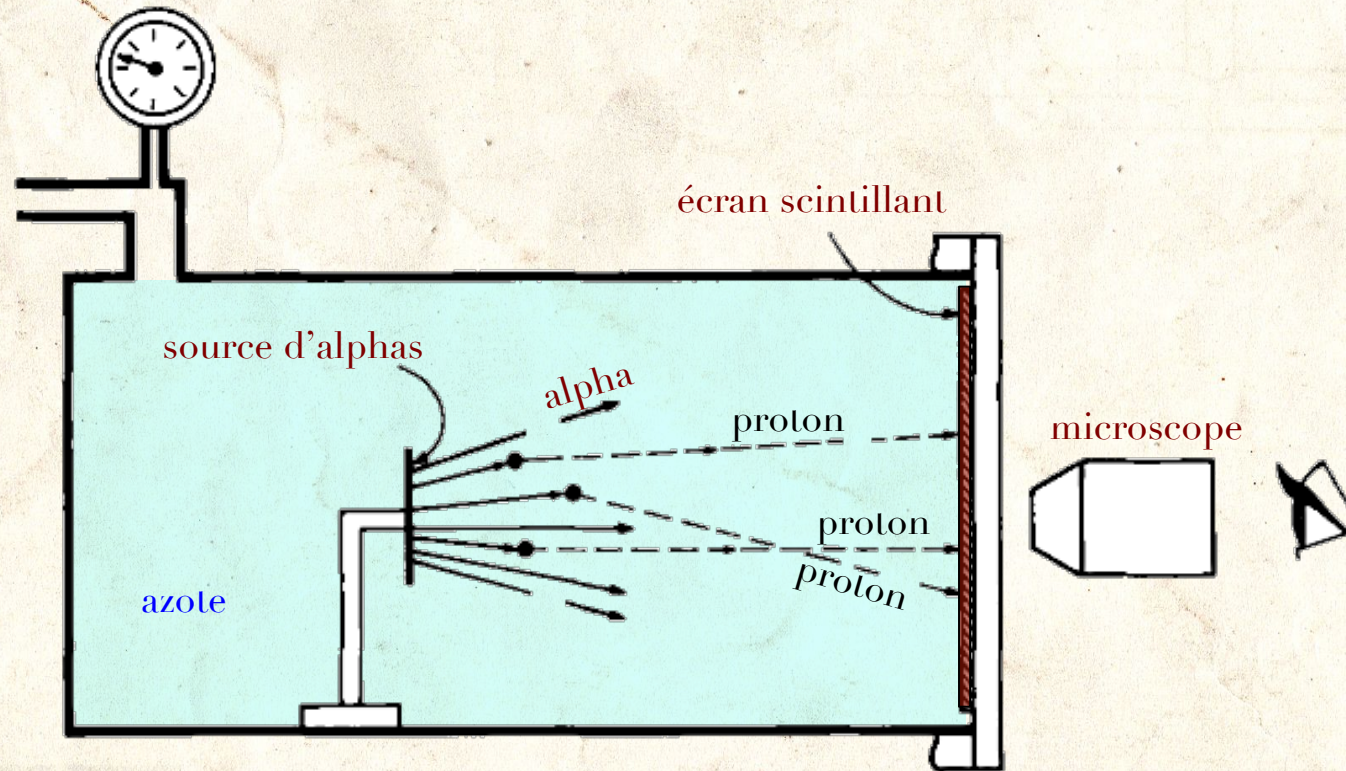
Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

AU COMMENCEMENT ÉTAIT RUTHERFORD...

- Collisions de rayons α 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)

○ Rayons X

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

○ Inconvénients

- intensité faible (le plus souvent quelques mCi = 3.7×10^7 Bq)
- énergie limitée à quelques MeV

○ Cibles et absorbants

○ Feuilles métalliques très minces (les alphas sont facilement absorbés) d'aluminium, ou d'or [~ 100 nm]

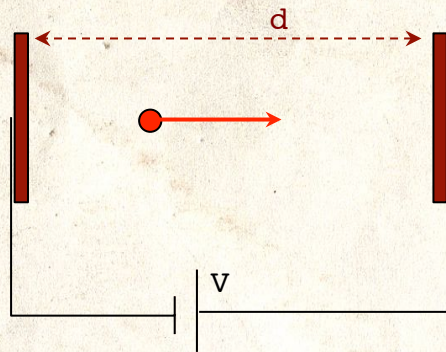
○ Gaz raréfiés, ou sous pression : hydrogène, azote, fluor, argon, etc.

○ Écrans de plomb ou de cuivre (absorbant), ou de paraffine (cible)

ACCÉLÉRATEURS

ACCÉLÉRATION PAR UN CHAMP ÉLECTRIQUE

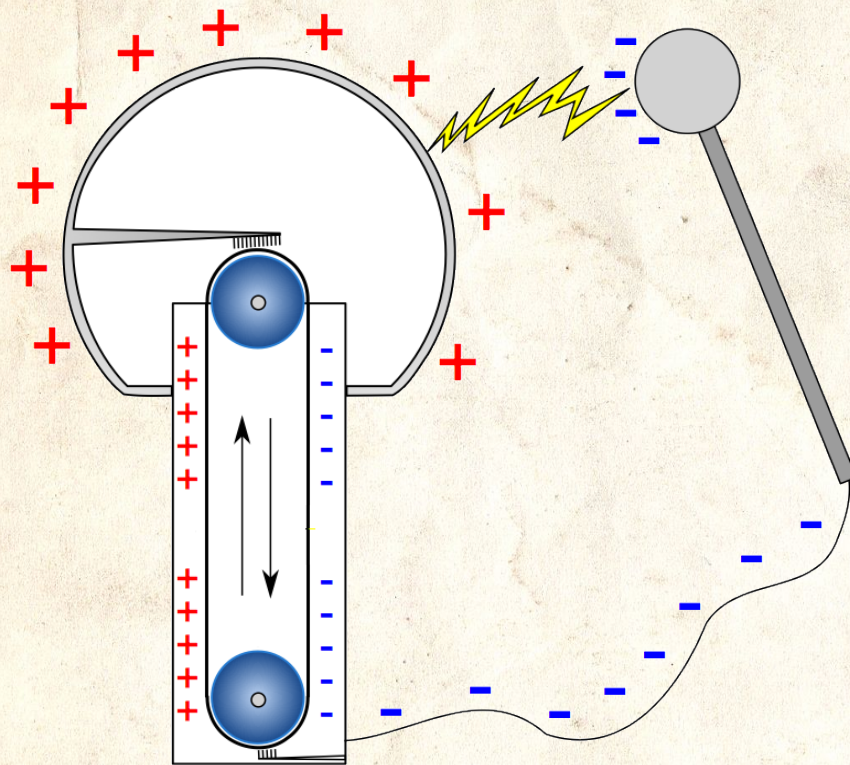
- Particule de charge e et de masse m dans un champ électrique E
- → accélération $\gamma = eE/m$



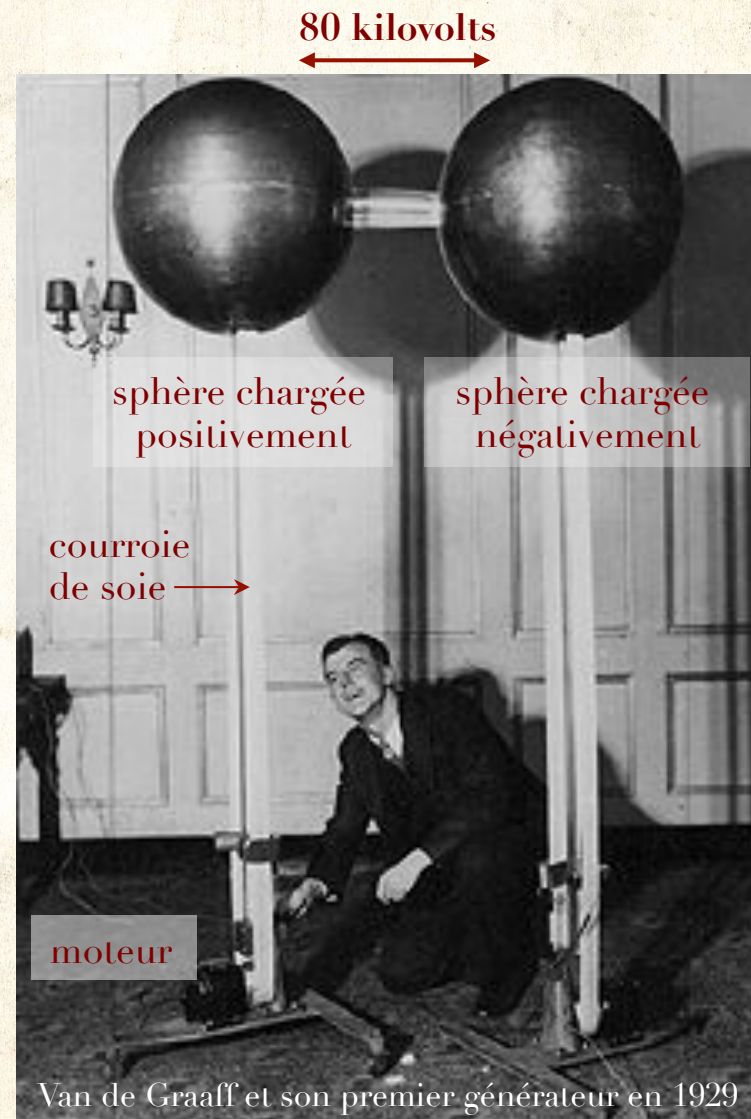
D'où la mesure des énergies par particule en électron-volts (eV)

- → énergie acquise sur une distance d : $E_c = m\gamma d = eEd = eV$
 1. indépendante de la masse m et de la distance d parcourue
 2. mais directement proportionnelle à la différence de potentiel V
- **recherche de très hautes tensions** [\sim million de volts]

GÉNÉRATEUR VAN DE GRAAFF

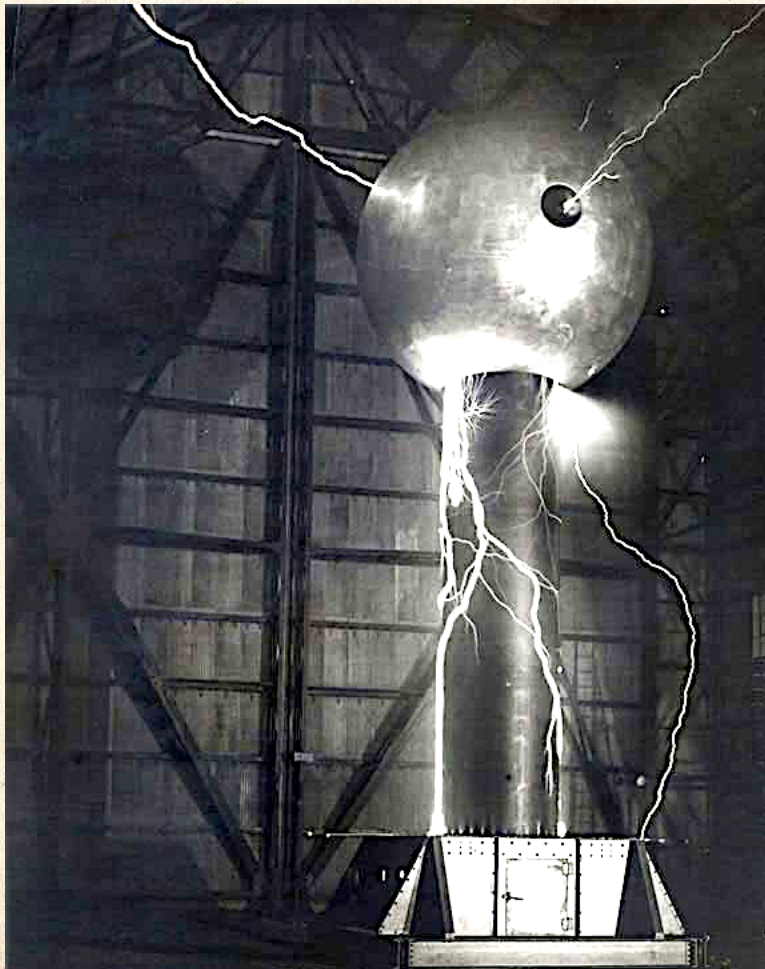


- Robert Van de Graaff (1901-1967) parvint à 1 MV en 1931, à 7 MV en 1933 (sphères de 5 m de diamètre à 7 m de hauteur)

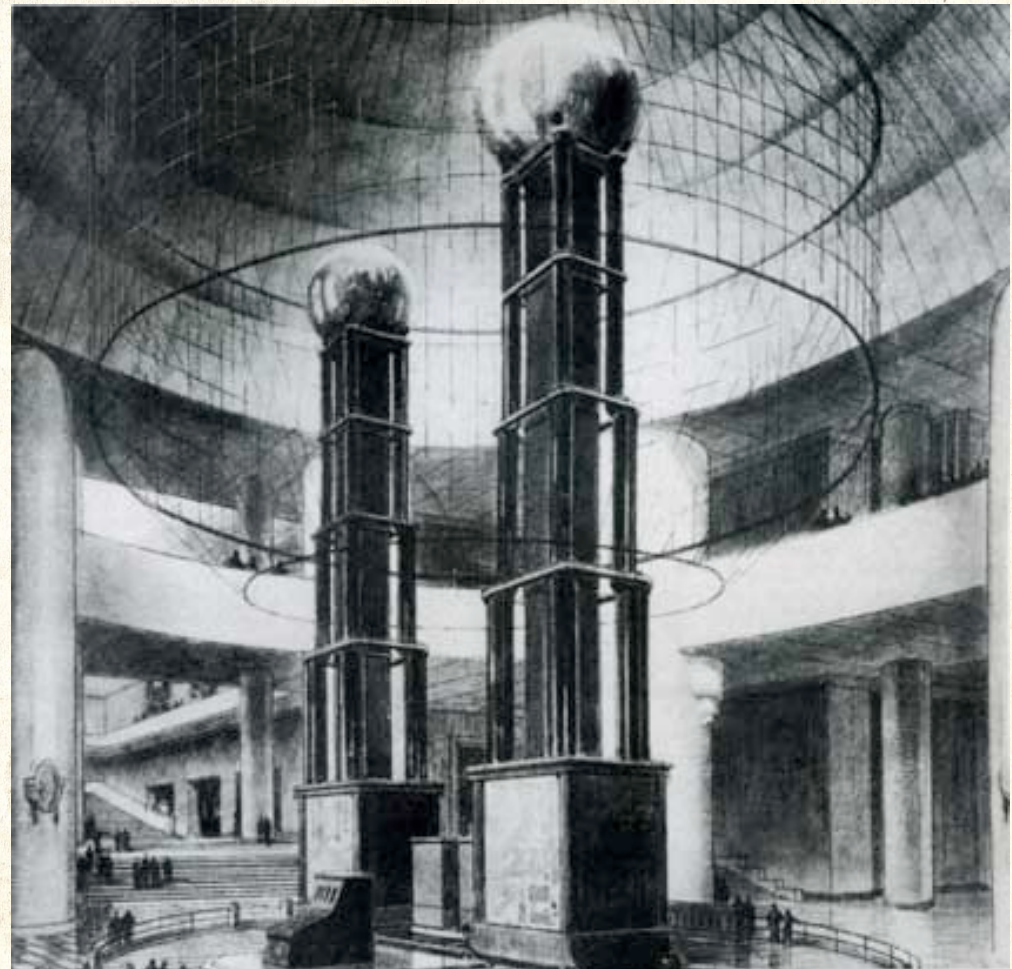


UNE MACHINE SPECTACULAIRE !

○ MIT (1934)

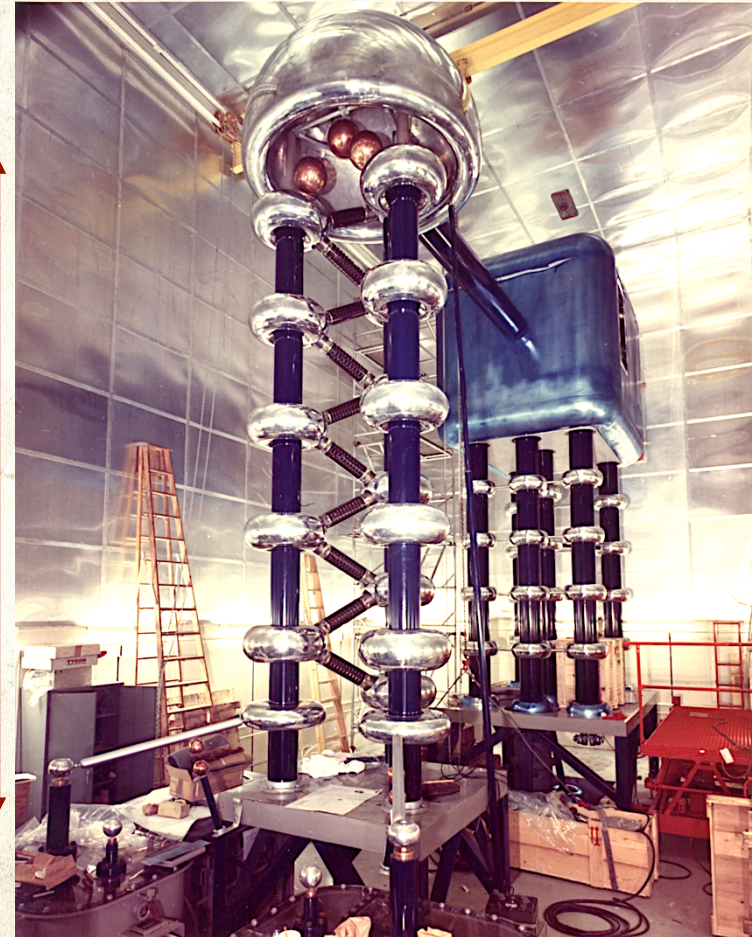
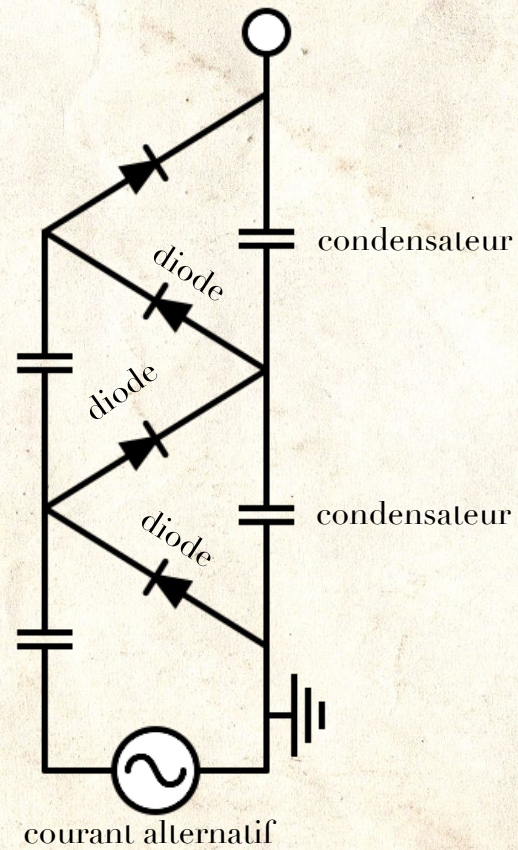


○ Palais de la Découverte (1937)



COCKCROFT & WALTON @ CAVENDISH

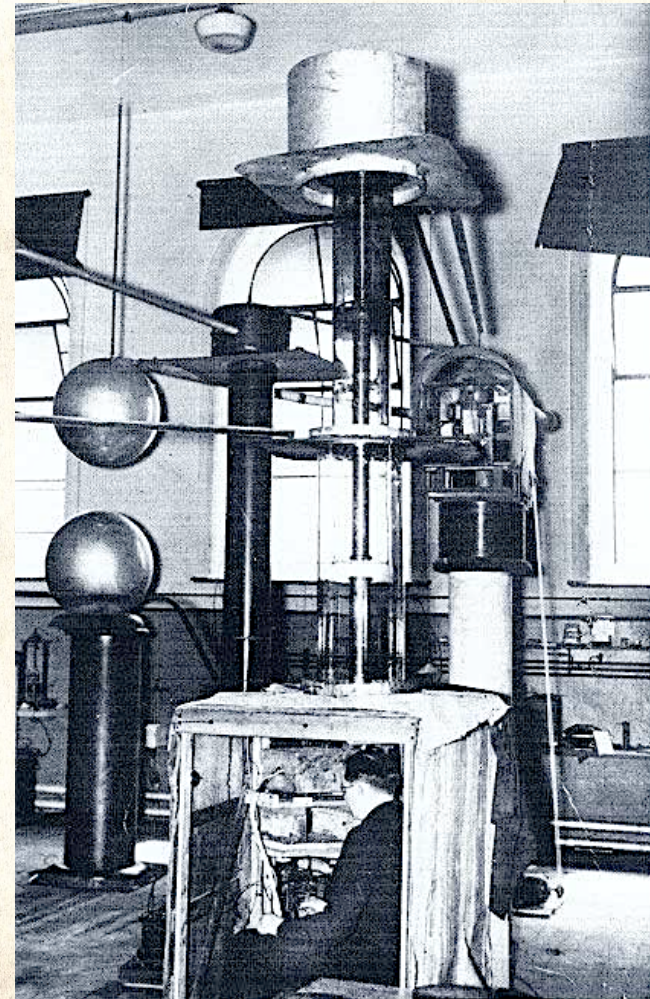
- 1928→1932 : une échelle vers les très hautes tensions
- 200 kV en 1930, 800 kV en 1932



AU CAVENDISH

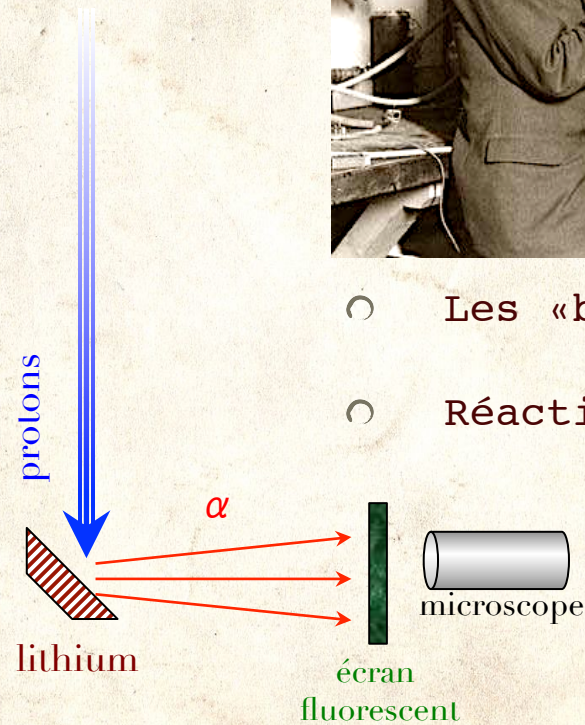
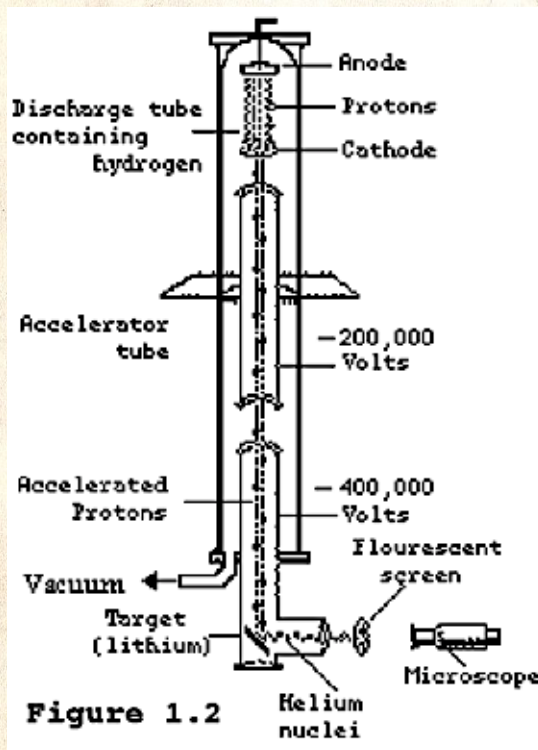
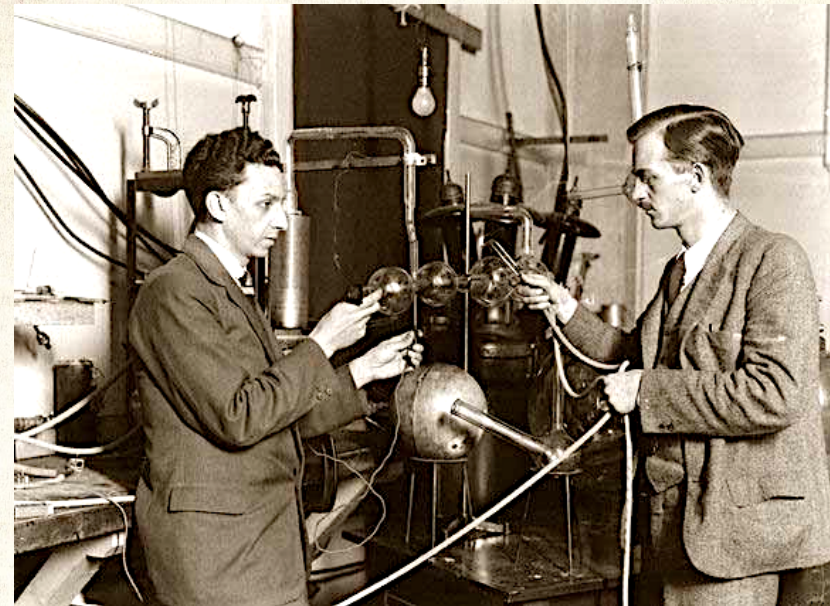


John Cockcroft, Ernest Rutherford et Ernest Walton



UN ULTIMATUM DE RUTHERFORD

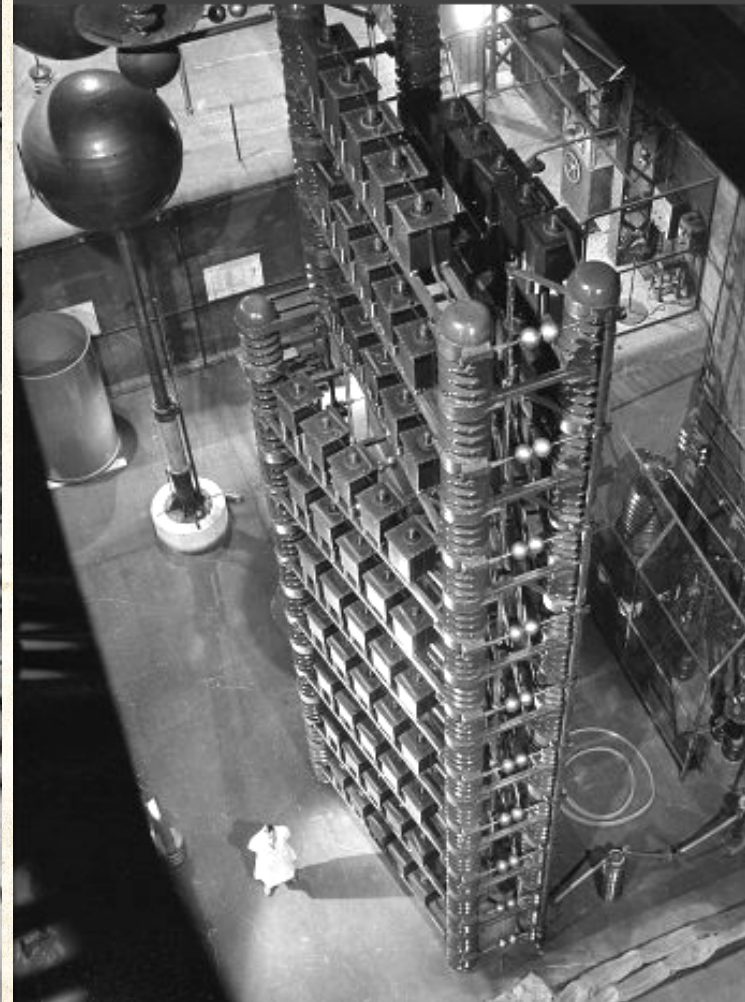
- «Arrêtez de jouer, faites de la physique!»



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

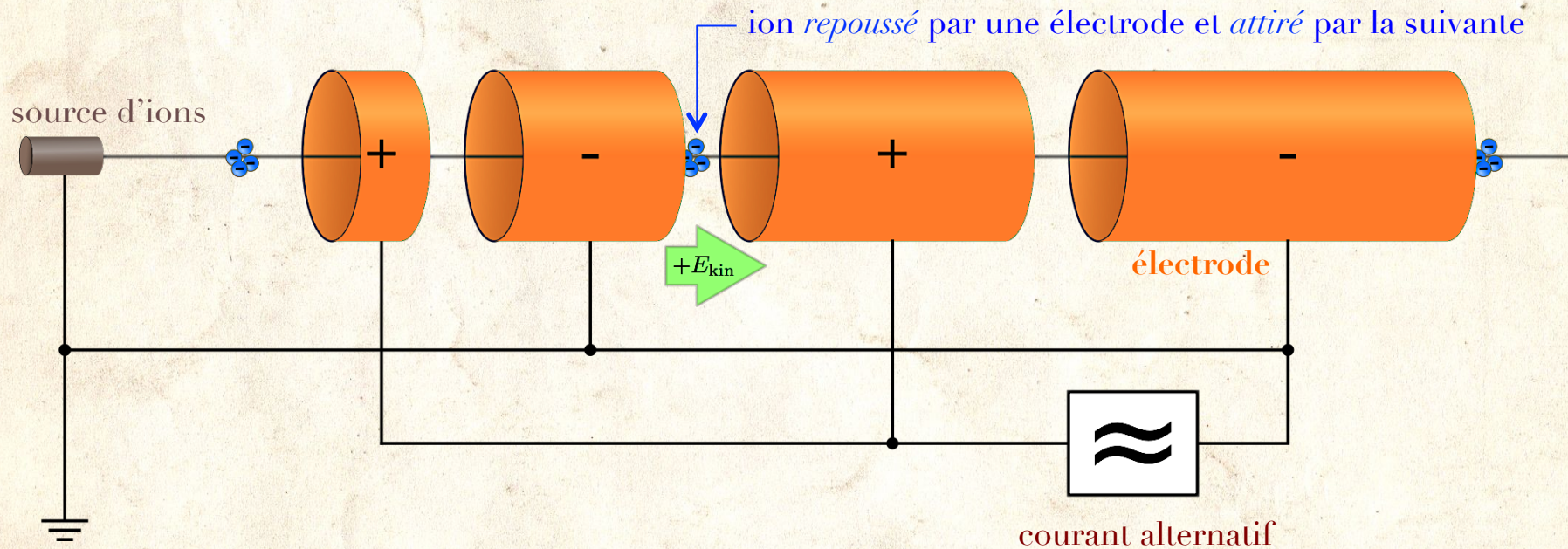
Le nombre d' α augmente rapidement avec l'énergie des protons (de 100 à 500 keV) \Leftrightarrow franchissement plus facile de la barrière coulombienne

LABORATOIRE DE SYNTHÈSE ATOMIQUE (IVRY)



ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES « RÉSONANTS »

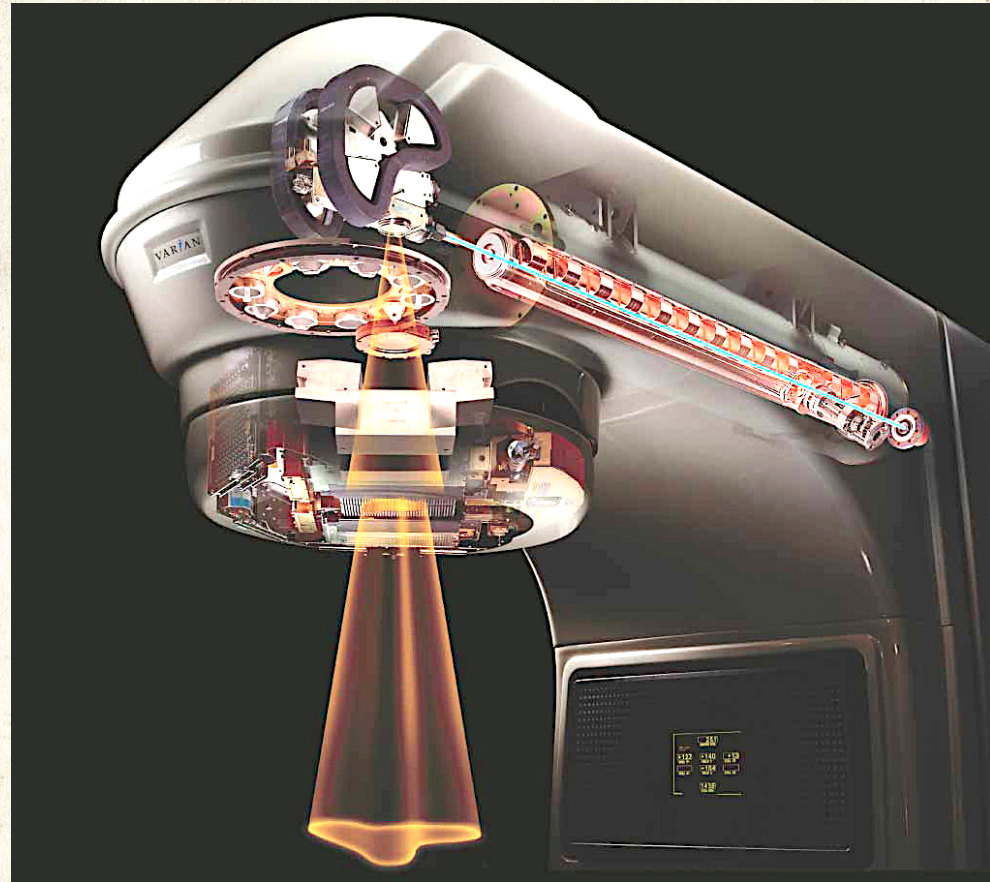
○ Principe



○ Accélération \Rightarrow longueur et espacement grandissants des électrodes

ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE À USAGE MÉDICAL

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



- Hautes tensions et hautes fréquences → compacité

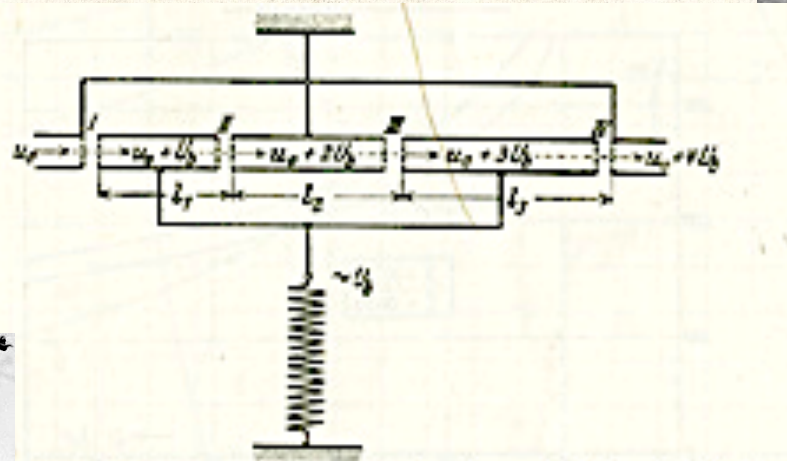
SLAC (STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER)



CYCLOTRONS

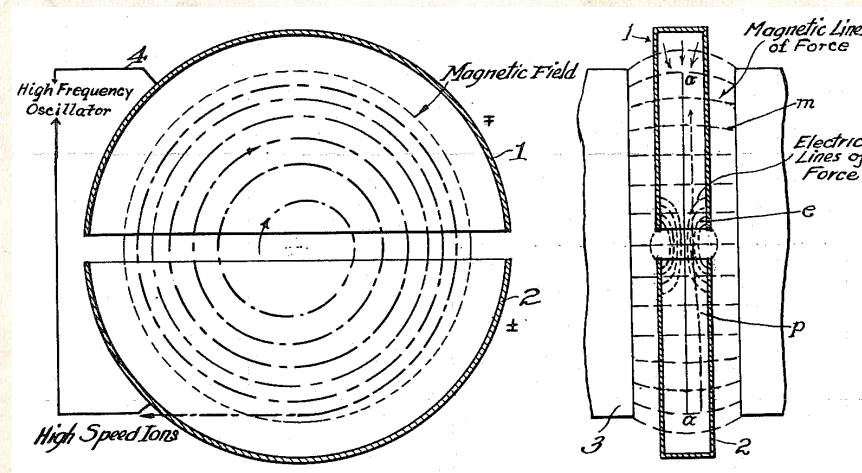
ERNEST ORLANDO LAWRENCE

- Inspiré par une figure de l'article de Widerøe



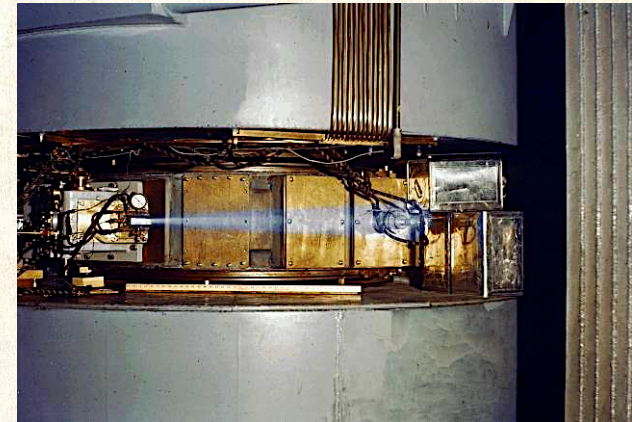
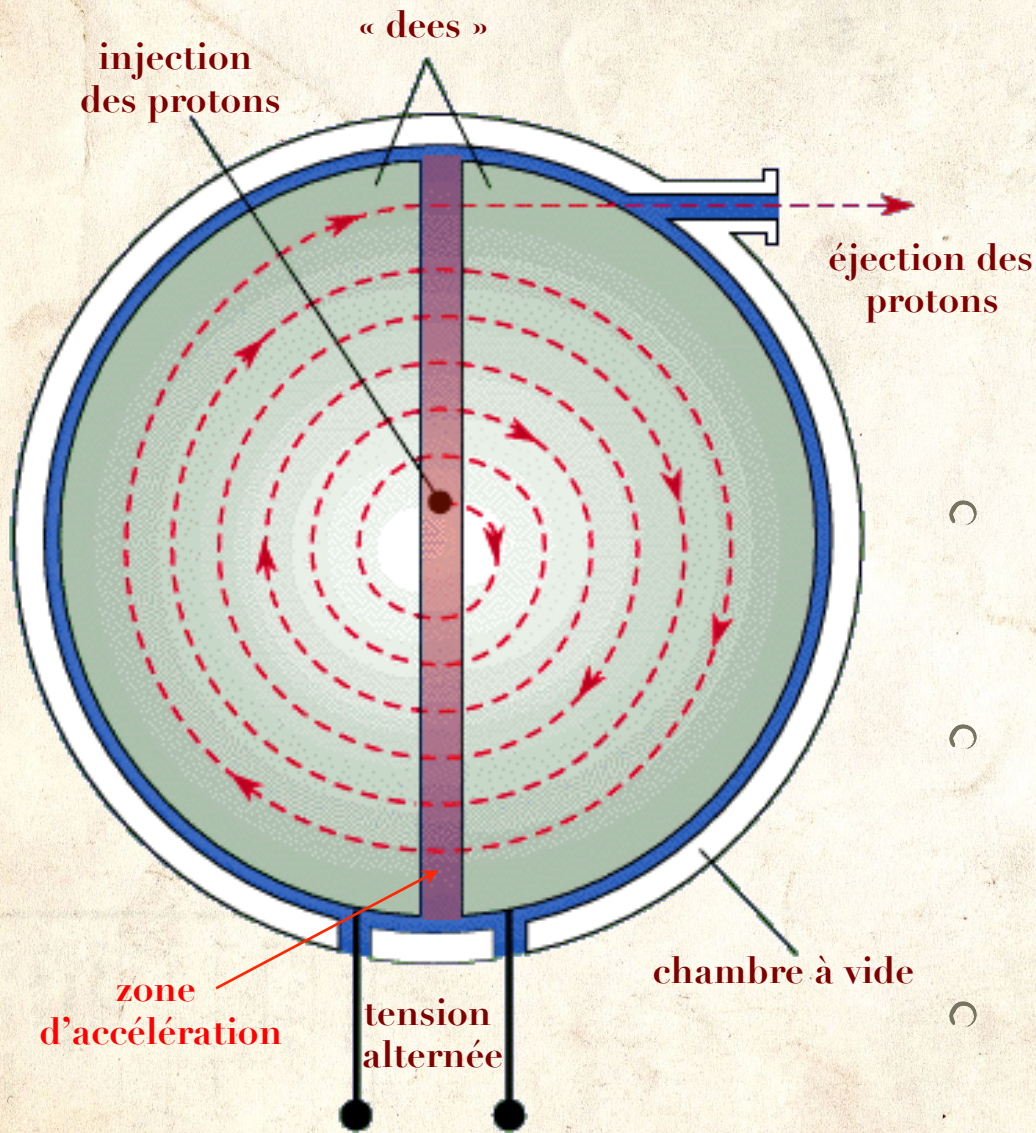
Prinzip der Spannungstransformation mit Potentialfeldern.

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 the 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

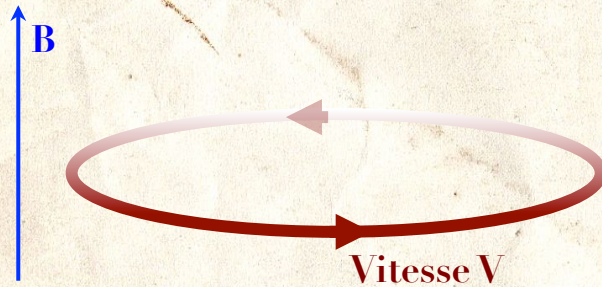


Faisceau de protons ionisant l'air

- 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
 1. augmenter le champ magnétique
 2. augmenter le rayon

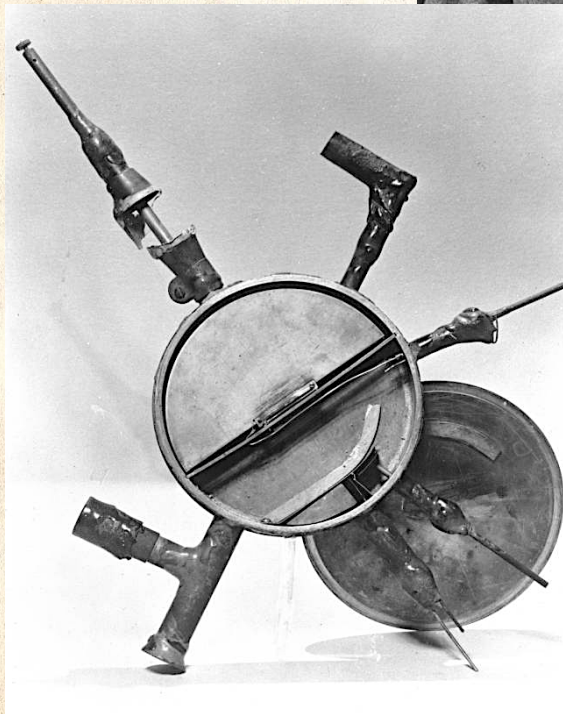
- Limitations

- financières
- pertes d'énergie (bremsstrahlung)
- effets relativistes \rightarrow synchrocyclotron et synchrotron

UNE RAPIDE ÉVOLUTION



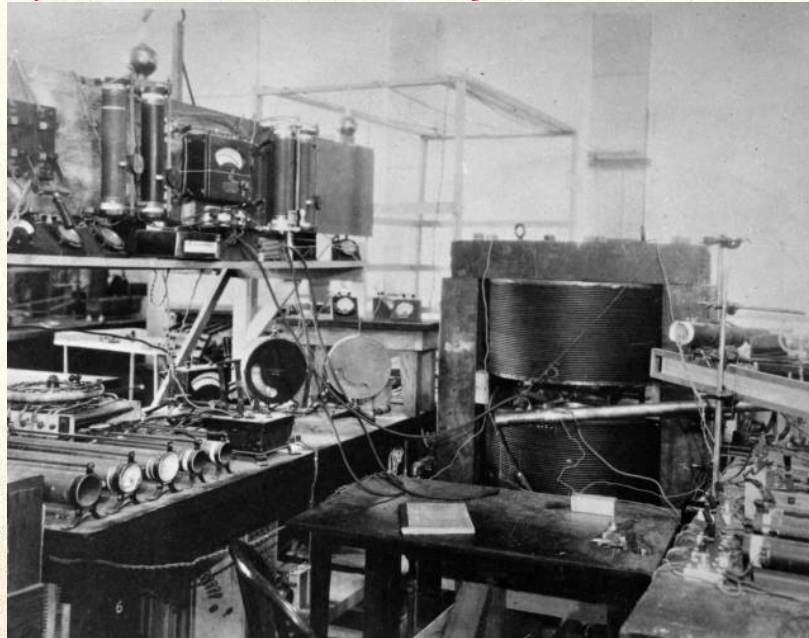
Cyclotron de 5 pouces 1930
Tension 2 000 V
Énergie 80 keV



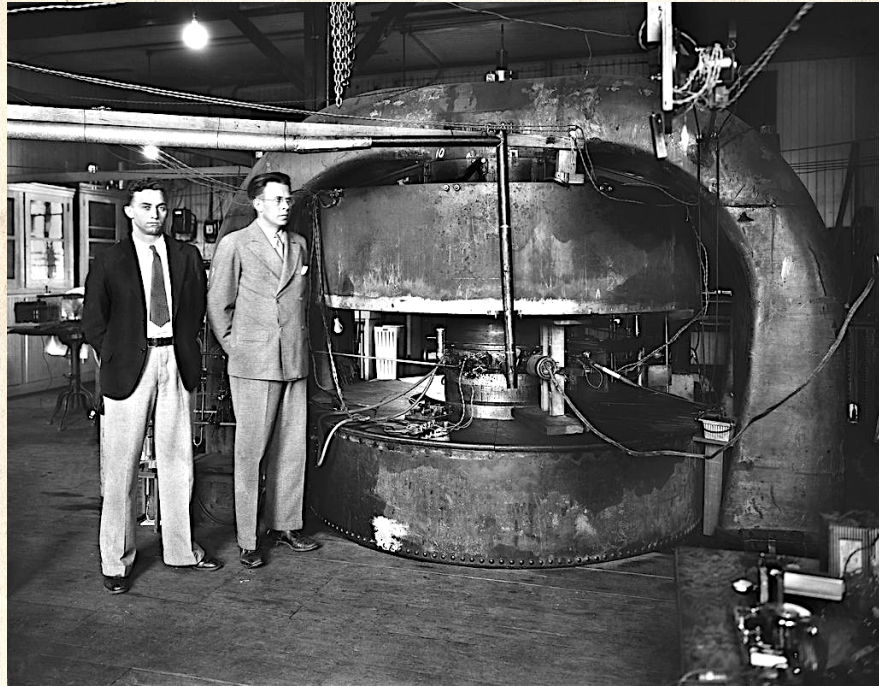
$$E = 4,8 \text{ MeV} [q/e]^2 [m_p/m] [B/1 \text{ T}]^2 [R/1 \text{ m}]^2$$

- ☞ 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 Lawrence et Livingston en 1931 : 1,2 MeV

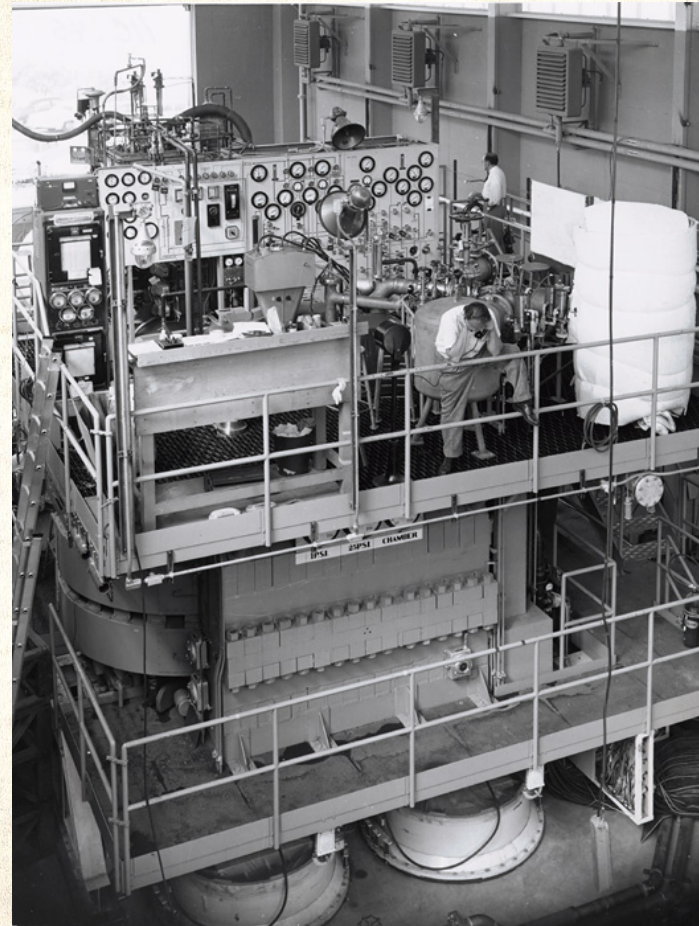


UNE RAPIDE ÉVOLUTION

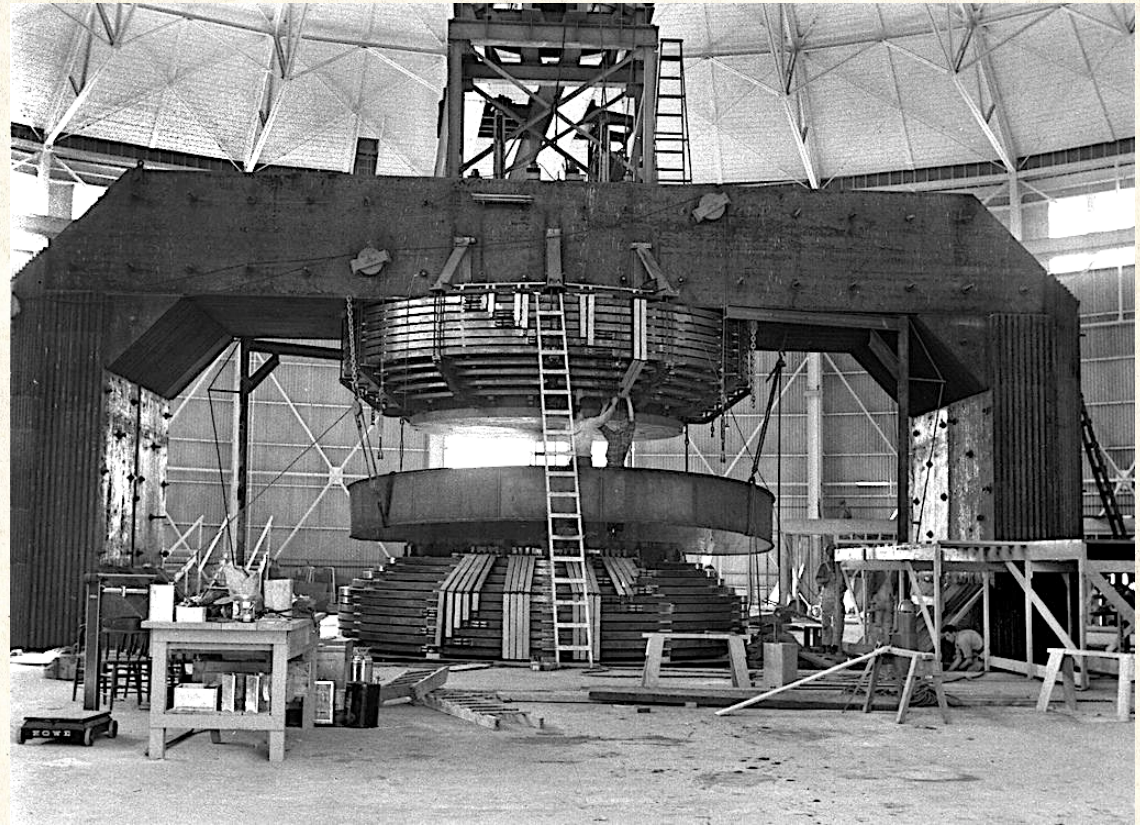


Cyclotron de 28 pouces en 1934 (Lawrence à droite)
Protons de 1 MeV, puis deutérons de 5 MeV

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



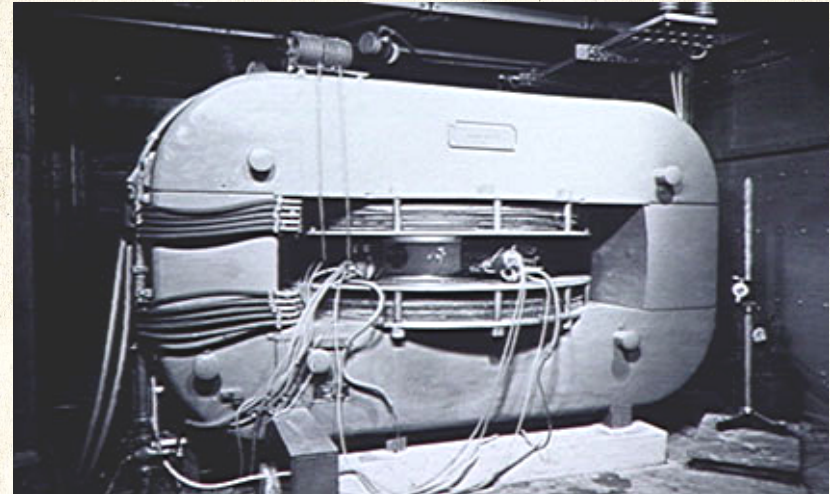
UNE RAPIDE ÉVOLUTION



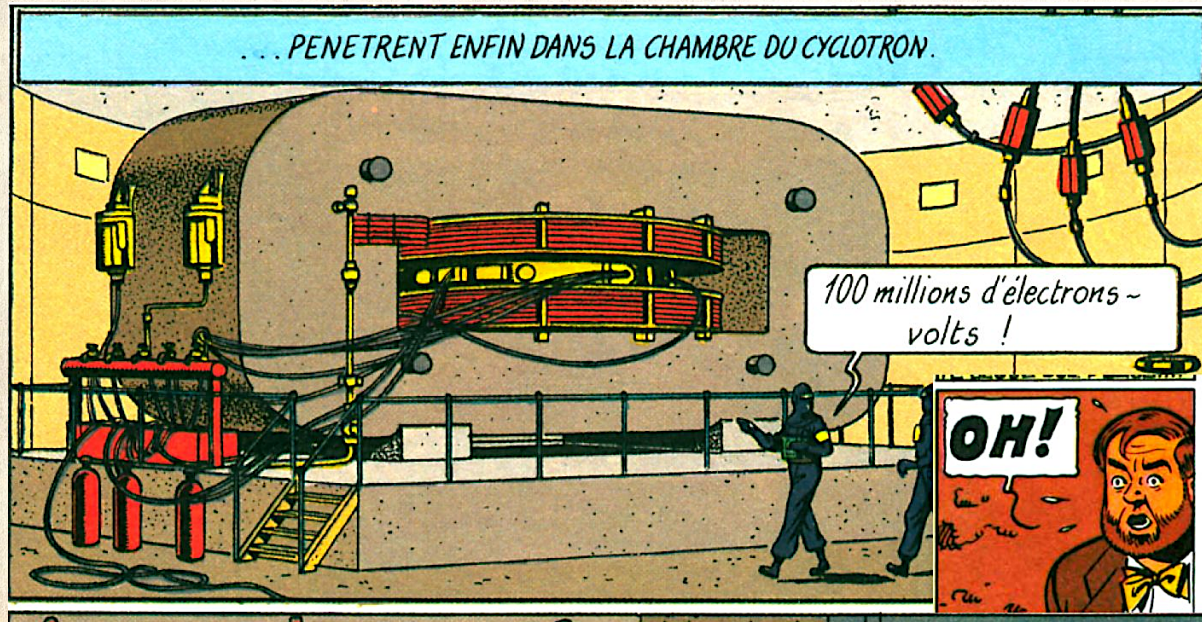
Lawrence en 1942 devant le bâtiment du cyclotron de 184 pouces

LE CYCLOTRON SUPERSTAR

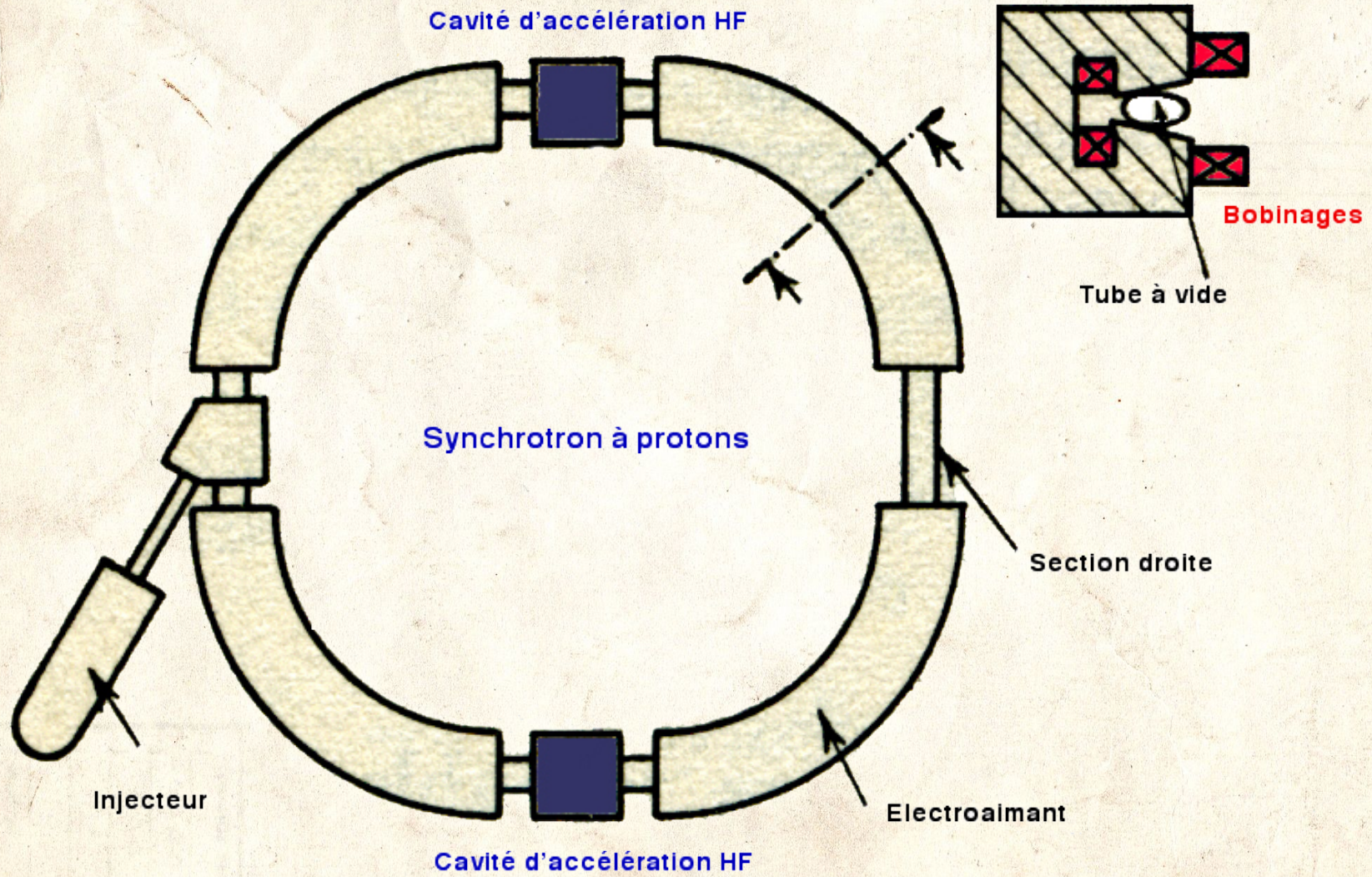
Le cyclotron de Joliot au Collège de France en 1942



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



SYNCHROTRON



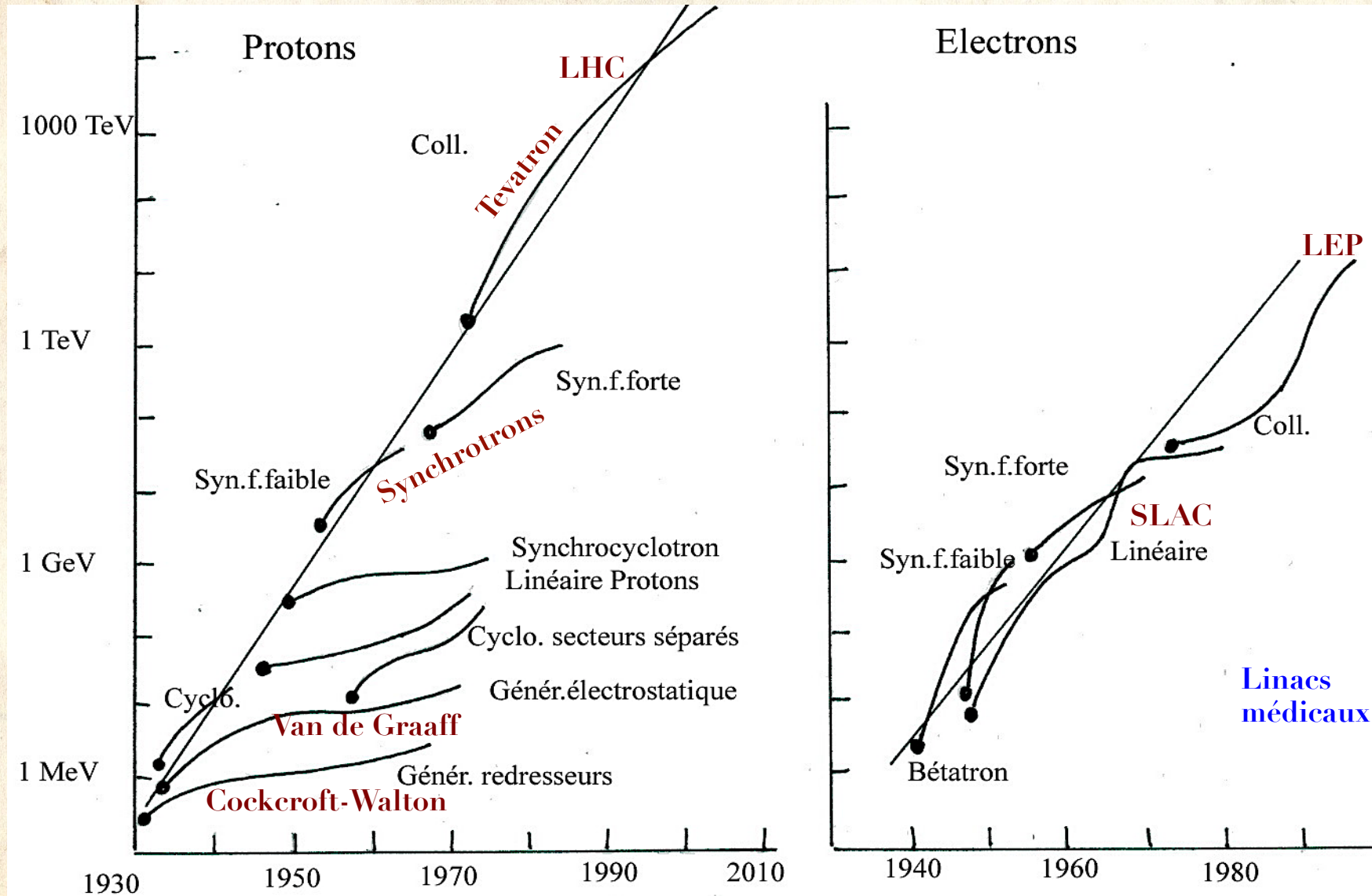
LE LARGE HADRON COLLIDER AU CERN



UN SYNCHROTRON À ÉLECTRONS : SOLEIL



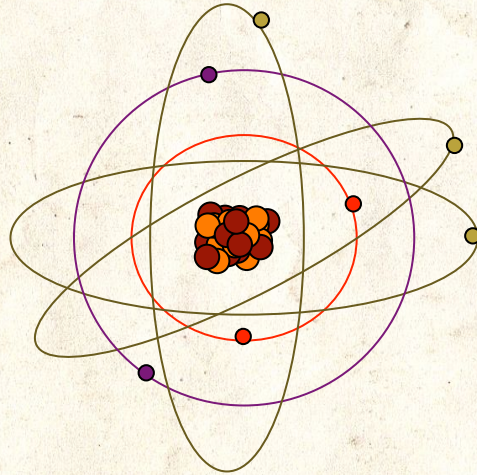
LES ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES



DÉTECTEURS

IONISATION

- Atome d'azote (par exemple)
 - Noyau : 7 protons + 7 neutrons
 - → 7 électrons : 2 sur la 1s, 2 sur la 2s et 3 sur la 2p



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

- Comment ioniser ?
 - Onde électromagnétique

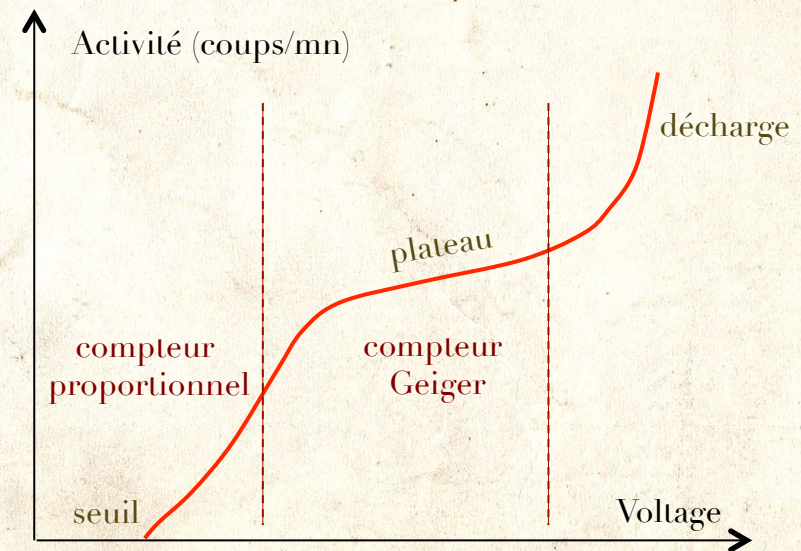
- micro-ondes \Leftrightarrow 1 meV
- visible \Leftrightarrow 1 eV
- rayons X \Leftrightarrow 1 keV
- rayons γ \Leftrightarrow 1 MeV

$$E > 10 \text{ eV} \Leftrightarrow \lambda < 100 \text{ nm} \Leftrightarrow \text{UV, X, } \gamma$$

- effet photoélectrique
- effet Compton (déplace un électron, lequel ionise)
- production de paires e^+e^-
- Particule chargée: e^- , p^+ , α
- Neutron : met un proton en mouvement, lequel ionise

DÉTECTION D'UN RAYONNEMENT IONISANT

- Énergie d'ionisation ~ 10 eV
 - hydrogène 13,6; azote 14,5; oxygène 13,6 pour la 1^o ionisation
 - la 7^o pour l'azote est à 667 eV et la 8^o 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 ~ 10 eV] attirés par l'anode
- \Rightarrow cascade (avalanche de Townsend)



COMPTEURS

○ Compteur proportionnel

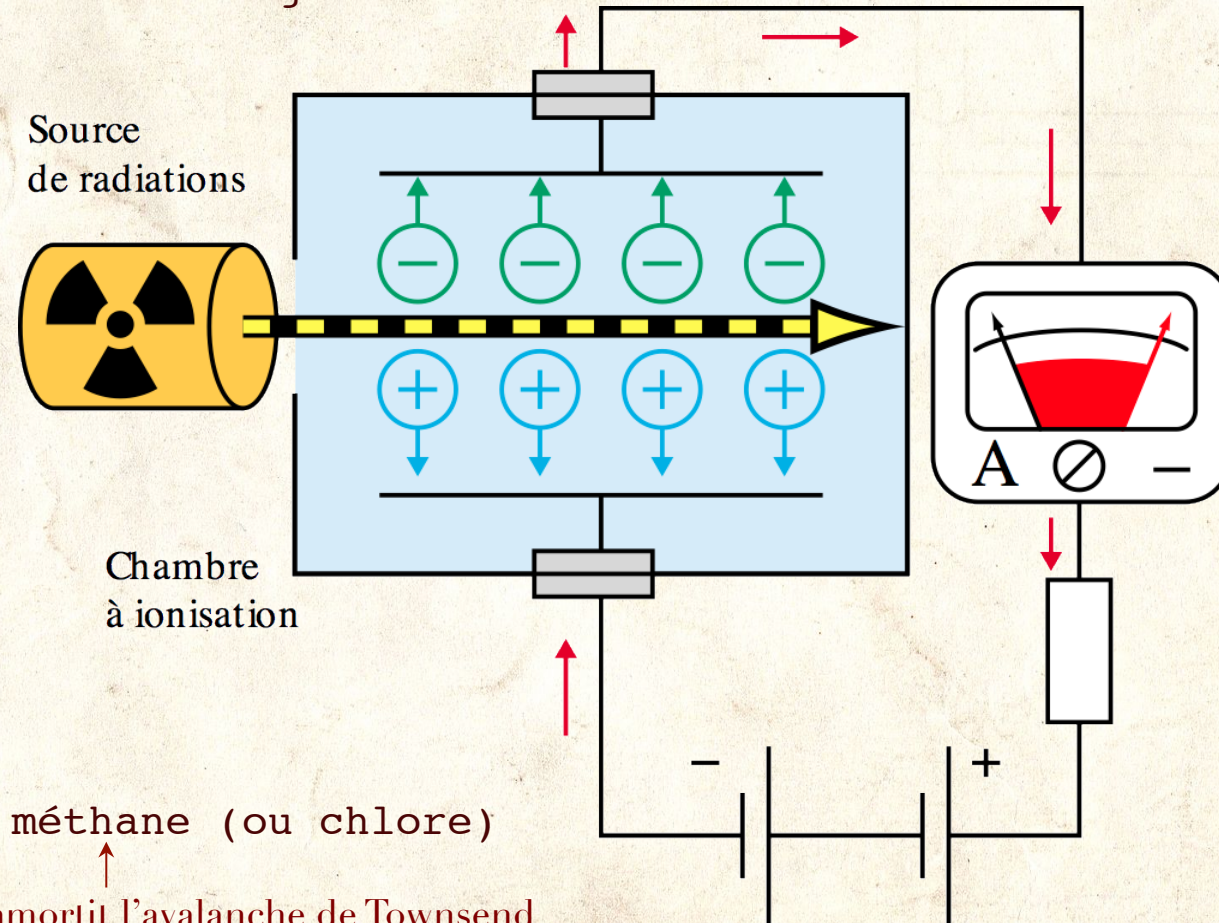
- Tensions 100 à 500 V
- Gaz inerte (Ne, He ou Ar) sous faible pression (0,1 atm)
- +10% méthane pour le *quenching* (absorption des photons de désexcitation lors de la recombinaison)
- Intensité du courant ~ proportionnelle à l'énergie de la particule incidente
- ⇒ compte le nombre et l'énergie des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

○ Compteur Geiger

- Tensions > 500 V
- ⇒ avalanche de Townsend
- ⇒ **très sensible**
- Mais ne distingue pas α , β et γ
- Et ne mesure pas leur énergie (tout ou rien)
- Temps mort ~ 200 μ s ⇒ comptage limité à 500 cps
- Fenêtre en mica → laisse passer les α
- Fenêtre en verre → $\beta > 2,5$ MeV et γ

CHAMBRE D'IONISATION / COMPTEUR PROPORTIONNEL

○ Compteur proportionnel à gaz

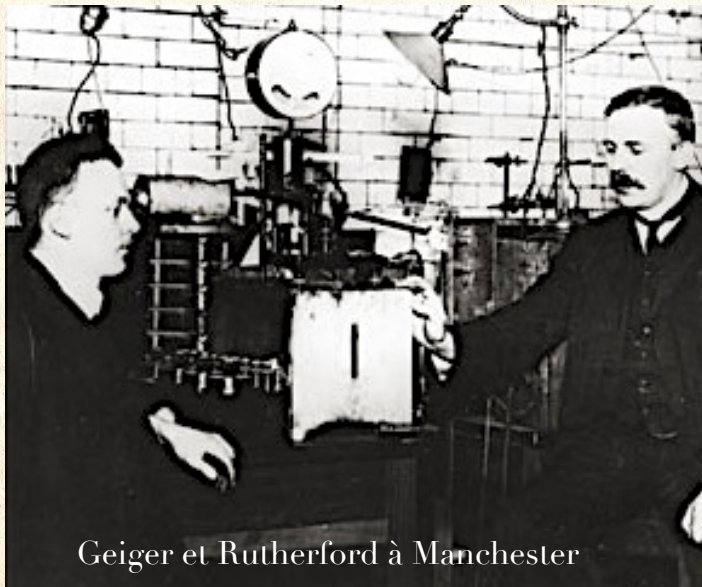
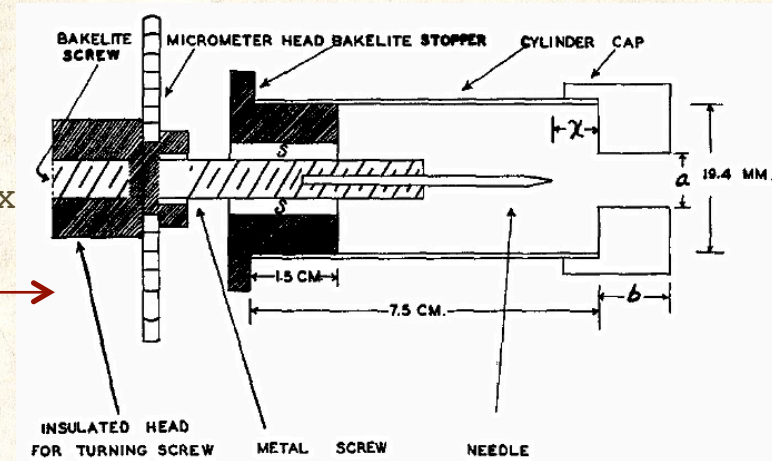


○ Air → argon + méthane (ou chlore)
↑
amortit l'avalanche de Townsend

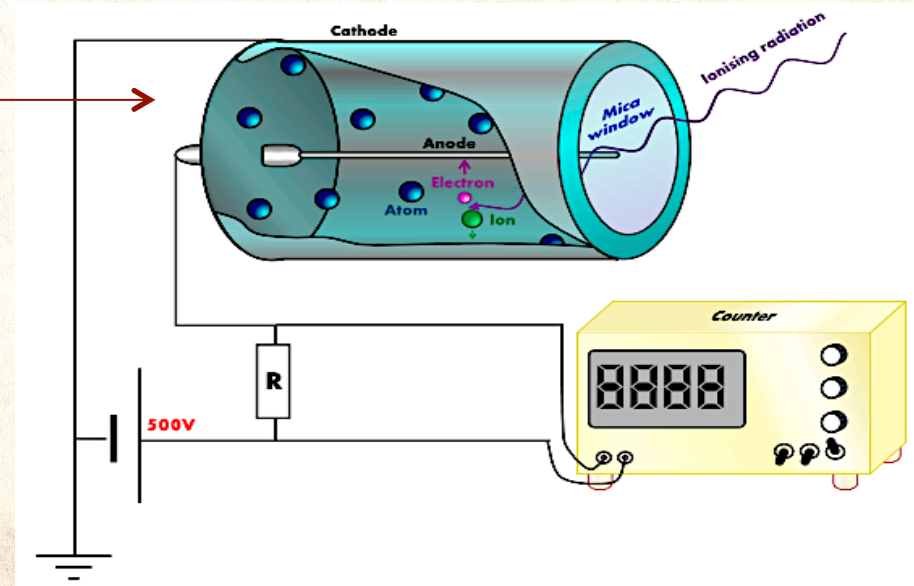
facilement ionisé par effet Compton

COMPTEUR(S) GEIGER

- 1908 Compteur d' α avec Rutherford
- 1912 Compteur de β
- 1913 Compteur à pointe, sensible aux β et aux γ mais d'utilisation très délicate
- 1928 Compteur Geiger-Müller à basse pression, plutôt utilisé pour β et γ (α à la rigueur)



Geiger et Rutherford à Manchester

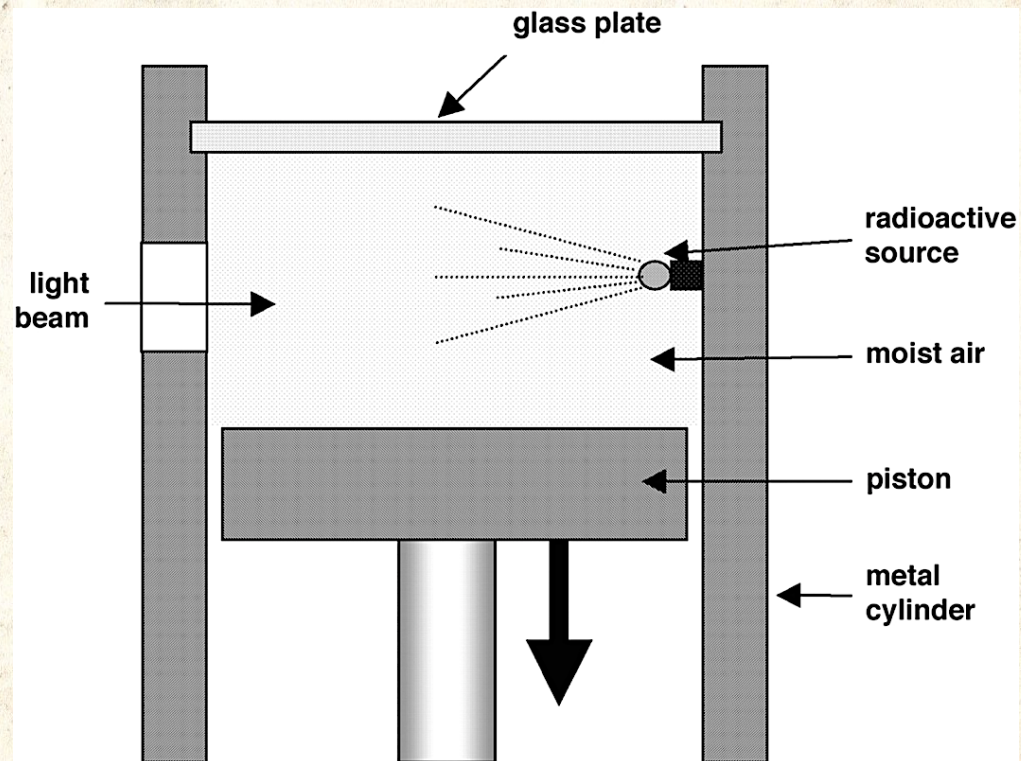


LA CHAMBRE À BROUILLARD

- 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



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 → trainée de gouttelettes

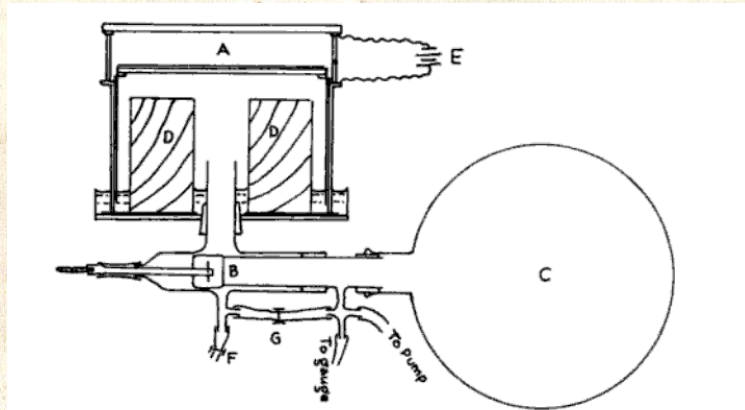
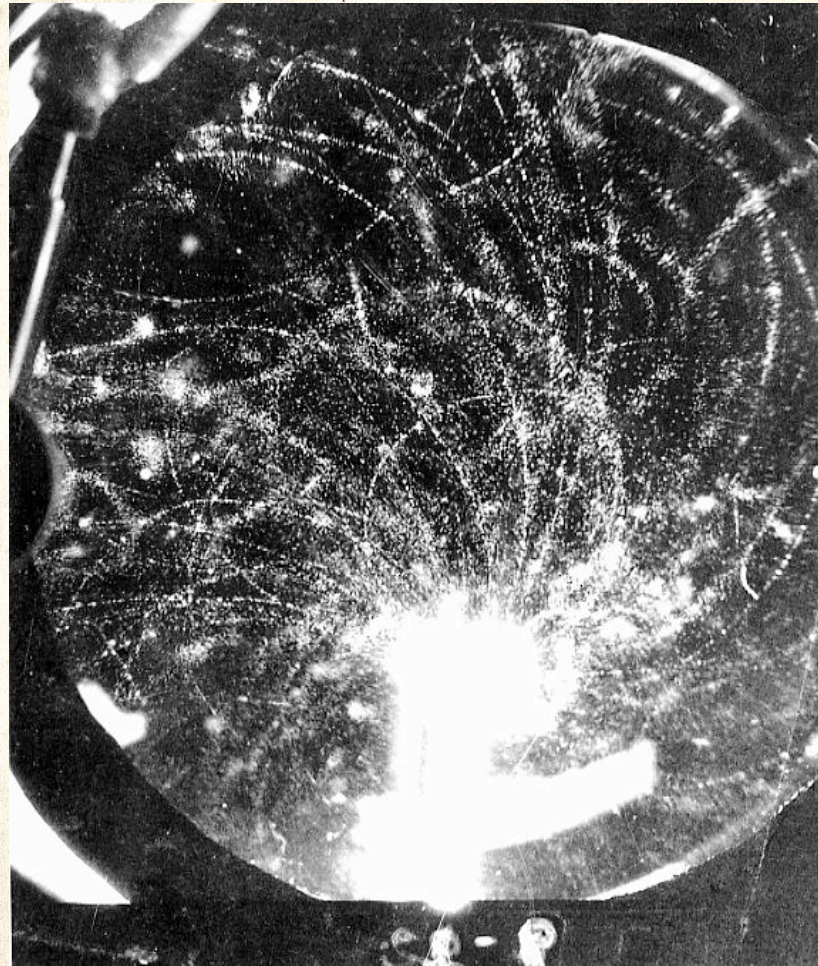
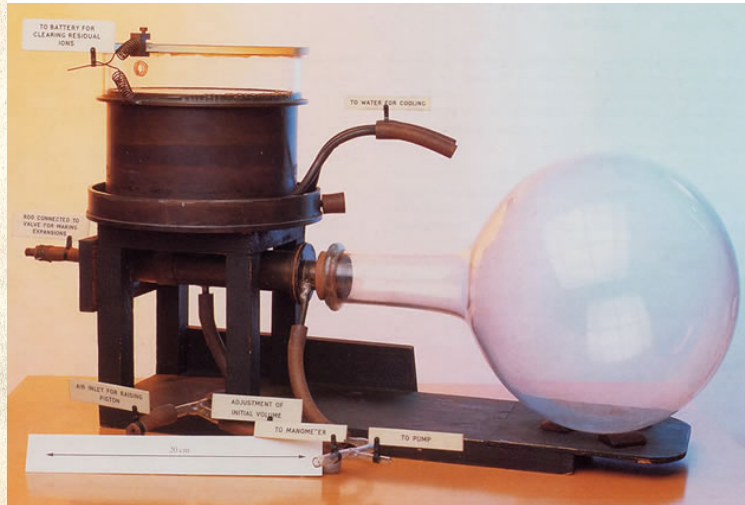
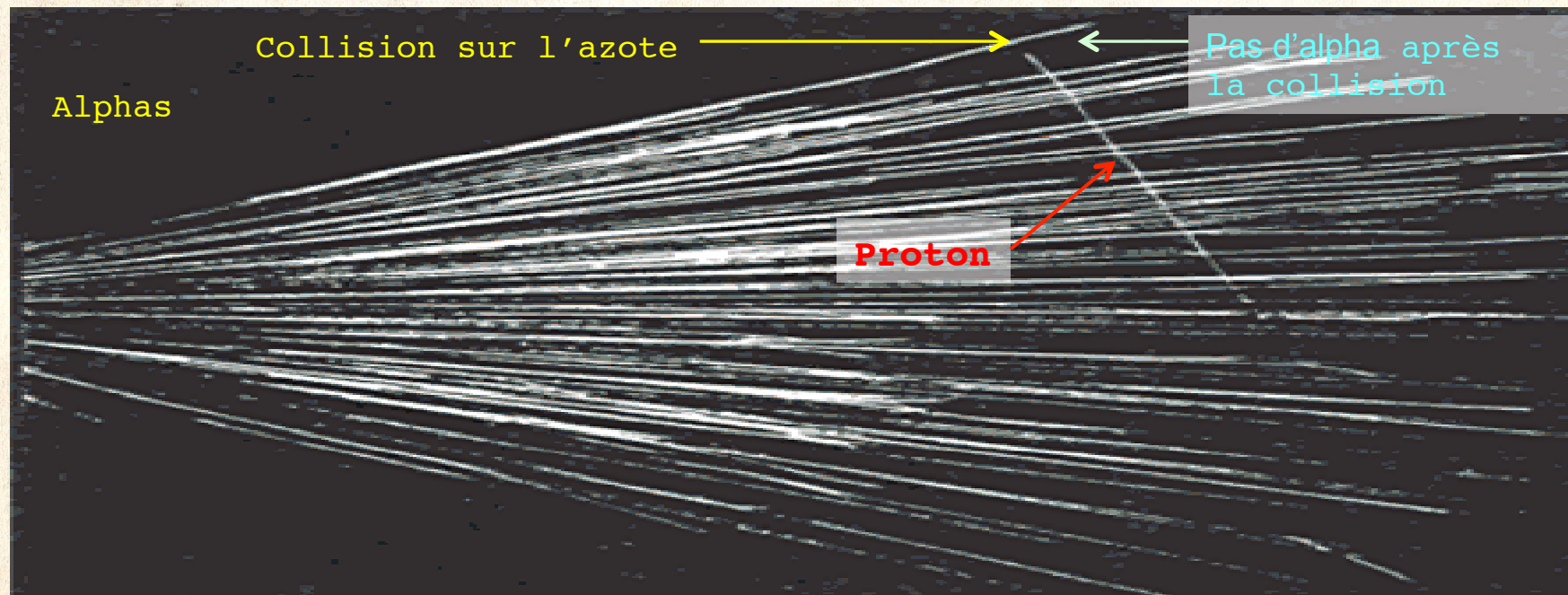


Fig.5.7. Wilson's own cloud chamber in final form



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)



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!