

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

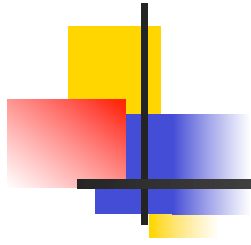
- Physique nucléaire ➔ structure du noyau (et applications techniques)
- Physique subnucléaire ➔ étude des nouvelles particules et leurs interactions

- 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)

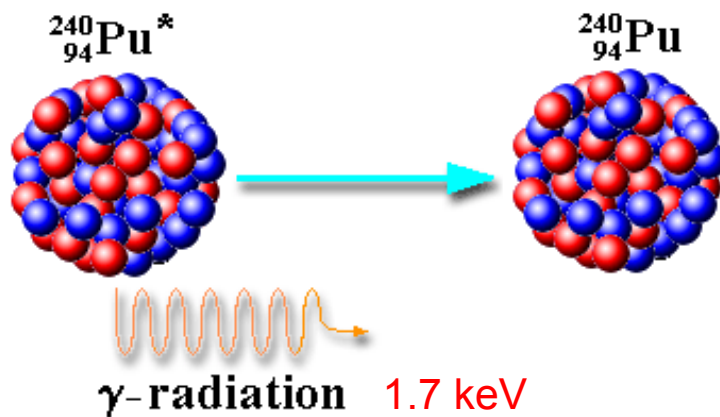
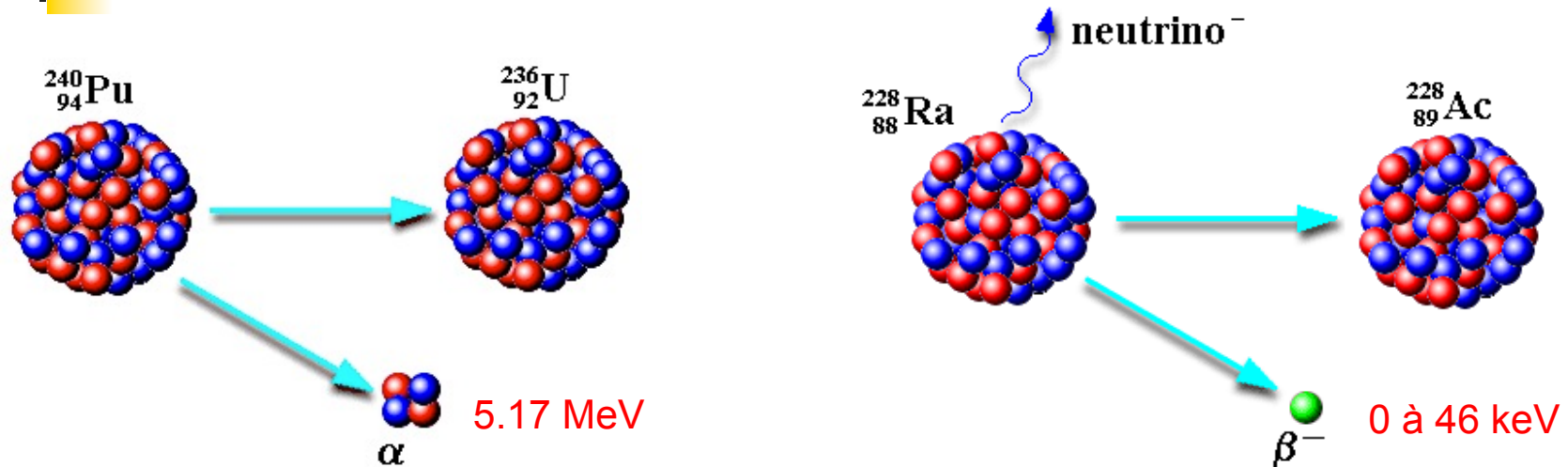


- ➔ les Etats-Unis dominant la discipline sans partage pendant ~30 ans
- et une nouvelle génération prend la relève (Feynman, Gell-Mann, Segrè, Alvarez, Lederman, Steinberger...)



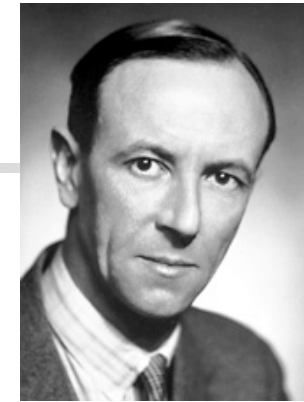
NEUTRINOS

Alpha, bêta, gamma



- L'énergie d'un α [ou celle d'un γ] 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 β 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 $\sim e^2/m_e c^2 \sim 10^{-15} \text{ m}$?

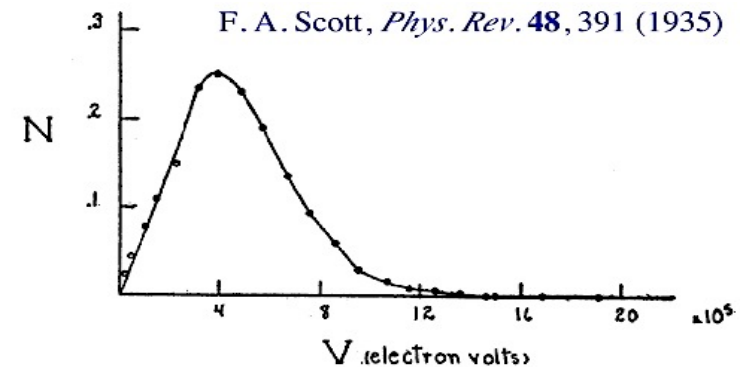
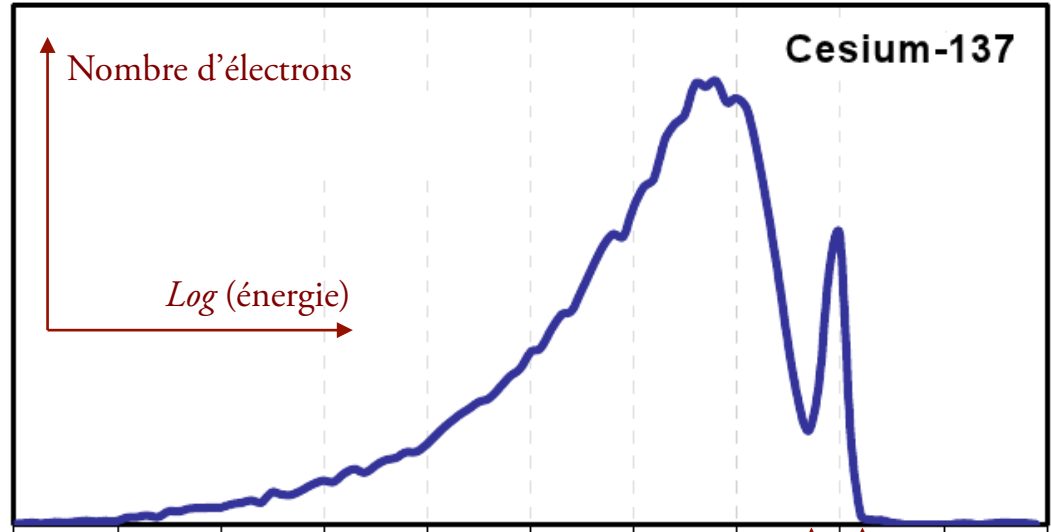
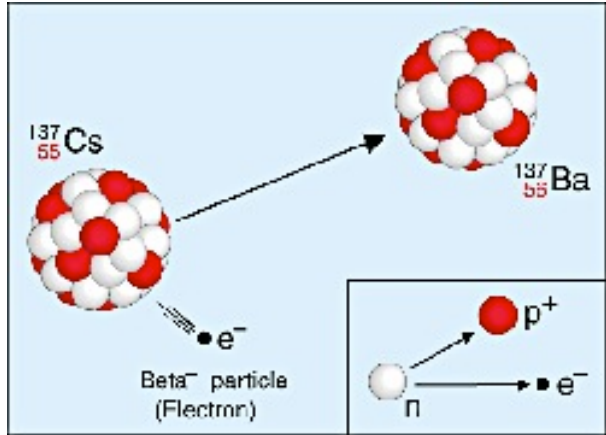


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

Cas du césium 137



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

30.17 a $7/2^+$

max 0.5120 MeV β^- 94.6%

max 1.174 MeV β^- 5.4%

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

0.6617 MeV γ

85.1% $^{137}_{56}\text{Ba}$ 0 $3/2^+$
stable

« 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}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 ($\sim m_{\text{électron}}$?)



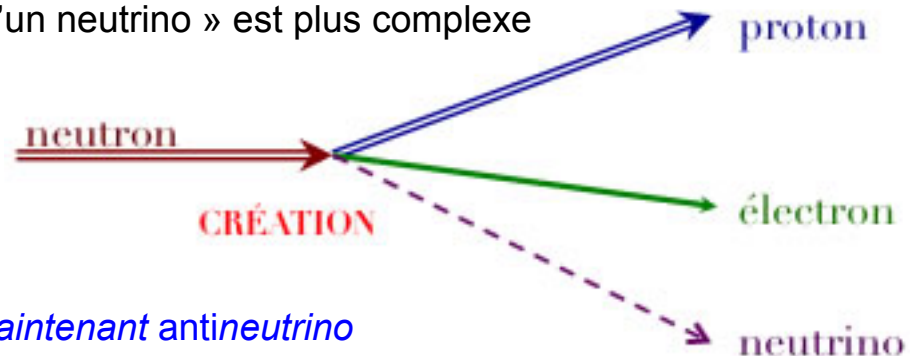


Difficultés

- 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

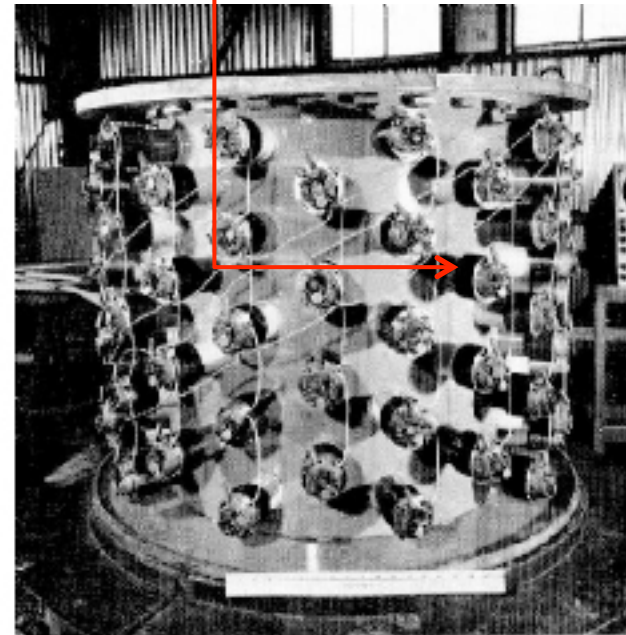
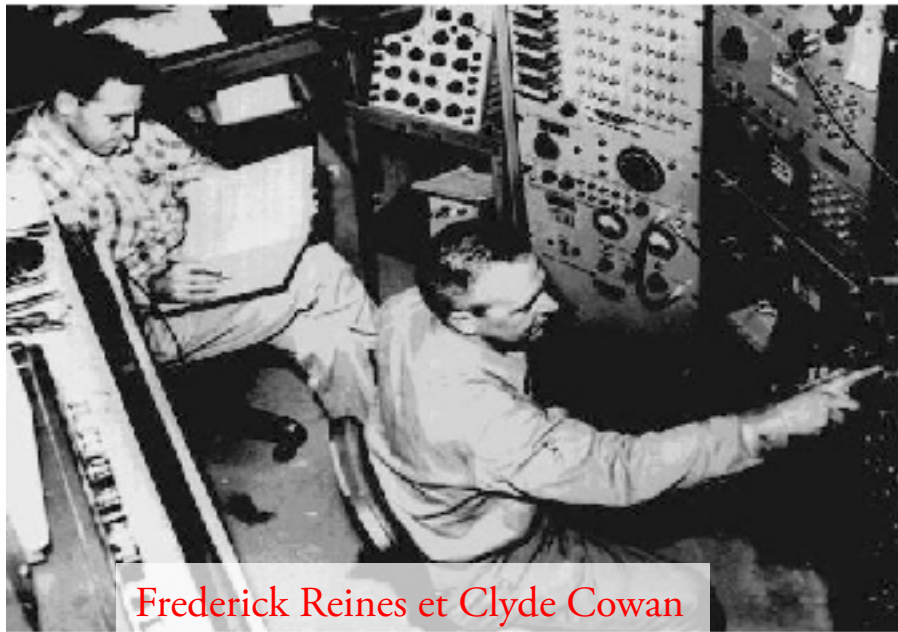
- Fermi utilisait pour l'électron et le neutrino
 - l'équation de Dirac → spineurs ψ_e et ψ_ν à 4 composantes
 - les opérateurs de création \mathbf{a} et d'annihilation \mathbf{a}^\dagger (définis par Dirac pour les photons)

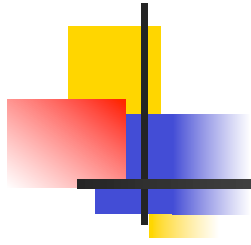
$$\psi_e = \sum_n \alpha_n \mathbf{a}_n \quad \psi_e^\dagger = \sum_n \alpha_n^* \mathbf{a}_n^\dagger \quad \psi_\nu = \sum_n \beta_n \mathbf{b}_n \quad \psi_\nu^\dagger = \sum_n \beta_n^* \mathbf{b}_n^\dagger$$

- 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 β , dépendant de m_ν**
 - → 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 β 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 CdCl_2 (scintillateur) entouré de photomultiplicateurs

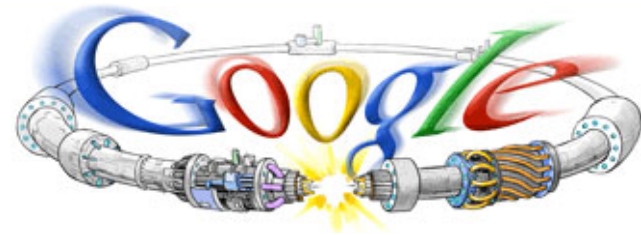




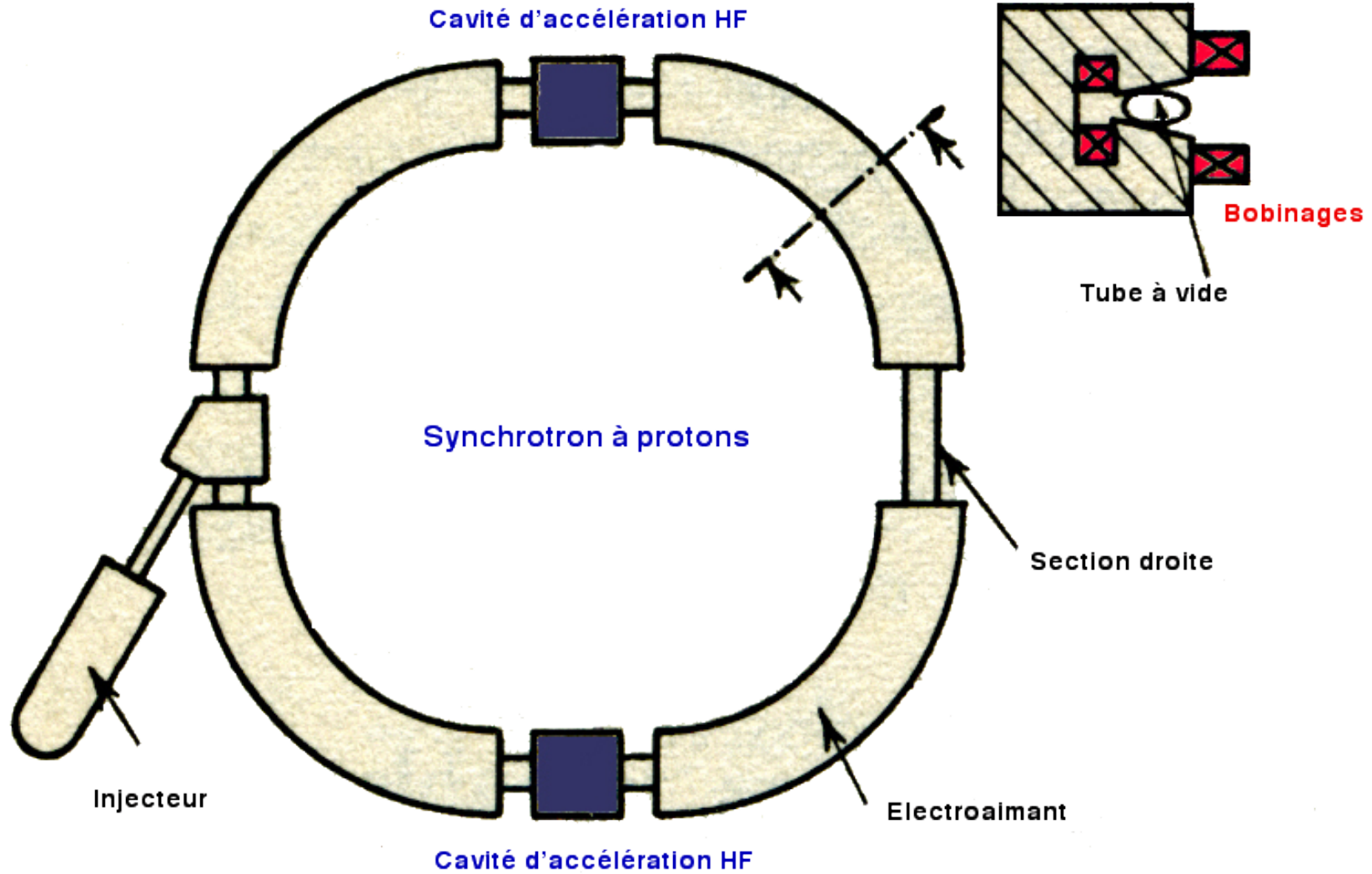
ACCÉLÉRATEURS ET CHAMBRES À BULLES

Des rayons cosmiques aux accélérateurs

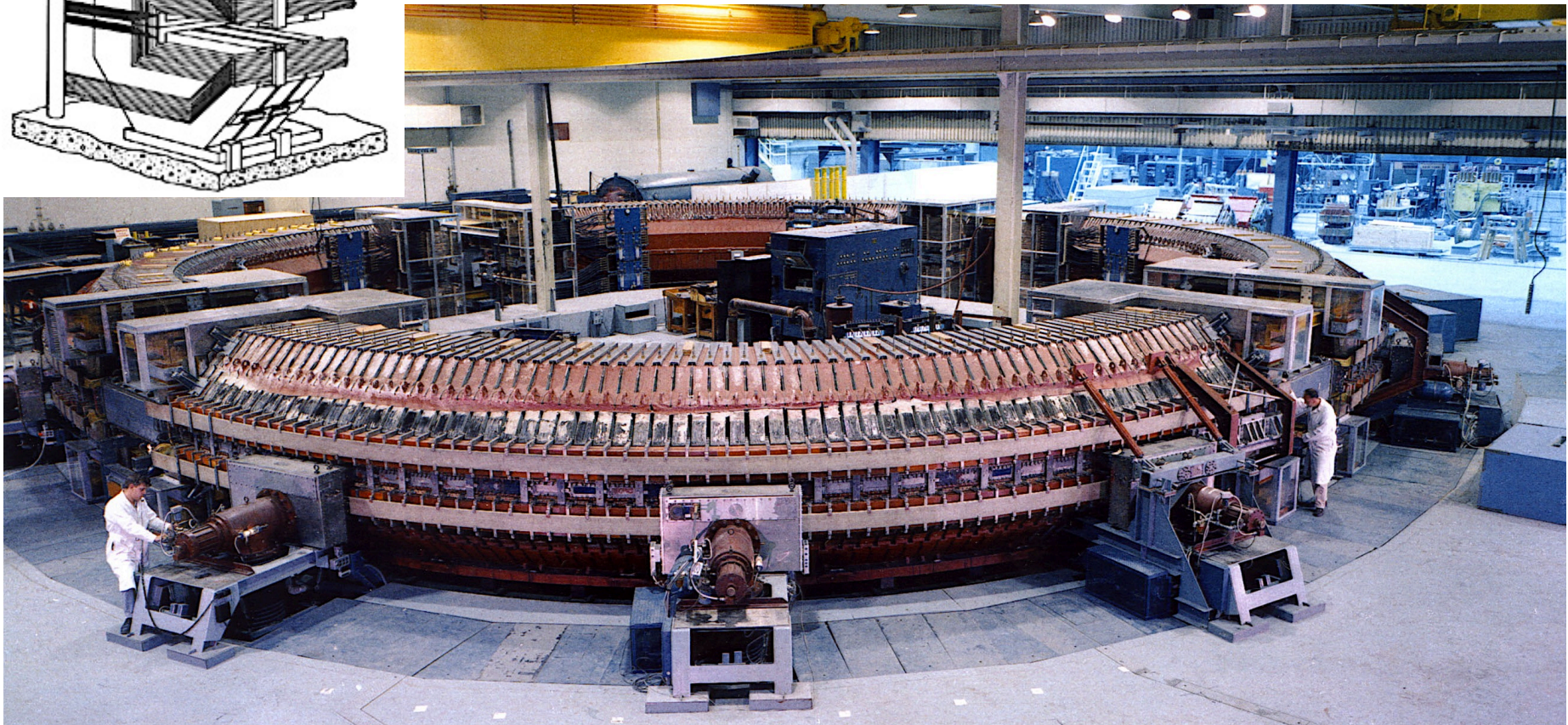
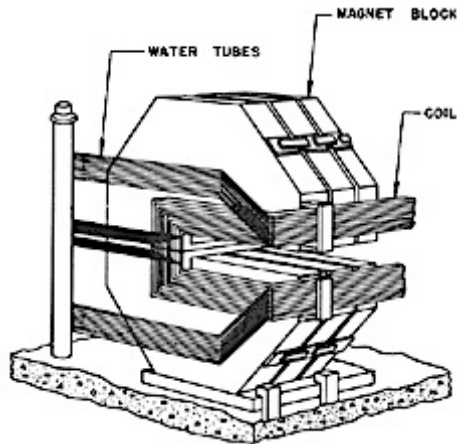
- Intérêt des accélérateurs
 - identité du projectile connue
 - flux du projectile connu
 - énergie du projectile connue **et réglable**
- Augmentation de l'énergie
 - ➔ résolution spatiale accrue ($L = 1/E$)
 - ➔ possibilité de créer de nouvelles particules (pions ➔ nucléons ➔ W et Z ➔ Higgs ➔ ...)
- Course à l'énergie
 - Van de Graaf, Cockroft-Walton ➔ limités à ~ 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



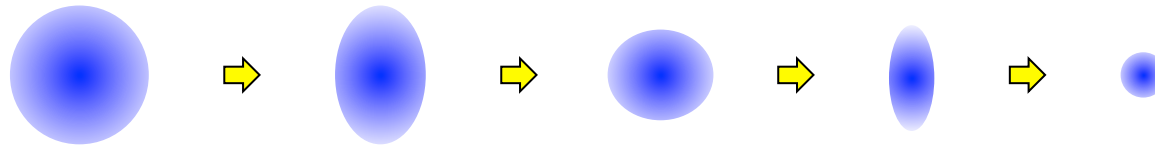
Aux commandes du Bevatron



Les synchrotrons

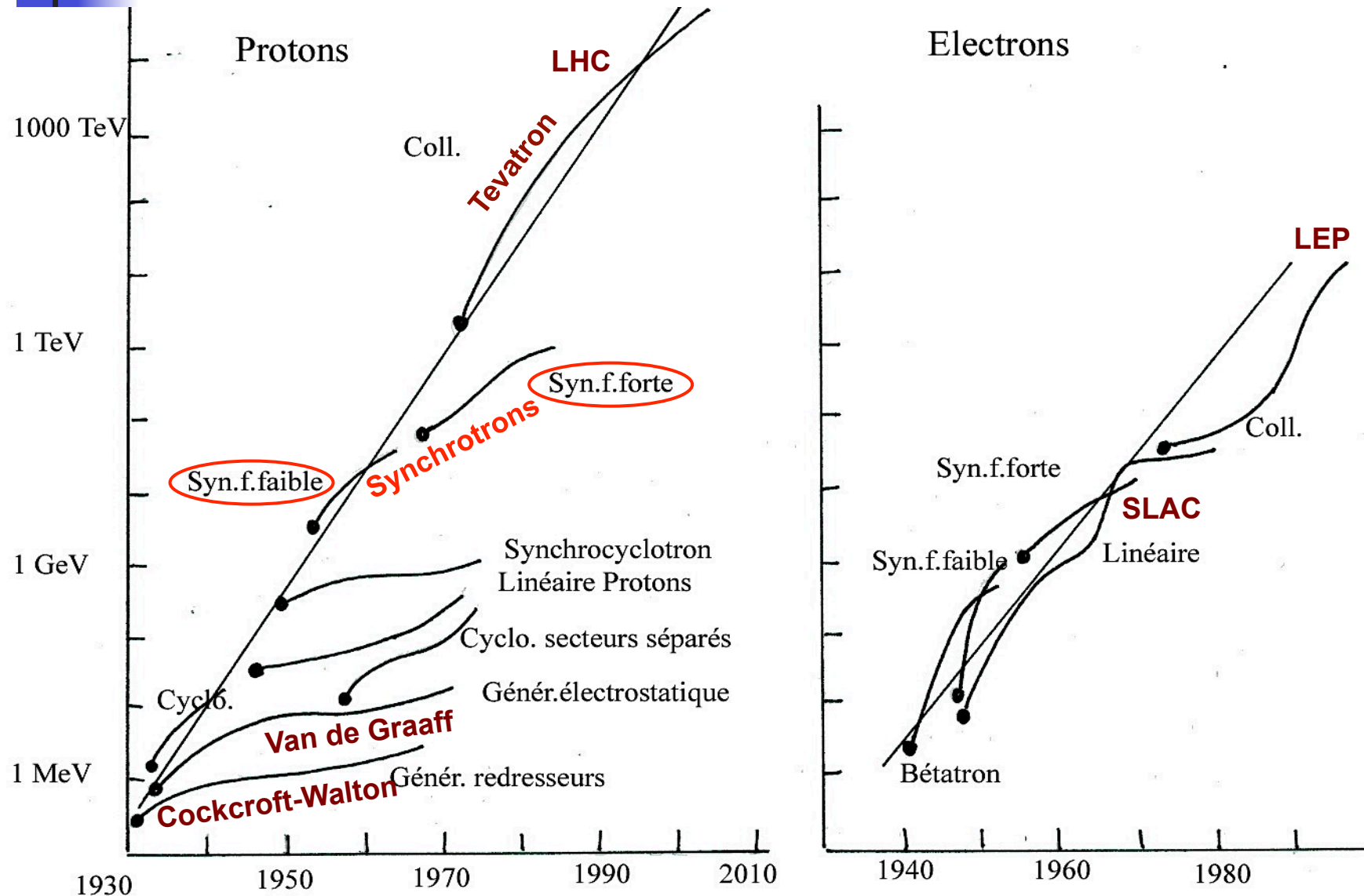
- 1952 : *Cosmotron* de Brookhaven 3.3 GeV ➔ étude des « particules V »
- 1954 : *Bevatron* de Berkeley 6.2 GeV ➔ découverte de l'antiproton
- 1957 : *Synchrophasotron* de Dubna 10 GeV
- Limite pratique atteinte : la taille du faisceau impose de très gros aimants
- ➔ **Focalisation du faisceau**

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



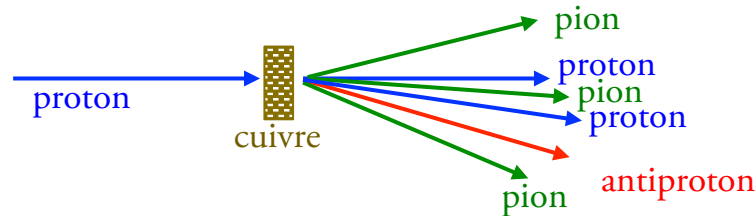
- Cosmotron/Bevatron/Synchrophasotron : 4 000 cm² de section du faisceau
- Proton Synchrotron/Alternating Gradient Synchrotron : 40 cm²
- LHC : 1 mm² (250 μm² aux intersections)
- ➔ aimants plus petits ou **énergie plus grande**, et **collisions plus fréquentes**
- 1959 : PS du CERN 28 GeV (628 m de circonférence)
- 1960 : AGS de Brookhaven 33 GeV ➔ découverte Ω^- , ν_μ , Ξ^0 , J/ψ

Les accélérateurs de particules

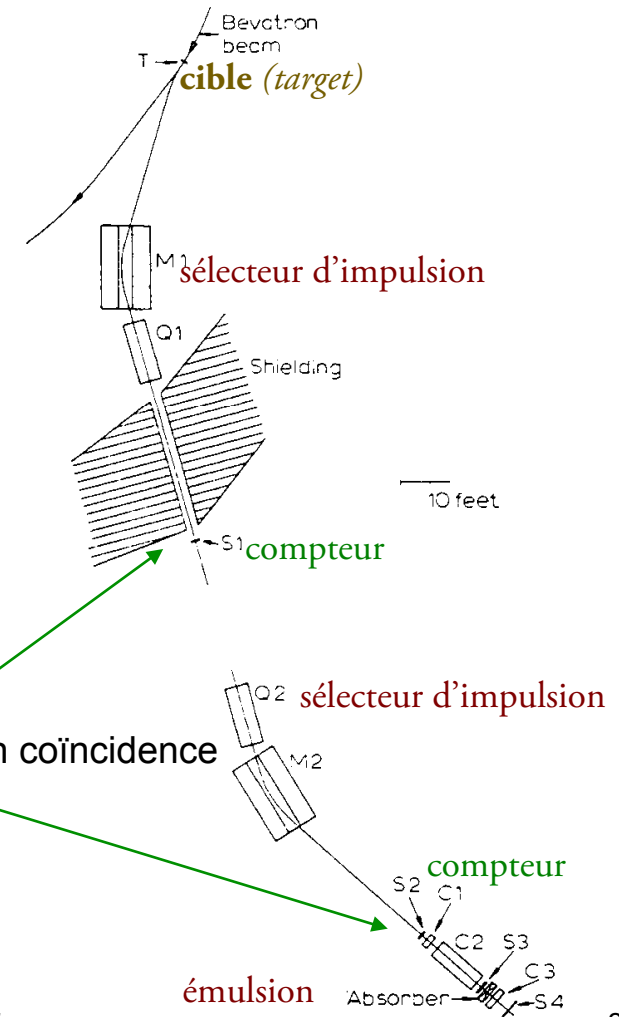
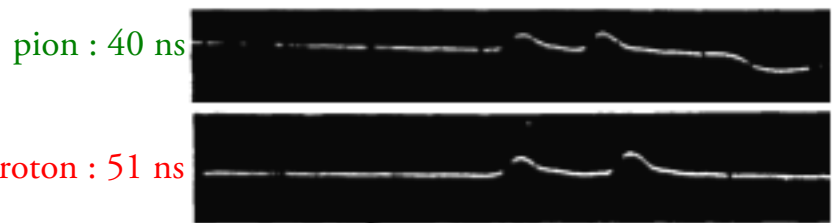


Antiproton (Segrè & Chamberlain 1955)

- 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 π^-
 - mesurer l'impulsion $mV \rightarrow$ **déviations magnétiques**
 - mesurer la vitesse V par temps de vol \rightarrow **compteurs en coïncidence**



La découverte des antiprotons (1955)

BUMS 4 B 1
YANKS 3 Y 5
 GAME 6

PROGRESS OF ANTI PROTON EXPERIMENT

NOTE: ALL RESULTS ARE PROVISIONAL & SUBJECT TO RECALL, KEEP THEM "IN THE FAMILY".

DETECTED: 38 negative particles, mass 940 ± 70 MeV (1840 ± 140 Me) [6.1 to 6.3 BeV]
 0 " when set for mass = 1670 Me; 8 expected if spectrograph had been set
 3 " " " " " " " " " " " " for mass 1840
 At reduced energy (4.8 to 5.1 BeV), set for 1840 Me, found 3 in a time 10 would occur at full energy
 PRESENT OPERATION: Set for mass 1840; Beam energy) 4.1 to 4.4 BeV 2050 Me; 17 expected
 { Fermi degenerates }
 { A most probable threshold is 5.1 BeV with lower limit at 4.4 BeV, for 1 stage process. }

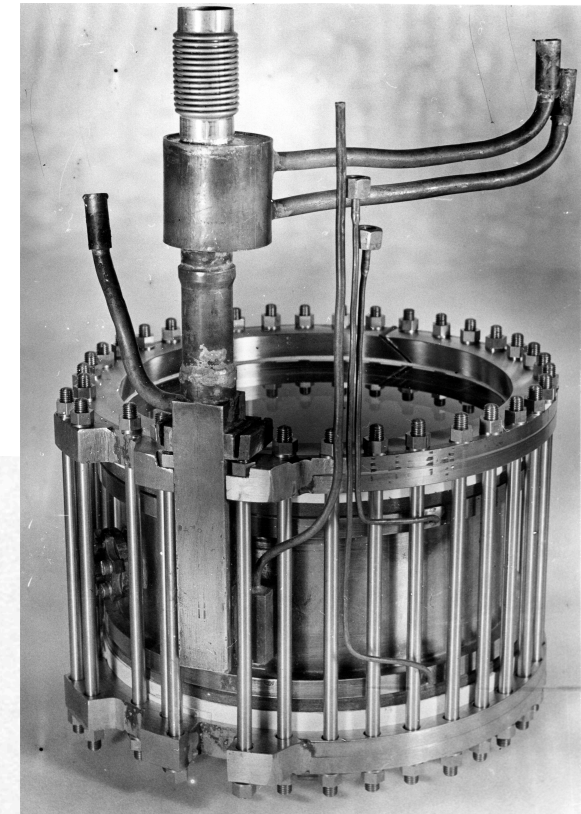
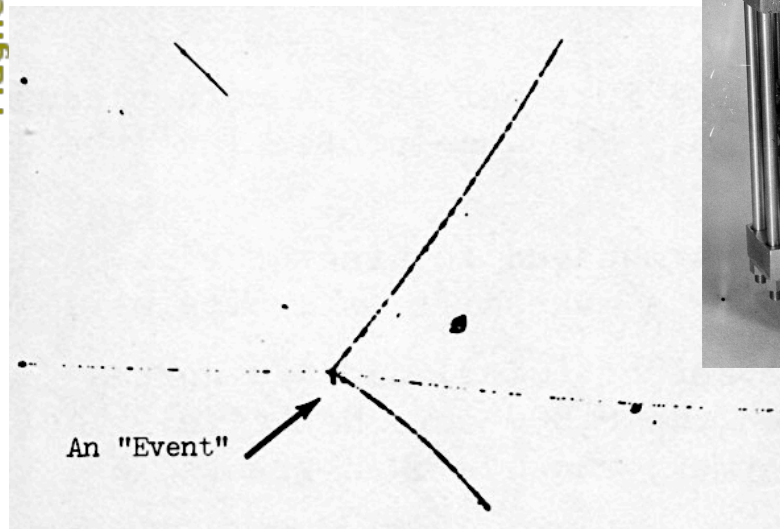
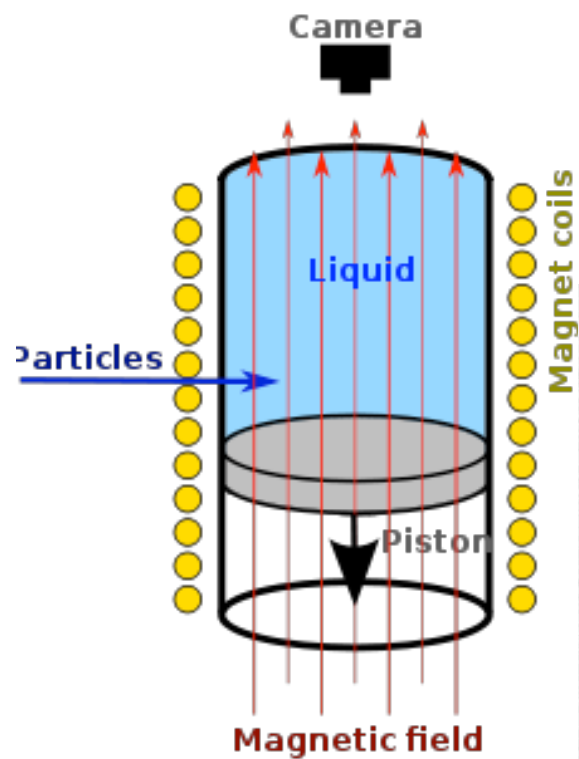
number neg. particles, p mass. 38 1
 number means 1,810,000 48000

Momentum of neg. particle beam: 1.187 BeV
 $\beta = \frac{\text{vel. of particle}}{\text{vel. of light}}$ of neg. particles of p mass: 0.78 c
 Energy " " " " " " " " " " " " 572 MeV

4:30 PM
OCT. 6

La chambre à bulles (1952)

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



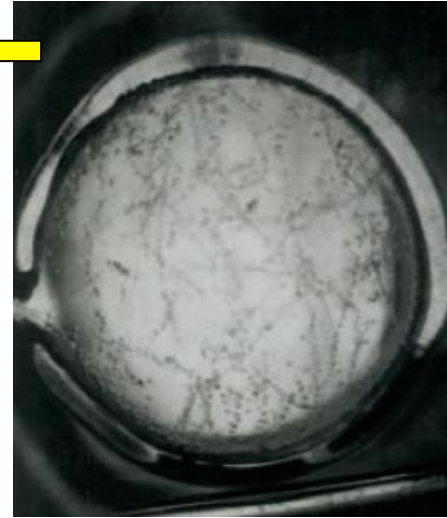
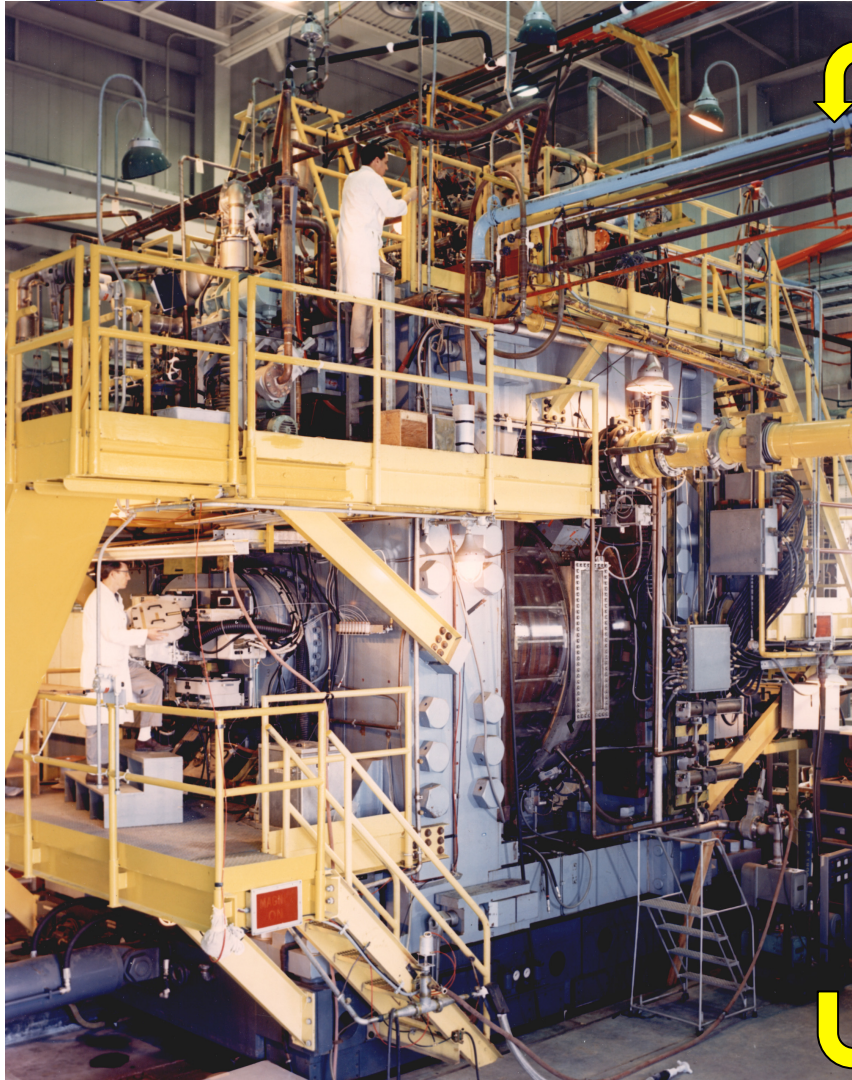


Donald Glaser

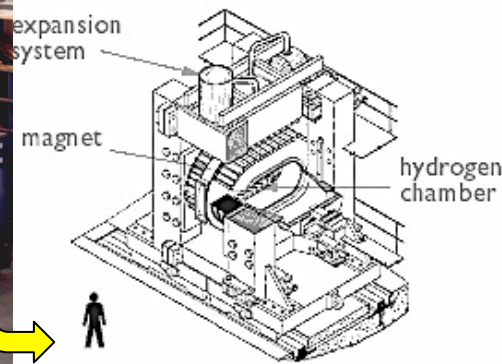


Chambre à bulles emplie de xénon liquide à Berkeley vers 1960

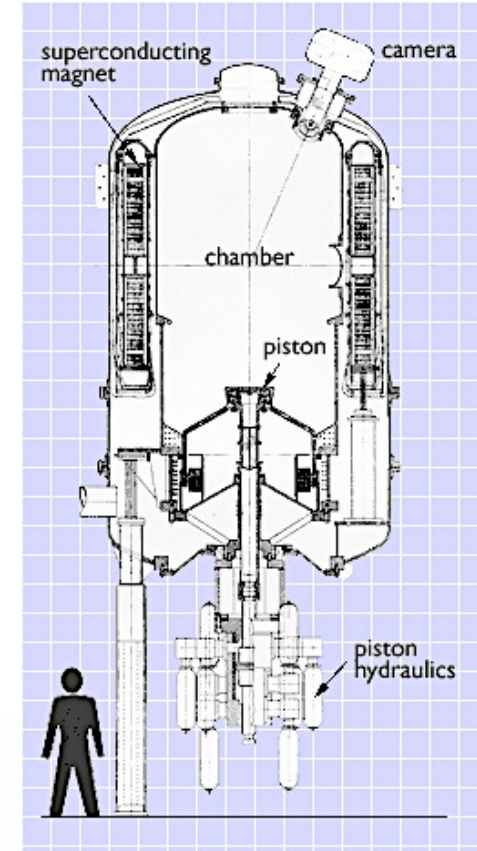
Les chambres à bulles grandirent très vite



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

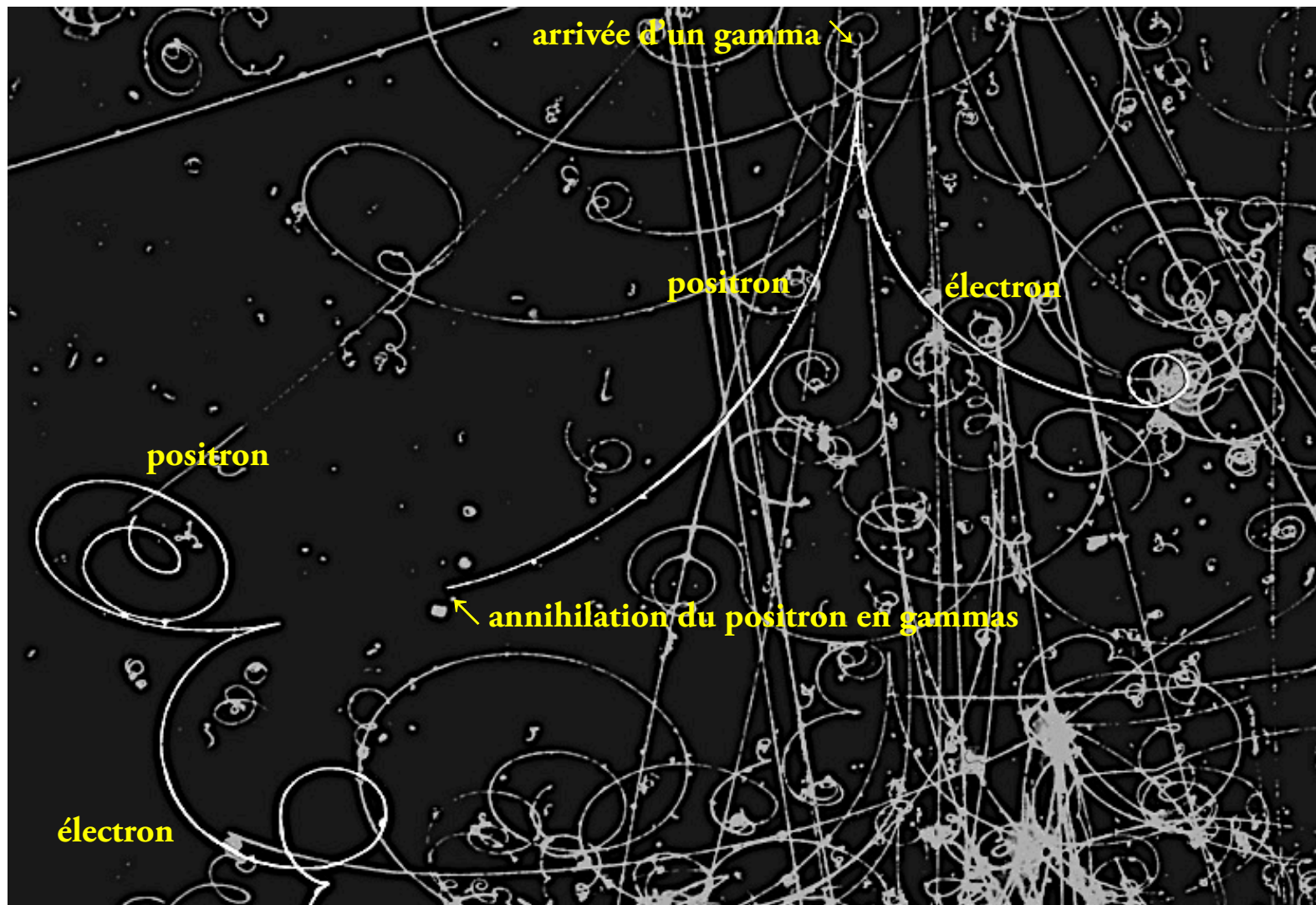


La chambre de 80 pouces de long à Brookhaven (1963)



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

Photo de chambre à bulles

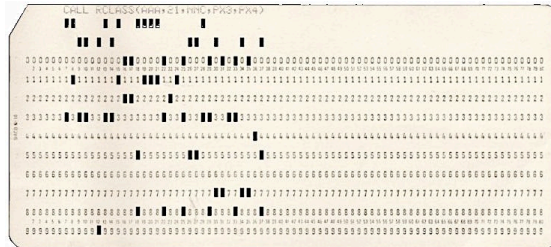


Scanning : le *Franckenstein* à Berkeley

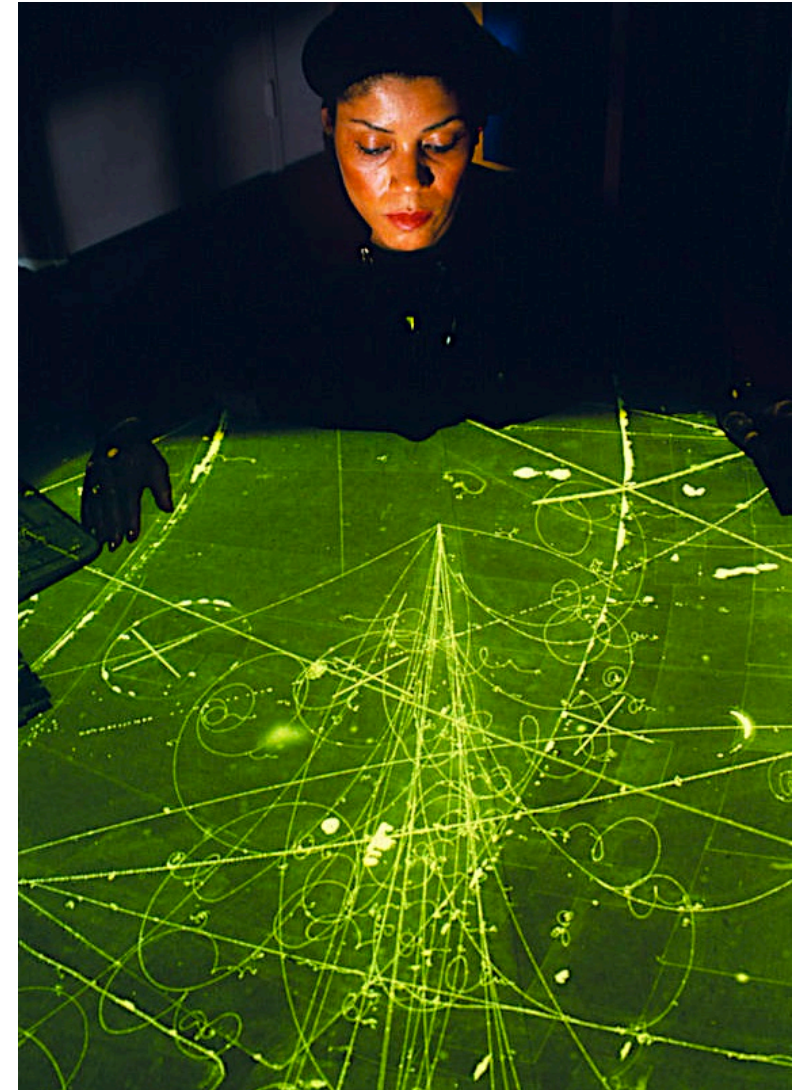


Scanning

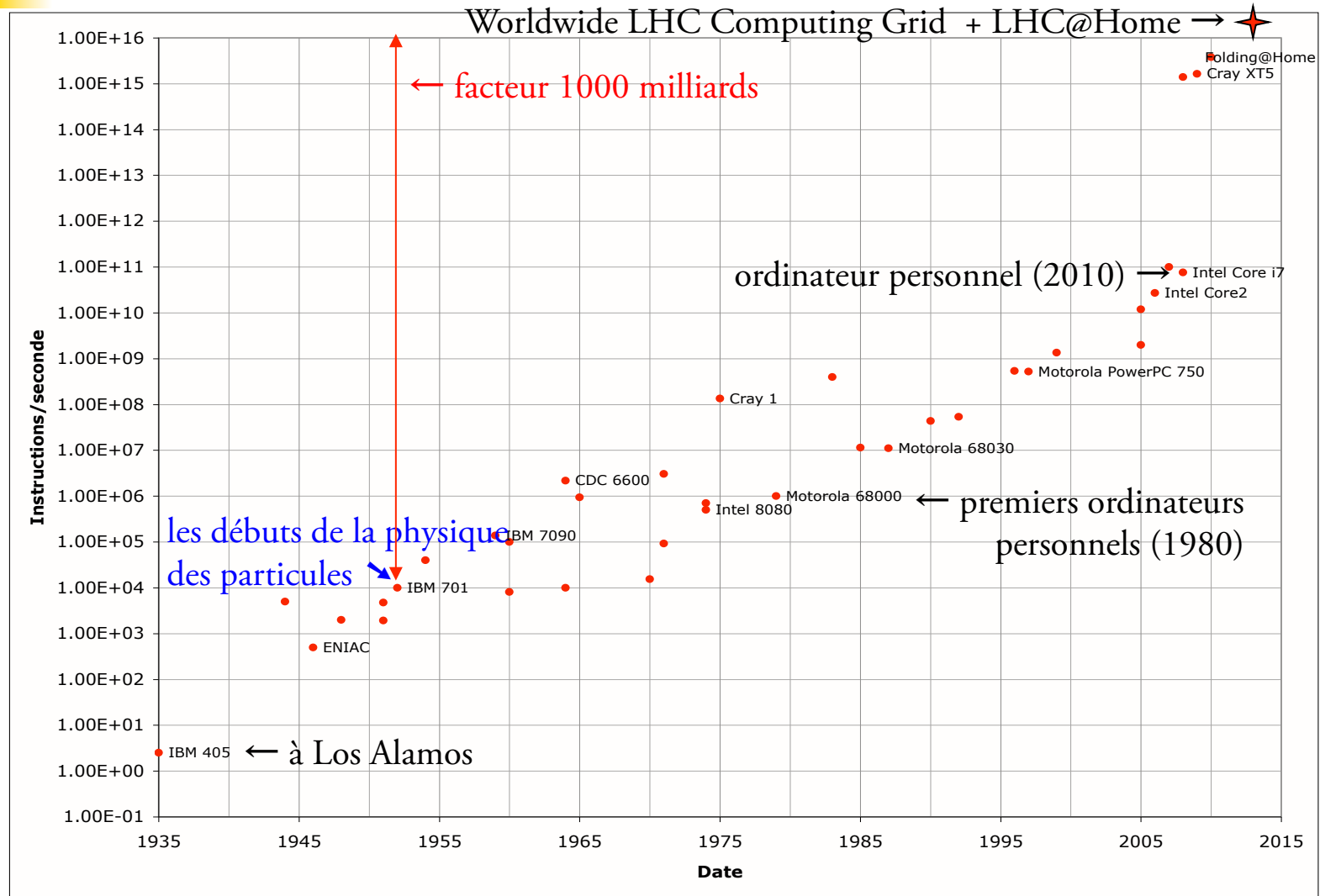
- Procédure répétitive
 - l'image (film 35 mm) est projetée
 - premier tri rapide, visuel, des photos
 - sélection des événements « intéressants »
 - la « scanneuse » place un capteur photosensible au début de *chaque* trace l'image
 - il la suit automatiquement et transmet sa position à la perforatrice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

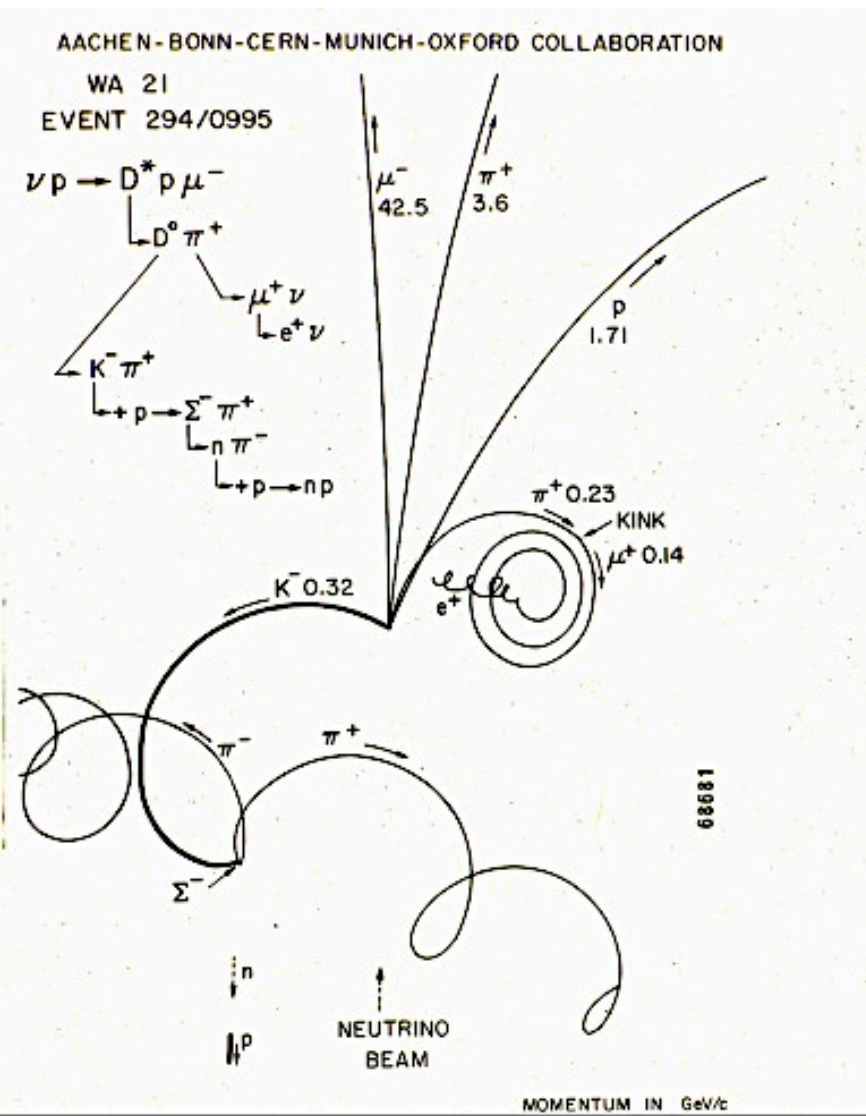
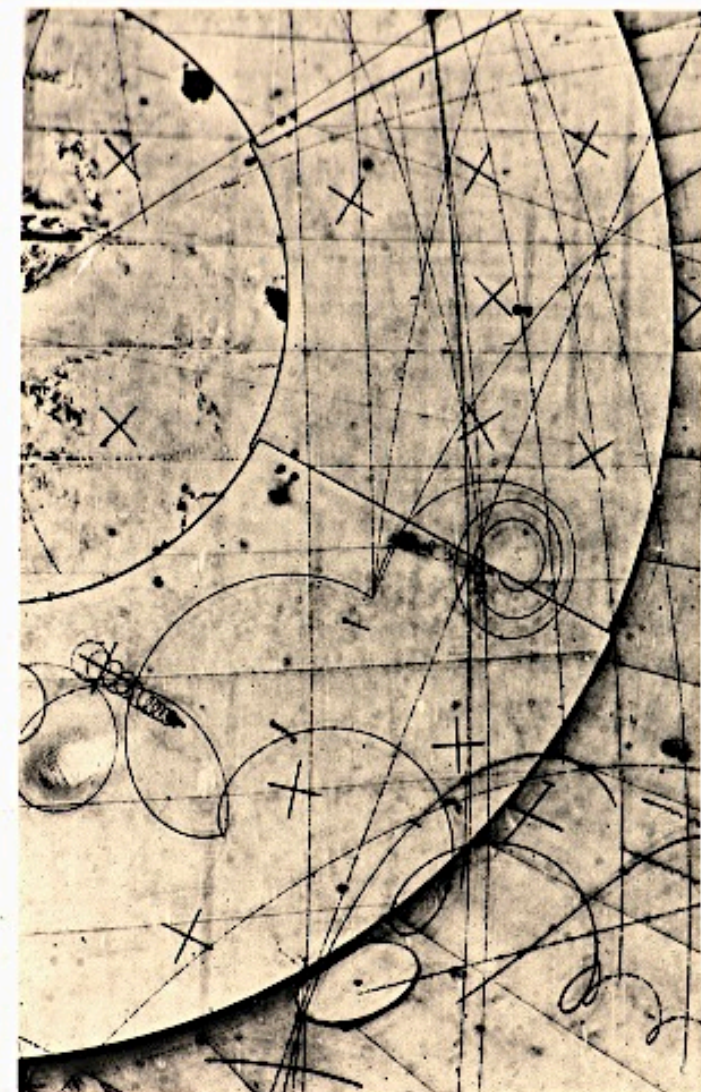


- les cartes sont données à un ordinateur (IBM 701 puis ses successeurs) qui calcule les trajectoires et donne les impulsions et une première identification des particules
- ➔ ~ 100 clichés analysés par jour en 1960



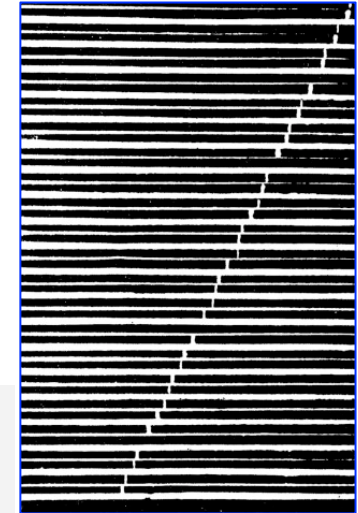
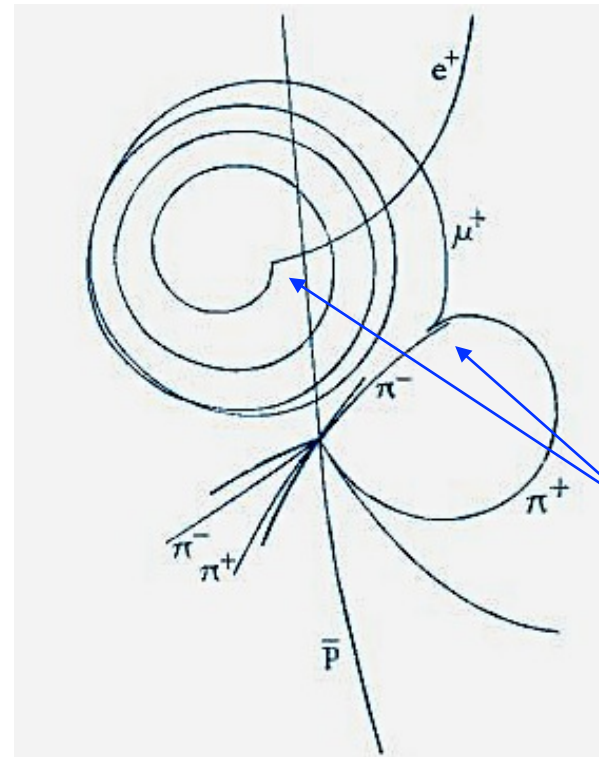
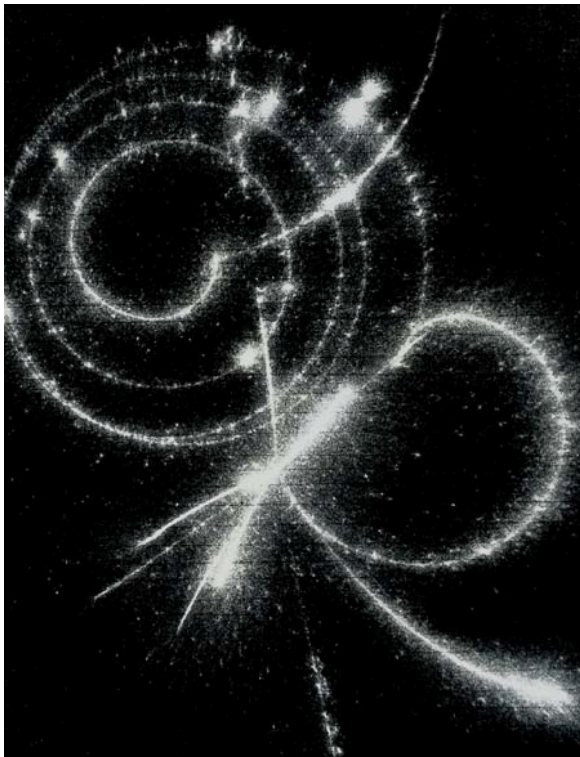
(Évolution de la puissance de calcul)

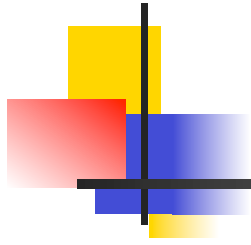




Chambres à étincelles (*spark chambers & streamer chambers*)

- 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)



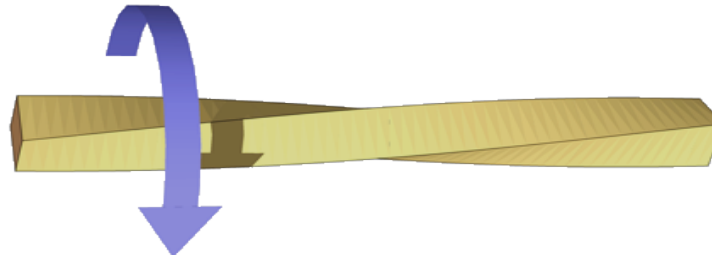
- Conservation = constance *dans le temps*
- Extension : constance lors d'une transformation (\pm virtuelle) à *un instant donné*
 - Transformation **spatiale** : translation, rotation, réflexion en miroir
 - Transformation **interne** : remplacement d'un atome/électron/quark par un autre
- Désintégration $p \rightarrow e^+ + \dots$ 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

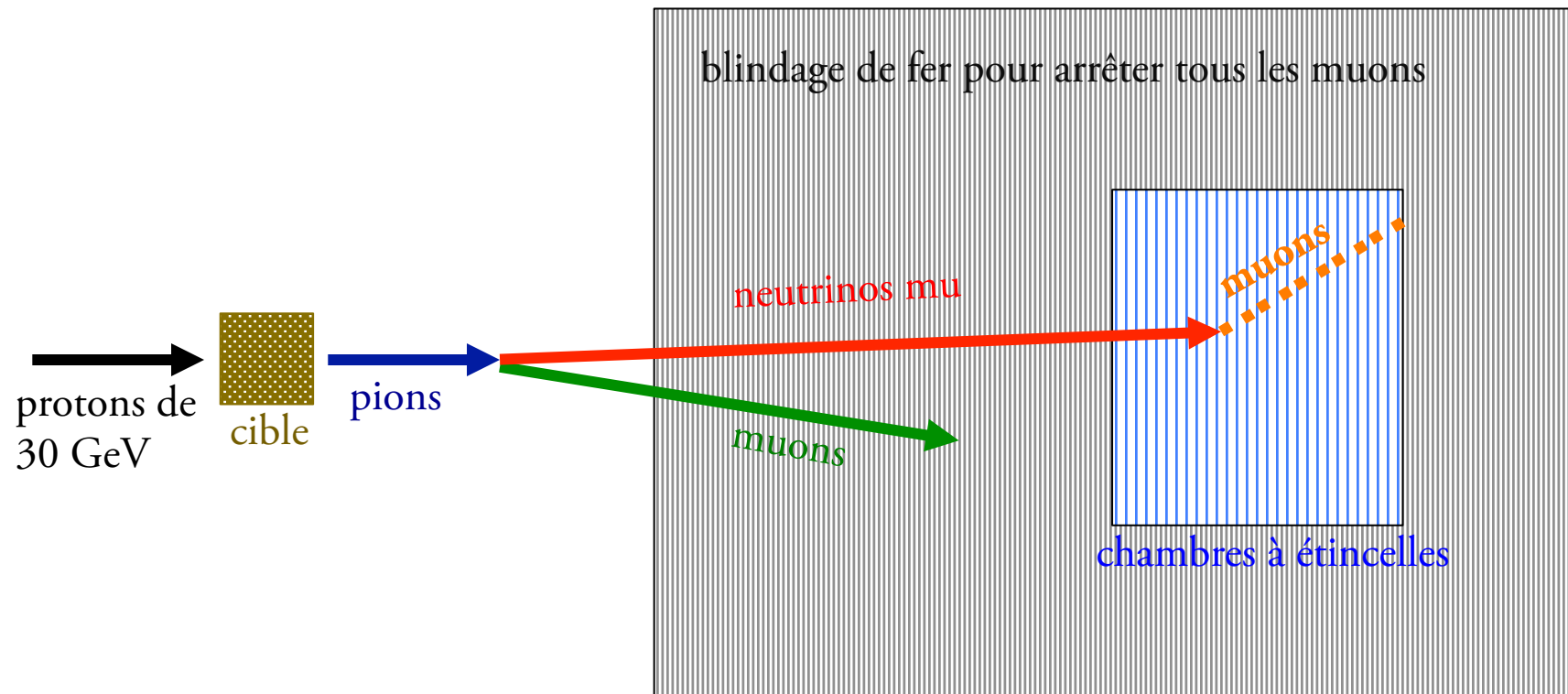
- Baryon
 - proton et neutron (= nucléon)
 - puis découverte progressive de particules du même genre mais plus lourdes (hypérons)
 - ➔ *nombre quantique baryonique conservé dans toutes les interactions*
 - Mésons
 - primary mesotron ➔ pi meson ➔ pion π (mundane mesotron ➔ mu meson ➔ muon μ)
 - puis découverte progressive de particules du même genre mais plus lourdes
 - mésons K , aussi de spin zéro, mésons ρ , ω 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

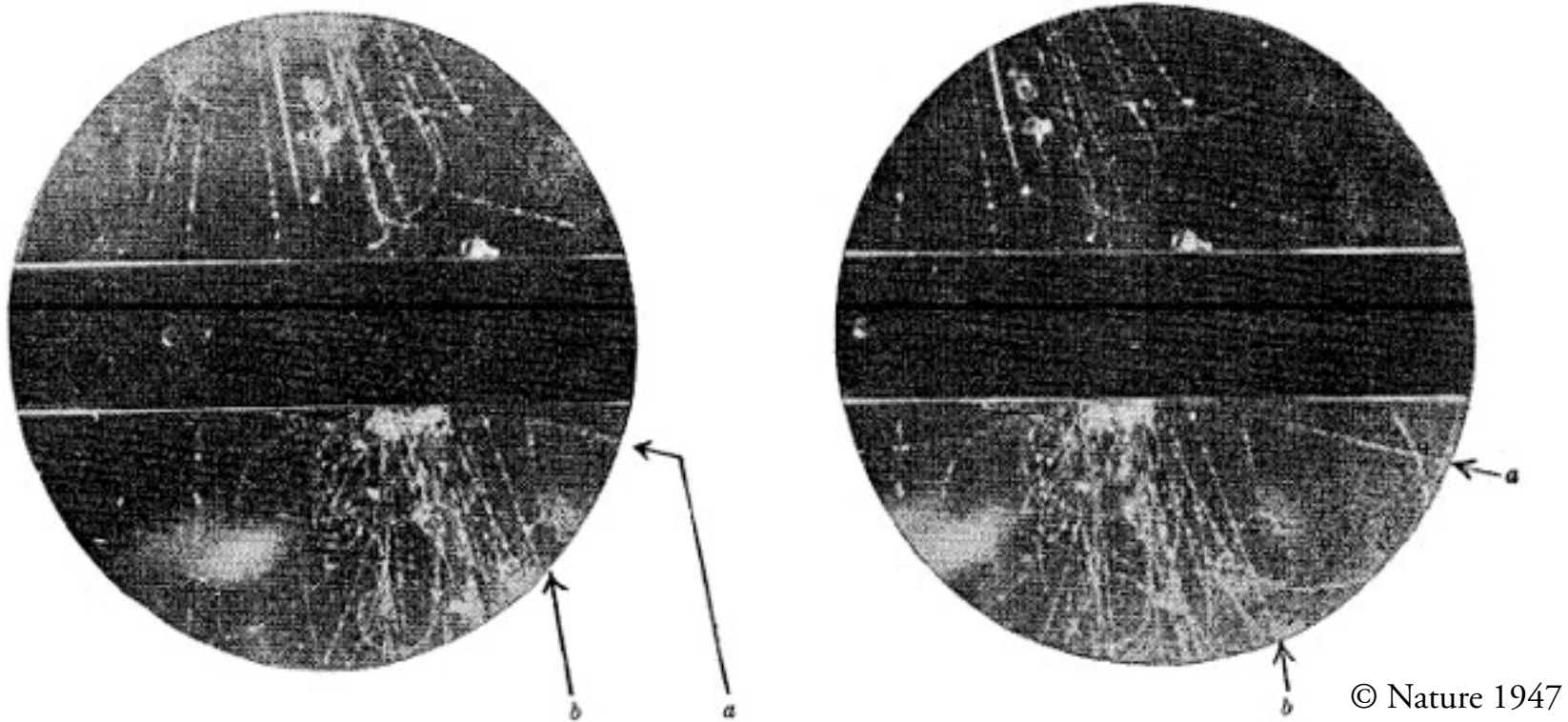
- Création d'un électron \Rightarrow création simultanée d'un positron ou d'un (anti)neutrino
 - \Rightarrow *nombre quantique leptonique L conservé par toutes les interactions*
 - \Rightarrow électron $L = +1 \Rightarrow$ positron $L = -1$
 - \Rightarrow neutrino rebaptisé antineutrino $L = -1$ (et 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 ν_e associé à l'électron et **un autre** associé au muon, ν_μ
 - \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 $500 \pm 80 \text{ MeV}$

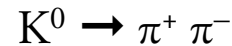


© Nature 1947



Particules V

- Confirmation par Anderson (Caltech)



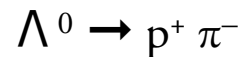
- Ces particules parurent *étranges* en raison de leur longue durée de vie $\sim 10^{-10}$ s
- [10^{-23} s pour l'interaction forte, 10^{-16} s pour le $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$]

- 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 Λ^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 opposés)
 - 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 Ξ^- (1952) puis Ξ^0 (1959) masse 1320 MeV S = -2
→ cascades : $\Xi \rightarrow \Lambda \rightarrow p$
 - 3 hypérons sigma Σ^+ et Σ^- (1953) puis Σ^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*)

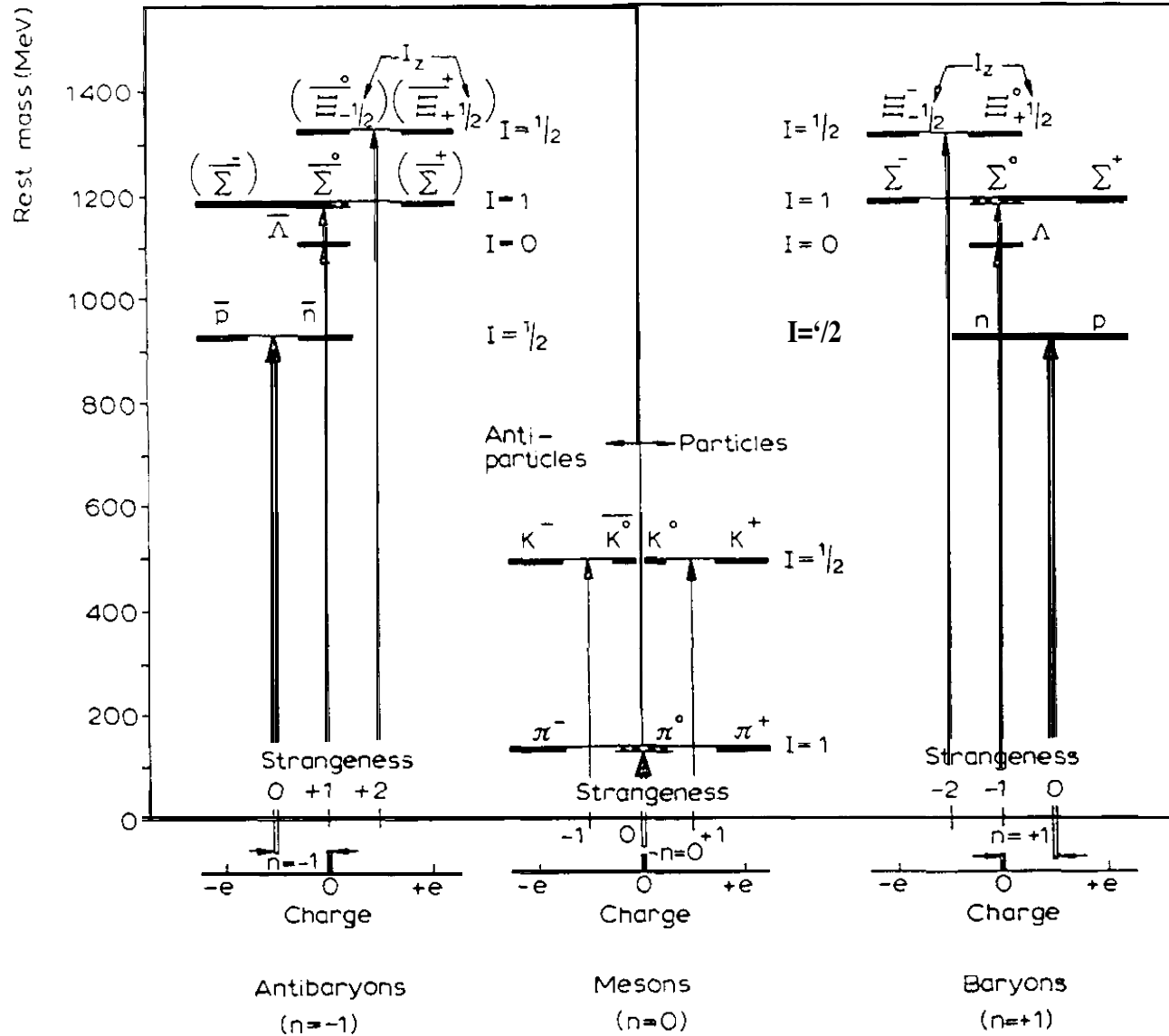
$$S = 2 \cdot Q - B$$

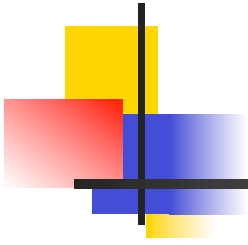
- nucléons : $Q = \frac{1}{2}$ $B = 1$ $\rightarrow S = 0$
- kaons : $Q = \frac{1}{2}$ $B = 0$ $\rightarrow S = +1$
- Λ^0 : $Q = 0$ $B = 1$ $\rightarrow S = -1$
- seul Ξ^- était alors connu, $B = 1$ et $S = -2$ $\rightarrow Q = -\frac{1}{2}$ \rightarrow il devait exister un Ξ^0
- (découvert à Brookhaven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

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

- -1 pour Λ^0 et les Σ (1100 et 1200 MeV)
- -2 pour Ξ^0 et Ξ^- (1300 MeV) ↙ modèle des quarks (Gell-Mann, Zweig)
- -3 pour...? \rightarrow oui, pour Ω^- (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 !

