

# CHAMPS & PARTICULES

## LES DÉBUTS DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES (1945-1960)



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

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



# Physiques nucléaire et *subnucléaire* se séparent

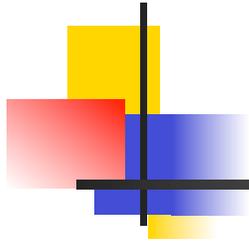
- Physique nucléaire      ➔ structure du noyau      (et applications techniques)
- Physique subnucléaire      ➔ étude des nouvelles particules et leurs interactions

- 1945

- une Europe réduite à un champ de ruines
- qui a vu la plupart de ses meilleurs physiciens émigrer aux Etats-Unis
- et qui a accumulé un retard scientifique **et technique** considérable
- un Japon dans la même situation
- une Union soviétique qui met l'accent sur le nucléaire (militaire)

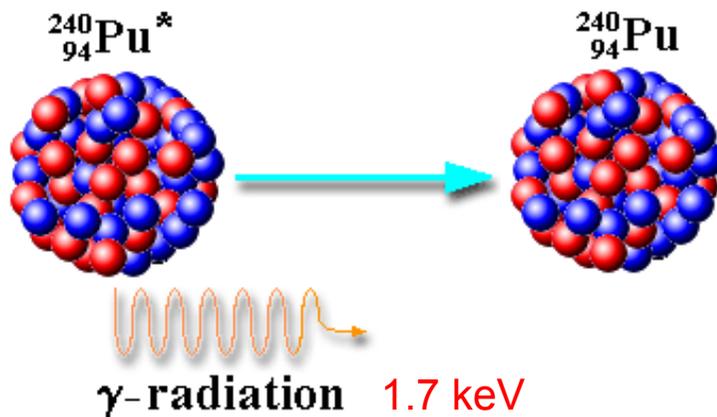
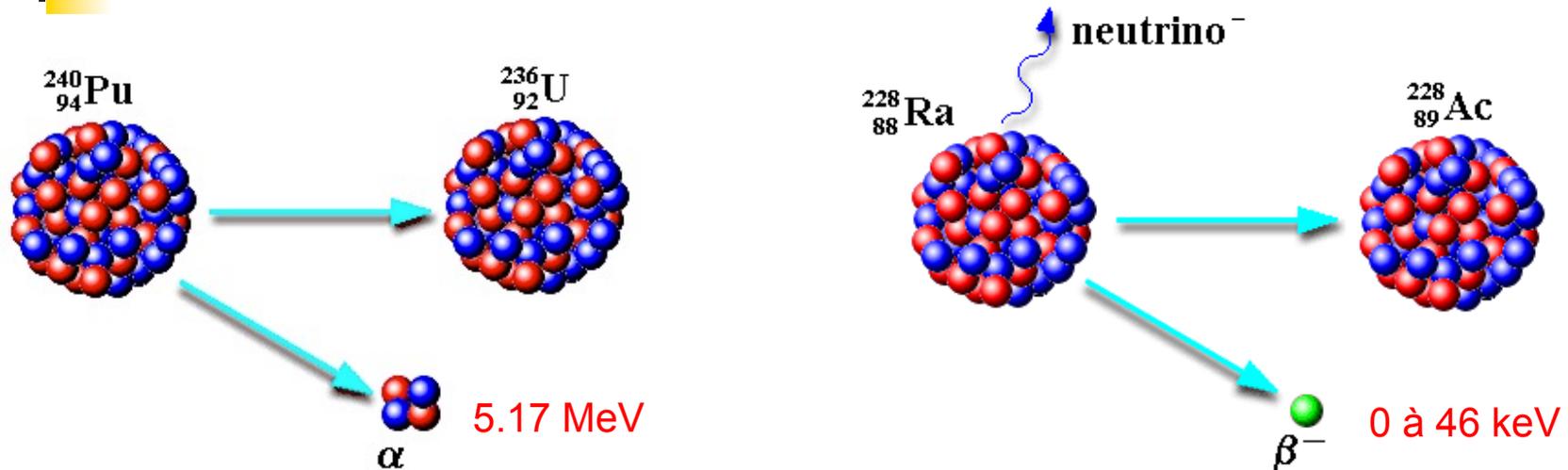


- ➔ les Etats-Unis dominant la discipline sans partage pendant ~30 ans
- et une nouvelle génération prend la relève (Feynman, Gell-Mann, Segrè, Alvarez, Lederman, Steinberger...)



# NEUTRINOS

# Alpha, bêta, gamma



- L'énergie d'un  $\alpha$  [ou celle d'un  $\gamma$ ] est **toujours la même** pour les transmutations d'un noyau donné
- C'est la différence entre l'énergie du noyau avant et après transmutation [en tenant compte du recul]
- L'énergie d'un  $\beta$  est au contraire **très variable**, mais toujours inférieure à la différence des énergies du noyau

# Le spectre des électrons bêta



- Problème : il est continu, à la différence des spectres alpha et gamma
  - situation initialement pas très claire (présence annoncée de raies)
  - confirmation d'un spectre continu par Chadwick (1914)
  - présence occasionnelle de raies due à d'autres processus (photoproduction par rayons gamma, capture d'électrons par le noyau et conversions internes)
- La mécanique quantique ne parvenait pas à l'expliquer
  - incompatible avec les niveaux discrets d'énergie du noyau, théoriquement prédits et montrés par les alphas et les gammas
  - spectre continu dû à la *perte d'énergie des électrons* sortant du noyau (Meitner) ?  
Expérience calorimétrique de Ellis et Wooster → ce n'est pas cela
- → nouvelle physique à l'échelle du noyau ?
- Bohr (1929) : conservation de l'énergie vraie seulement **en moyenne** ?
- Heisenberg (1929) : échelle **fondamentale** de longueur  $\sim e^2/m_e c^2 \sim 10^{-15} \text{ m}$  ?

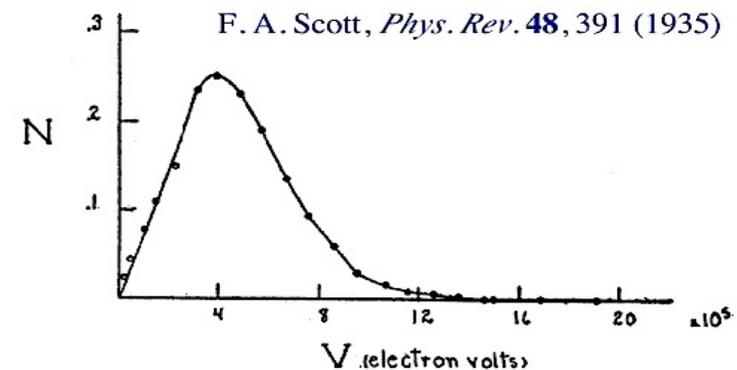
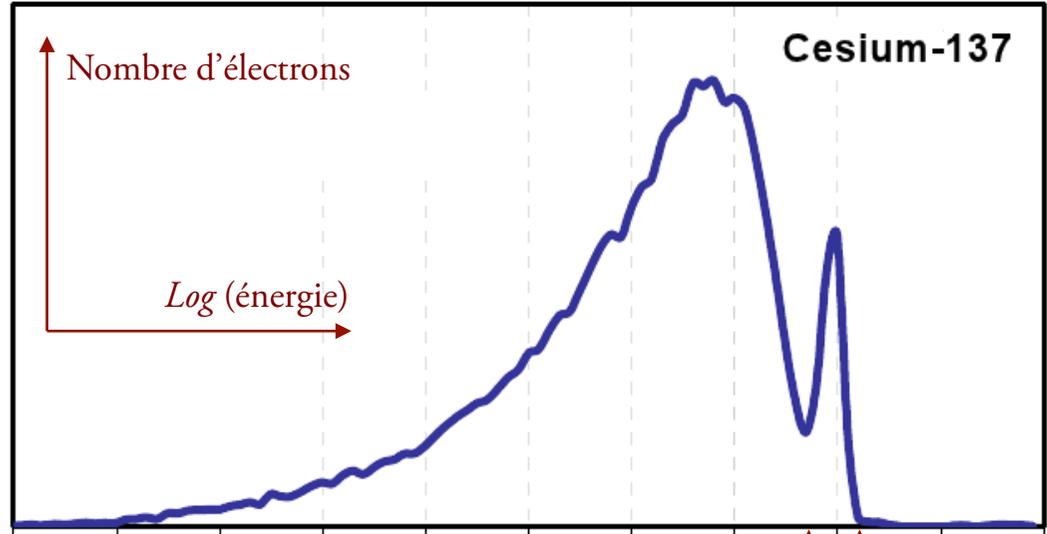
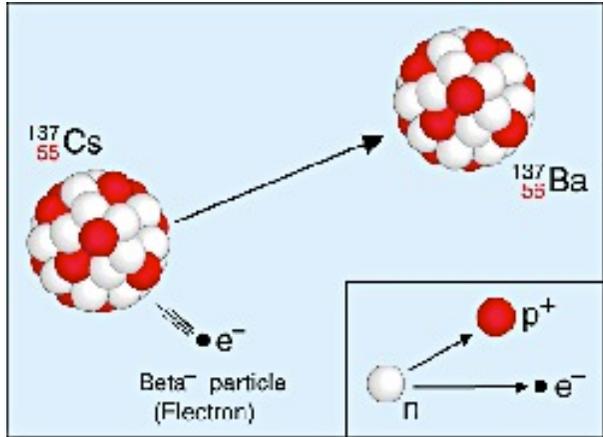


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

# Cas du césium 137



$^{137}_{55}\text{Cs}$

30.17 a  $7/2^+$

max 0.5120 MeV  $\beta^-$  94.6%

max 1.174 MeV  $\beta^-$  5.4%

$^{137m}_{56}\text{Ba}$  0.6617 11/2-  
2.55m

0.6617 MeV  $\gamma$

$^{137}_{56}\text{Ba}$  0 3/2+  
stable

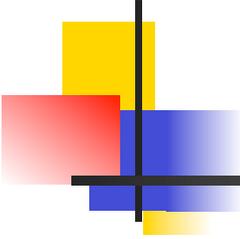
0.512 MeV

1.174 MeV

## « Chers mesdames et messieurs radioactifs... »

- Le spectre des bêtas n'était pas le seul problème de la physique nucléaire en 1930
  - noyau formé de protons et d'électrons → problème de spins ( $^{14}\text{N}$ )
  - confinement d'un électron dans le noyau → énergie  $\gg$  GeV
- Pauli (1930) : faire d'une pierre deux (trois) coups
  - Lettre à Geiger et Meitner (au colloque de Tübingen) :
    - Si l'énergie est conservée dans chaque transmutation bêta
    - alors une **nouvelle particule, neutre**, est émise en même temps
    - et elle emporte l'énergie « manquante »
- Conformément aux idées du temps
  - Pauli pensait que cette particule neutre était présente dans le noyau **avant** la transmutation bêta (comme l'électron)
  - → elle pouvait ainsi corriger le problème du spin de certains noyaux, **si son spin était  $\frac{1}{2}$**
  - Pauli suggéra qu'elle était maintenue dans le noyau par des forces magnétiques (écrivant l'équation de Dirac avec un terme magnétique additionnel)
  - et il indiquait que sa masse était (expérimentalement) nettement inférieure à celle du proton ( $\sim m_{\text{électron}}$  ?)





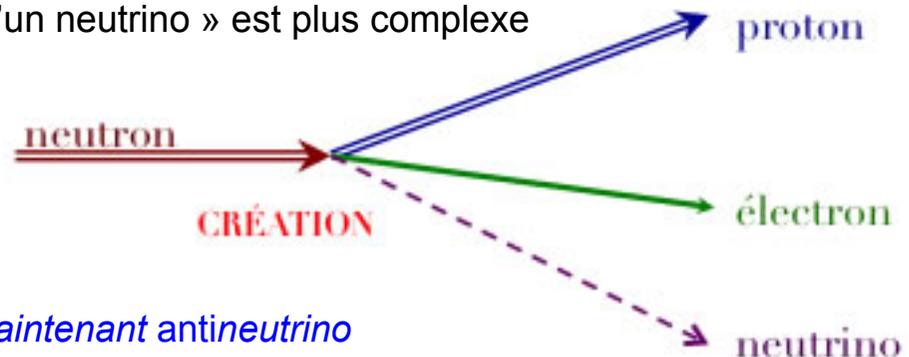
# Difficultés

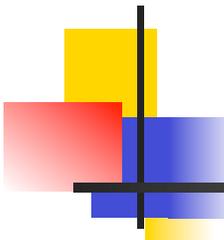
---

- Conférence de Rome (1931)
  - recherches infructueuses du « neutron magnétique » de Pauli (ce qui était en fait prévisible, Oppenheimer & Carlson 1932)
  - Bohr se montra très hostile à l'idée du « neutron magnétique » de Pauli
  - Fermi fut par contre très intéressé
- Découverte du positron (Anderson 1932) → valida l'équation de Dirac
- Découverte du neutron (Chadwick 1932)
  - mais initialement supposé un état fortement lié proton + neutron, pas une particule élémentaire
  - sauf à Rome où Majorana et Fermi le considéraient comme un « proton neutre »
  - → il n'y a pas d'électron en permanence dans le noyau
- Mesures plus précises du spectre bêta (Ellis & Mott 1933)
  - la limite supérieure de l'énergie de l'électron est constante et bien définie, et elle correspond à la différence d'énergie des noyaux avant et après transmutation
  - → il n'y a jamais d'électron d'énergie supérieure → il est difficile de soutenir l'idée de Bohr d'une non-conservation de l'énergie

# Théorie de Fermi de la transmutation bêta (1933)

- Fermi partit des considérations suivantes
  - la continuité du spectre en énergie des électrons dans la transmutation bêta implique l'existence d'une particule légère et neutre, le **neutrino**
  - l'impossibilité de confiner un électron, et un neutrino, dans un volume aussi petit qu'un noyau implique que ni l'électron ni le neutrino ne sont présents avant la transmutation  $\Leftrightarrow$  ils sont **créés** en même temps lors de la transmutation
  - $\rightarrow$  par conséquent le noyau ne contient que des protons et des neutrons
  - que l'on peut considérer (à la suite du modèle de Heisenberg de 1932) comme deux états de la même particule, le **nucléon**
  - $\rightarrow$  la partie neutron  $\rightarrow$  proton est une simple rotation entre ces deux états (isospin)
  - La partie « création d'un électron et d'un neutrino » est plus complexe
- De manière imagée
- **NB : le neutrino de Fermi s'appelle maintenant antineutrino**





# Création de particules

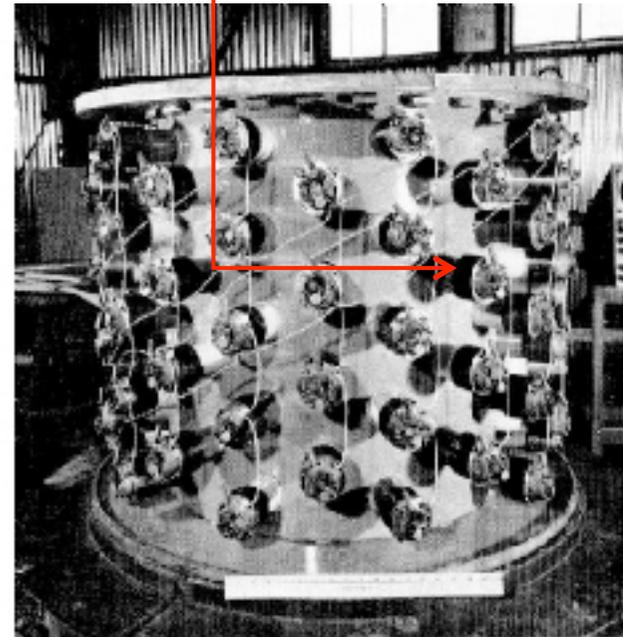
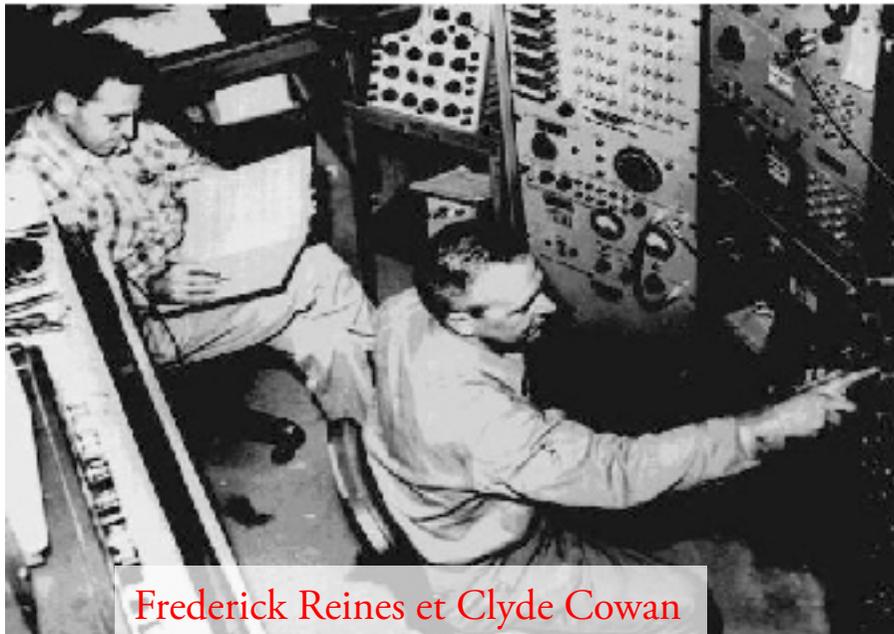
- Fermi utilisait pour l'électron et le neutrino
  - l'équation de Dirac → spineurs  $\psi_e$  et  $\psi_\nu$  à 4 composantes
  - les opérateurs de création  $\mathbf{a}$  et d'annihilation  $\mathbf{a}^\dagger$  (définis par Dirac pour les photons)

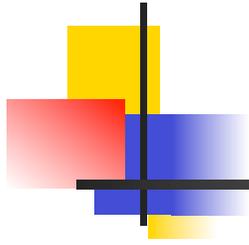
$$\psi_e = \sum_n \alpha_n \mathbf{a}_n \quad \psi_e^\dagger = \sum_n \alpha_n^* \mathbf{a}_n^\dagger \quad \psi_\nu = \sum_n \beta_n \mathbf{b}_n \quad \psi_\nu^\dagger = \sum_n \beta_n^* \mathbf{b}_n^\dagger$$

- Pour le hamiltonien d'interaction, Fermi prit la forme la plus simple
  - $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{\text{nucléons}} \cdot \mathbf{H}_{e\nu}$
  - *sans* préciser la forme de  $\mathbf{H}_{\text{nucléons}}$  [qui dépend de la structure interne du noyau]
  - et avec  $\mathbf{H}_{e\nu} = G \psi_e \psi_\nu$  [Fermi imagina aussi des formes plus complexes]
- Fermi calcula ensuite la probabilité de transition (application de la « règle d'or ») en intégrant sur le neutrino non observé
  - → distribution de probabilité pour l'énergie de l'électron
  - ⇔ forme du **spectre  $\beta$ , dépendant de  $m_\nu$**
  - → relation **explicite** entre  $\frac{1}{2}$  vie de la transmutation et énergie (maximale) de l'électron
  - →  $G \sim 10^{-11} \text{ MeV}^{-2}$  → très petite valeur → transmutation  $\beta$  rare à l'échelle nucléaire

## Reines & Cowan : preuve expérimentale (1956)

- Flux de neutrinos du réacteur de Savannah River ( $5 \times 10^{13} \nu / \text{s/cm}^2$  à 11 m du cœur)
- Réaction  $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$  suivie de  $e^+ + e^- \rightarrow 2 \gamma$  de 511 keV « faciles » à détecter
- 3 détections/heure dans un réservoir de 200 l d'eau avec 40 kg de  $\text{CdCl}_2$  (scintillateur) entouré de photomultiplicateurs

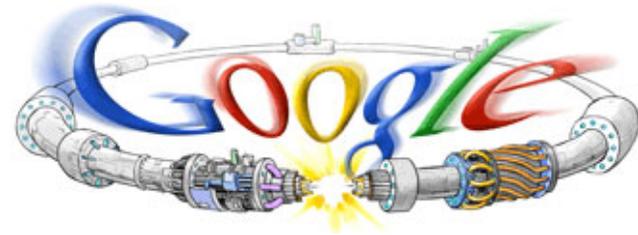




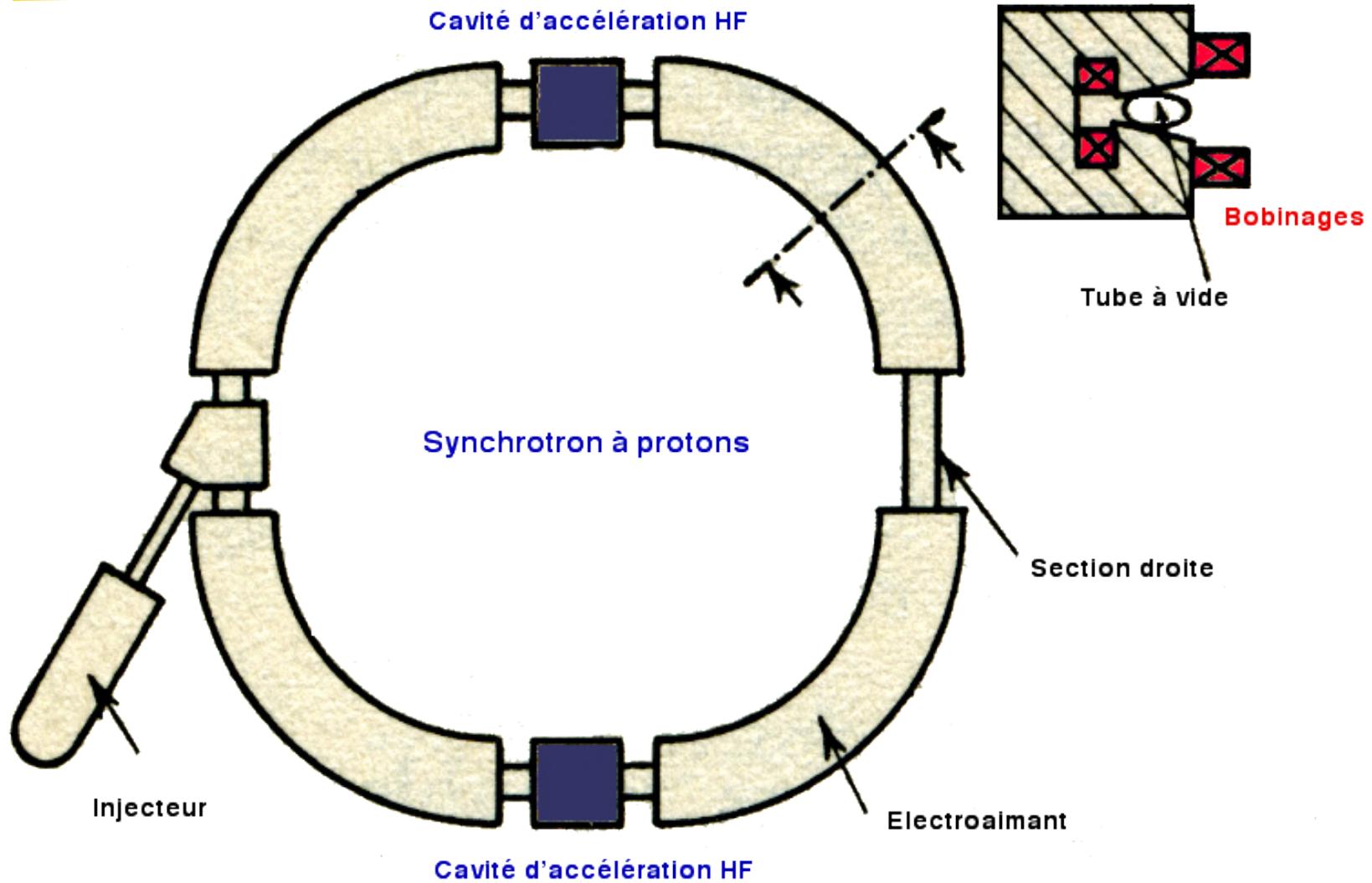
# ACCÉLÉRATEURS ET CHAMBRES À BULLES

# Des rayons cosmiques aux accélérateurs

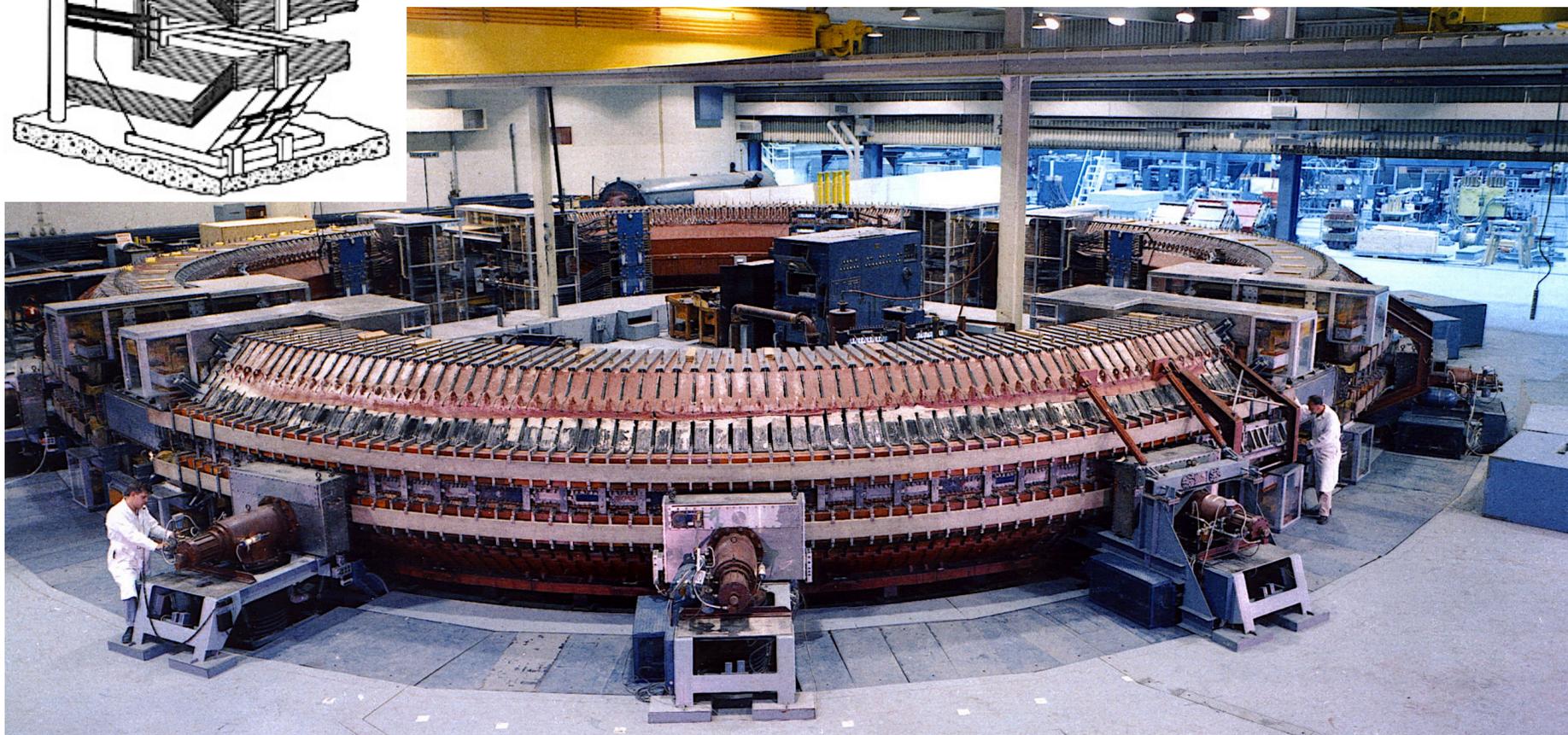
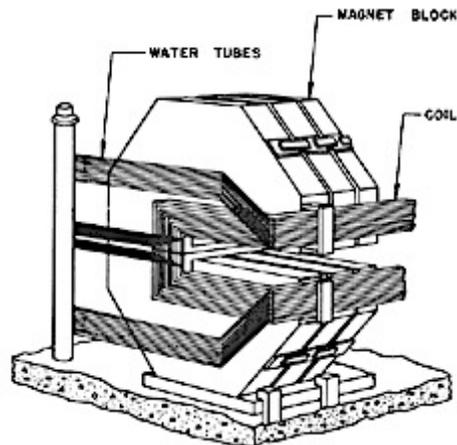
- Intérêt des accélérateurs
  - identité du projectile connue
  - flux du projectile connu
  - énergie du projectile connue **et réglable**
- Augmentation de l'énergie
  - ➔ résolution spatiale accrue ( $L = 1/E$ )
  - ➔ possibilité de créer de nouvelles particules (pions ➔ nucléons ➔ W et Z ➔ Higgs ➔ ...)
- Course à l'énergie
  - Van de Graaf, Cockroft-Walton ➔ limités à  $\sim 10$  MeV
  - ➔ **cyclotrons**
  - $E = \frac{1}{2} q^2 B^2 R^2 / m$
  - ➔ 16 MeV avec le « 60 pouces », 150 MeV espérés avec le « 184 pouces » (➔ pions?)
  - ➔ exigent des aimants gigantesques
  - 😡 **effets relativistes** ➔ la période de rotation n'est plus constante
  - ➔ diminution progressive de la fréquence quand l'énergie augmente (*synchrocyclotron*)
  - ➔ fonctionnement par paquets
  - ➔ possibilité d'une chambre à vide en anneau ➔ aimants plus petits ou anneau plus grand
  - ➔ **énergie plus élevée**



# Synchrotron



# Le Cosmotron de Brookhaven : 3.3 GeV en 1952



# Le Bevatron de Berkeley : 6.2 GeV en 1954



## Aux commandes du Bevatron

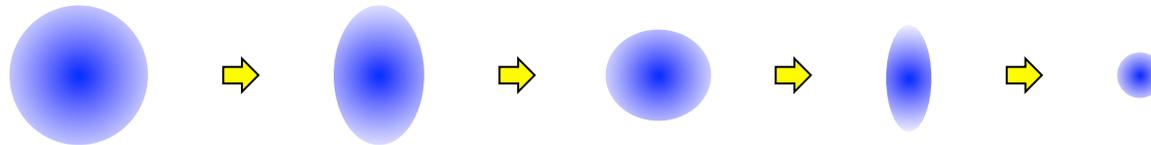


# Les synchrotrons

- 1952 : *Cosmotron* de Brookhaven 3.3 GeV ➔ étude des « particules V »
- 1954 : *Bevatron* de Berkeley 6.2 GeV ➔ découverte de l'antiproton
- 1957 : *Synchrophasotron* de Dubna 10 GeV
- Limite pratique atteinte : la taille du faisceau impose de très gros aimants

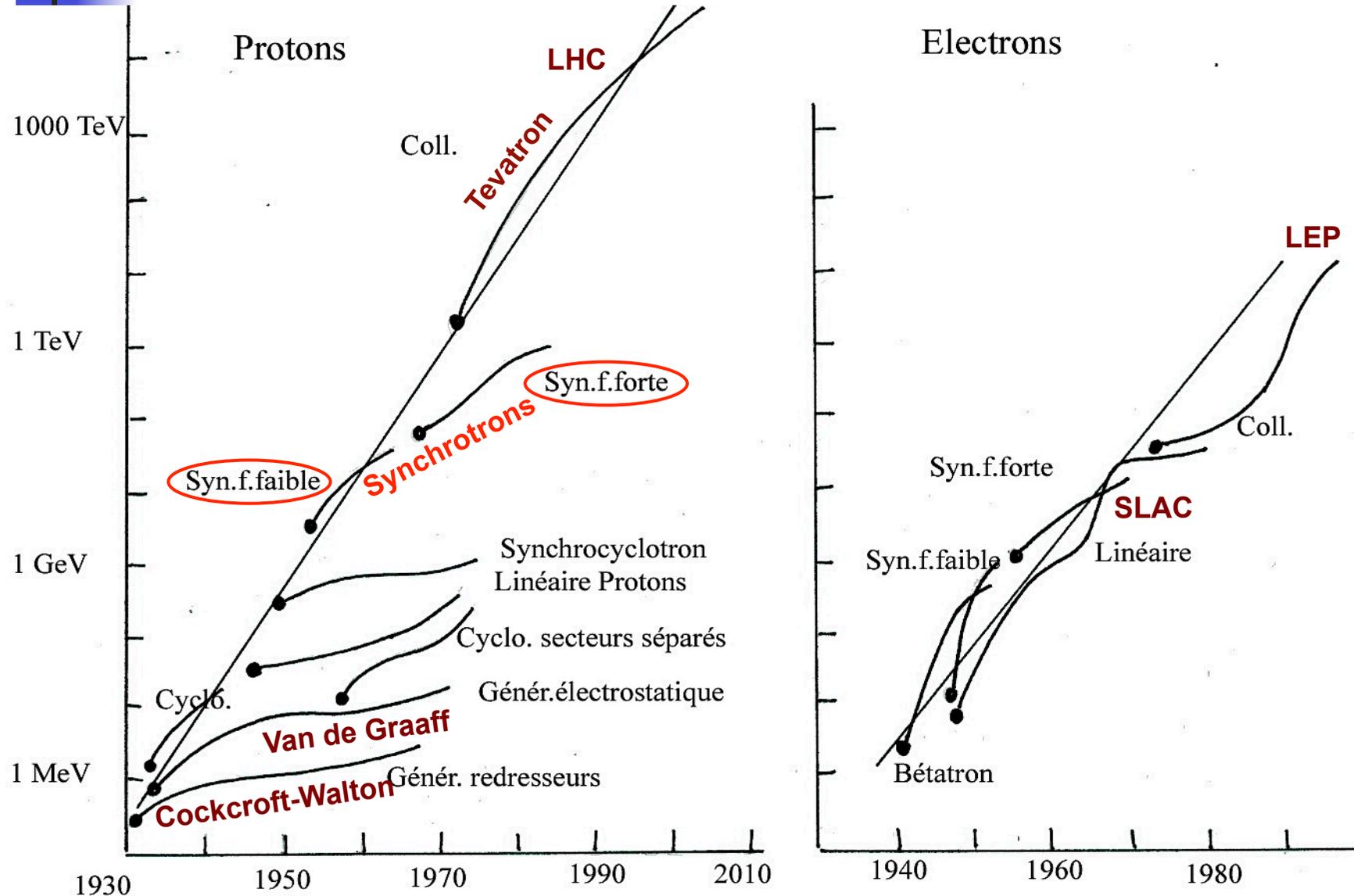
## ➔ Focalisation du faisceau

- succession d'aimants le focalisant alternativement dans une direction puis une autre



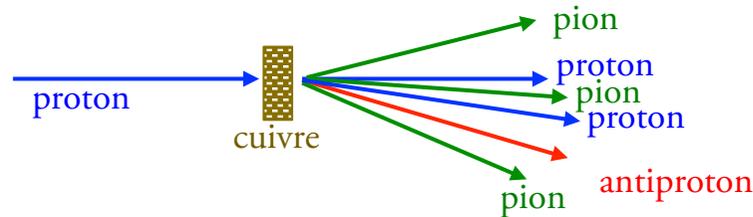
- Cosmotron/Bevatron/Synchrophasotron : 4 000 cm<sup>2</sup> de section du faisceau
- Proton Synchrotron/Alternating Gradient Synchrotron : 40 cm<sup>2</sup>
- LHC : 1 mm<sup>2</sup> (250 μm<sup>2</sup> aux intersections)
- ➔ aimants plus petits ou **énergie plus grande**, et **collisions plus fréquentes**
- 1959 : PS du CERN 28 GeV (628 m de circonférence)
- 1960 : AGS de Brookhaven 33 GeV ➔ découverte  $\Omega^-$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\Xi^0$ ,  $J/\psi$

# Les accélérateurs de particules

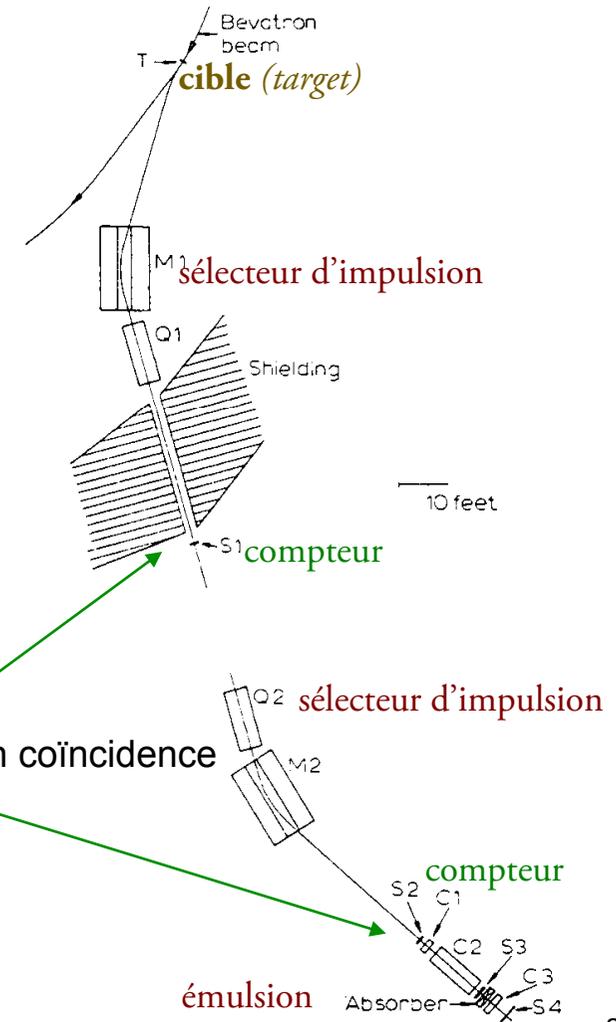
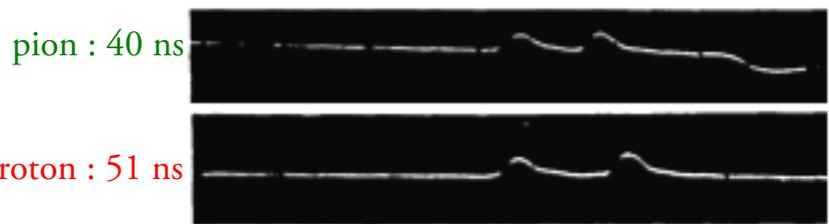


# Antiproton (Segrè & Chamberlain 1955)

- Symétrie par conjugaison de charge **C** : toute particule a son antiparticule
- **Mais est-ce vrai ?**
- ➔ expérience pour créer des antiprotons
- ➔ création simultanée **paire** proton-antiproton



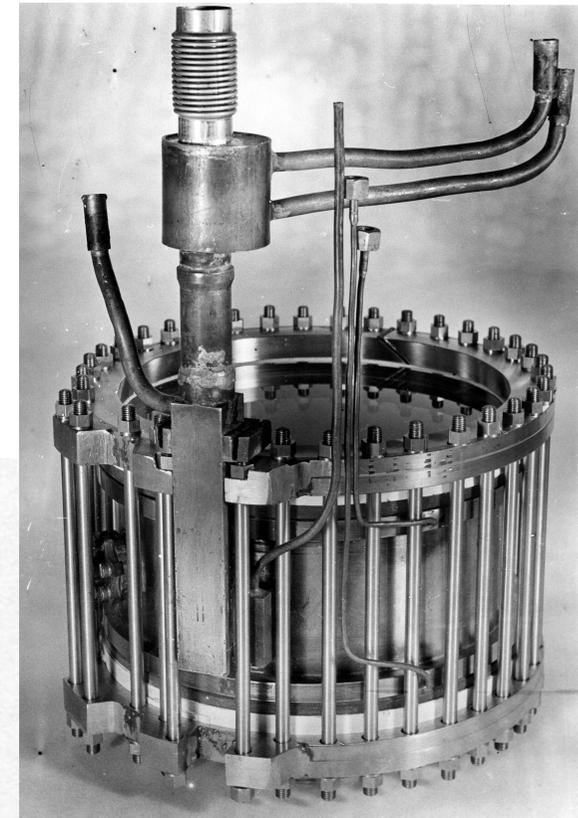
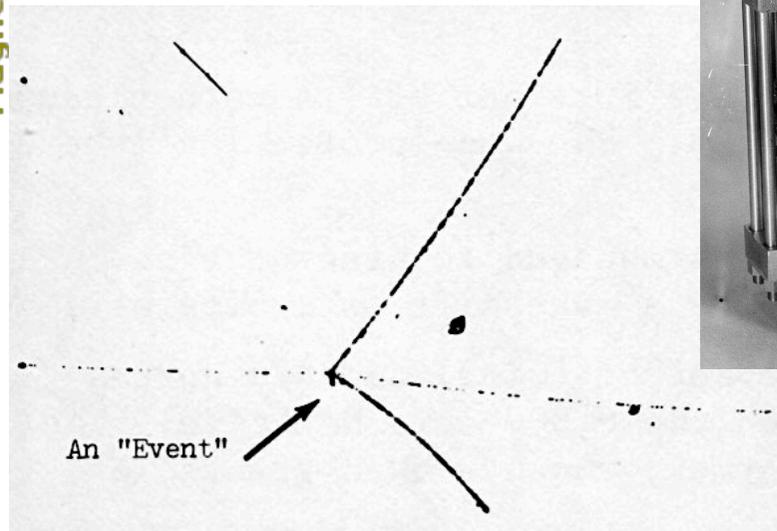
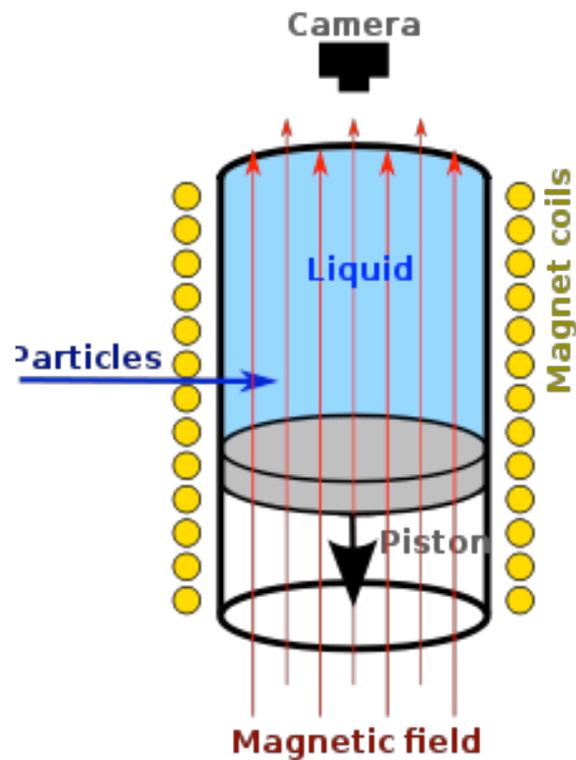
- ➔ énergie minimale 6 GeV ➔ Bevatron
- Différencier un antiproton d'un  $\pi^-$ 
  - mesurer l'impulsion  $mV \rightarrow$  **déviations magnétiques**
  - mesurer la vitesse  $V$  par temps de vol  $\rightarrow$  **compteurs en coïncidence**

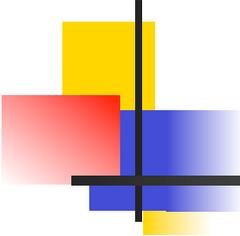




# La chambre à bulles (1952)

- Principe voisin de la chambre à brouillard de Wilson, *mais*
  - cycle plus rapide ( $\sim 1$  s)
  - et surtout **densité d'un liquide** au lieu d'un gaz
  - → collisions bien plus fréquentes à taille égale



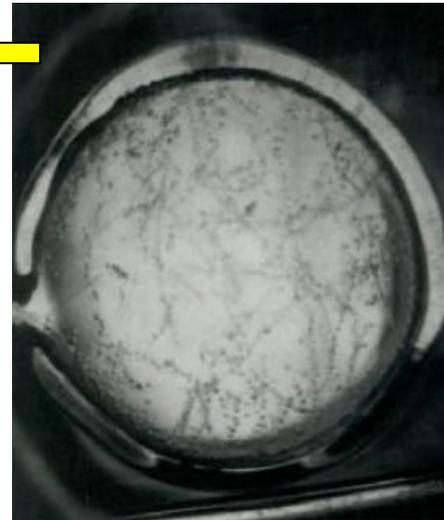
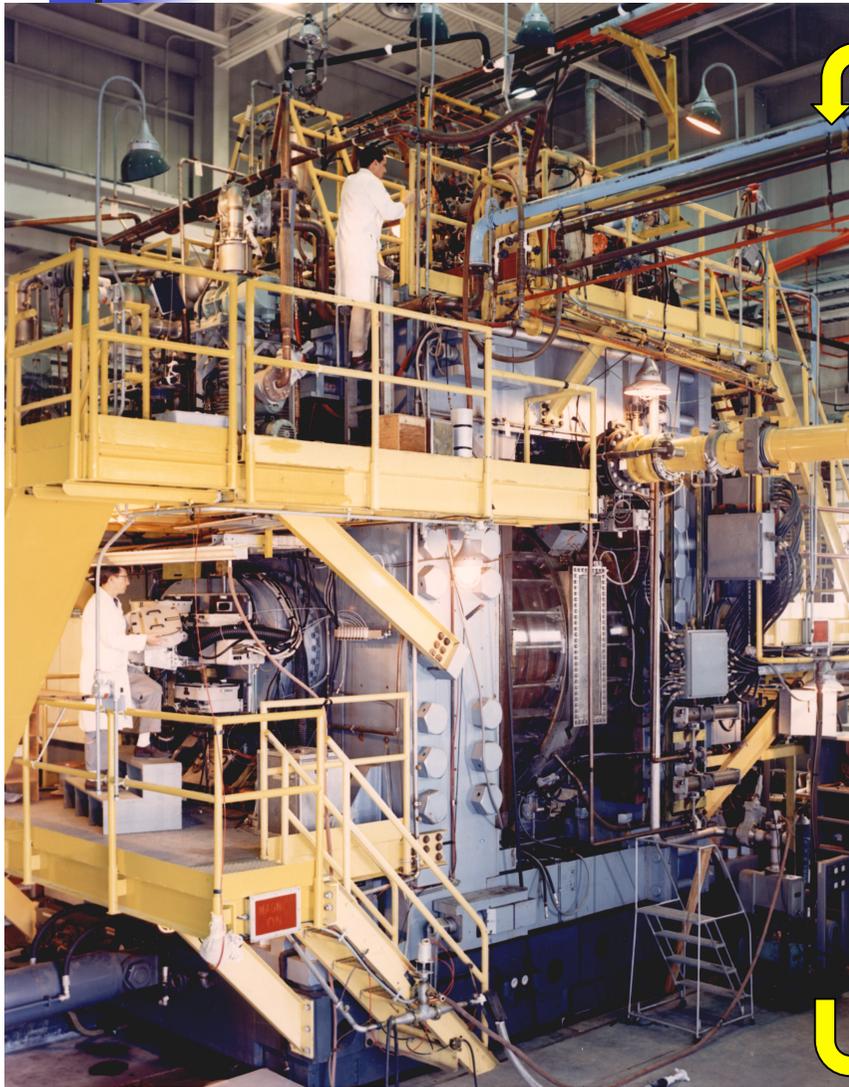


## Donald Glaser

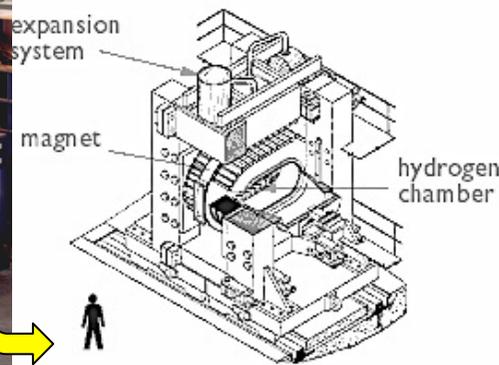


Chambre à bulles emplie de xénon liquide à Berkeley vers 1960

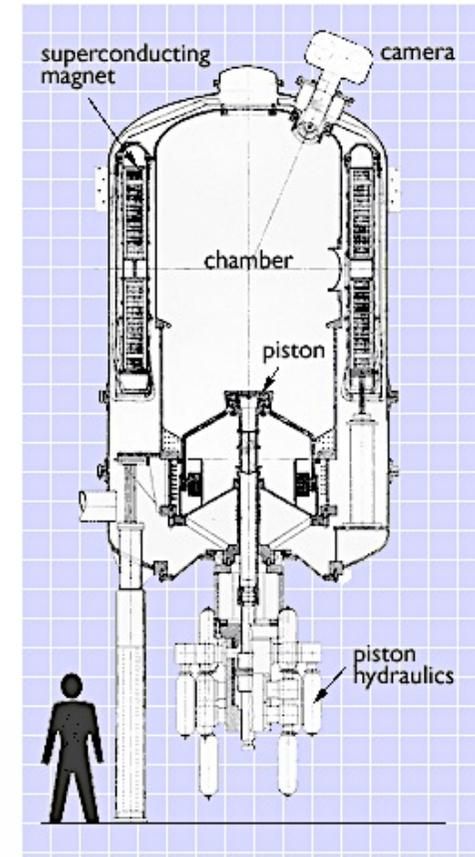
# Les chambres à bulles grandirent très vite



Première chambre à hydrogène liquide  $\varnothing$  3 cm Berkeley (1954)

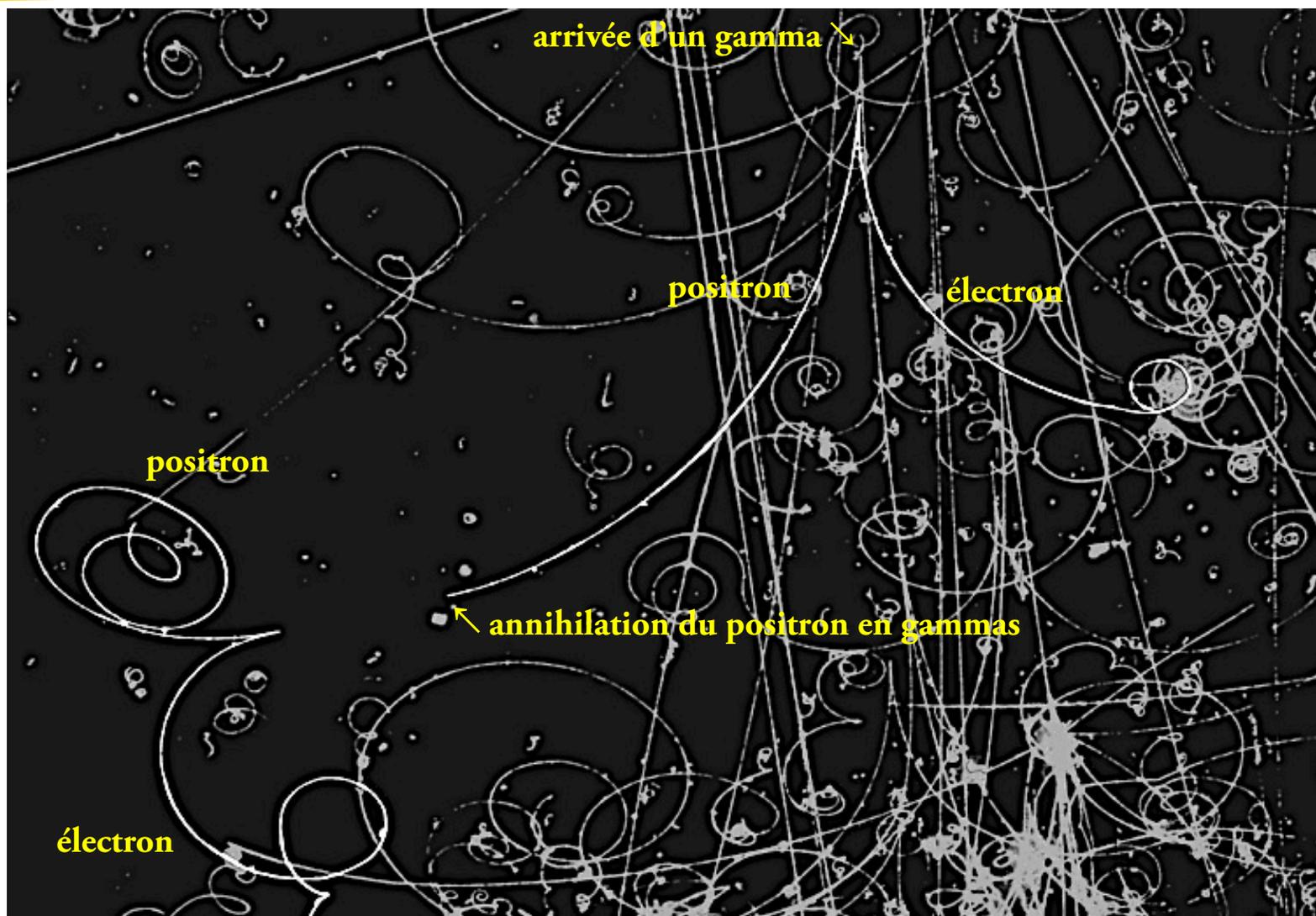


La chambre de 80 pouces de long à Brookhaven (1963)



La chambre de 7 pieds de diamètre à Brookhaven (1974)

# Photo de chambre à bulles

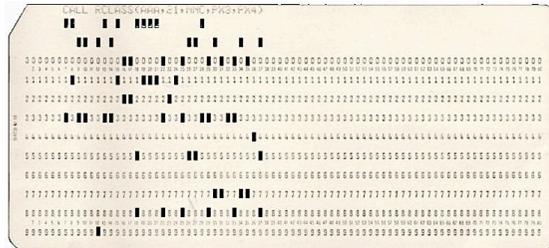


## Scanning : le *Franckenstein* à Berkeley



# Scanning

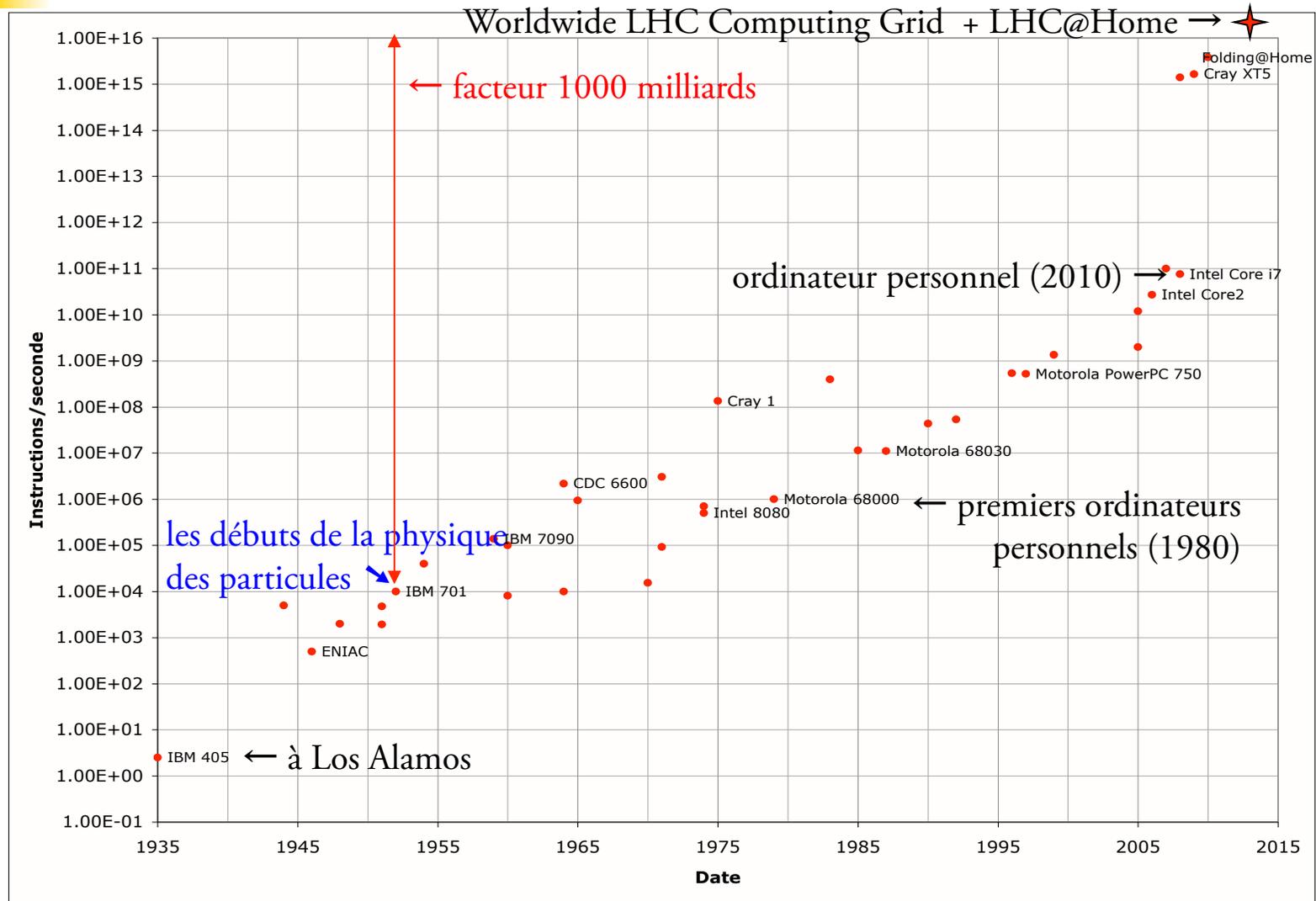
- Procédure répétitive
  - l'image (film 35 mm) est projetée
  - premier tri rapide, visuel, des photos
  - sélection des événements « intéressants »
  - la « scanneuse » place un capteur photosensible au début de *chaque* trace l'image
  - il la suit automatiquement et transmet sa position à la perforatrice
  - qui perfore des cartes avec les coordonnées

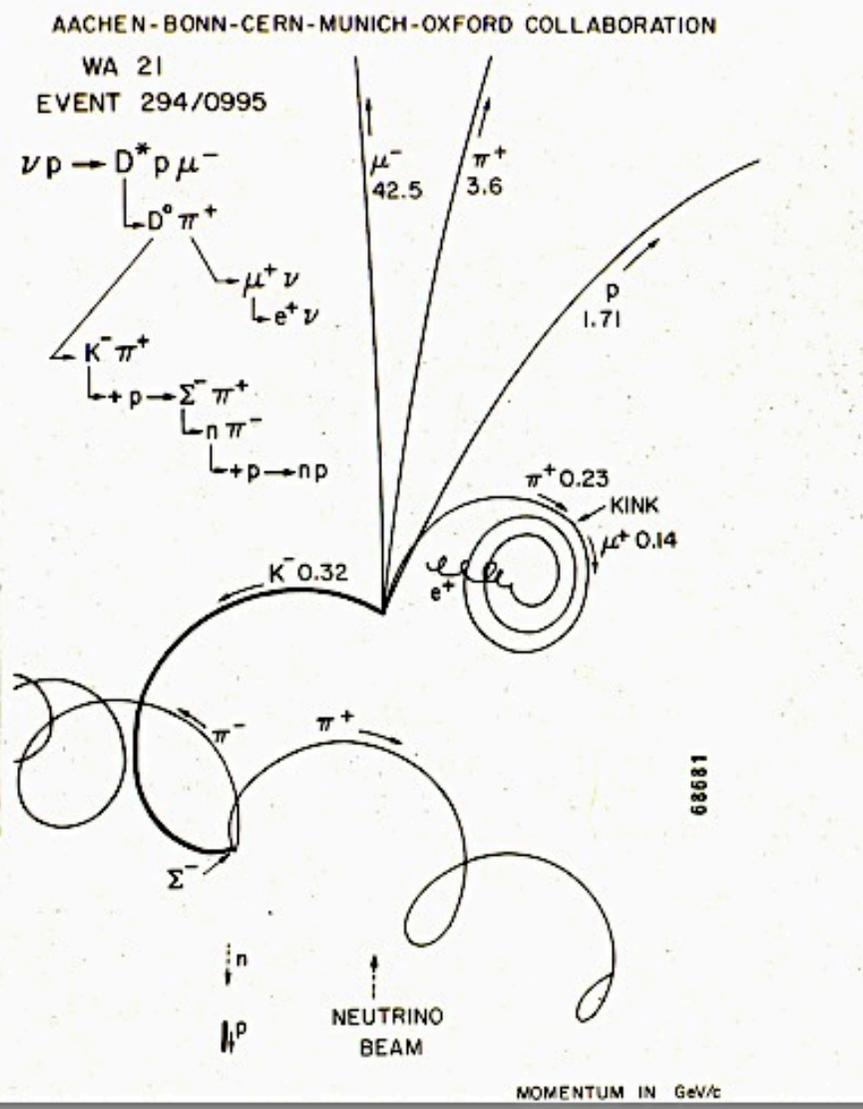
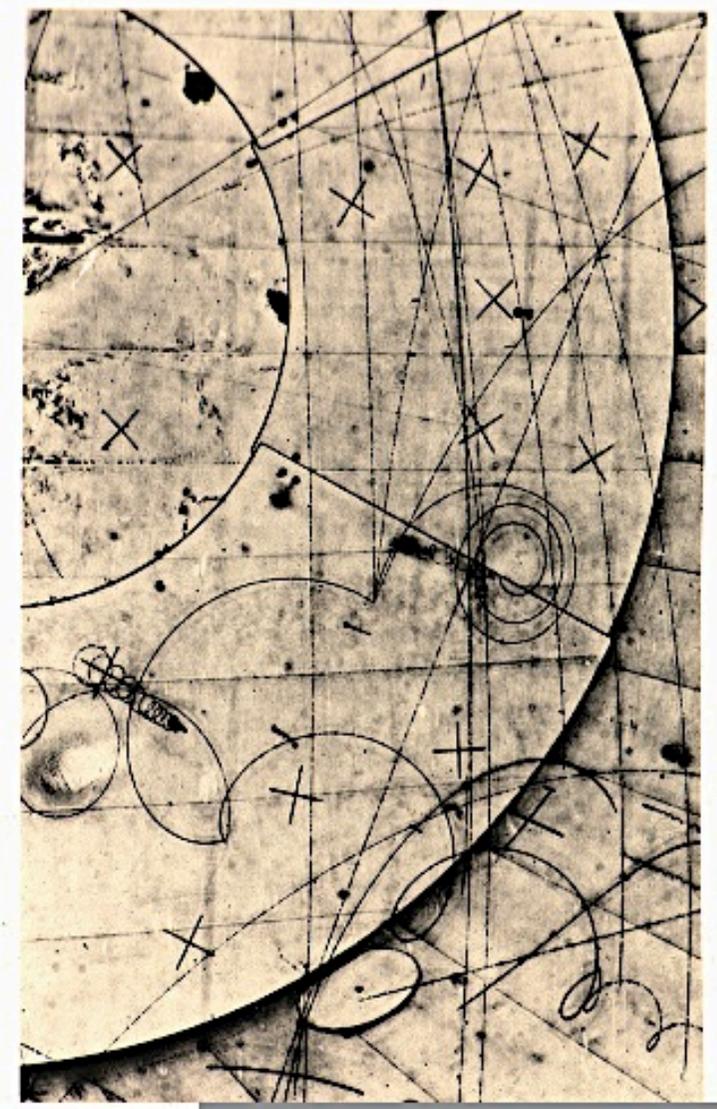
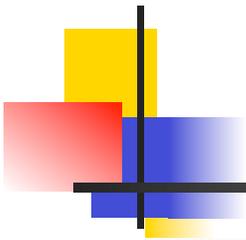


- les cartes sont données à un ordinateur (IBM 701 puis ses successeurs) qui calcule les trajectoires et donne les impulsions et une première identification des particules
- ➔ ~ 100 clichés analysés par jour en 1960



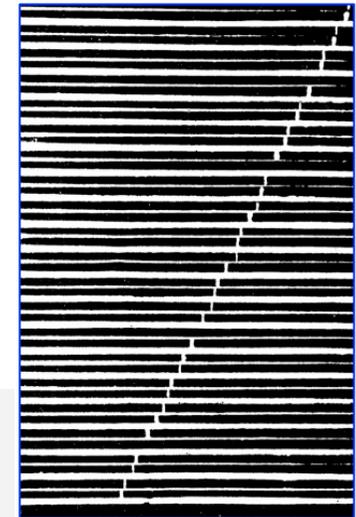
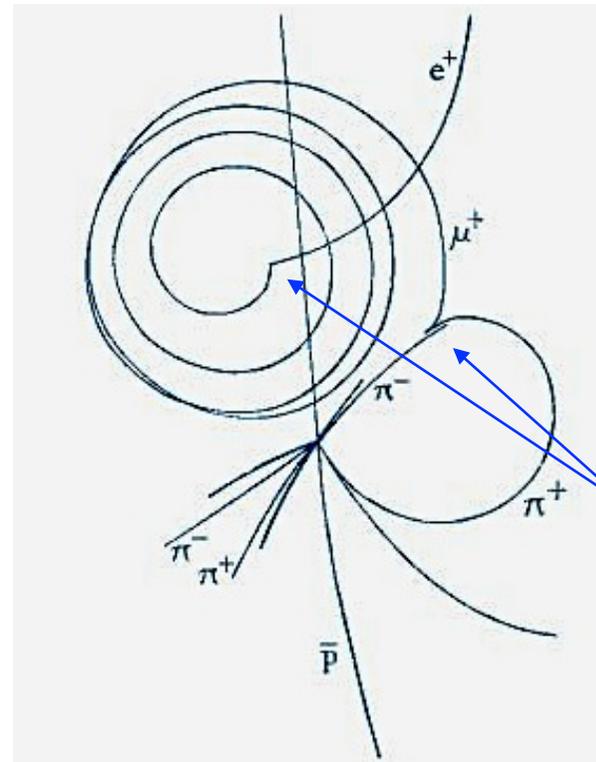
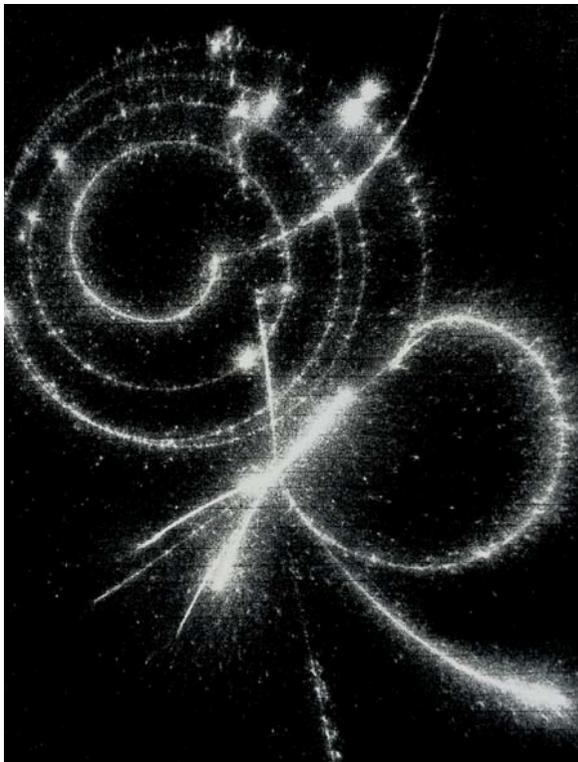
# (Évolution de la puissance de calcul)

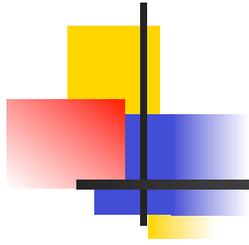




# Chambres à étincelles (*spark chambers & streamer chambers*)

- Surfaces conductrices sous tension dans un gaz ionisable → **étincelles**
- Avantages : déclenchées par un *trigger* + cycle très rapide (1 ms)
  - Ex: annihilation proton-antiproton → pions en grand nombre
  - → ceux-ci se désintègrent en muons + neutrino invisible
  - → puis en électrons + neutrinos invisibles





# **BARYONS MÉSONS**

# **LEPTONS**

# Lois de conservation

- Lois empiriques pour expliquer **pourquoi** certaines actions n'ont jamais lieu
  - **Énergie** (retouchée au fur et à mesure que des formes différentes d'énergie étaient identifiées : cinétique, gravitationnelle, thermique, électromagnétique, nucléaire...)
  - **Impulsion** (moment linéaire) → recul du canon
  - **Moment cinétique** (moment angulaire) → orbites planétaires, patineurs...
  - **Masse**
  - **Charge électrique**
  - **Identité des atomes** lors des réactions chimiques (→ difficultés avec la radioactivité)
- Conservation = constance *dans le temps*
- Extension : constance lors d'une transformation ( $\pm$  virtuelle) à *un instant donné*
  - Transformation **spatiale** : translation, rotation, réflexion en miroir
  - Transformation **interne** : remplacement d'un atome/électron/quark par un autre
- Désintégration  $p \rightarrow e^+ + \dots$  non-observée  $\Leftrightarrow$  conservation du **nombre baryonique**

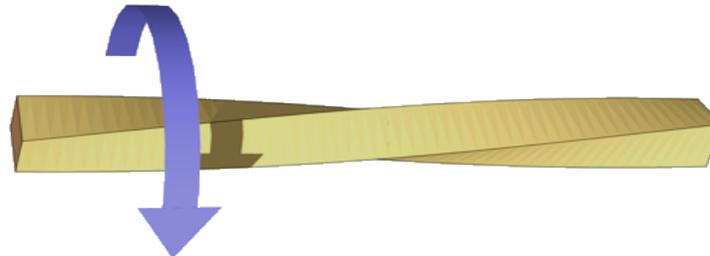


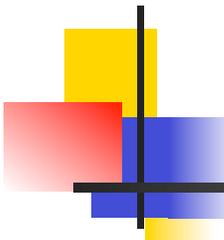
# Théorème de Noether

- À toute transformation qui laisse invariante l'intégrale d'action correspond une grandeur qui se conserve

$$T |\psi\rangle = |\psi'\rangle \quad S = \int \mathcal{L}(\psi) dt \rightarrow S' = S$$

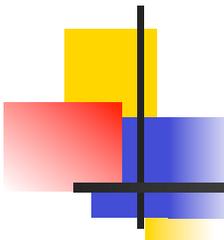
- Quantité **conservée**  $\Leftrightarrow$  **invariance** sous une transformation  $\Leftrightarrow$  **symétrie**
  - conservation de l'énergie  $\Leftrightarrow$  invariance par translation dans le temps
  - conservation de l'impulsion  $\Leftrightarrow$  invariance par translation dans l'espace
  - conservation du moment angulaire  $\Leftrightarrow$  invariance par rotation dans l'espace
  - conservation de la charge électrique ?
    - $\rightarrow$  invariance du système par changement de phase (quantique)
- Symétries globales  $\Leftrightarrow$  transformation du système *identique* en tout point
- Symétries locales  $\Leftrightarrow$  transformations du système *variable* d'un point à l'autre





# Les hadrons : baryons et mésons

- Baryon
    - proton et neutron (= nucléon)
    - puis découverte progressive de particules du même genre mais plus lourdes (hypérons)
    - ➔ *nombre quantique baryonique conservé dans toutes les interactions*
  - Mésons
    - primary mesotron ➔ pi meson ➔ pion  $\pi$  (mundane mesotron ➔ mu meson ➔ muon  $\mu$ )
    - puis découverte progressive de particules du même genre mais plus lourdes
    - mésons K , aussi de spin zéro, mésons  $\rho$ ,  $\omega$  de spin 1
    - *pas de « nombre mésonique » conservé*
- Spin  $\frac{1}{2}$  entier ➔ baryon**                      **Spin entier ➔ méson**
- (plus tard baryon = 3 quarks et méson = quark-antiquark, et quarks de spin  $\frac{1}{2}$  )
  - *Regroupement des particules identiques à la charge près en multiplets d'isospin*
    - n multiplet de n particules ➔ isospin  $I = (n-1)/2$
    - chaque membre du multiplet a  $I_3 = -I, -I+1, \dots, I-1, I$
    - nucléons  $\{-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\}$       pions  $\{-1, 0, 1\}$       kaons  $\{-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\}$

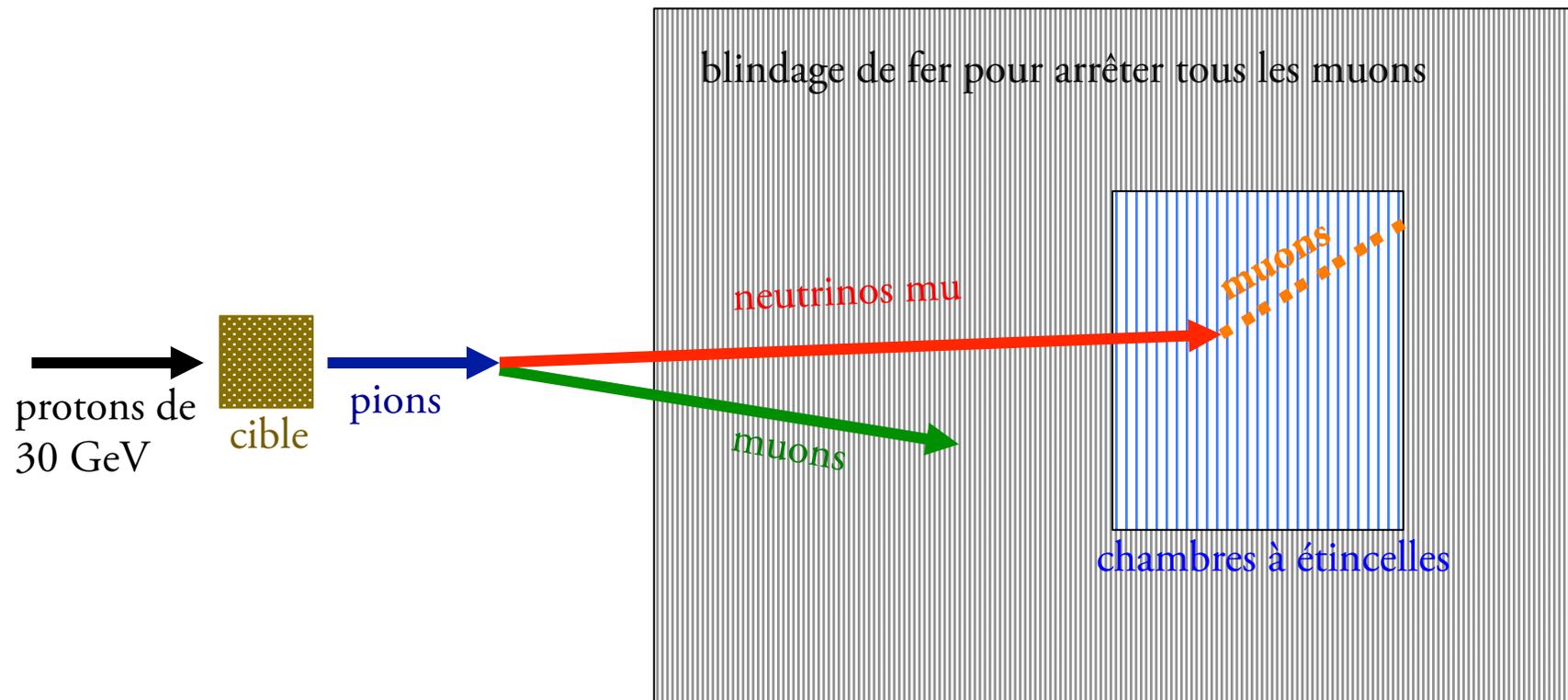


# Les leptons

---

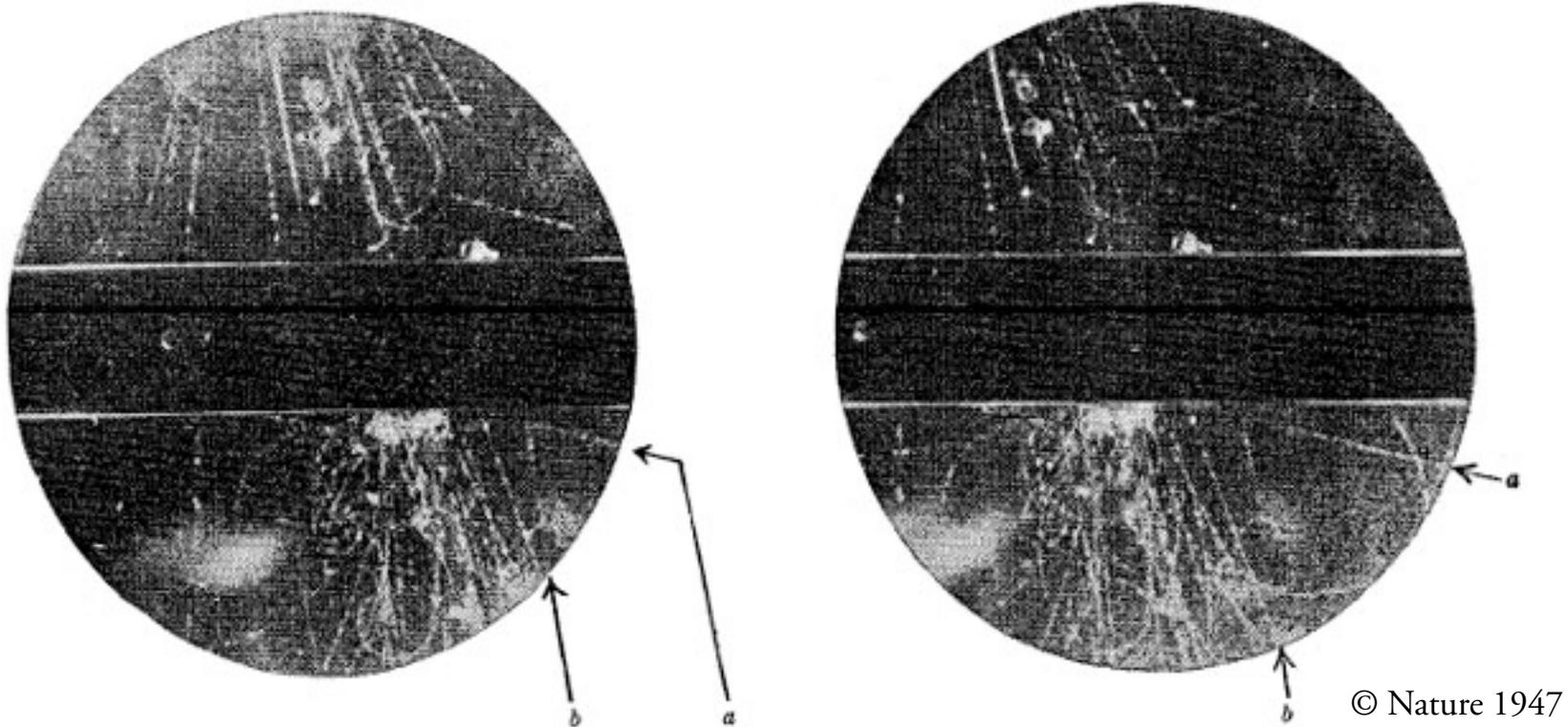
- Création d'un électron  $\Rightarrow$  création simultanée d'un positron ou d'un (anti)neutrino
  - $\Rightarrow$  *nombre quantique leptonique L conservé par toutes les interactions*
  - $\Rightarrow$  électron  $L = +1 \Rightarrow$  positron  $L = -1$
  - $\Rightarrow$  neutrino rebaptisé antineutrino  $L = -1$  (et donc neutrino  $L = +1$ )
- À l'électron et au neutrino s'était ajouté le muon, sans interaction forte
  - pas de désintégration  $\mu \rightarrow e + \gamma$  observée
  - $\Rightarrow$  *deux nombres quantiques leptoniques différents* : électronique et muonique
  - $\Rightarrow$  un neutrino  $\nu_e$  associé à l'électron et **un autre** associé au muon,  $\nu_\mu$
  - $\Rightarrow$  différence observée en 1962 à Brookhaven (Lederman, Schwarz et Steinberger)
  - faisceau de protons (AGS) + cible  $\rightarrow$  pions  $\rightarrow \mu + \nu_\mu$
  - arrêt de tous les muons dans un blindage entourant une chambre à étincelles
  - observation de muons **mais pas d'électrons** produits dans la chambre par les neutrinos
  - $\Rightarrow \nu_\mu \neq \nu_e \Rightarrow$  prix Nobel (en 1988 seulement)

# Le neutrino mu

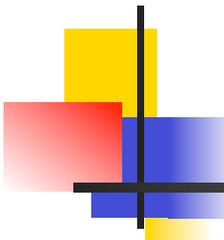


## Particules V

- 1946-1947 : Rochester et Butler, à Manchester. Rayons cosmiques, chambre à brouillard, champ magnétique et images stéréo
- ➔ 2 exemples de traces en forme de V ➔ particule neutre ➔ 2 particules chargées
- ➔ masse de la particule neutre  $500 \pm 80 \text{ MeV}$



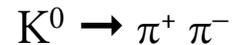
© Nature 1947



# Particules V

---

- Confirmation par Anderson (Caltech)



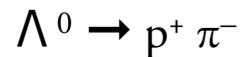
- Ces particules parurent *étranges* en raison de leur longue durée de vie  $\sim 10^{-10}$  s
- [  $10^{-23}$  s pour l'interaction forte,  $10^{-16}$  s pour le  $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$  ]

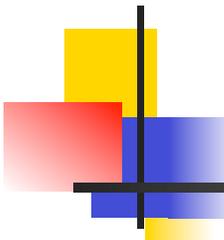
- Il s'avéra vite qu'il y avait deux types de particules V

- des mésons (plus légers que le proton), de spin entier 495 MeV  $K^0, K^+, K^-$
- des hypérons (plus lourds que le proton), de spin  $\frac{1}{2}$  entier 1116 MeV  $\Lambda^0$

- qu'elles étaient toujours produites par paires ( $K^+K^-$ ,  $K^0\Lambda^0$ , ...)

- et qu'elles ne se désintégraient que par interaction faible

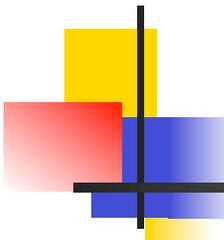




# Le nombre quantique d'étrangeté

---

- Pais, Nishijima, Gell-Mann
- Explication possible s'il existe un nombre quantique S (*strangeness*)
  - conservé par interaction forte → production nécessairement par paires (d'étrangetés opposées)
  - non conservé par interaction faible → désintégration très lente
  - exemple: collision  $\pi^- p \rightarrow \Lambda^0 K^0$  → étrangetés S = 0 , 0 , -1 et +1
- Découverte progressive d'autres particules étranges
  - 2 hypérons xi  $\Xi^-$  (1952) puis  $\Xi^0$  (1959)      masse 1320 MeV      S = -2  
→ cascades :  $\Xi \rightarrow \Lambda \rightarrow p$
  - 3 hypérons sigma  $\Sigma^+$  et  $\Sigma^-$  (1953) puis  $\Sigma^0$  (1956)      masse 1190 MeV      S = -1



# Le nombre quantique d'étrangeté

Relation de Gell-Mann et de Nishijima (1953)

- L'étrangeté  $S$  augmente avec la charge électrique *moyenne*  $Q$  d'un multiplet (*hypercharge*)

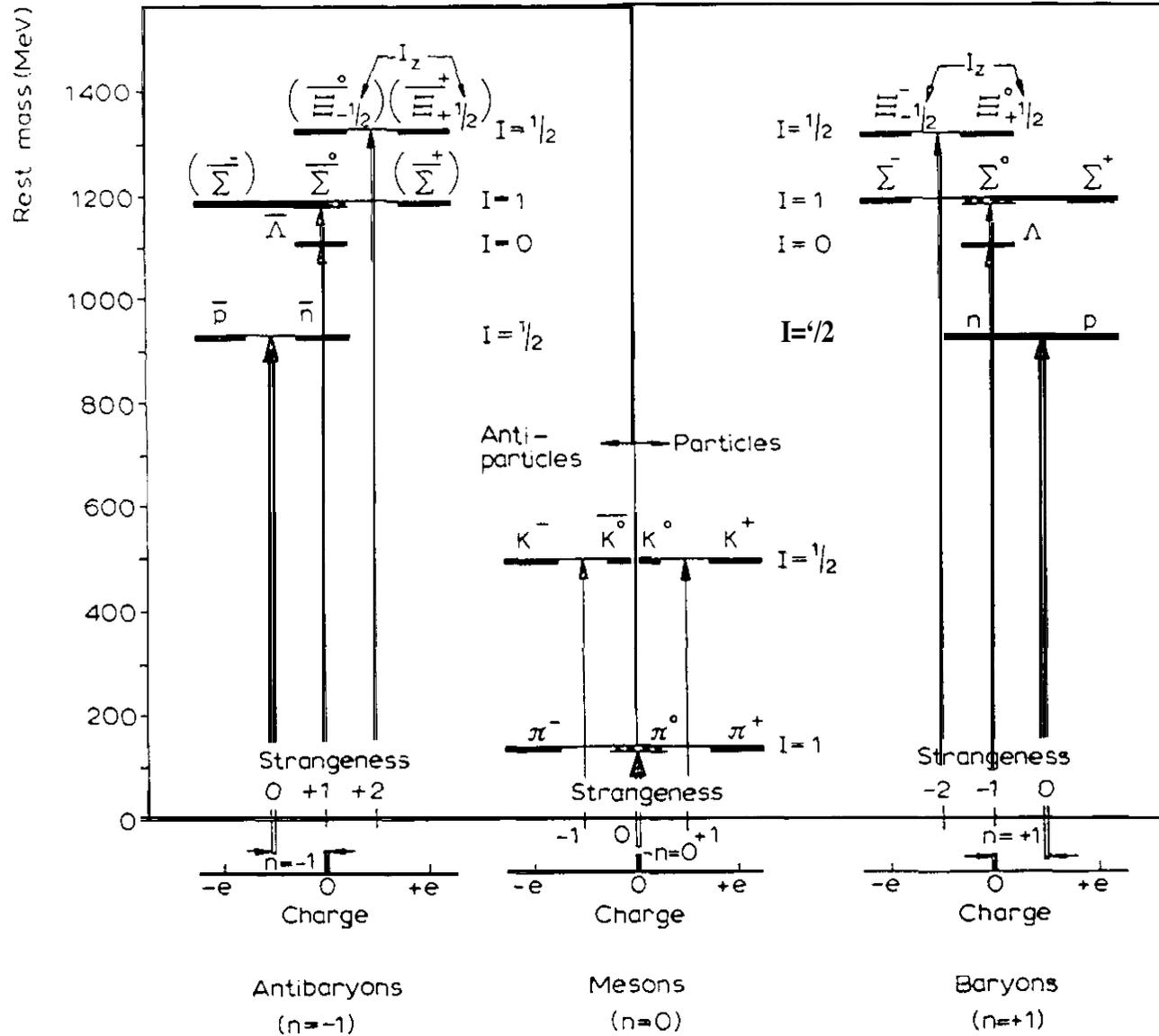
$$S = 2 \cdot Q - B$$

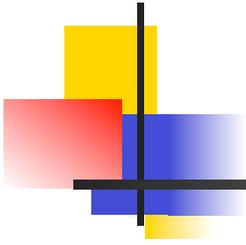
- nucléons :  $Q = \frac{1}{2}$   $B = 1$   $\rightarrow S = 0$
- kaons :  $Q = \frac{1}{2}$   $B = 0$   $\rightarrow S = +1$
- $\Lambda^0$  :  $Q = 0$   $B = 1$   $\rightarrow S = -1$
- seul  $\Xi^-$  était alors connu,  $B = 1$  et  $S = -2$   $\rightarrow Q = -\frac{1}{2}$   $\rightarrow$  il devait exister un  $\Xi^0$
- (découvert à Brookhaven en 1959)

- L'étrangeté  $S$  augmente régulièrement avec la masse de la particule étrange

- $-1$  pour  $\Lambda^0$  et les  $\Sigma$  (1100 et 1200 MeV)
- $-2$  pour  $\Xi^0$  et  $\Xi^-$  (1300 MeV) ↙ modèle des quarks (Gell-Mann, Zweig)
- $-3$  pour...?  $\rightarrow$  oui, pour  $\Omega^-$  (1670 MeV, prédit en 1962, découvert en 1964)
- $-4$  ?  $\rightarrow$  non, aucune particule n'a  $S = -4$  (comme prédit en 1962)

# La situation en 1957





Merci de votre attention !

