



Les accélérateurs de particules

Partie 1: Historique

et le foisonnement des techniques

Wilfrid.Farabolini@cern.ch

L'instrument par excellence de la Recherche Fondamentale

*Goal of Accelerator Science :
Answer Fundamental Questions*

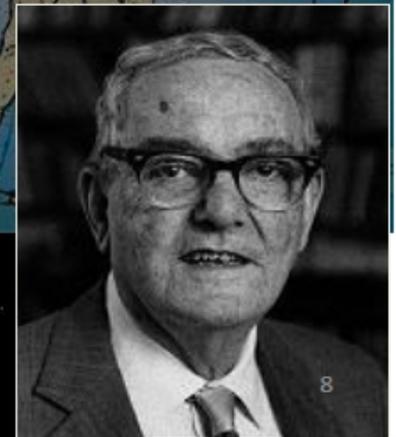
*We humans have long been obsessed
with four great questions:*

*the nature of matter,
the origins of the Universe,
the nature of Life,
the workings of mind.*

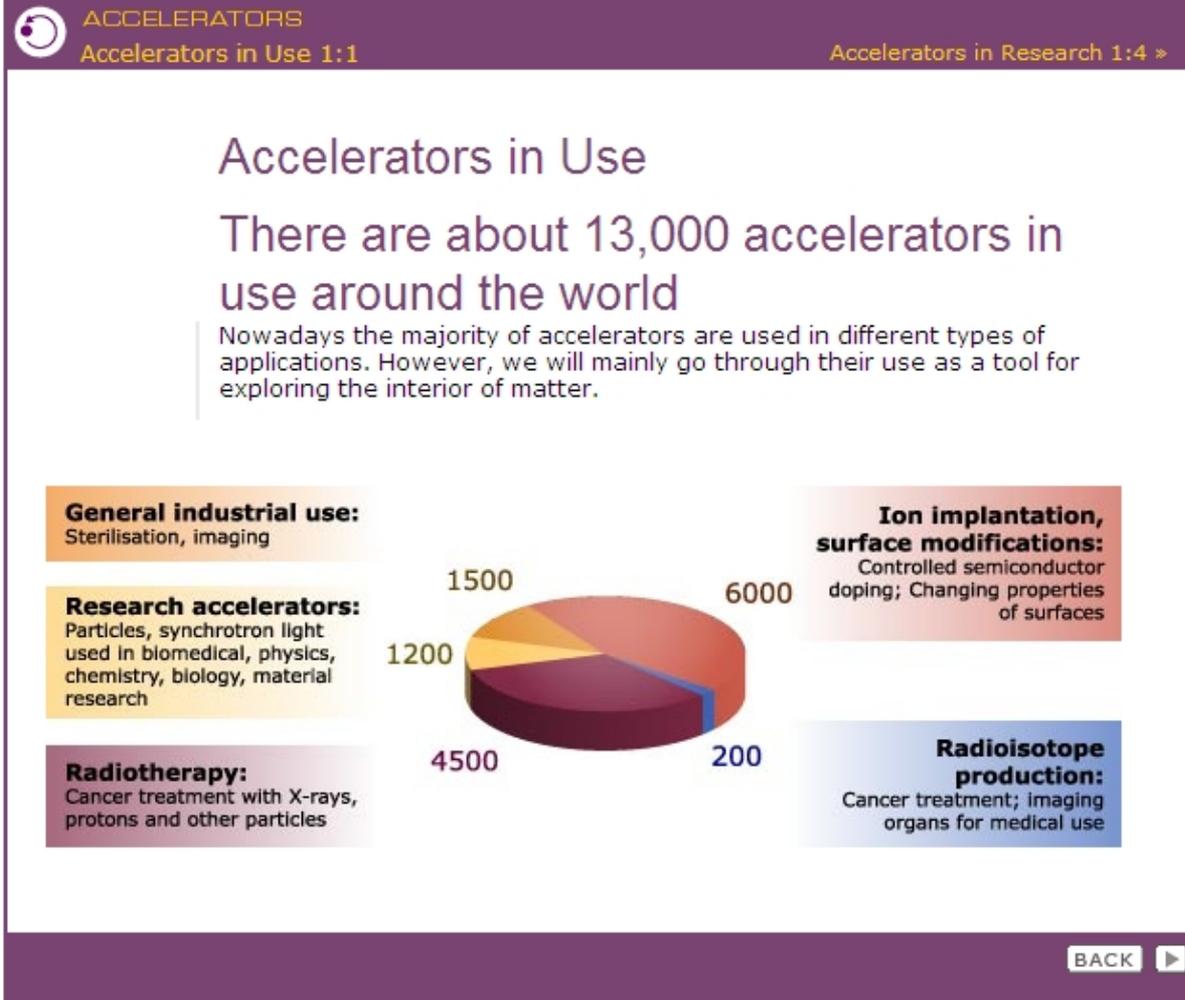
Herbert A. Simon

Nobel Laureate in Economics

from the Lecture in 1986



Qui rend aussi de grand service a la Société

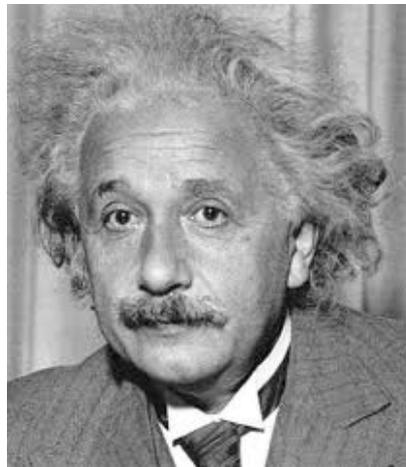


Des centaines de millions d'accélérateurs ont récemment disparu

Matter versus Energy

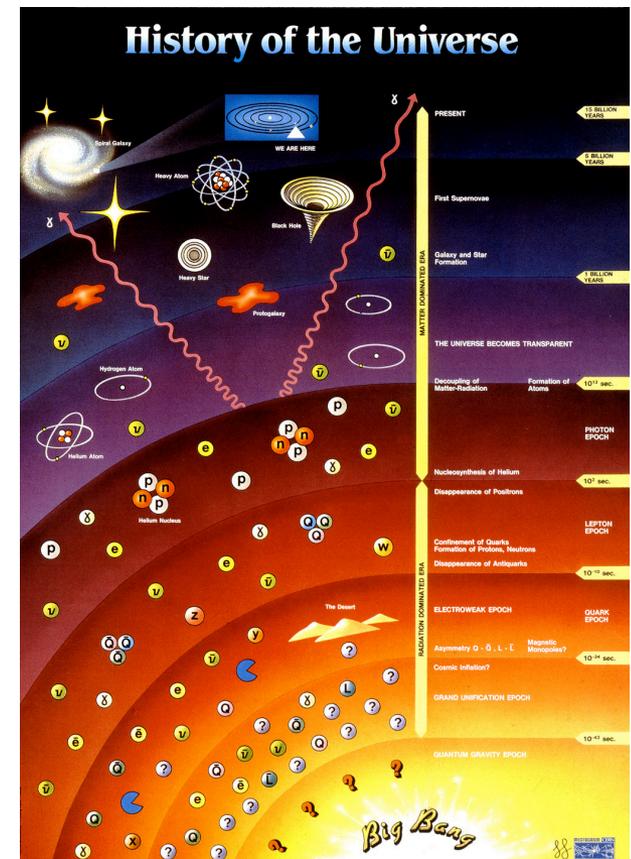
$$E = m c^2$$

During the Big Bang
Energy was transformed in matter



In our accelerators we provide energy to
the particle we accelerate.

In the detectors we observe the matter



Looking to smaller dimensions

Visible light

$\lambda = 400 \rightarrow 700 \text{ nm}$



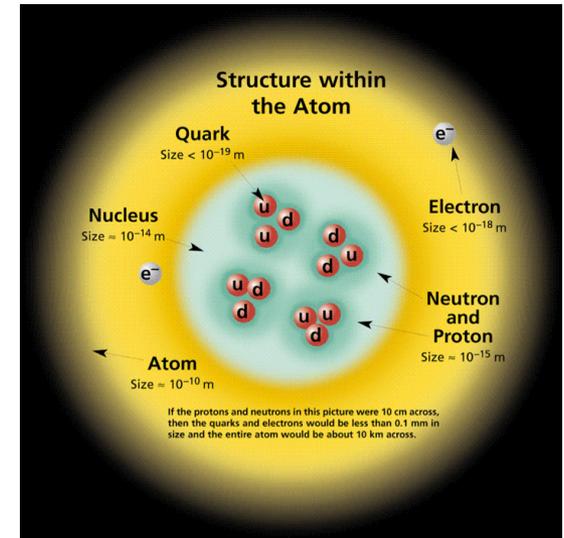
X-ray

$\lambda = 0.01 \rightarrow 10 \text{ nm}$



Particle accelerators

$\lambda < 0.01 \text{ nm}$



$$\lambda = \frac{hc}{E}$$



Increasing the energy will reduce the wavelength



Préhistoire



- 1864: Les équations de Maxwell
- 1888 : Premières expériences sur la propagation des ondes électromagnétiques par Rudolf Hertz
- 1895: Découverte des rayons X par Wilhelm Röntgen
- 1897: Découverte des électrons par Thomson
- 1905: La théorie de la Relativité restreinte d'Albert Einstein
- 1906: Invention de la triode par Lee de Forest
- 1924: Thèse de Louis de Broglie sur le dualisme onde-particule



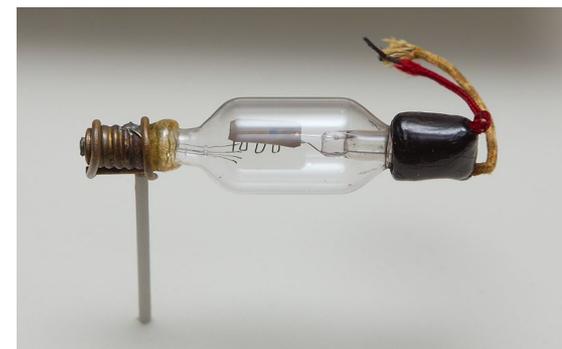
Tube de Crookes

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

Les équations de Maxwell



La main de Berta Röntgen
Rencontres d'été de physique 2023 -
Promotion Henrietta S. Leavitt



L'Audion de Lee De Forest, 1906

La radioactivité

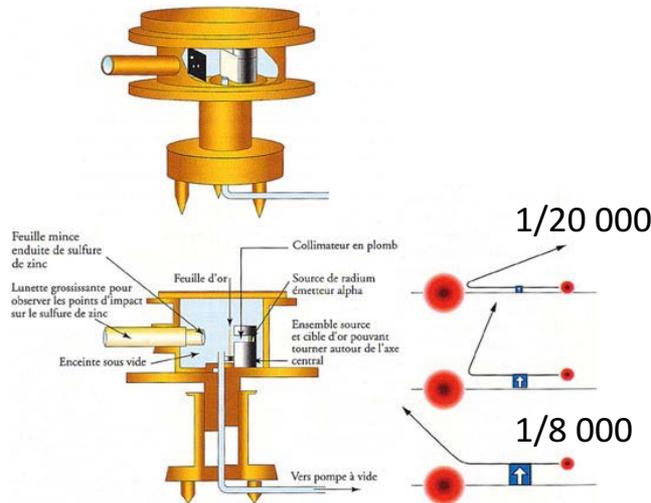
- 1896: Henri Becquerel découvre la radioactivité “spontanée” (*fortuitement*)
- 1898 : Pierre et Marie Curie découvrent le Radium
- 1911: Geiger, Marsden et Rutherford découvrent le noyau atomique en bombardant une feuille d’or par des particules α

Ernest Rutherford: " It was quite the most incredible event that ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you."

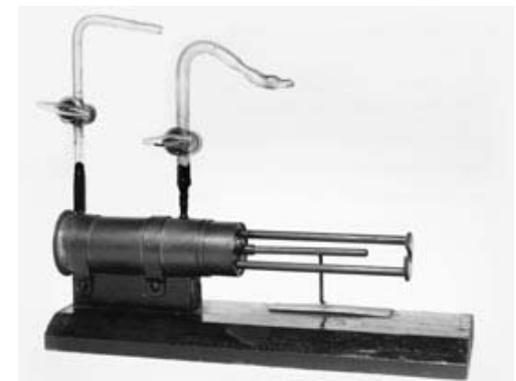
- 1919 Ernest Rutherford réalise la première transmutation nucléaire :
 α (^{14}N , ^{17}O) p



Plaque commémorative du laboratoire de Becquerel au Jardin des plantes



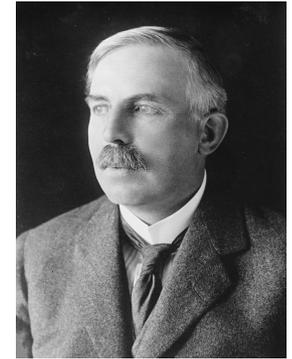
Expérience de diffusion des α
 Rencontres d'été de physique 2023 -
 Promotion Henrietta S. Leavitt



La chambre de la première transmutation nucléaire 7

L'expression du besoin

1 927 E. Rutherford says, addressing the Royal Society :“... *if it were possible in the laboratory to have a supply of electrons and atoms of matter in general, of which the individual energy of motion is greater even than that of the alfa particle, this would open up an extraordinary new field of investigation....*”



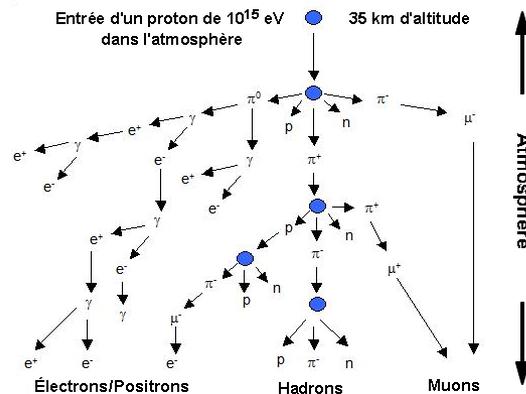
Ernest Rutherford

Car jusqu'ici les physiciens disposaient :

- Des α (< 10 MeV) et des β provenant de la radioactivité naturelle
- **Des particules cosmiques**
 - 1910 Theodore Wulf (tour Eiffel)
 - 1911-12 Victor Hess (10 ballons a 5000 m)
 - 1932 Anderson découvre le positron e^+ (0.511 MeV)
 - 1937 Anderson et Neddermeyer découvrent les muon m^- et m^+ (106 MeV)
 - 1940s particules étranges (quark étrange) K^+ K^- K_0 Λ Σ^+ (494 MeV – 1117 MeV)
 - 1947 Lattes, Occhialini et Powel découvrent les pion π^+ et π^- (140 MeV)



Victor Hess
Autriche 1912

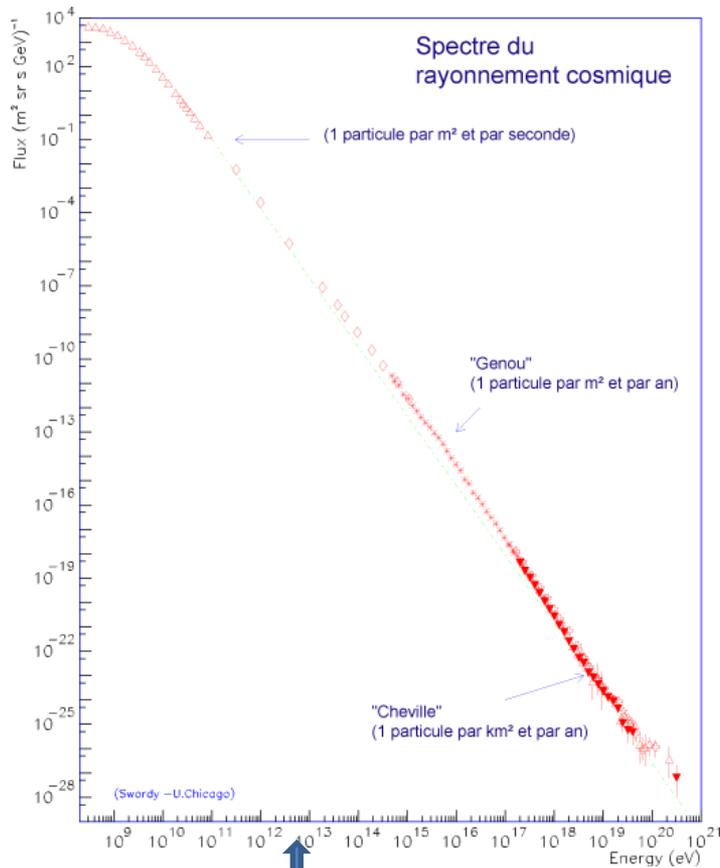


Arrivée au sol de quelque 10^9 particules :
80% γ ; 18% e^-e^+ ; 1,7% muons ; 0,3% hadrons

Rencontres d'été de physique 2023
Promotion Henrietta S. Leavitt

Petit aparté sur les astroparticules

- Des énergies phénoménales (jusqu'à 10^{20} eV)
- Mais de très faibles occurrences



Energie des protons dans le LHC
(2 x 7 TeV) mais avec $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Rencontres d'ete de physique 2023 -
Promotion Henrietta S. Leavitt



Observatoire Pierre Auger
en Argentine

Unit of Energy

Today's high-energy accelerators and future projects work/aim at the **TeV energy** range.

LHC: 7 TeV -> 14 TeV

CLIC: 3 TeV

HE/VHE-LHC: 33/100 TeV

In fact, this energy unit comes from acceleration:

1 eV (electron Volt) is the energy that 1 elementary charge e (like one electron or proton) gains when it is accelerated in a potential (voltage) difference of 1 Volt.

Basic Unit: eV (electron Volt)

keV = 1000 eV = 10^3 eV

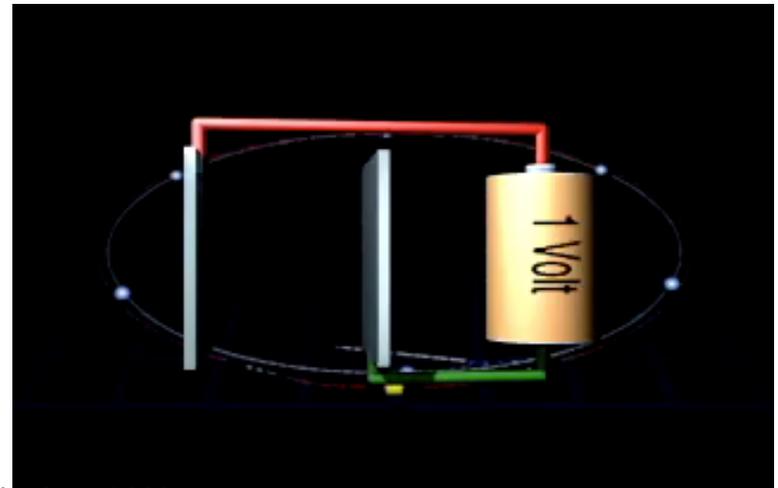
MeV = 10^6 eV

GeV = 10^9 eV

TeV = 10^{12} eV

LHC = ~450 Million km of batteries!!!

3x distance Earth-Sun



Les ingénieurs se mettent au travail

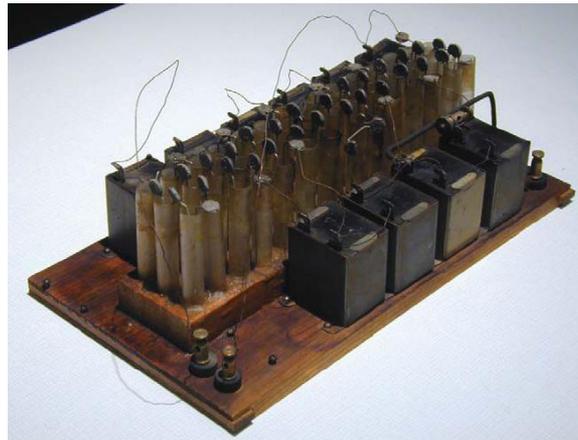
- 1930 John Cockcroft et Ernest Walton (Cavendish Lab. Cambridge) augmentent la tension du système utilisée dans les générateurs de rayon X (Cascade de Greinacher).



Cockcroft , Rutherford et Walton



Heinrich Greinacher



Le montage original de Greinacher - 1920

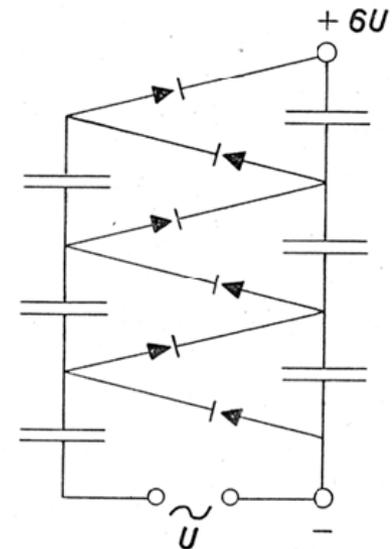
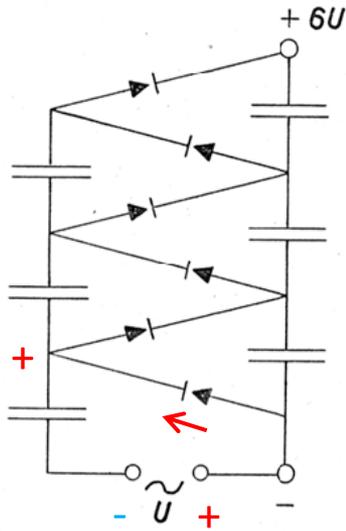
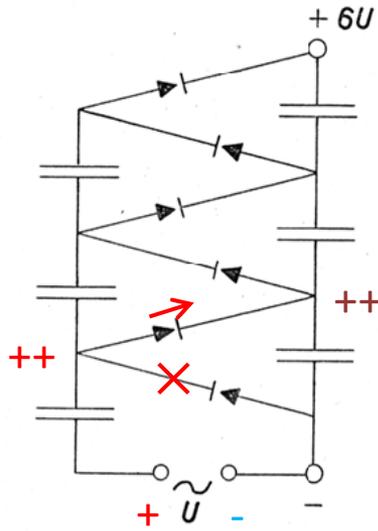


Schéma de la cascade de Greinacher

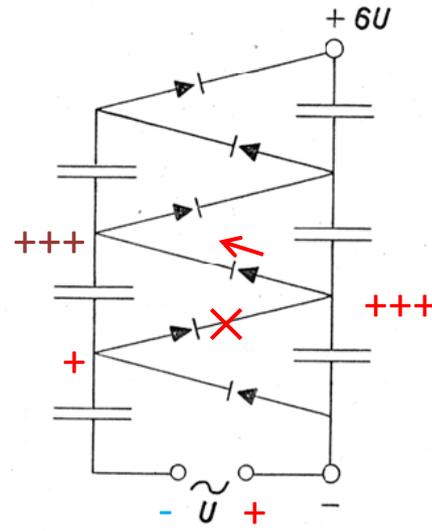
Fonctionnement de multiplieur de Greinacher



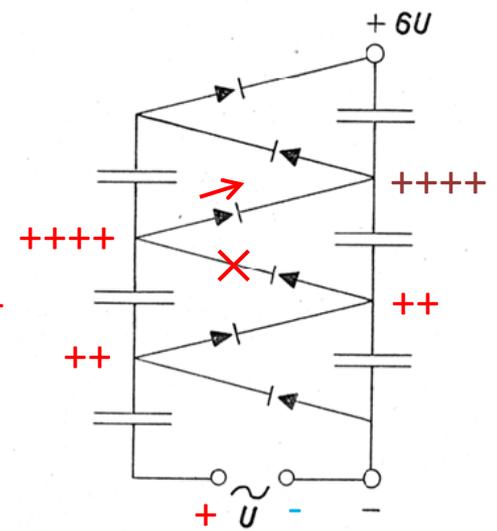
1^{ere} alternance



2^{eme} alternance



3^{eme} alternance



4^{eme} alternance ...

Le Cockcroft-Walton

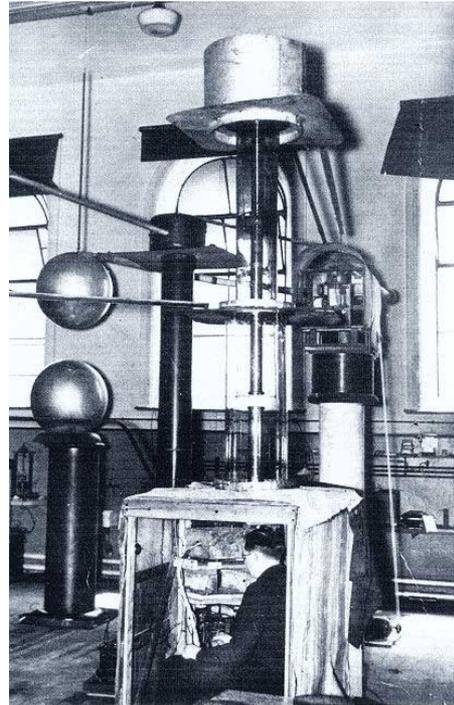
- 1932 : Cockcroft et Walton réussissent avec leur accélérateur la première désintégration d'atome de Li par des protons de 400 keV.
- Le C.W. est encore utilisé comme injecteur de Hadron mais est maintenant le plus souvent remplacé par un RFQ (Radio-Frequency Quadrupole).



John Cockcroft

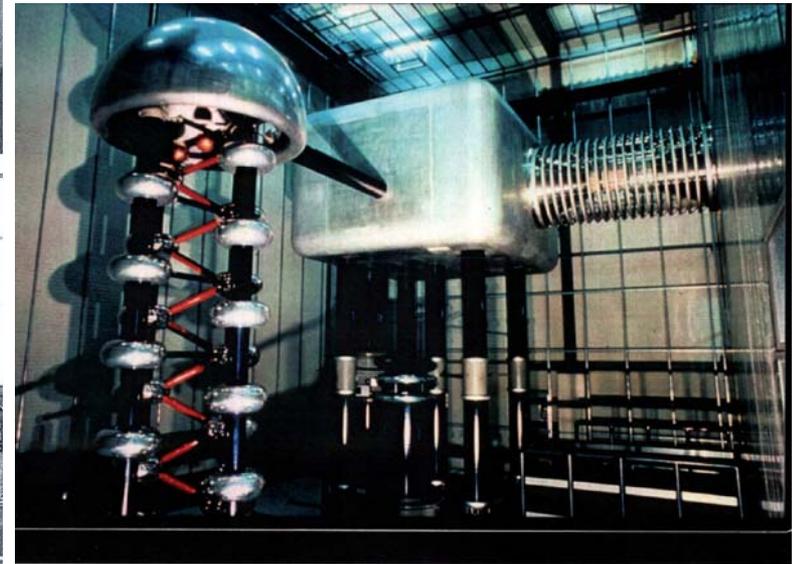


Ernest Walton

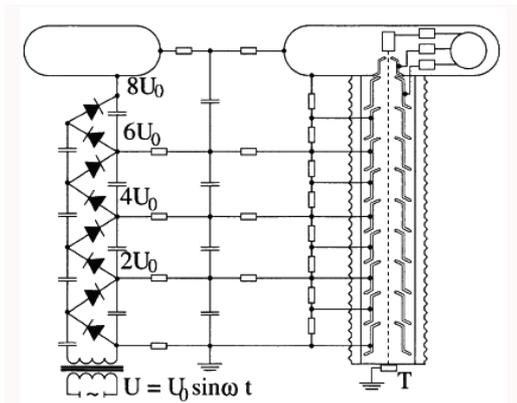


Walton en expérimentation

Rencontres d'été de physique 2023 -
Promotion Henrietta S. Leavitt



L'injecteur 810 kV du
cyclotron Mega-Watt
(PSI- Suisse)

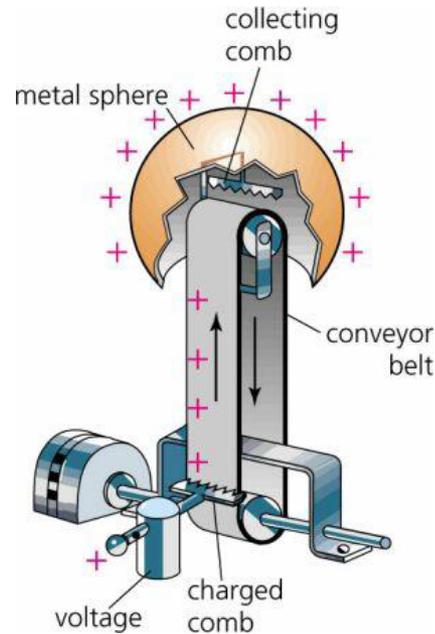


Autre approche : le générateur électrostatique

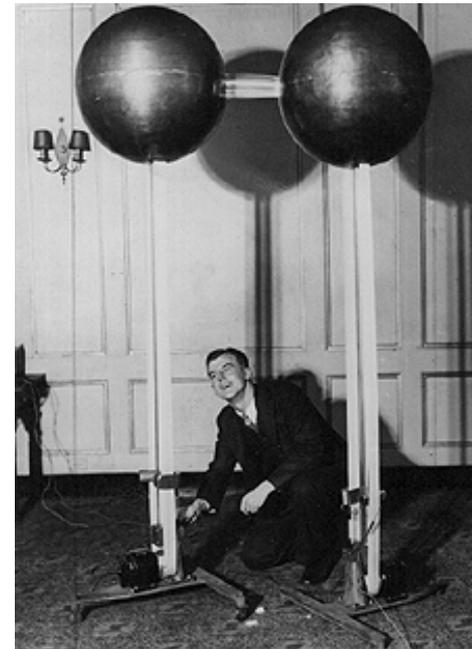
- 1929 : Robert Van de Graaf travaille à Princetown sur un principe de bande transportant des charges électriques.
- 1931 : 1.5 MV sont atteint au moyen de 2 machines



Machine de
Whimshurst - 1880



Principe de
fonctionnement



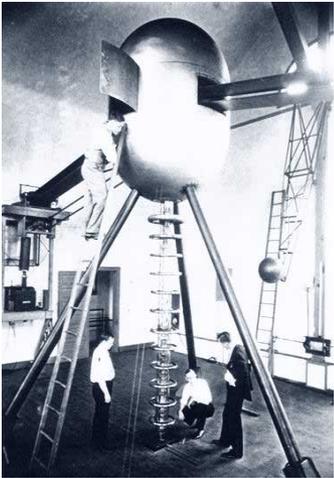
Van de Graaf et une
de ses 1^{ere} machine
(crédit MIT)



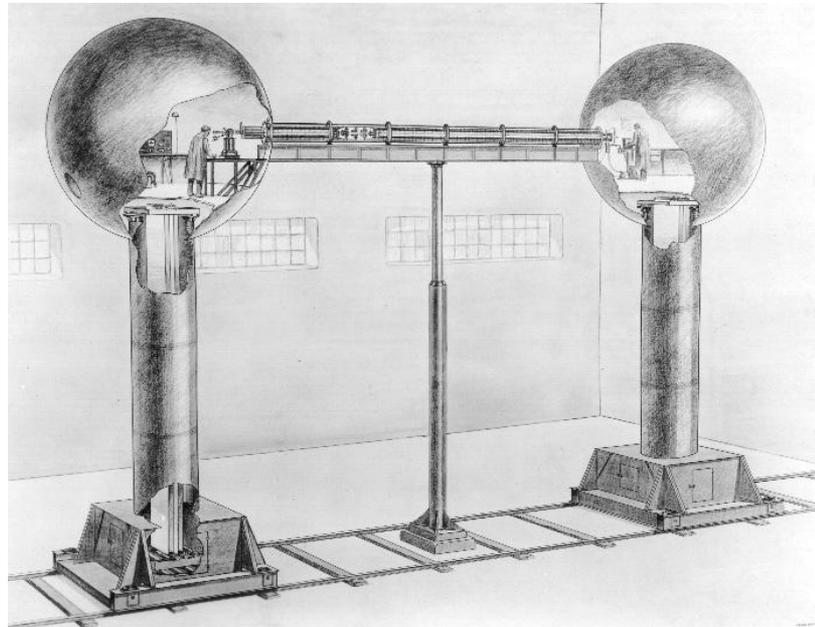
Robert Van
de Graaf

La course aux MV

- Pour éviter les claquages
 - augmenter les dimensions
 - augmenter l'isolation par des gaz de forte rigidité diélectrique sous pression
 - Opérer sous vide (loi de Paschen)



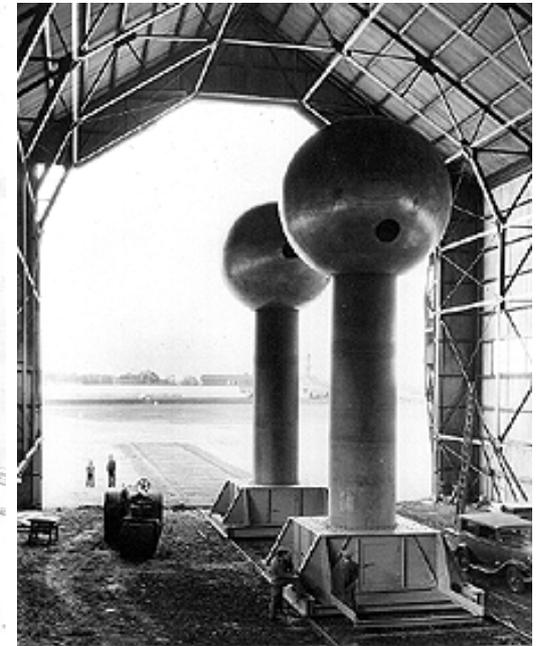
1933: Washington
1.2 MV



CUTAWAY DRAWING SHOWING HOW THE MACHINE WAS USED AT ROUND HILL

©MIT Museum All rights reserved

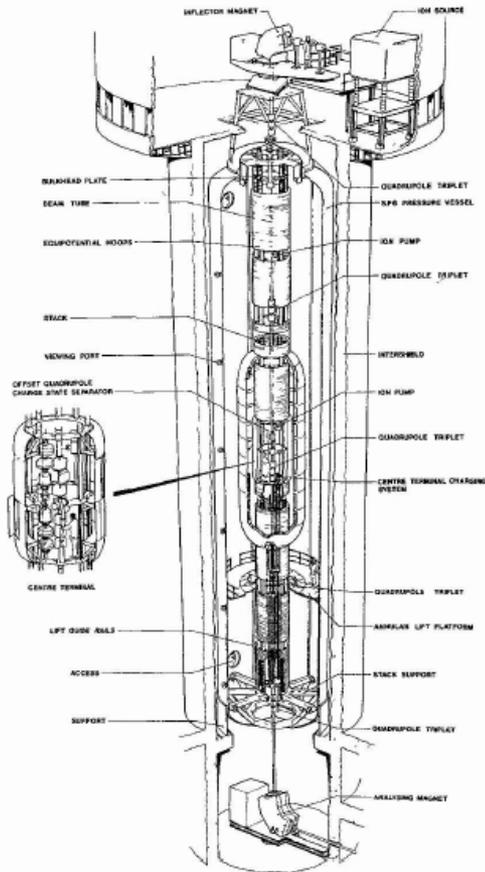
5 MV



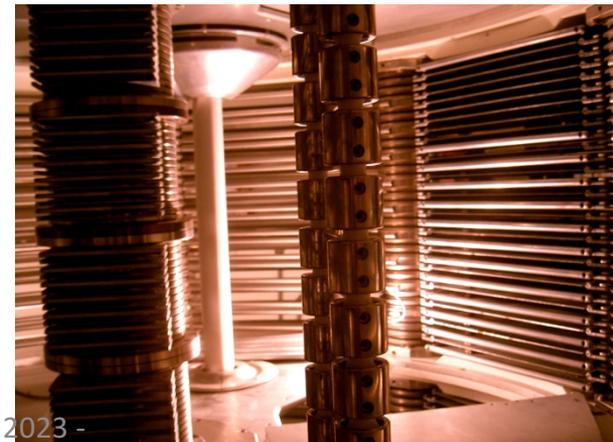
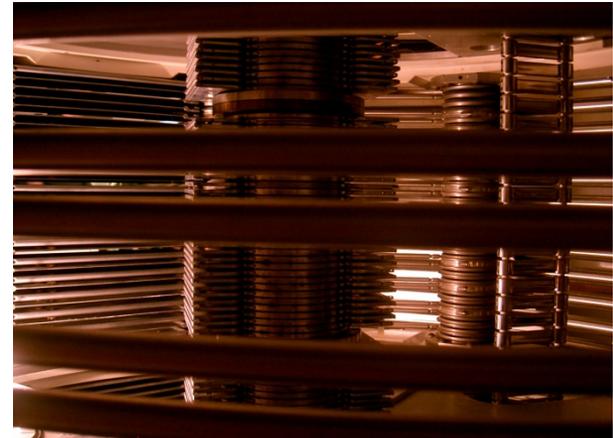
Construction dans un
ancien hangar de
dirigeable

Les records

- Vivitron (Strasbourg) mise en service 1993 décommissionné en 2003 (35 MV prévus - 25 MV atteints)
- Tandem de Daresbury (30 MV) décommissionné
- Très bon accélérateur pour la physique nucléaire : tous types d'ions, très faible dispersion en énergie, quelques 10s μ A, mais limités a 30 MV



Tandem de Daresbury



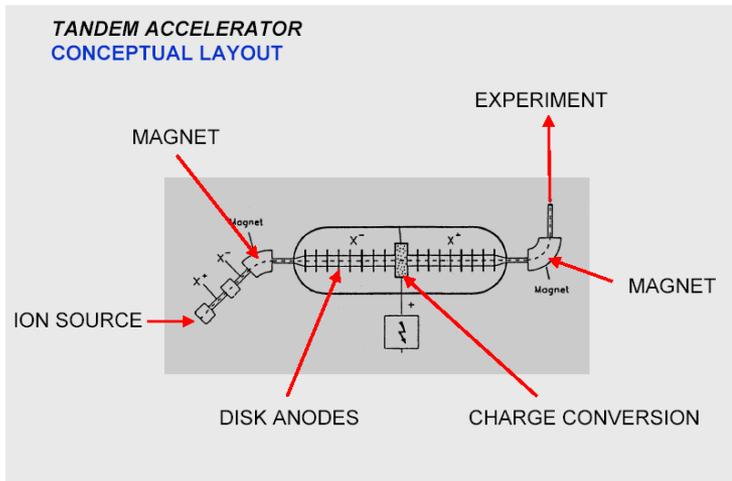
A l'intérieur

L' accélérateur tandem

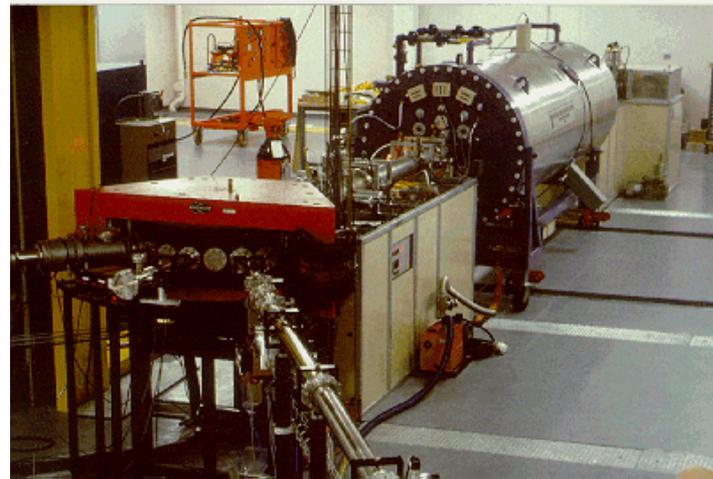
Accélérer des ions négatifs, les « éplucher » pour les transformer en ions positifs et ainsi les accélérer une seconde fois.

Avantages: - 2 accélérations successives

- la source d'ions ainsi que la cible restent à la masse



Principe du tandem



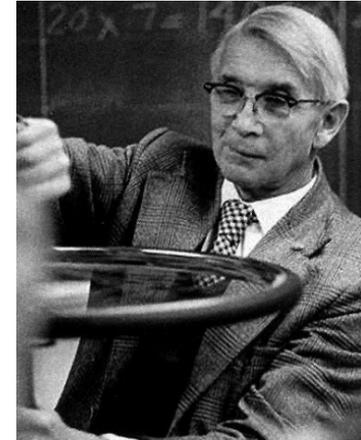
AGLAE : le Tandem du Louvre



L'accélération résonnante

Additionner un grand nombre d'accélération successives plutôt que d'essayer d'accroître la tension, forcément limitée.

- Proposé par Gustaf Ising en 1924
- Réalisé par Rolf Wideroe en 1928
- Premier Linac opérationnel construit par Sloan en 1930
- Premier cyclotron par Ernest Lawrence en 1931
- ...
- Pratiquement tous les accélérateurs aujourd'hui.



G. Ising

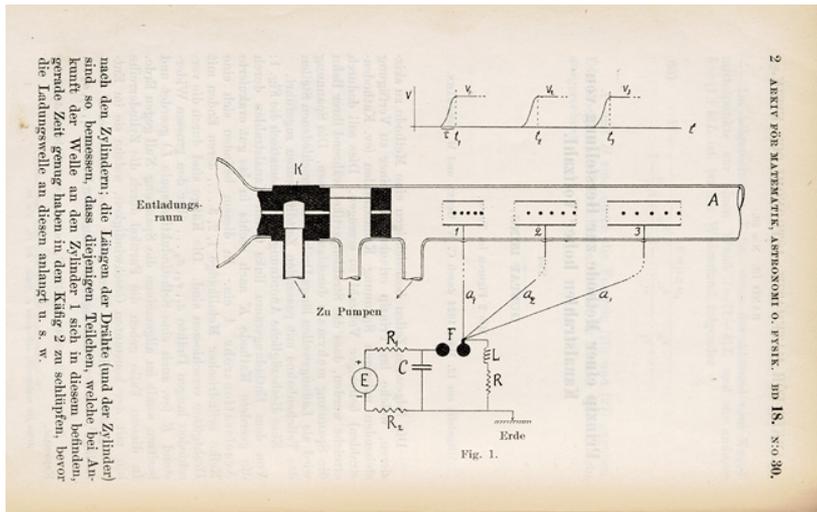
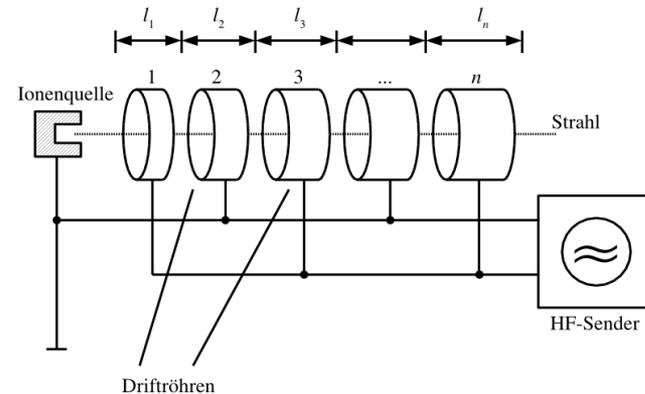


Schéma de Ising



et sa version moderne

Le premier Linac

- Rolf Wideroe construit en 1928 pour sa thèse à l'université d'Aix la Chapelle le premier Linac à partir d'une triode (1 MHz) et d'un transformateur (25 kV). Il parvient à accélérer des ions K^{1+} a 50 keV.
- Déjà tout y est: source d'ion, injecteur, générateur RF, 2 gaps accélérateurs avec tube de glissement, dipôle, détecteur, vide...



R. Wideroe

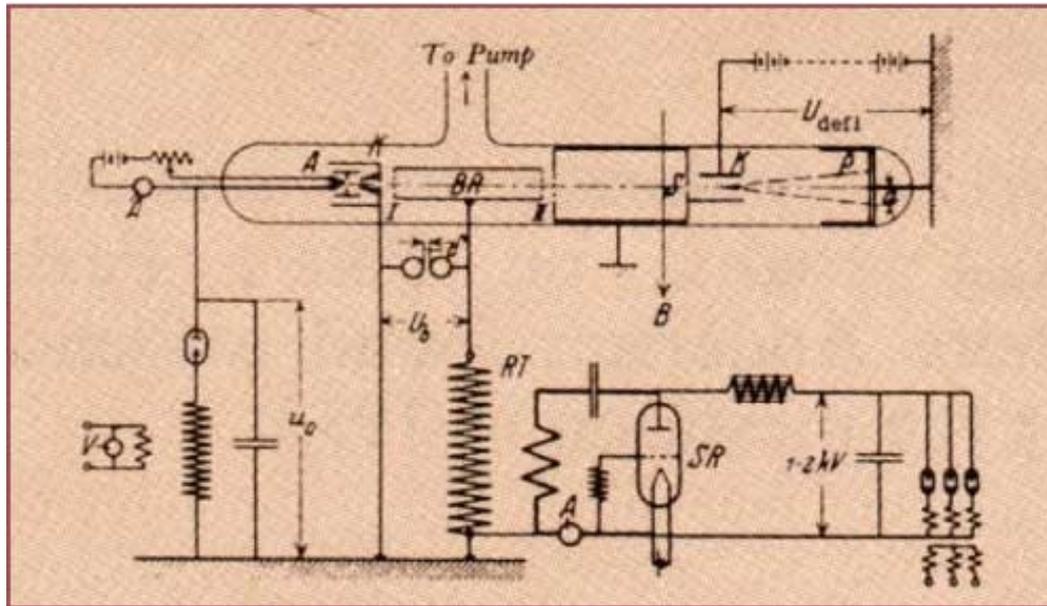


Schéma publié dans « Archiv fur Elektrotechnik »

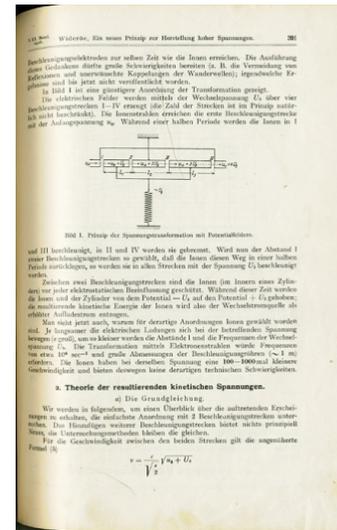
Une première démonstration sans suite...

- Des limitations technologiques pour la RF à l'époque :
 - Pour des p+ d' énergie $W= 1 \text{ MeV}$, si on veut des tubes de glissement de longueur raisonnable ($d= 20 \text{ cm}$) : $d = \beta \lambda/2$, $\beta = v/c = (1 - 1/\gamma^2)^{1/2} = 0.046$
→ $\lambda = 8.7 \text{ m}$ → fréquence RF = $c/\lambda = 34.5 \text{ MHz}$
- Même s'il avait été possible de produire de telles fréquences, les tube auraient rayonnés la puissance RF dans l'espace tel une antenne.
- Après sa thèse Wideroe par travailler chez AEG au développement de disjoncteurs haute tension...

Mais l'idée traverse l'Atlantique

- 1929: Ernest Lawrence, jeune professeur à Berkeley, déchiffre pendant une réunion ennuyeuse la thèse de Wideroe trouvée à la bibliothèque (il ne parle pas l'Allemand) et comprend tout le potentiel de l'accélération radio-fréquence.
- Il démarre 2 projets en parallèle avec ses étudiants en thèse:
 - Un Linac multi-tubes pour ions lourds (David Sloan et Lawrence)
 - Un accélérateur circulaire en incurvant les trajectoires grâce à un champ magnétique (Stanley Livingstone et Lawrence) -> Le Cyclotron

not being able to read German easily, I merely looked at the diagrams and photographs of Wideroe's apparatus and from the various figures in the article readily deduced 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

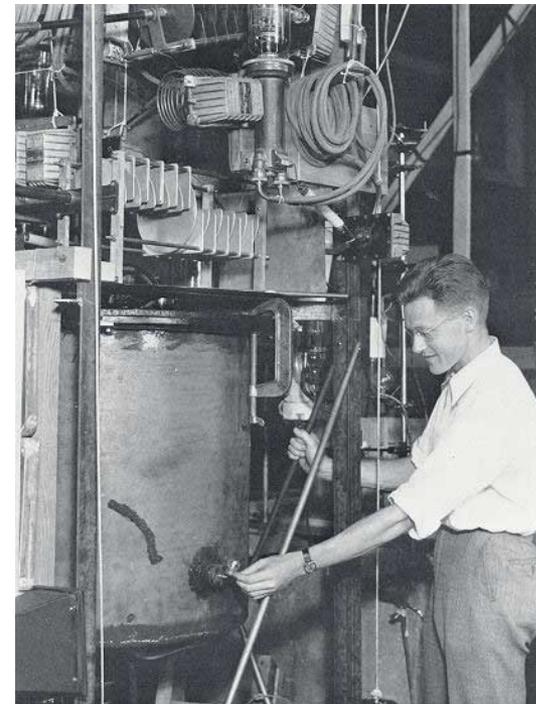
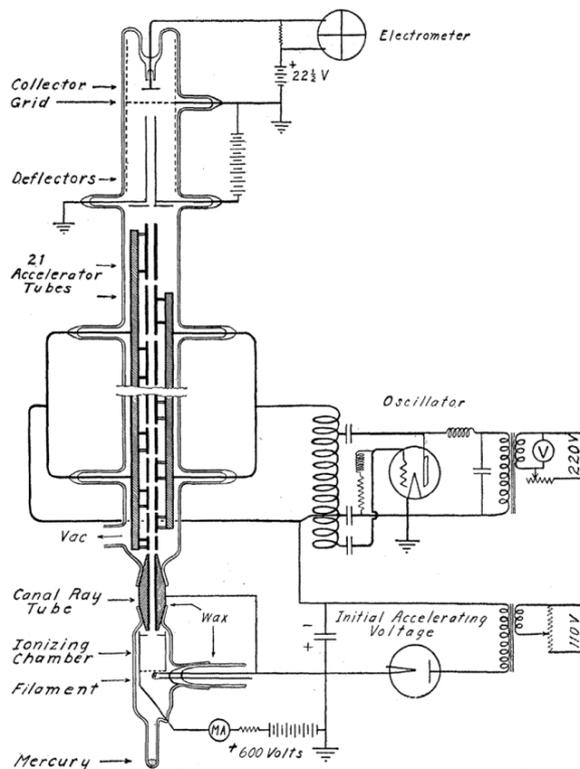


“I’m going to be famous.”

La publication de la thèse de Wideroe

Plus de tubes pour plus d'énergie

- Après plusieurs prototypes, en mars 1931 David Sloan construit un Linac de 30 électrodes qui accélère un faisceau d'ions Hg de $0.01 \mu\text{A}$ à 1.26 MeV avec un oscillateur a $11 \text{ MHz} - 75 \text{ W}$
- Sloan et Lawrence apprennent beaucoup de ces machines (stabilité du faisceau, pratique de la RF...)



D. Sloan et son Linac de 1.3 MeV

Schéma d'un des Linac de Sloan

Cependant le cyclotron est plus prometteur... pour l'instant

- L'idée circulait déjà depuis 1924 : Gabor, Flegler, Szilard, Steenbeck, Wideroe, mais semblait irréalisable.
- Tout le mérite de Lawrence est d'avoir essayé. [aphorisme de Mark Twain]

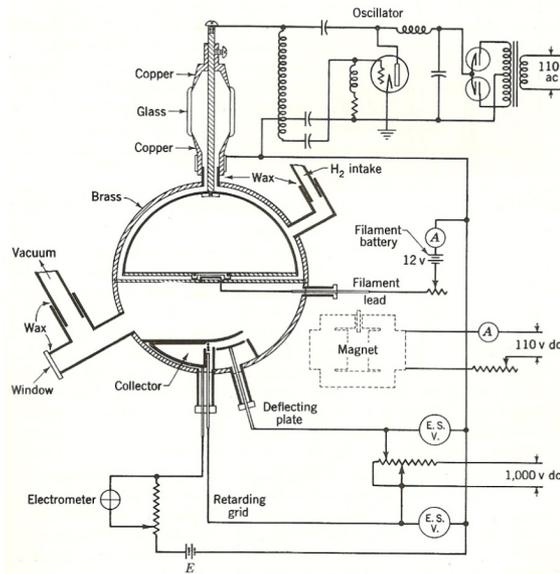
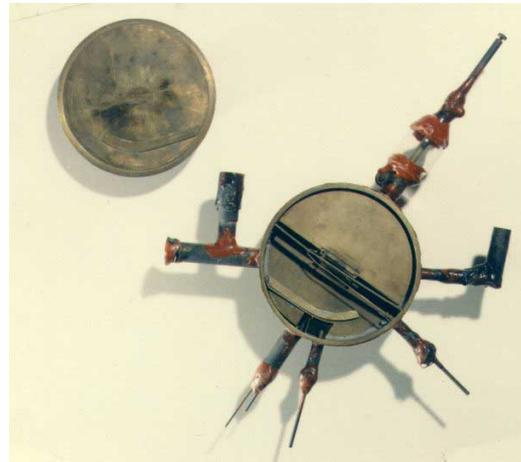
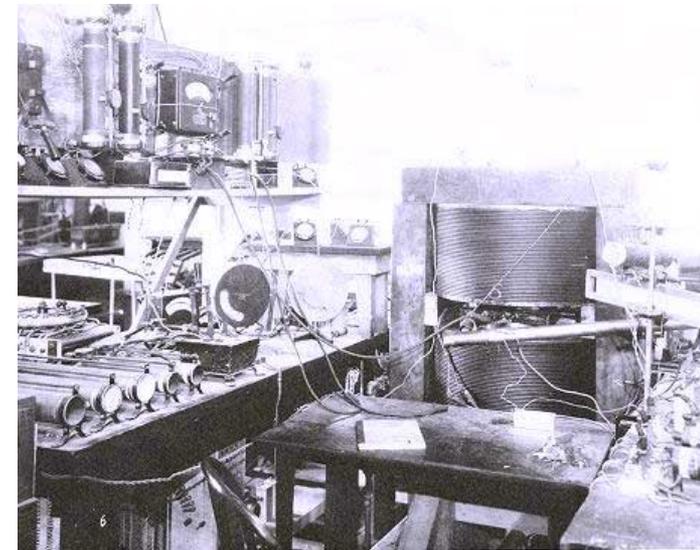


Schéma du premier cyclotron dans la thèse de Livingston



Sa réalisation:
Diamètre 10.2 cm
H₂⁺ a 80 keV
Janvier 1931



Version suivante:
Diamètre 28 cm
H⁺ a 1 MeV
été 1931

La Physique a été favorable

1. La fréquence de rotation est indépendante de l'énergie (isochronisme dans la limite non relativiste) $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

$$F_r = \gamma m_0 \frac{v_\theta^2}{R} = q v_\theta B_z \Rightarrow \omega = \frac{v_\theta}{R} = \frac{q B_z}{\gamma m_0}$$

2. La stabilité verticale est assurée par la courbure vers l'extérieur des lignes de champ B

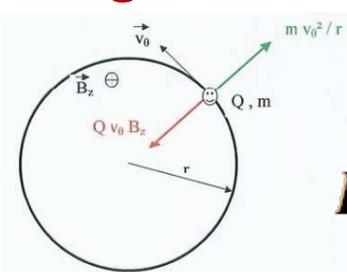
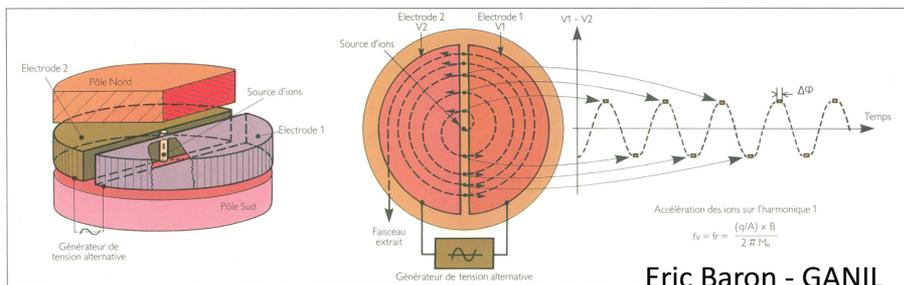
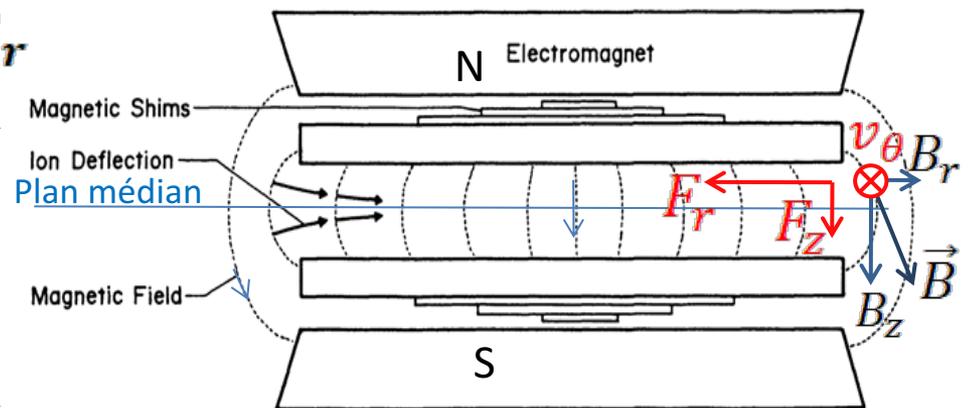


Diagram showing a particle of charge Q, m moving in a magnetic field \vec{B} with velocity \vec{v}_θ . The forces are $F_r = q v_\theta B_z$ and $F_z = -q v_\theta B_r$. The rotation is $\text{rot } \vec{B} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial \theta} - \frac{\partial B_\theta}{\partial z}\right) \vec{u}_r + \left(\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r}\right) \vec{u}_\theta + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r}(r B_\theta) - \frac{\partial B_r}{\partial \theta}\right) \vec{u}_z$.

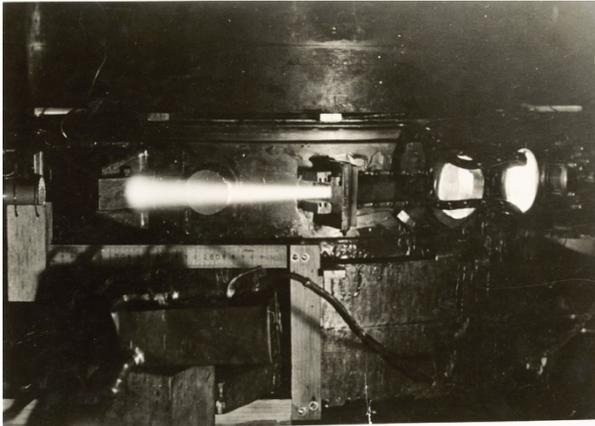


Eric Baron - GANIL

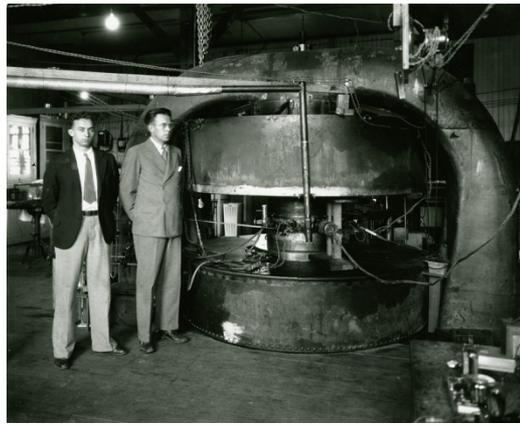
Isochronisme du cyclotron

Stabilité verticale dans un cyclotron

Des cyclotrons toujours plus gros



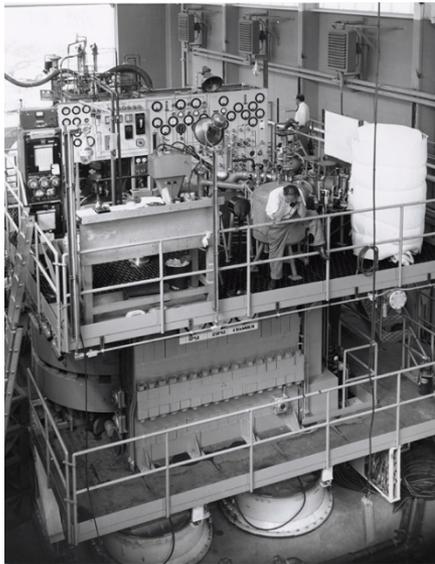
1931 : 28 cm – p+ 1.2 MeV



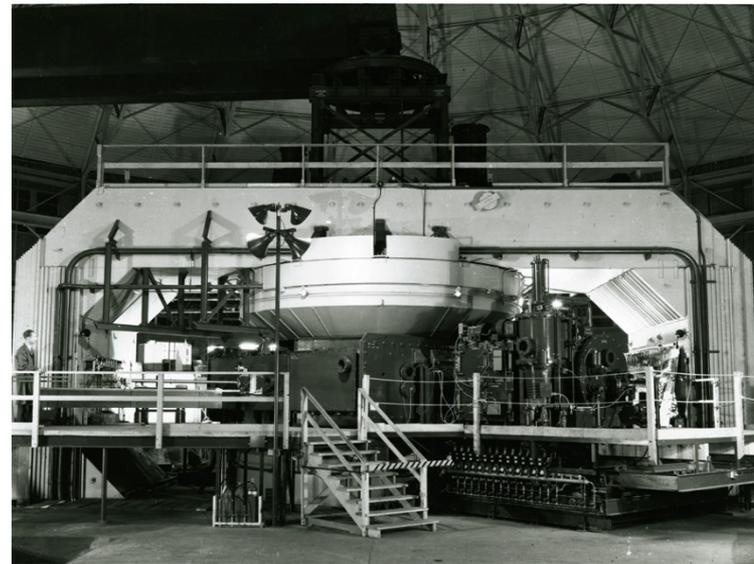
1932-36 : 69 cm D+ 4.8 MeV



1937-38 : 94 cm D+ 8 MeV



1939-41 : 152 cm D+ 16 MeV

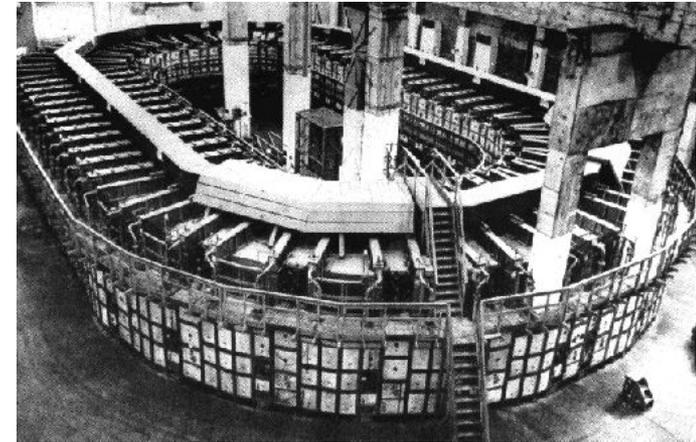
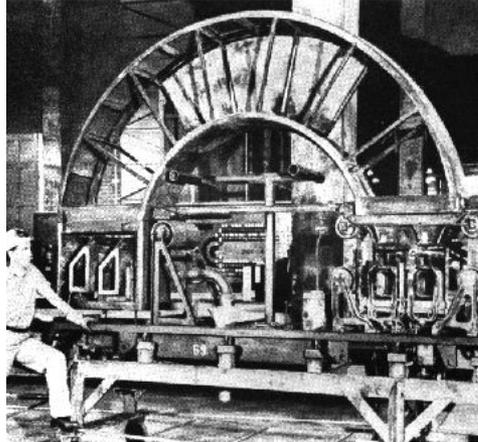
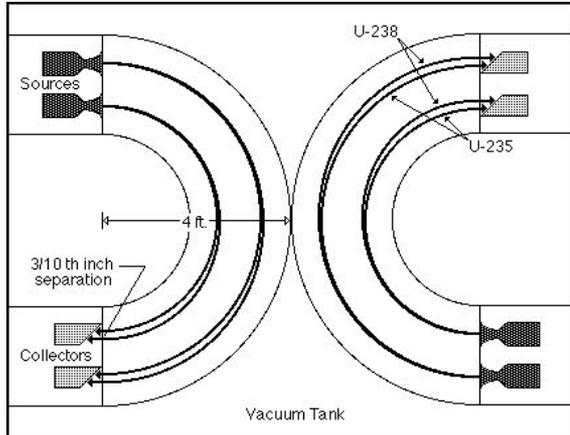


1942: 467 cm ions lourd > 100 MeV

- <http://bancroft.berkeley.edu/Exhibits/physics/> Contres d'ete de physique 2023 - Promotion Henrietta S. Leavitt

Et déjà une utilisation médicale !

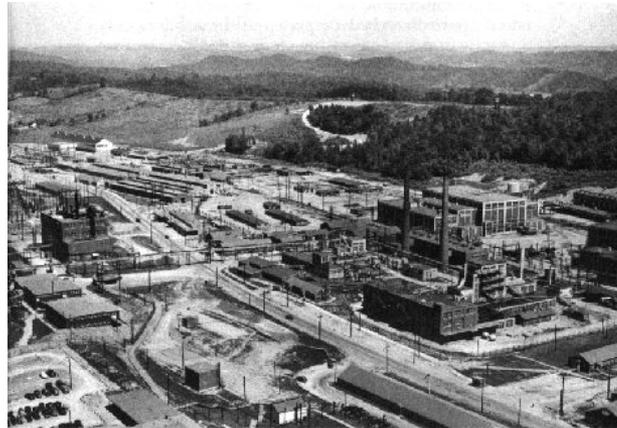
Mais aussi militaire



Le Calutrons pour la séparation isotopique de l'uranium



Bobinage en argent de la réserve fédérale US



Le site Y-12, 268 bâtiments
Rencontres d'été de physique 2023 -
Promotion Henrietta S. Leavitt



Salle de contrôle des
Calutrons

Les solutions possibles

Changer la fréquence en cours d'accélération:
Synchrocyclotrons

Augmenter B_z en fonction de R:
Cyclotrons isochrones a secteurs

$$\omega_{RF} = n \omega_{particules} = n \frac{v_{\theta}}{R} = n \frac{q B_z}{\gamma m_0}$$

Adapter fréquence et B_z simultanément afin de conserver R constant : **Synchrotrons**

Augmenter n d'une valeur entière a chaque tour: **Microtrons**

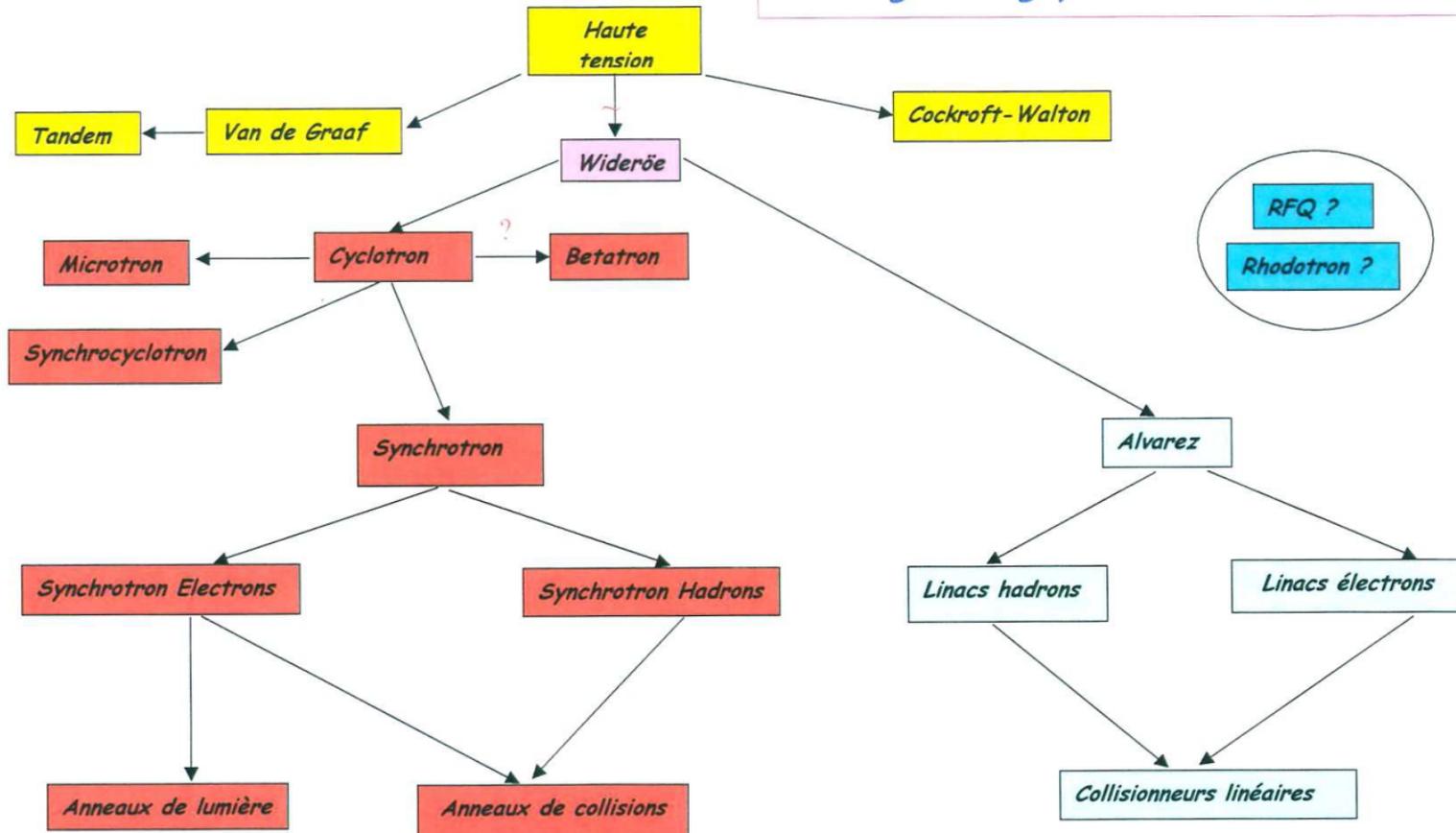
Utiliser des ions lourds:
Cyclotrons

Créer un champs E induit circulaire:
Betatrons, (accélérateurs a induction)

Cesser de tourner:
Accélérateurs linéaires

L'arbre généalogique

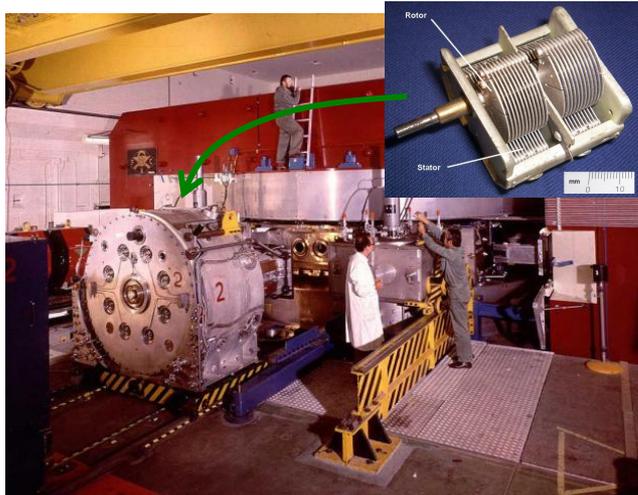
Arbre généalogique des accélérateurs



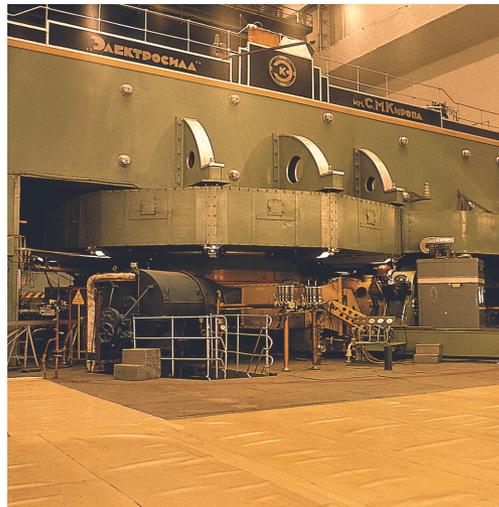
Eric Baron - GANIL

Le synchrocyclotron

- Inventé simultanément en 1945 par Edwin McMillan (USA) et Vladimir Veksler (URSS).
- La fréquence varie cycliquement grâce à un très gros condensateur rotatif (période qq Hz a 100 Hz).
 - Un très grand nombre de tours devient possible, moins de tension RF nécessaire
 - La limite énergétique vient de la taille du dipôle (Leningrad: diam. 7 m 7000 t 1GeV p+)
 - Mais le faisceau est pulsé : **intensité réduite**.
- Encore quelques machines en service dont le CPO (Centre de Photothérapie d'Orsay) jusqu'en 2008



CERN SC 1957-1990 600 MeV et un petit condensateur variable



Rencontres d'été de physique 2023 -
Promotion Henrietta S. Leavitt



1949 : Dubna 6m 700 MeV p+

Cyclotron à secteur

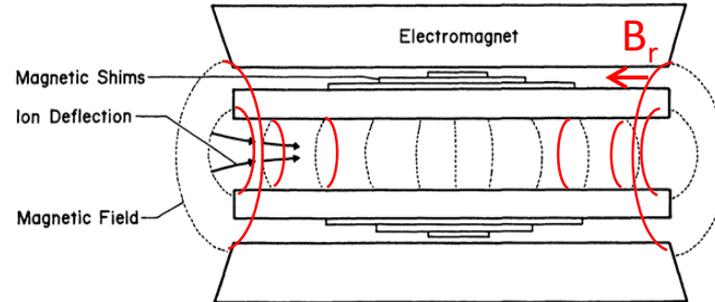
- Augmenter $B_z(r)$ proportionnellement au γ de la particule (donc à r)

$$\omega = \frac{v_\theta}{R} = \frac{q B_z}{\gamma m_0}$$

- Mais alors les lignes de champ magnétique sont orientées vers l'intérieur

$$\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} = 0$$

→ Plus de stabilité verticale

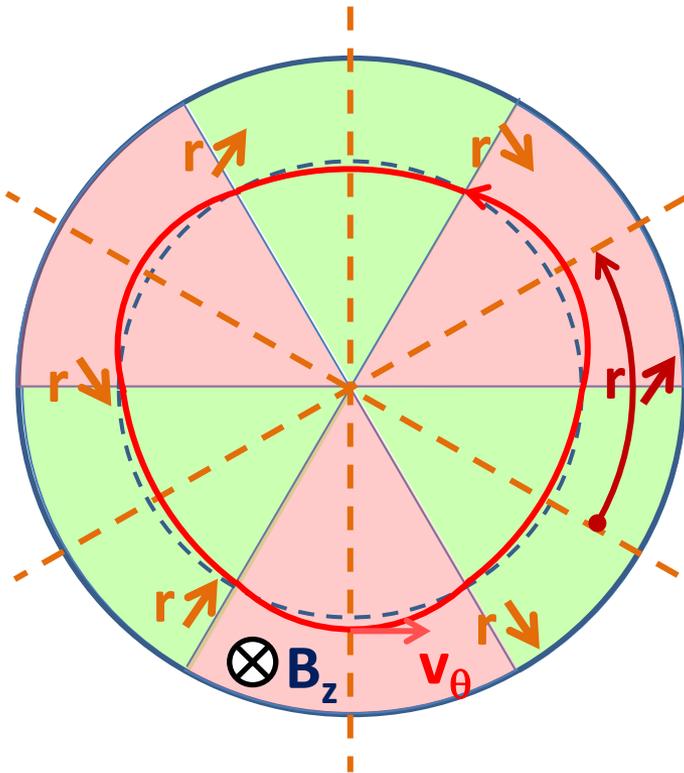


- Solution:** retrouver une force de rappel selon z en jouant sur B_θ et v_r

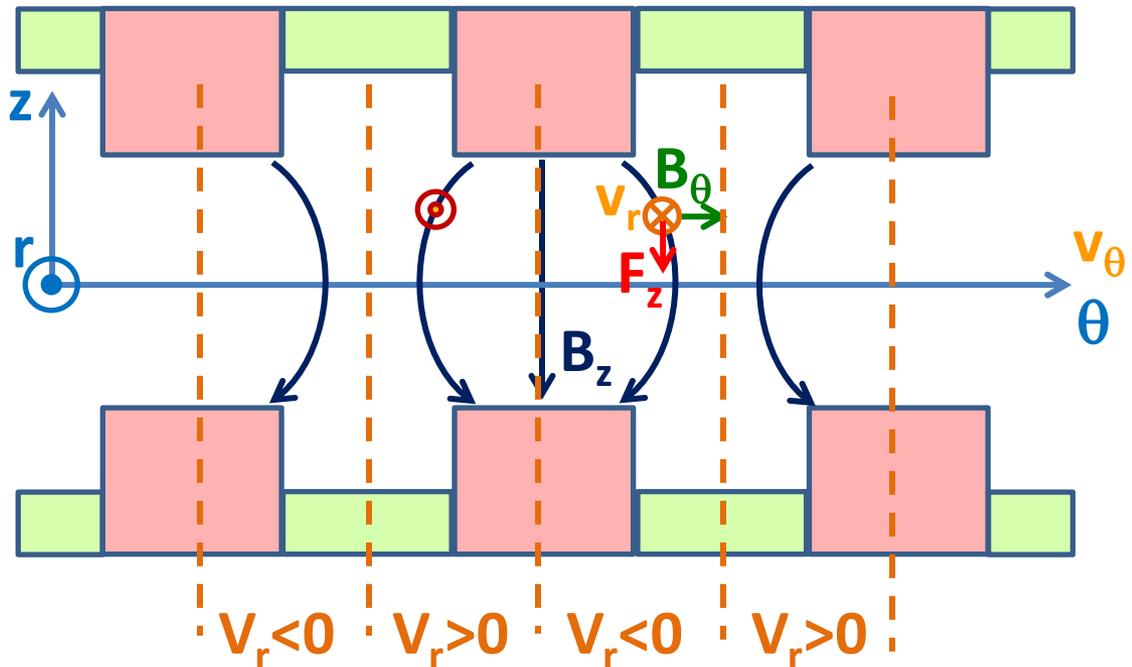
$$F_z = q (v_r B_\theta - v_\theta B_r)$$

→ Utilisation d'une modulation azimuthale de B

Modulation azimuthal du champs B



Vue de dessus
Création de V_r

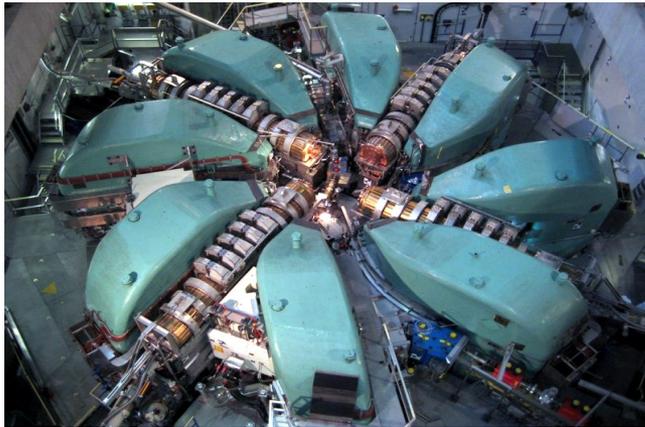
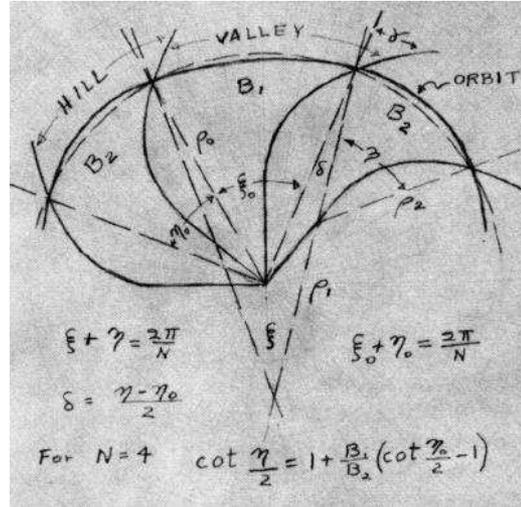
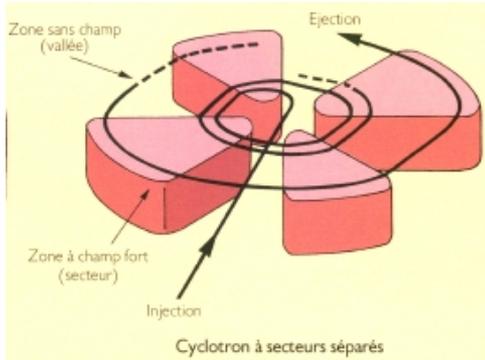


Vue de coté déroulée
Création de B_θ

Collines et vallées

Les cyclotrons ne sont plus à pôles plats

1938 : L.H. Thomas (edge focusing), 1954 Kerst (secteur spiralés)



Manuscrit de Kerst



Cyclotron a Secteurs Séparés (SSC)
de PSI (Suisse) 590 MeV p+

Cyclotron spiralés commerciaux

Le Bétatron

- Un concept séduisant longuement muri (Slepian 1922, Wideroe 1928) et finalement réalisé par Donald Kerst en 1940.
- Le champ E est généré par la variation du champ B (accélérateur à induction [la 3^{ème} famille]).
- Condition de stabilité de l'orbite du faisceau d'énergie variable dans un champ B variable:

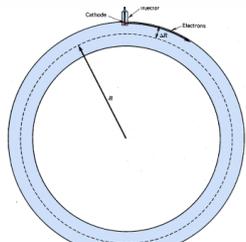
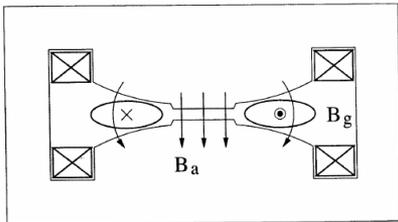
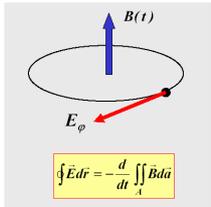


Figure 11.4 Injector geometry for low-current betatrons.

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\iint_A (\text{rot} \vec{E}) \cdot d\vec{a} = \iint_A -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a}$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{a}$$

$$2\pi r E_\theta = -\pi r^2 \frac{\partial B_{z \text{ moy}}}{\partial t}$$

$$E_\theta = -\frac{r}{2} \frac{\partial B_{z \text{ moy}}}{\partial t}$$

$$\frac{d}{dt}(mv_\theta) = q|E_\theta| = \frac{qr}{2} \frac{d}{dt} B_{z \text{ moy}}$$

$$\rightarrow mv_\theta = \frac{qr}{2} B_{z \text{ moy}}$$

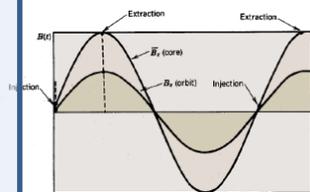
$$m \frac{v_\theta^2}{r} = q v_\theta B_z(r)$$

$$\rightarrow m v_\theta = q r B_z(r)$$

$$B_z(r) = \frac{1}{2} B_{z \text{ moy}}$$



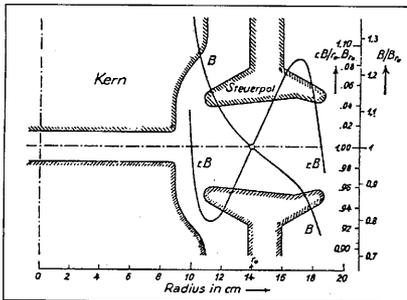
D. Kerst



Cycle du Bétatron

Bétatron : réalisation

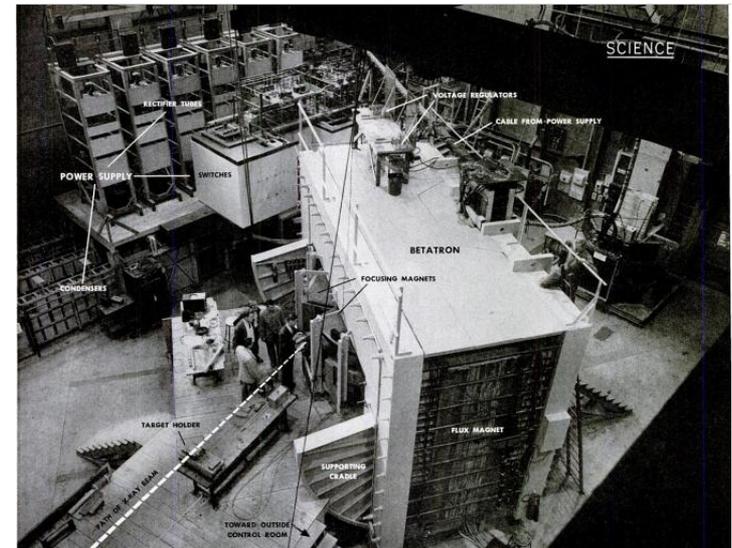
- 1940 : 2.2 MeV , 1942: 20 MeV, 1950 : 300 MeV
- Surtout utilisé pour la production de rayons X (médical et industriel)
- Resté dans l'histoire des accélérateurs par le terme « oscillations bétatron » toujours utilisé dans la dynamique faisceau.
- Kerst fut le premier à tout calculer avant de construire.
- Mais fonctionnement en pulsé



Forme des pièces polaires



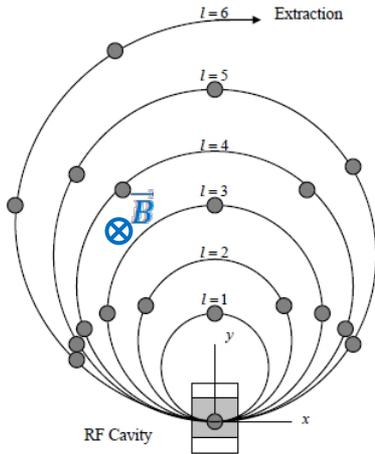
D. Kerst et son premier bétatron de 2.2 MeV



Bétatron de 300 MeV , Univ. d'Illinois

Le Microtron

Idée : rester en phase avec la RF en sautant une période entière a chaque tour (Veksler en 1944)



Position des paquets d'e- dans le Microtron

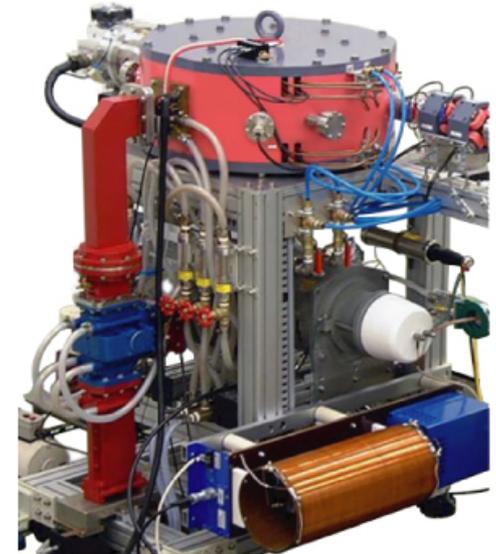
$$\omega_{RF} = n \omega_{particules}$$

$$\omega_{part.} = \frac{q B}{\gamma m_0}$$

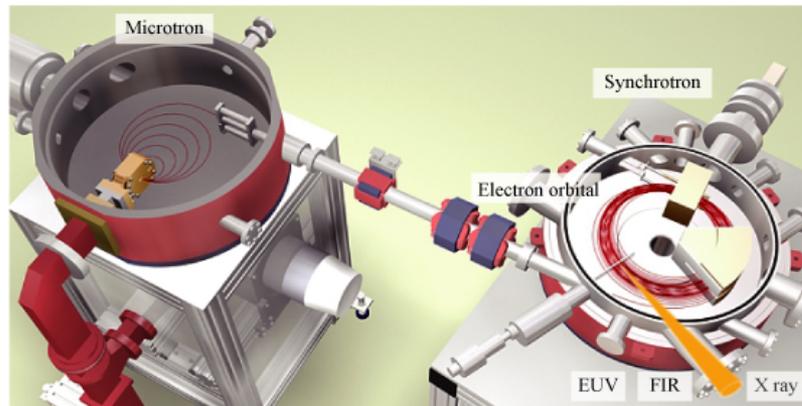
$$\omega_{part.} = \omega_0, \frac{\omega_0}{2}, \frac{\omega_0}{3}, \frac{\omega_0}{4}, \dots$$

$$\gamma_n = 1 + \frac{n \Delta E + E_{inject}}{E_0} = n \gamma_0$$

$$\Delta E = E_0 + E_{inject} \geq 511 \text{ keV pour } e^-$$

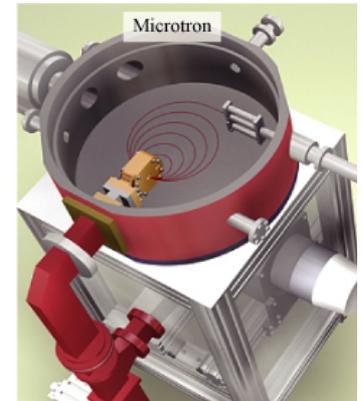
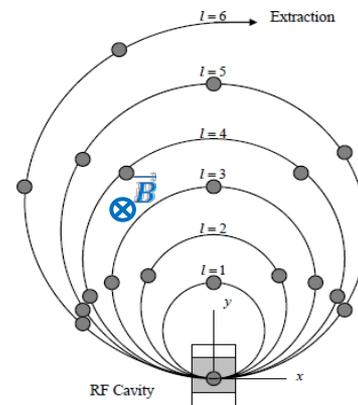
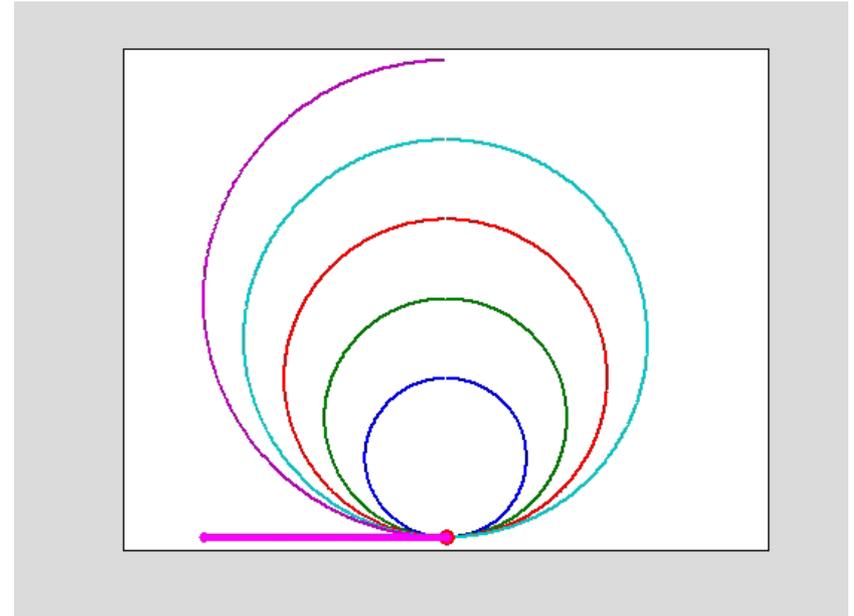
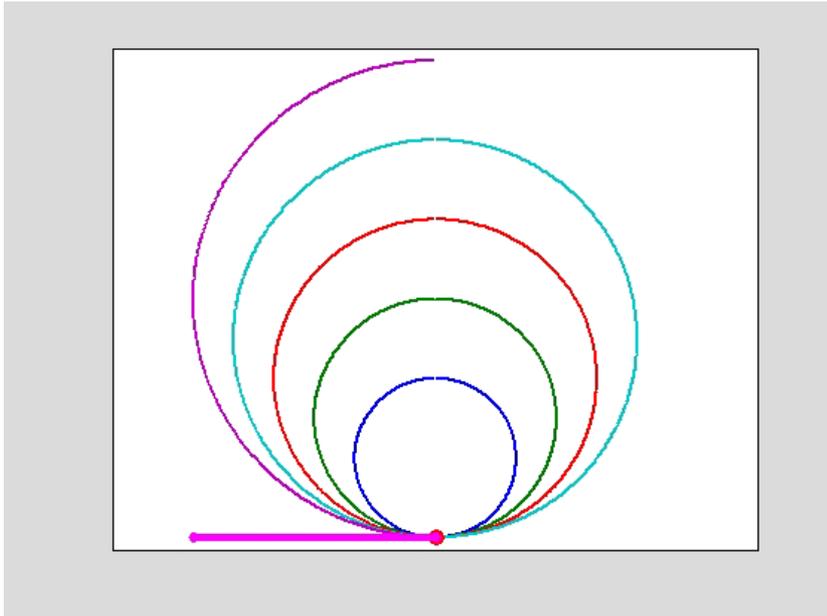


Microtron de 10 MeV 40 kW



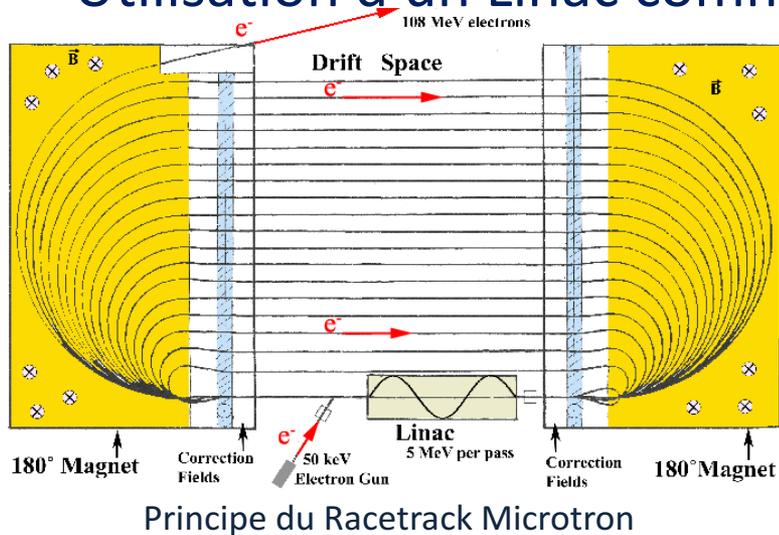
Rencontres d'ete de physique 2023 - Utilisation comme injecteur pour un synchrotron

Animations microtron

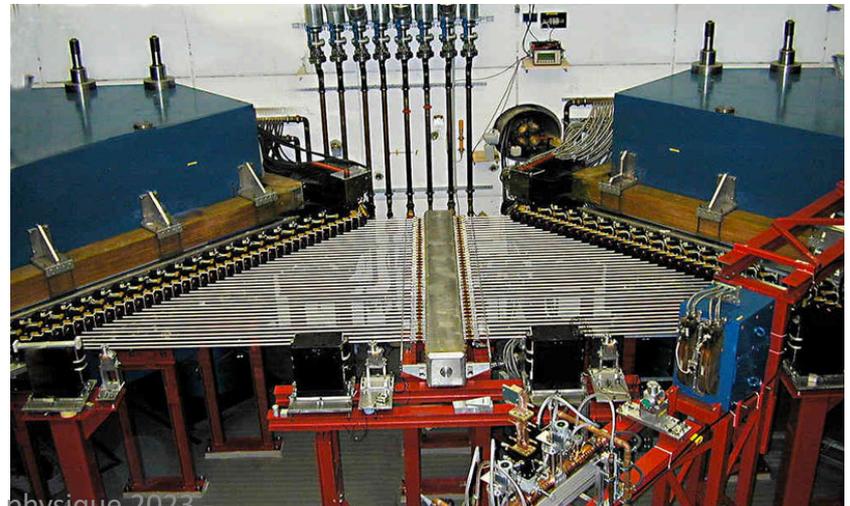
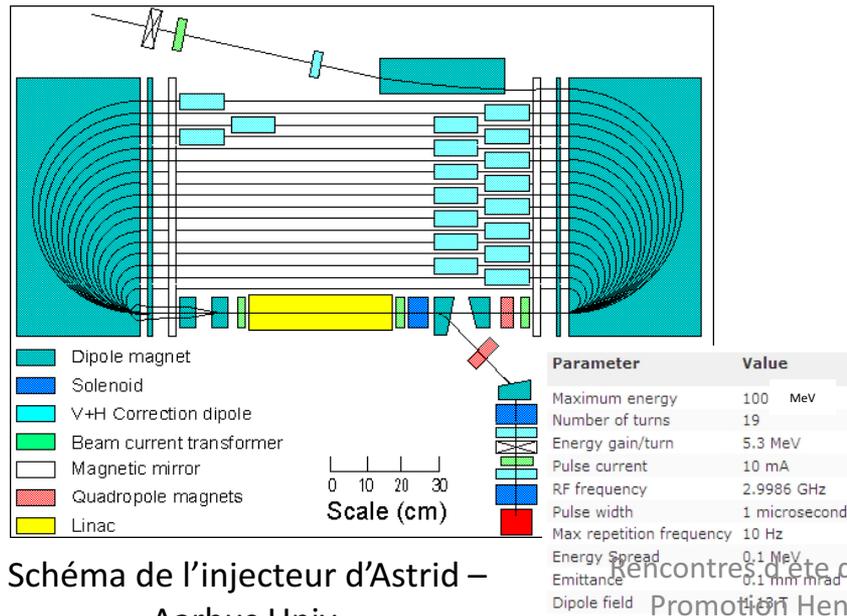


Racetrack Microtron

- Utilisation d'un Linac comme cavité accélératrice



MAMI B 882 MeV - Univ. De Mainz



MAMI C 1.6 GeV - Univ. De Mainz

Le synchrotron

- Intérêt: limiter les dimensions des pôles magnétiques .
- Utiliser une chambre torique en imposant une trajectoire de rayon constant.
- Idée proposée par Markus Oliphant en 1943 et réalisée en 1953 pour les protons a l'université de Birmingham (1.0 GeV)

*"Particles should be constrained to **move in a circle of constant radius** thus enabling the use of an **annular ring of magnetic field** ... which would be varied in such a way that the **radius of curvature remains constant as the particles gain energy** through successive accelerations by an alternating electric field applied between coaxial hollow electrodes."*

- Il faut donc adapter a tout moment le champ magnétique et la fréquence RF a l' énergie des particules.

$$B(t) = \frac{\gamma(t) m_0 v(t)}{R} \quad \omega_{RF} = n \frac{v(t)}{R}$$

n : nombre harmonique

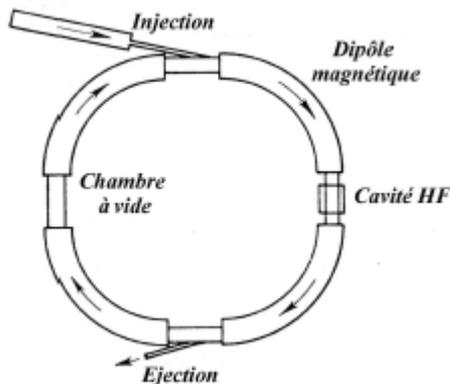
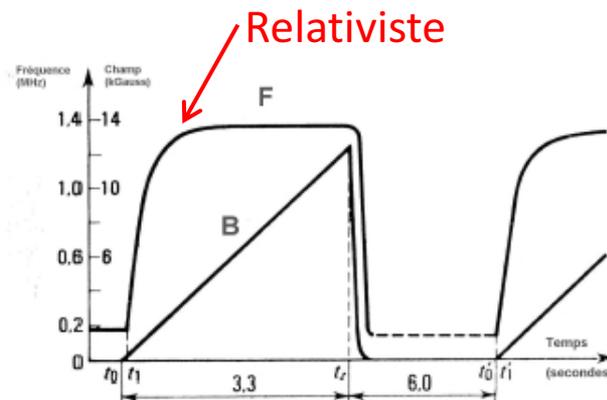


Schéma d'un synchrotron



A suivre...