

Physique des Particules et Physique Nucléaire

PHYS-F305

Année 2025-2026

Première partie - L. Favart

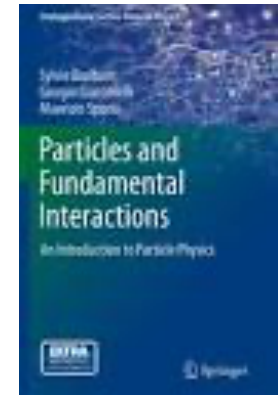
II - Moyens d'investigation

Références Bibliographiques

1. Particles and Fundamental Interactions

Sylvie Braibant, Giorgio Giacomelli, Maurizio Spurio

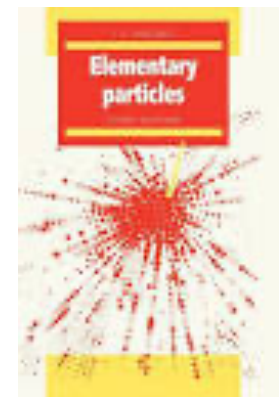
Ed. Springer



2. Elementary particles

I. S. Hughes

Ed. Cambridge University Press



3. Particle Physics - CERN lectures

David Tong

<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/particle.html>

Contenu Chapitre II

1. Où trouver des particules ?

Sources radioactives

Réacteurs nucléaires

Rayonnement cosmique

Accélérateurs (partie 1)

2. Comment détecter les particules (introduction)?

Nécessité d'une détection indirecte

Détection des particules chargées

Détection des particules neutres

La radioactivité

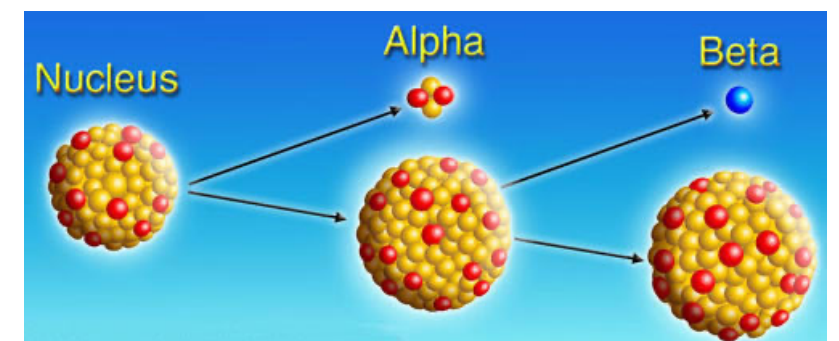
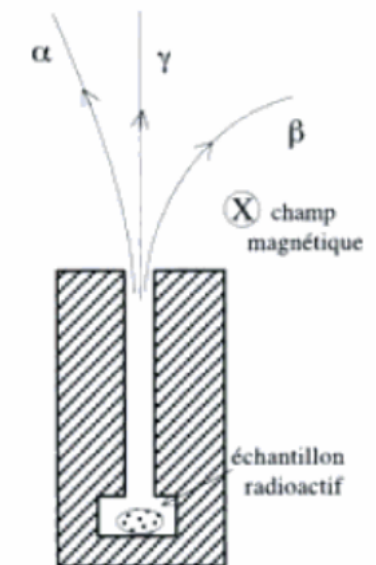
- 1896 Henri Becquerel : découverte de la radioactivité - Uranium
- juste après - Marie Curie - Radium

Sources radioactives

- alpha (α) - émission de particules α , c'est-à-dire des noyaux d'He
- bêta (β) - émission d'électrons (en fait aussi de neutrinos)
- gamma (γ) - émission de photons

Quelques exemples de radiations naturelles et leurs caractéristiques :

source	type	temps 1/2 vie	émission et énergie
^{90}Sr	β	29 ans	e^- jusqu'à 2.3 MeV
^{60}Co	γ	5.3 ans	γ de 1.2 MeV
^{55}Fe	γ	2,7 ans	γ de 6 keV
^{226}Ra	α	16000 ans	α de 4.8 MeV



Rayonnement cosmique



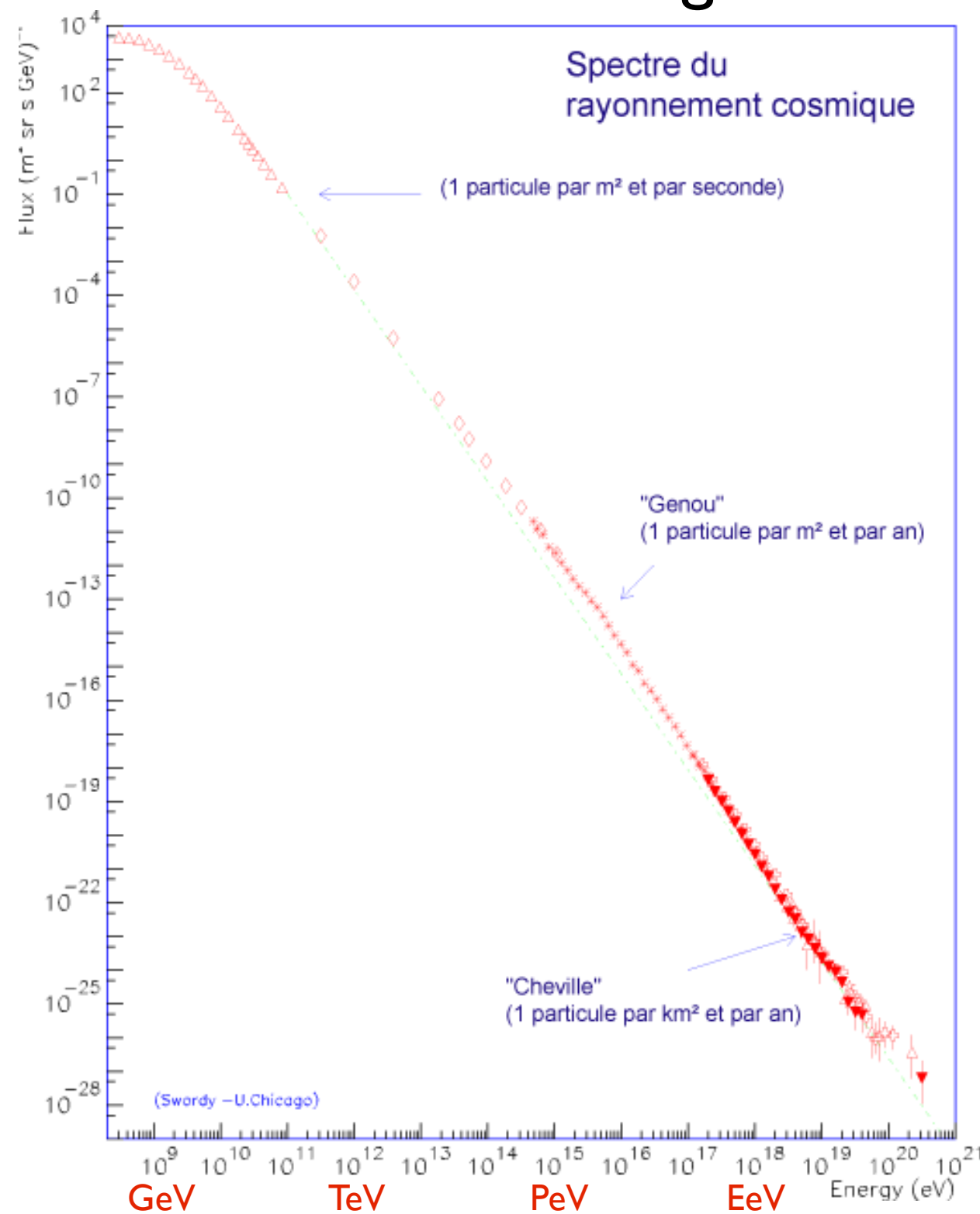
- 1938 Pierre Auger



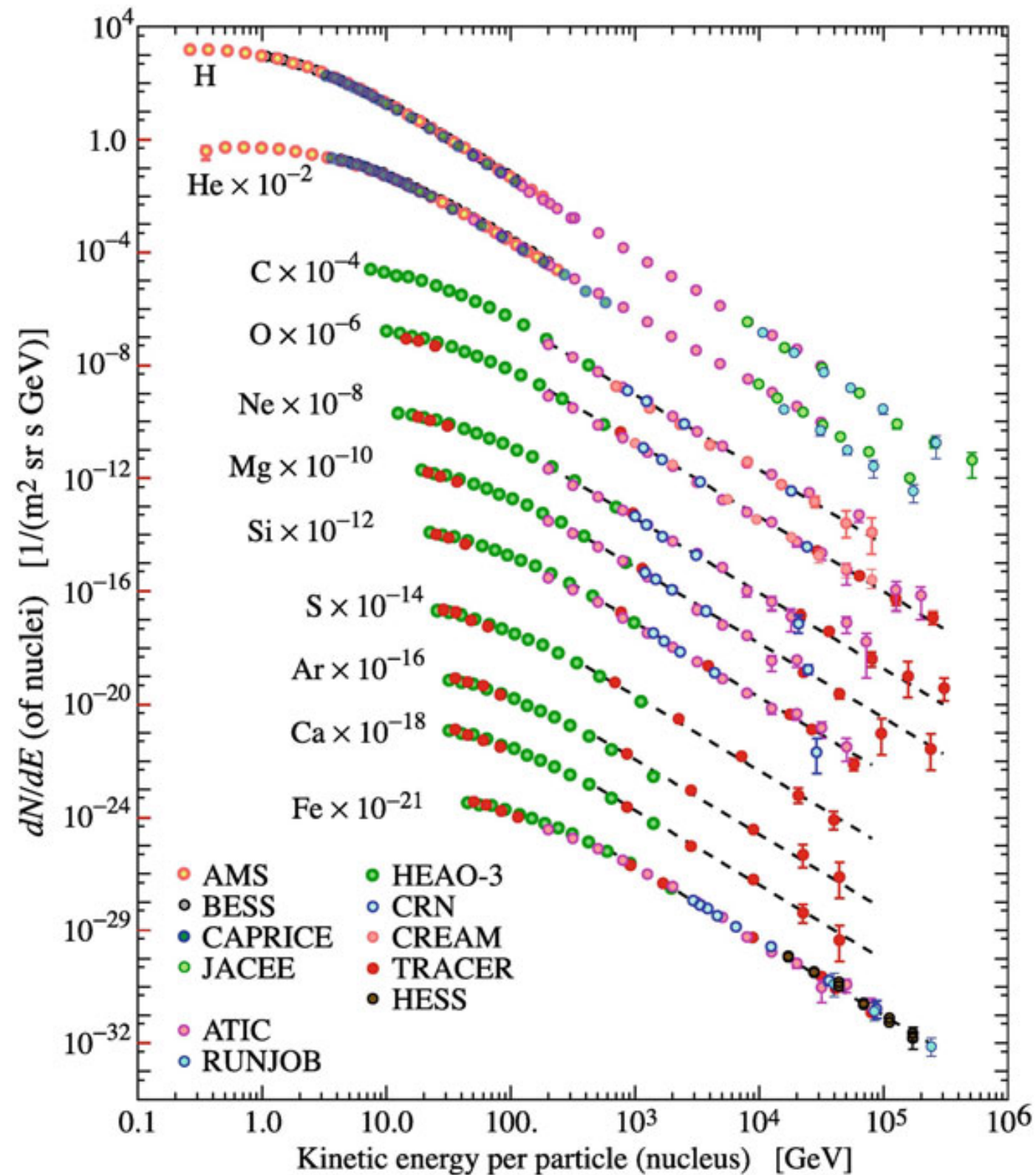
Prof. Piccard (ULB): 1931 premier vol stratosphérique

Rayonnement cosmique

Particules chargées

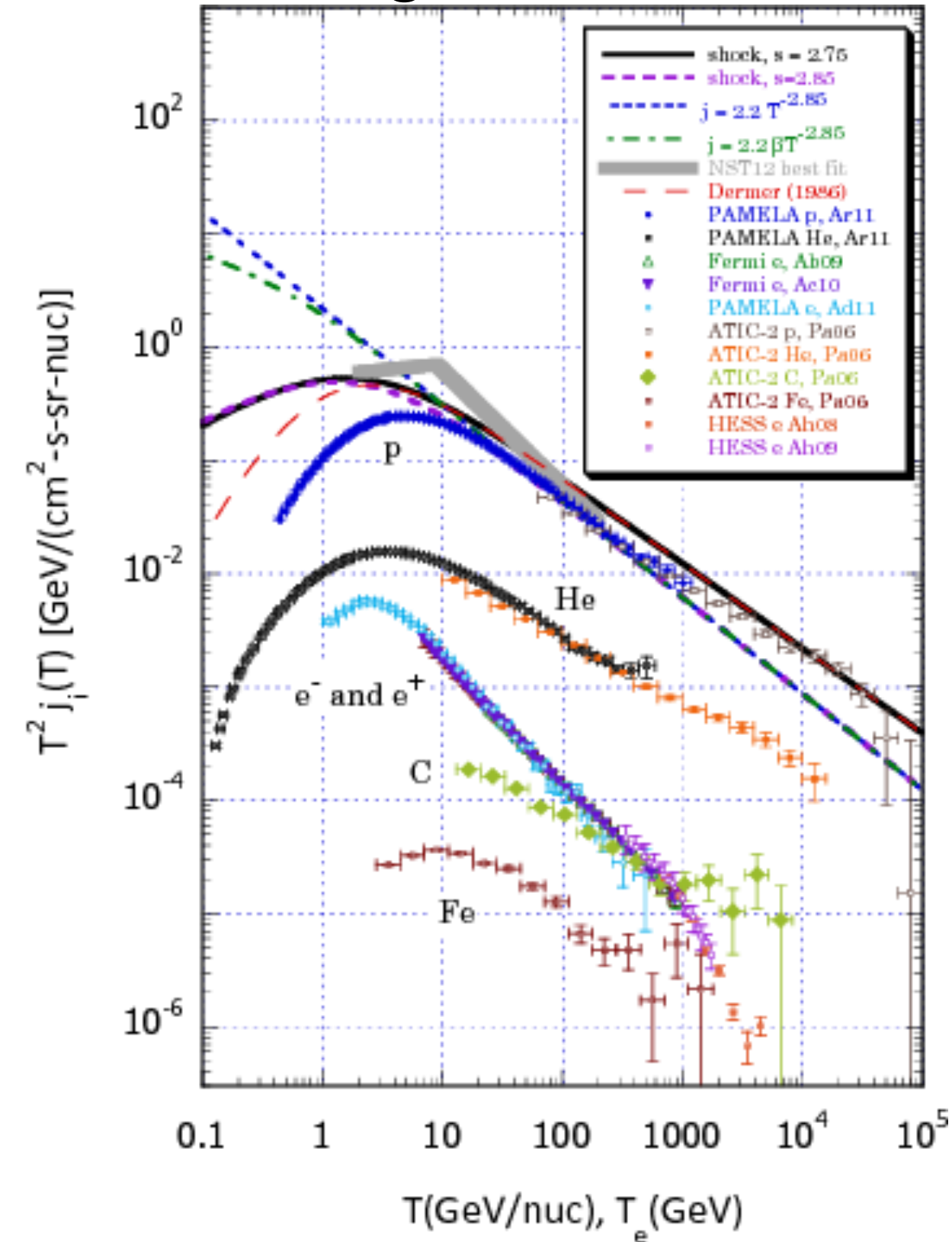


Rayonnement cosmique noyaux (chargés)

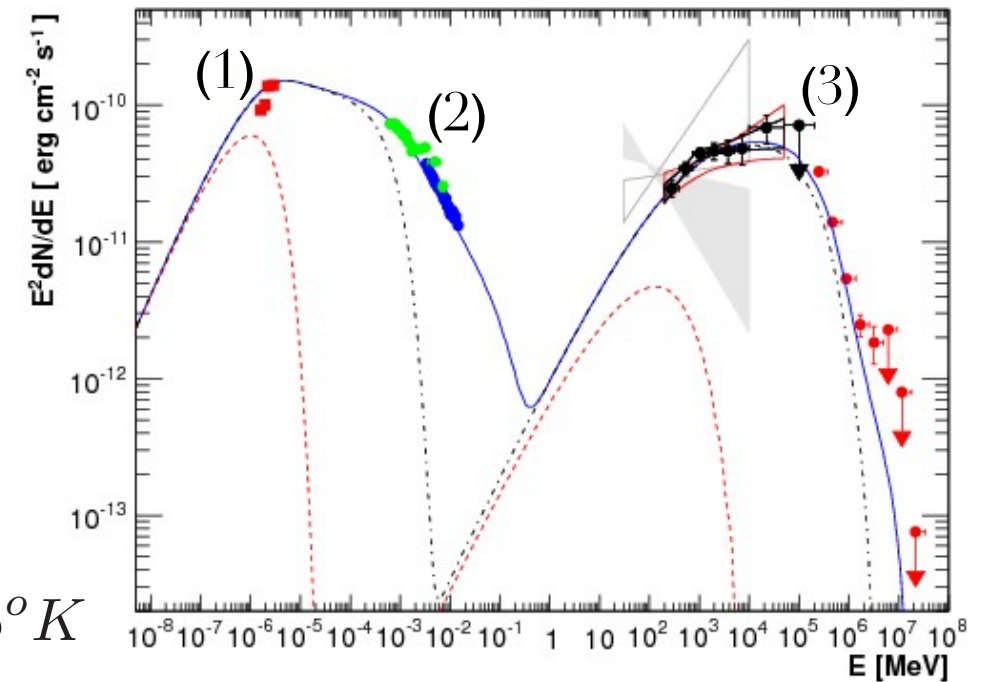


Rayonnement cosmique

Chargées



Photons

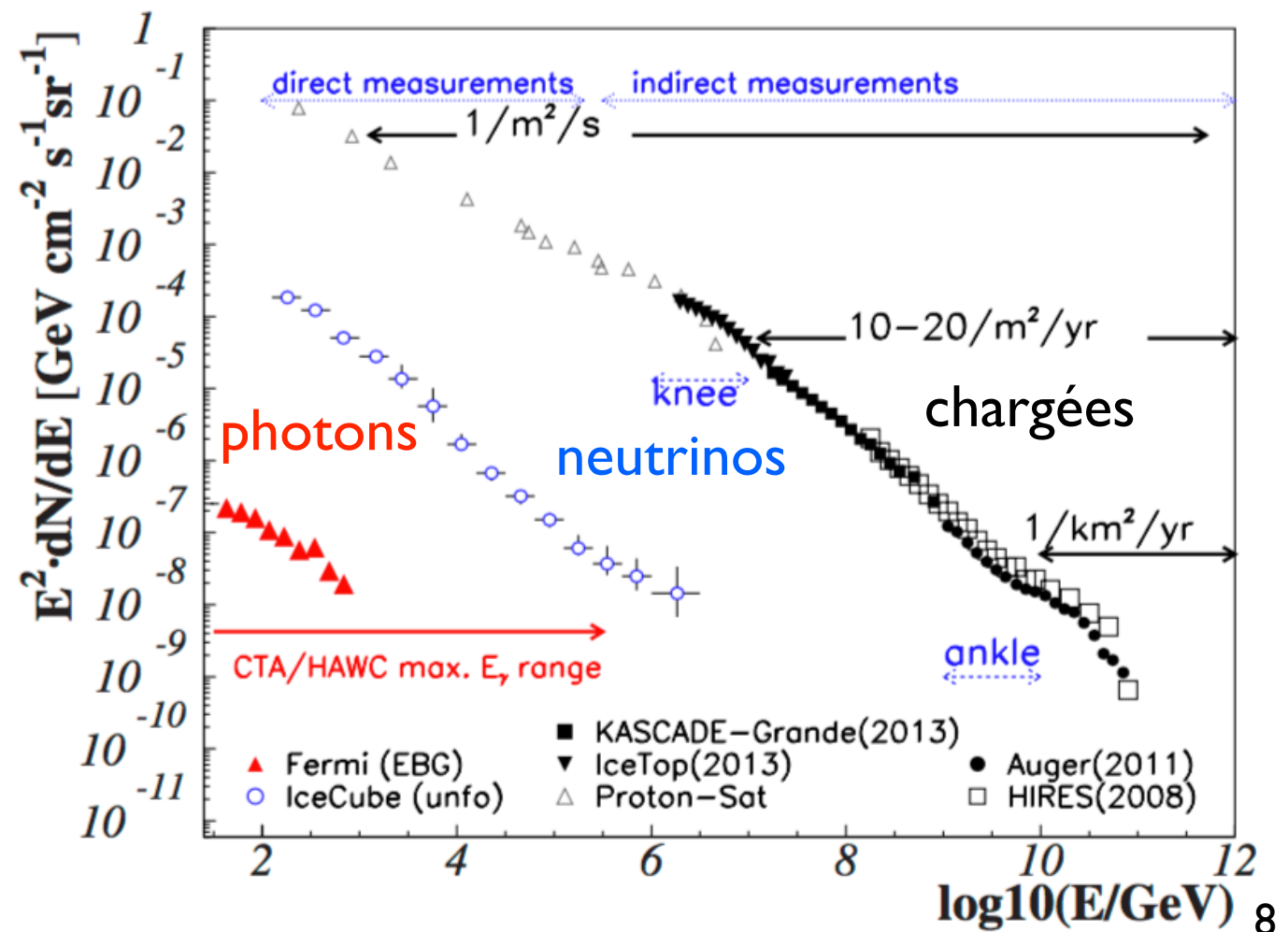


$$1\text{eV}/k_b = 11605^\circ K$$

(1) : fond diffus cosmologique à 3°K

(2) : rayonnement du corps noir entre 3.10³ et 3.10⁴ °K

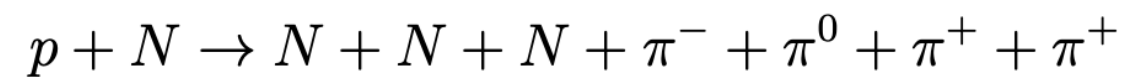
(3) : accélération par processus Compton $\gamma+p \rightarrow \gamma+p$



Rayonnement cosmique

Interaction d'une particule du rayonnement cosmique dans la haute atmosphère

par exemple:

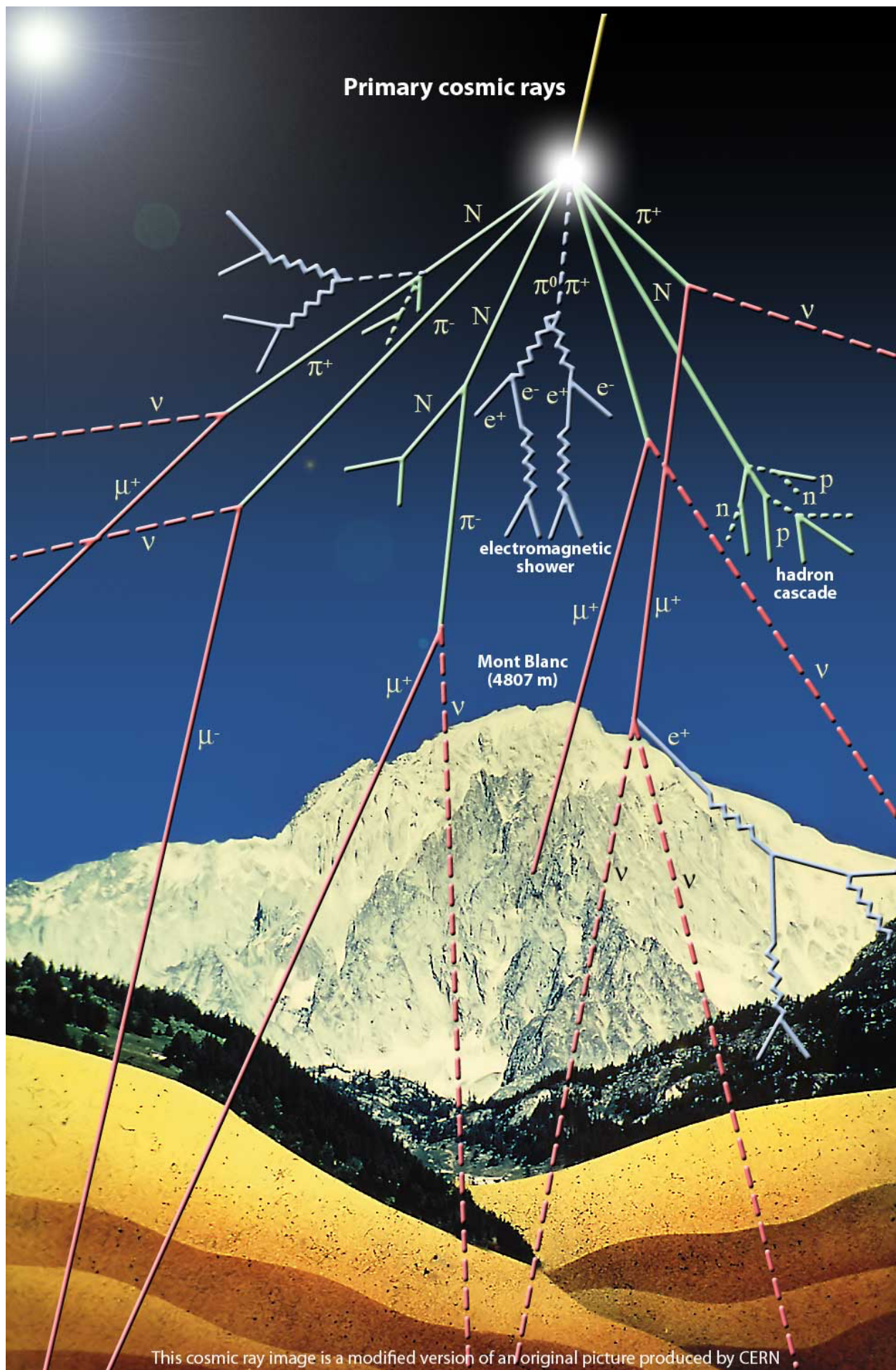


désintégration	temps de vie (τ)
$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	10^{-16} s
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	10^{-8} s
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	10^{-6} s

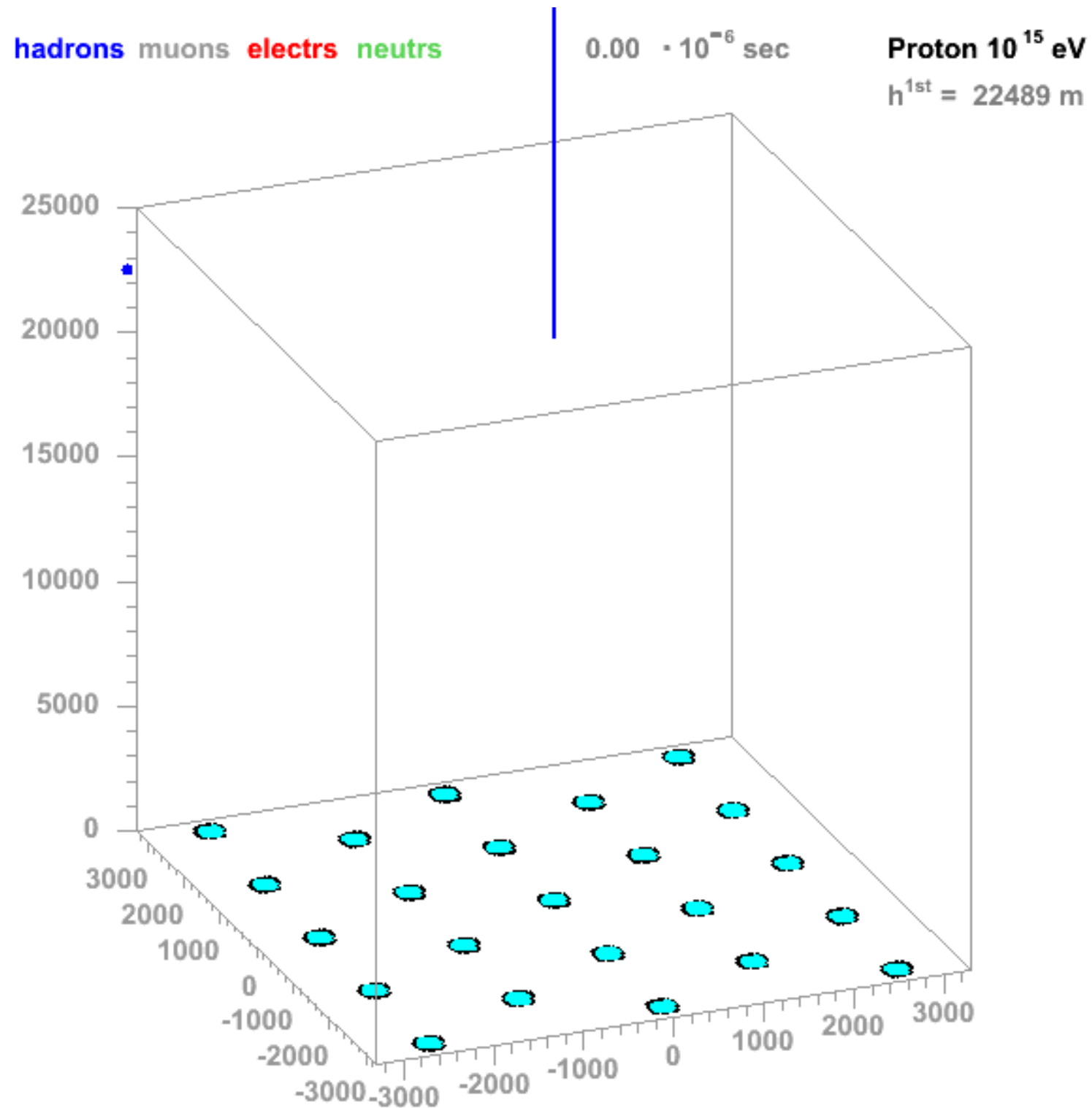
distance parcourue:

$$d = \beta \gamma c \tau \quad \text{où} \quad \beta = v/c \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

A haute énergie $\beta \simeq 1$ et $\beta \gamma = P/m$



Rayonnement cosmique



J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe

Simulation d'une gerbe issue du rayonnement cosmique dans la haute atmosphère

Accélérateurs

Objectifs :

- provoquer en abondance et de manière contrôlée des interactions entre particules
- étudier leur structure interne
- étudier leurs interactions
- créer de nouvelles particules

Choix :

- particules chargées et stables
- autres possibilités avec des faisceaux secondaires

Mode opératoire :

- cible fixe
- collisionneur

Principe de fonctionnement :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} \right)$$

seul le champ électrique peut accélérer :

$$\Delta E_{\text{cin}} = \int \vec{F} \cdot \vec{v} \, dt$$

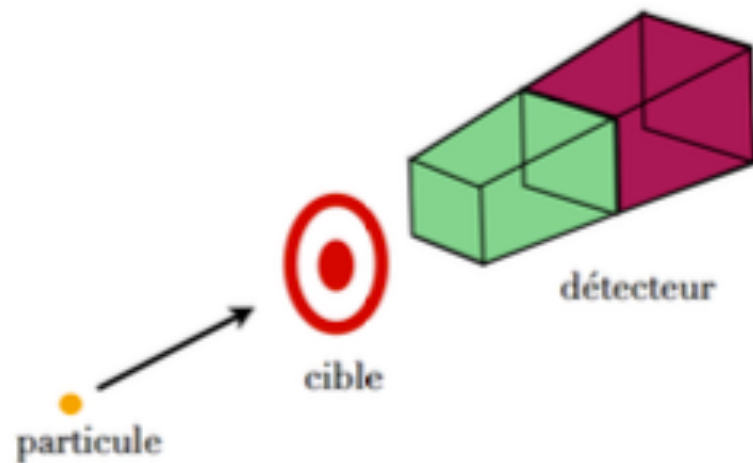
Accélérateurs

Cible fixe

$$p_A = (E_A, 0, 0, E_A)$$

$$p_B = (m_B, 0, 0, 0)$$

$$\rightarrow s = 2E_A m_B$$



Mode collisionneur

$$p_A = (E_A, 0, 0, E_A)$$

$$p_B = (E_B, 0, 0, -E_B)$$

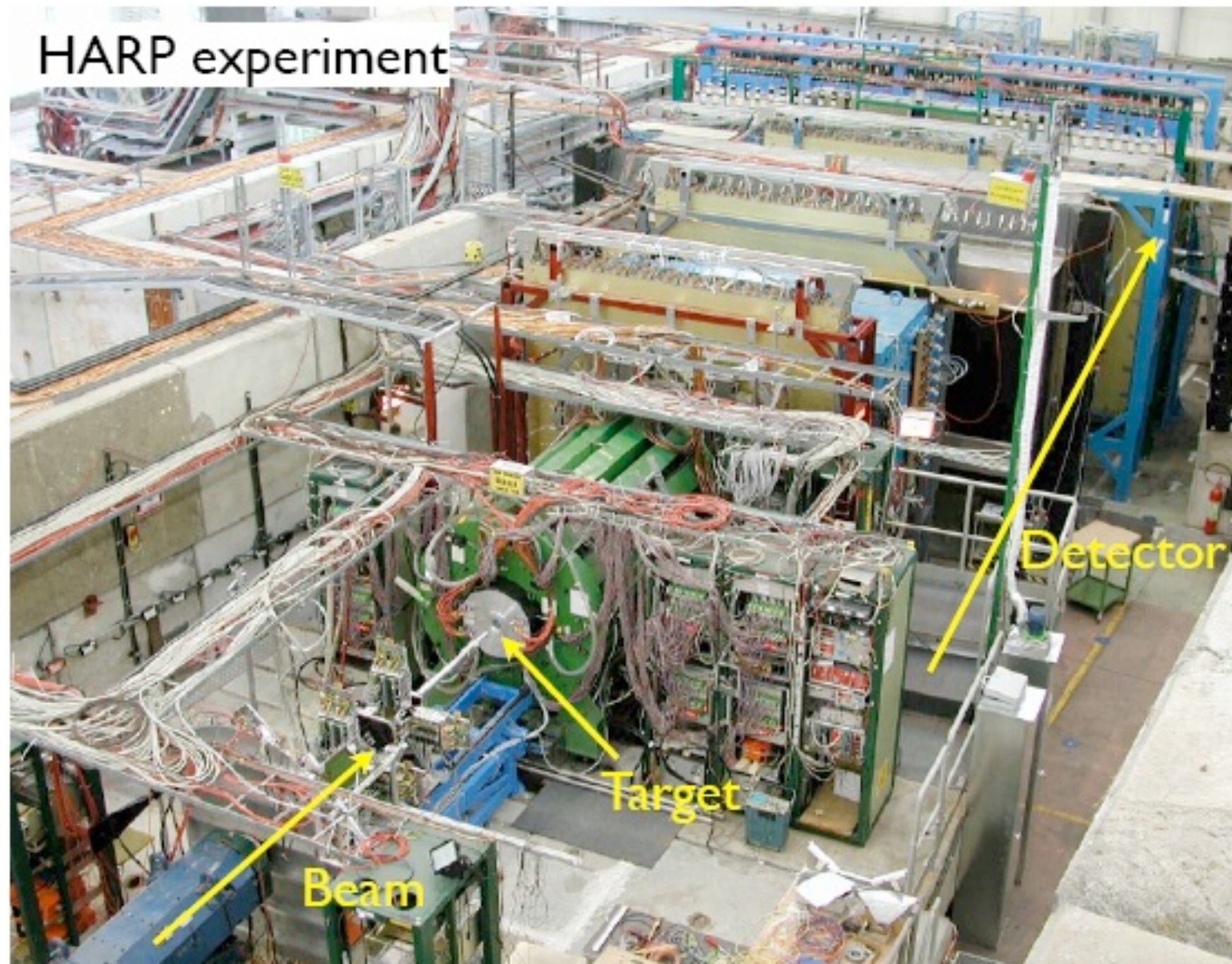
$$\rightarrow s = 4E_A E_B$$

si les faisceaux sont symétriques : $\sqrt{s} = 2E$

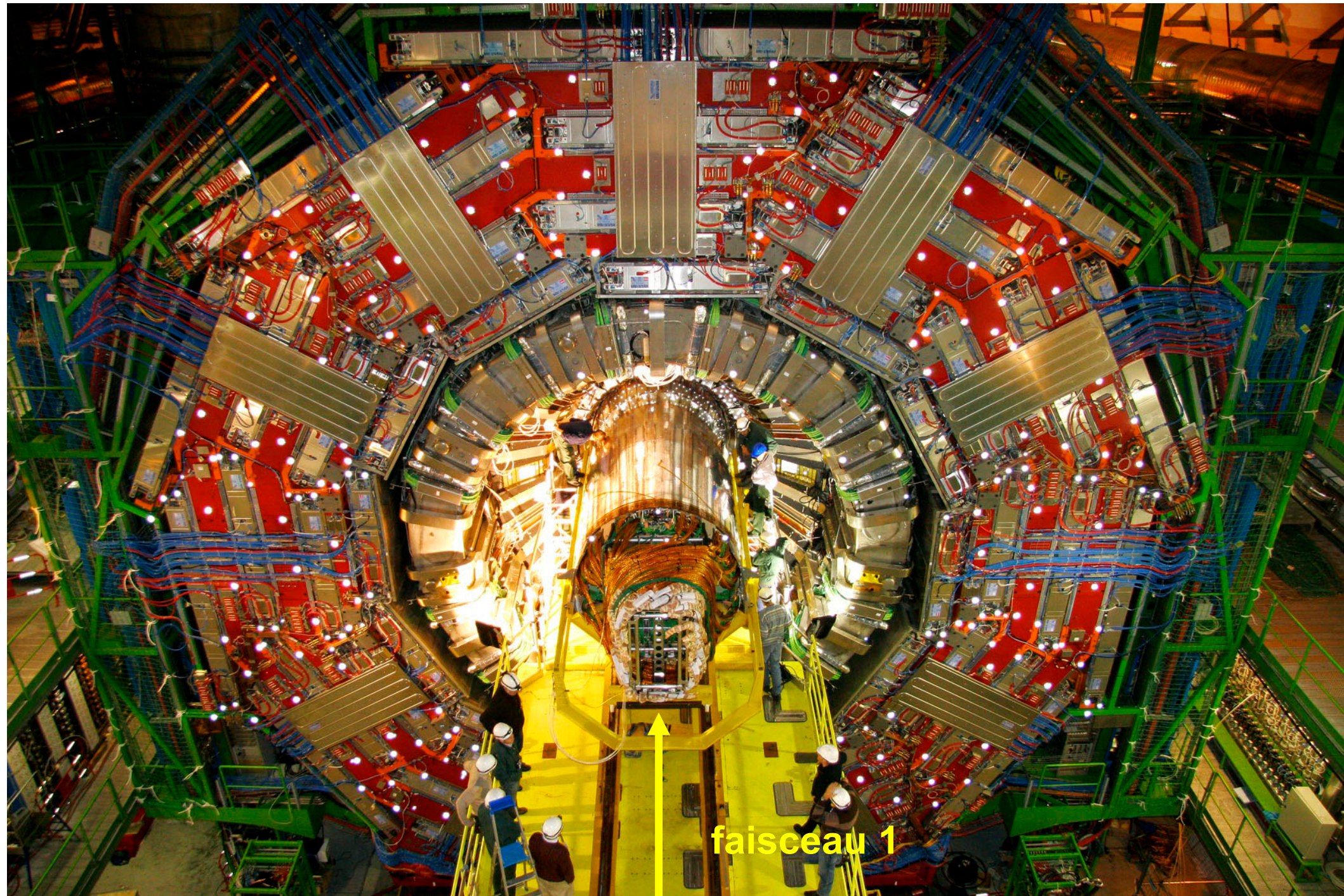


$$s = m_{AB}^2 = (p_{A+B})^\mu (p_{A+B})_\mu = (E_A + E_B)^2 - (\vec{p}_A + \vec{p}_B)^2$$

Accélérateurs - cible fixe



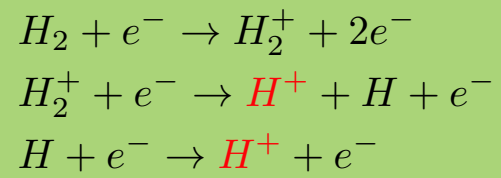
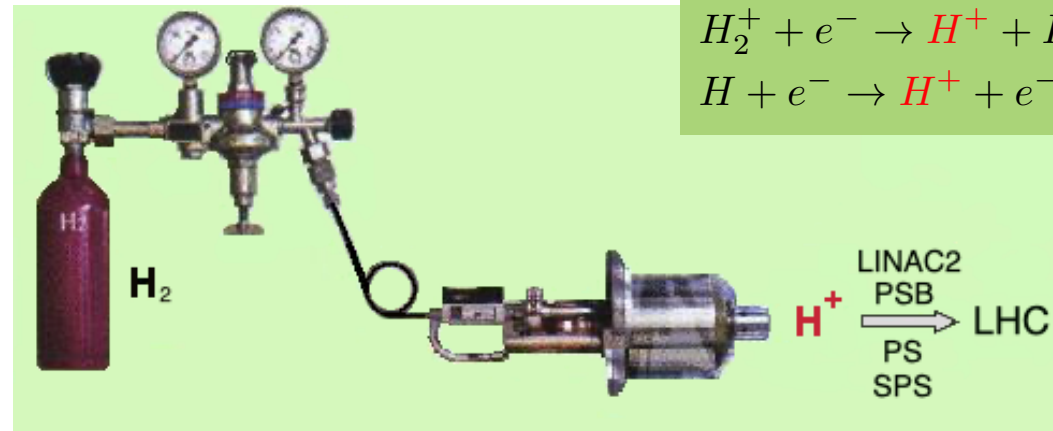
Accélérateurs - collisionneur



Entrée du tube à vide dans le détecteur CMS

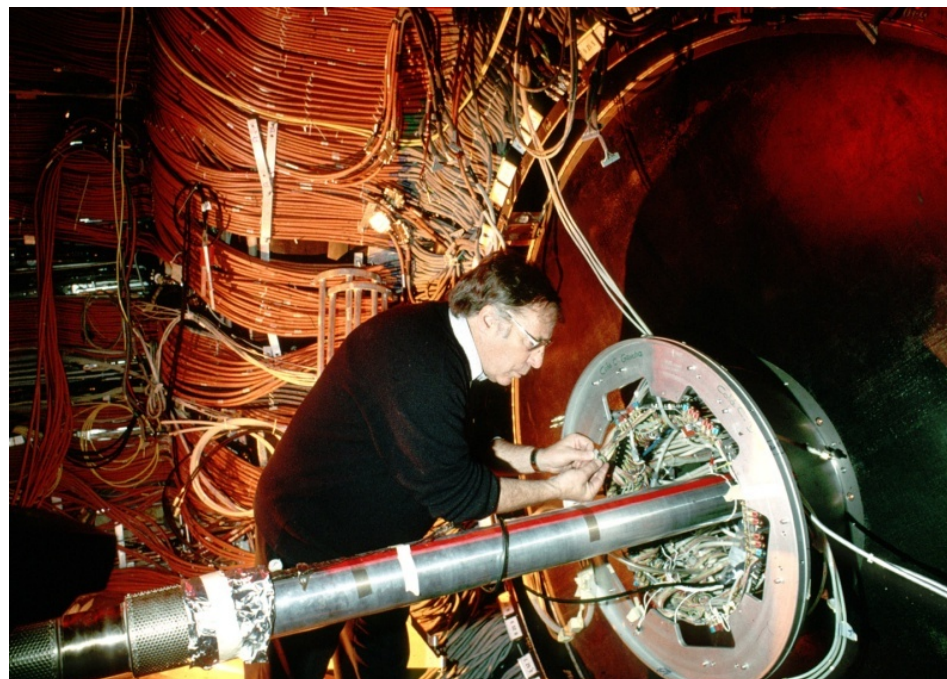
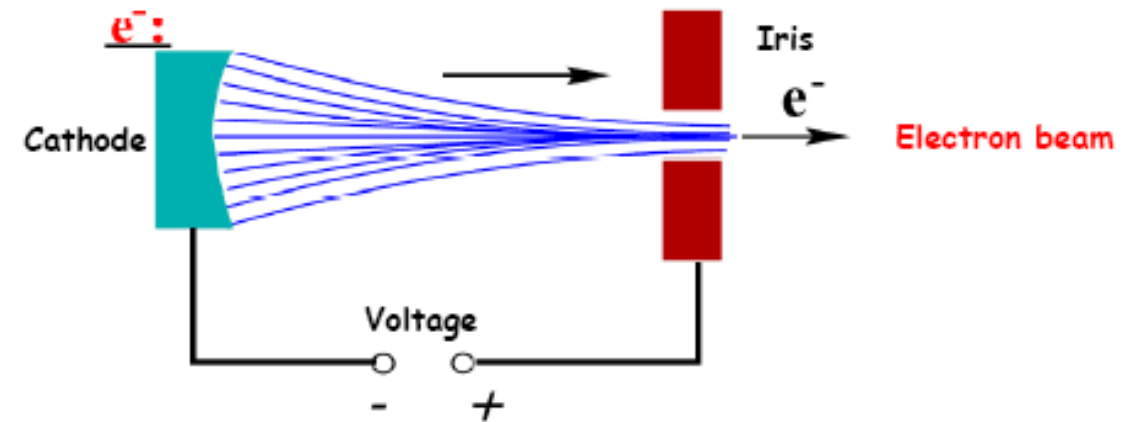
Sources de protons/électrons

Source de protons du CERN



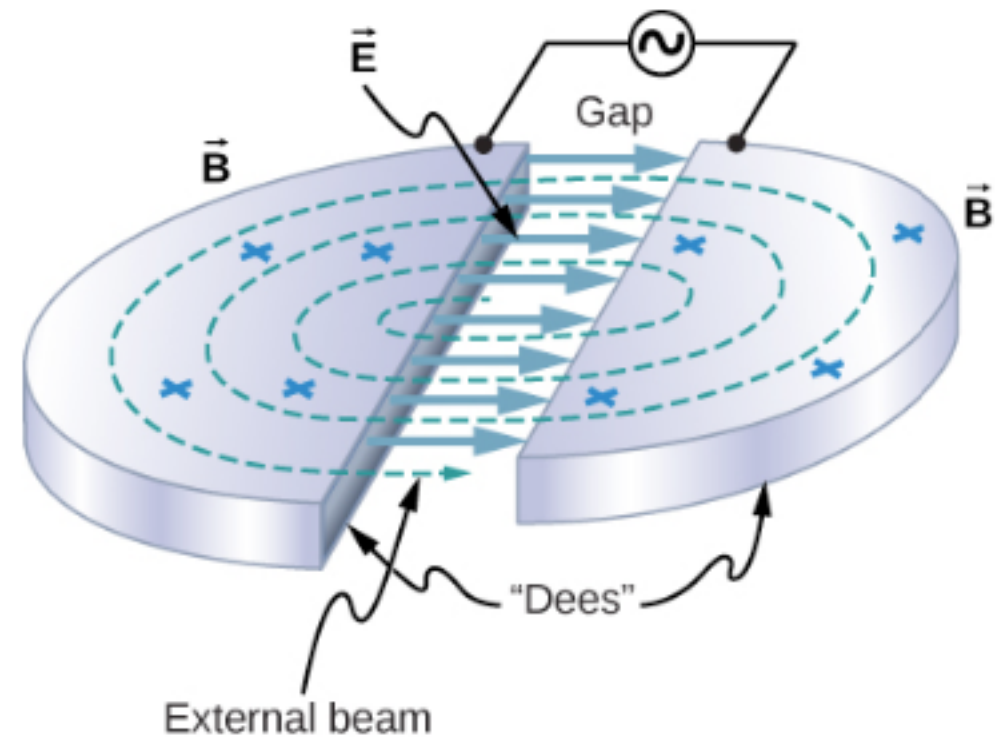
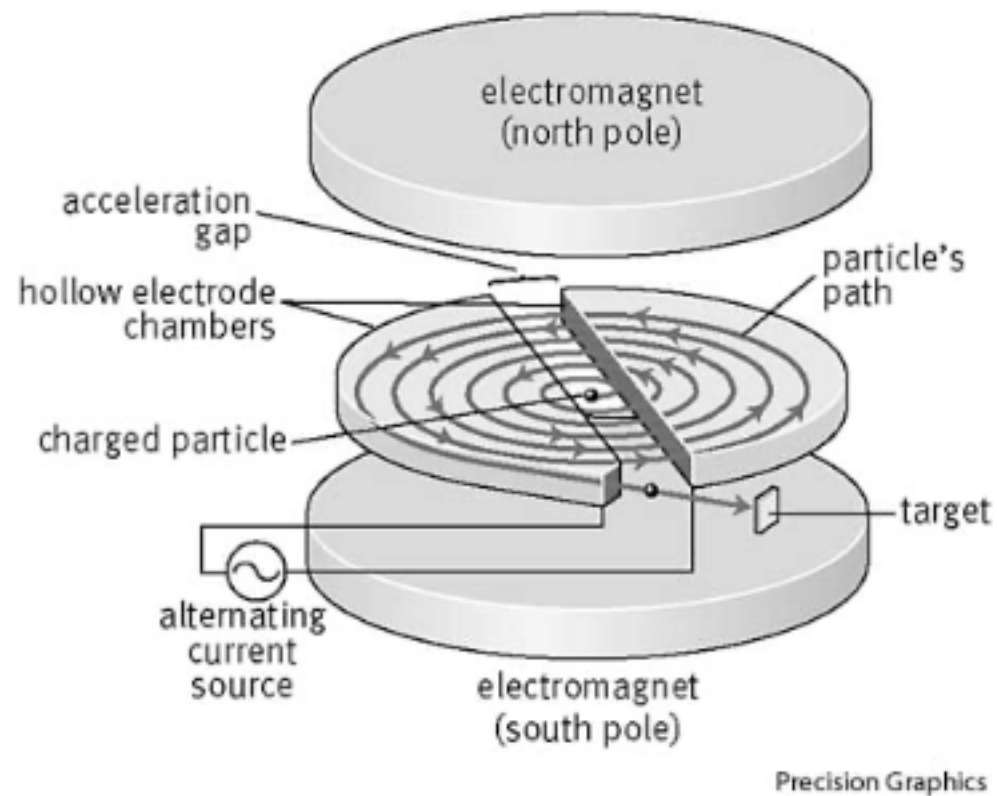
p à 100 keV
toutes les 100 μs

principe d'une
source d'électrons



Tube à vide en
béryllium du LEP, à
l'entrée d'un des
détecteurs

Le cyclotron



dans les D : le champ B génère une accélération dont la force égale la force centripète :

$$m a = m \frac{v^2}{R} = q v B \quad \Rightarrow \quad \omega = 2\pi f = \frac{v}{R} = \frac{q}{m} B \quad \text{vitesse angulaire constante}$$

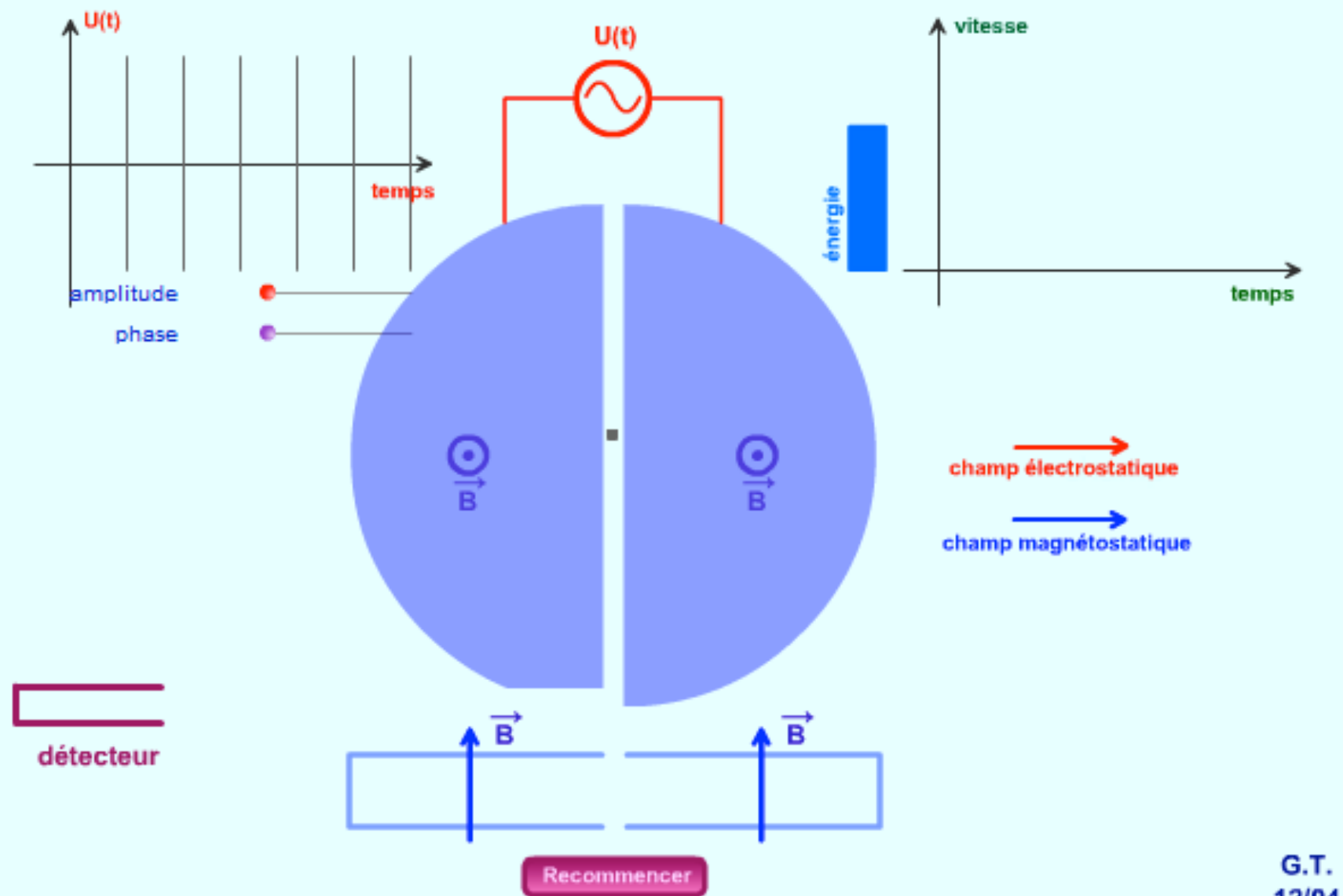
rayon de courbure : $R = \frac{m v}{q B}$

énergie cinétique : $E_{cin} = \frac{m v^2}{2}$ $E_{cin}^{fin} = \frac{m v_{fin}^2}{2} = \frac{q^2 B^2 R_{fin}^2}{2 m}$

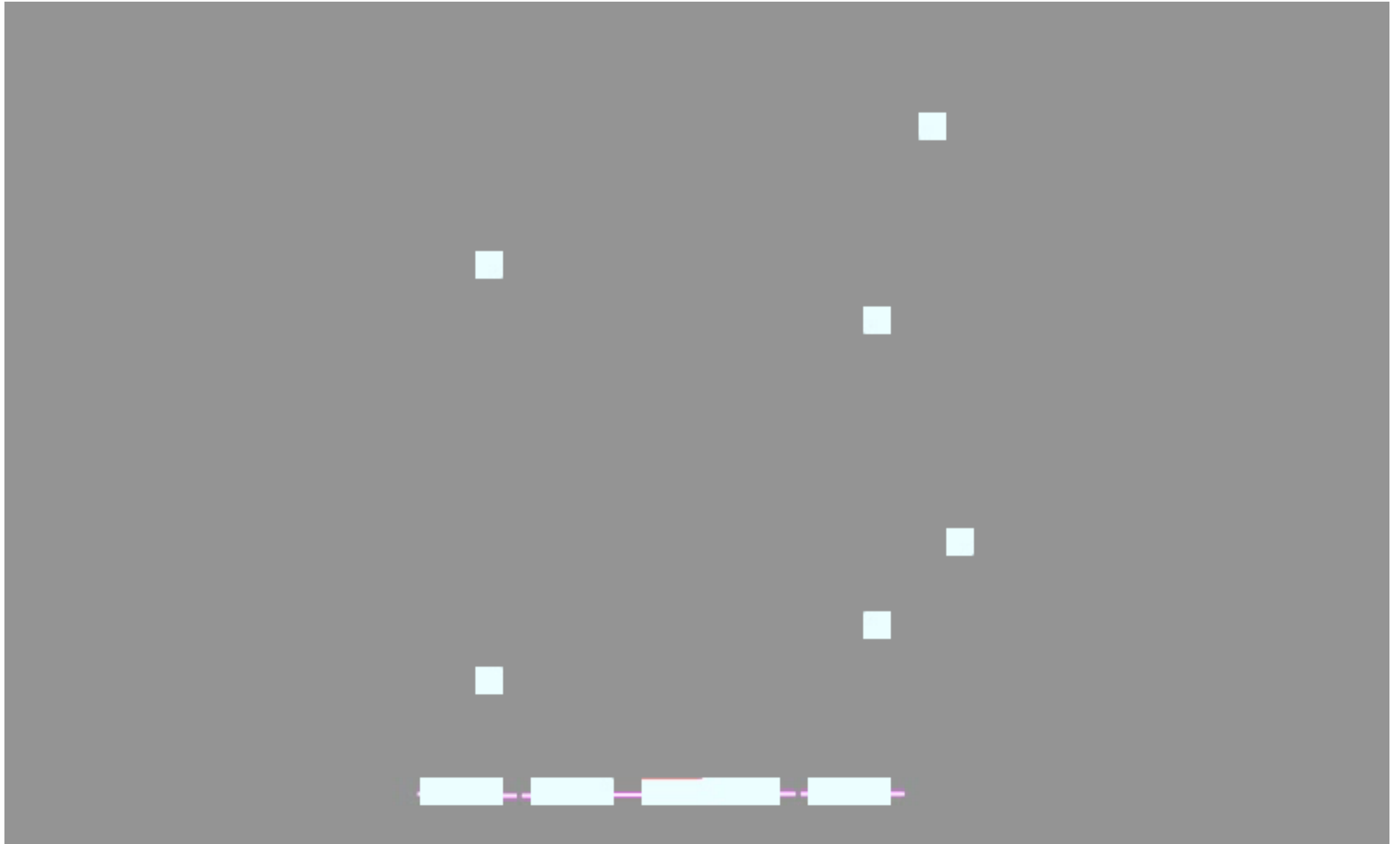
correction relativiste : $R = \frac{\gamma m v}{q B}$ et $\omega = \frac{q B}{\gamma m}$ non constante

Le cyclotron

Ernest O. LAWRENCE (1901-1958).
Prix Nobel 1939

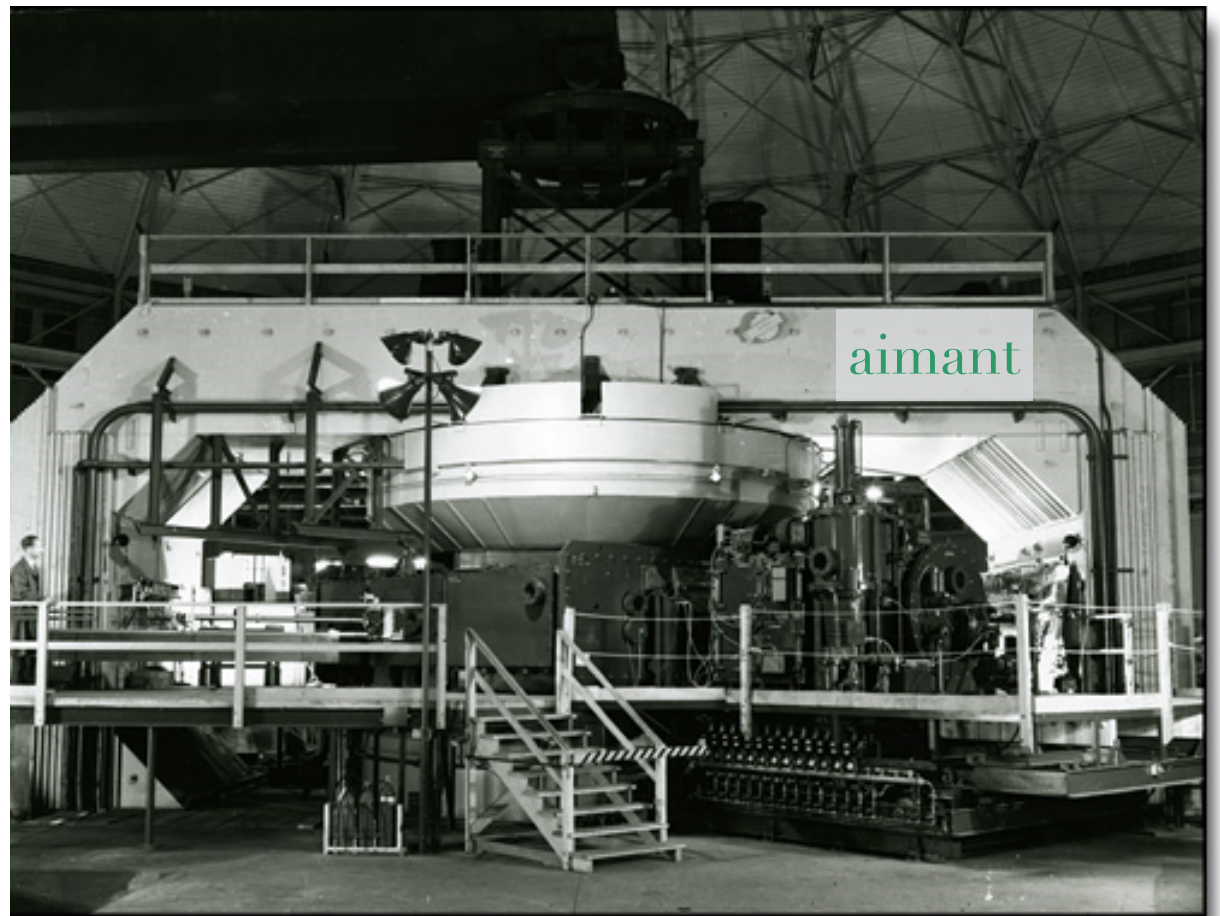


Le cyclotron (animation)



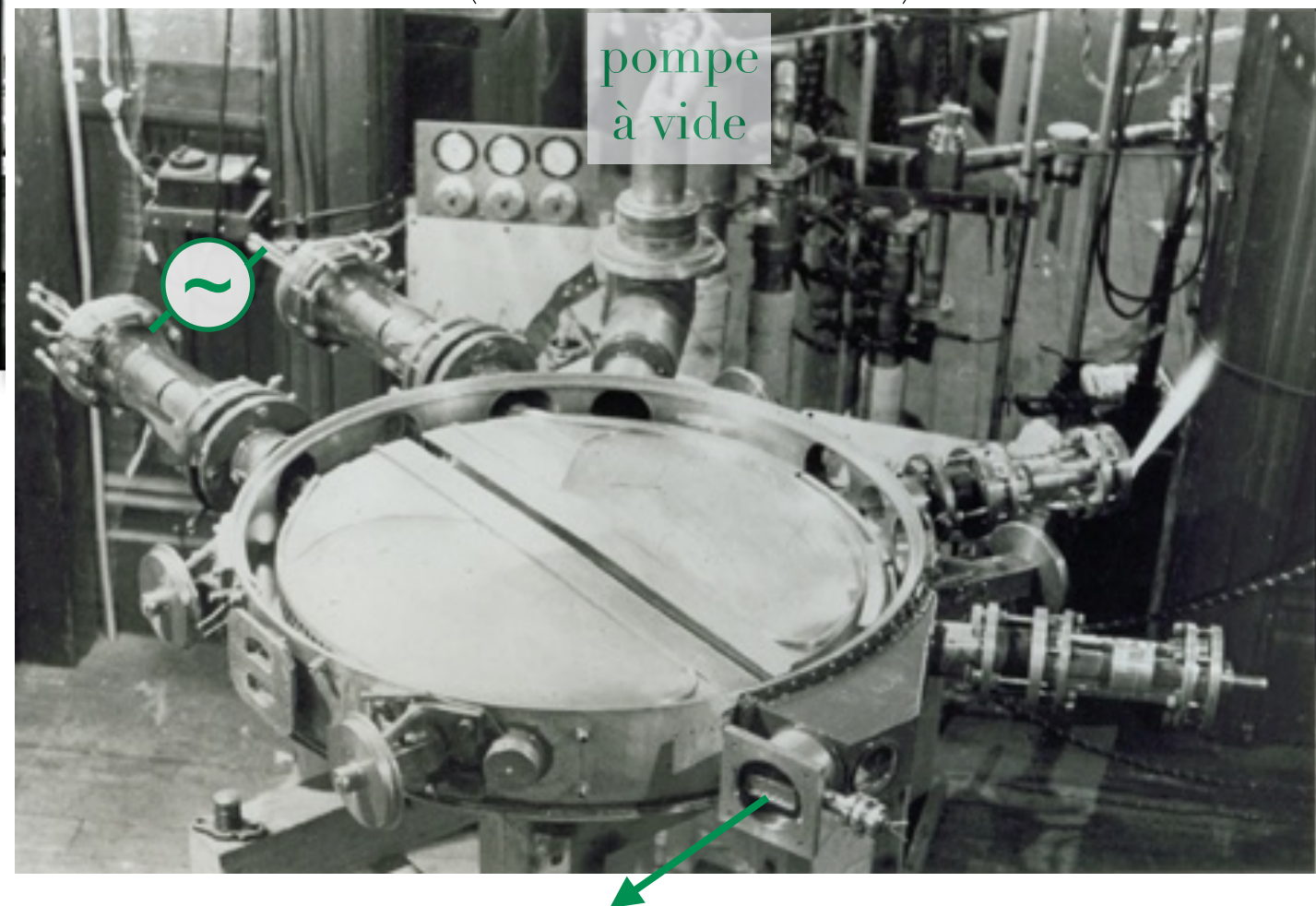
Animation: <https://www.iihe.ac.be/~lfavart/cyclotron.html>

Le cyclotron



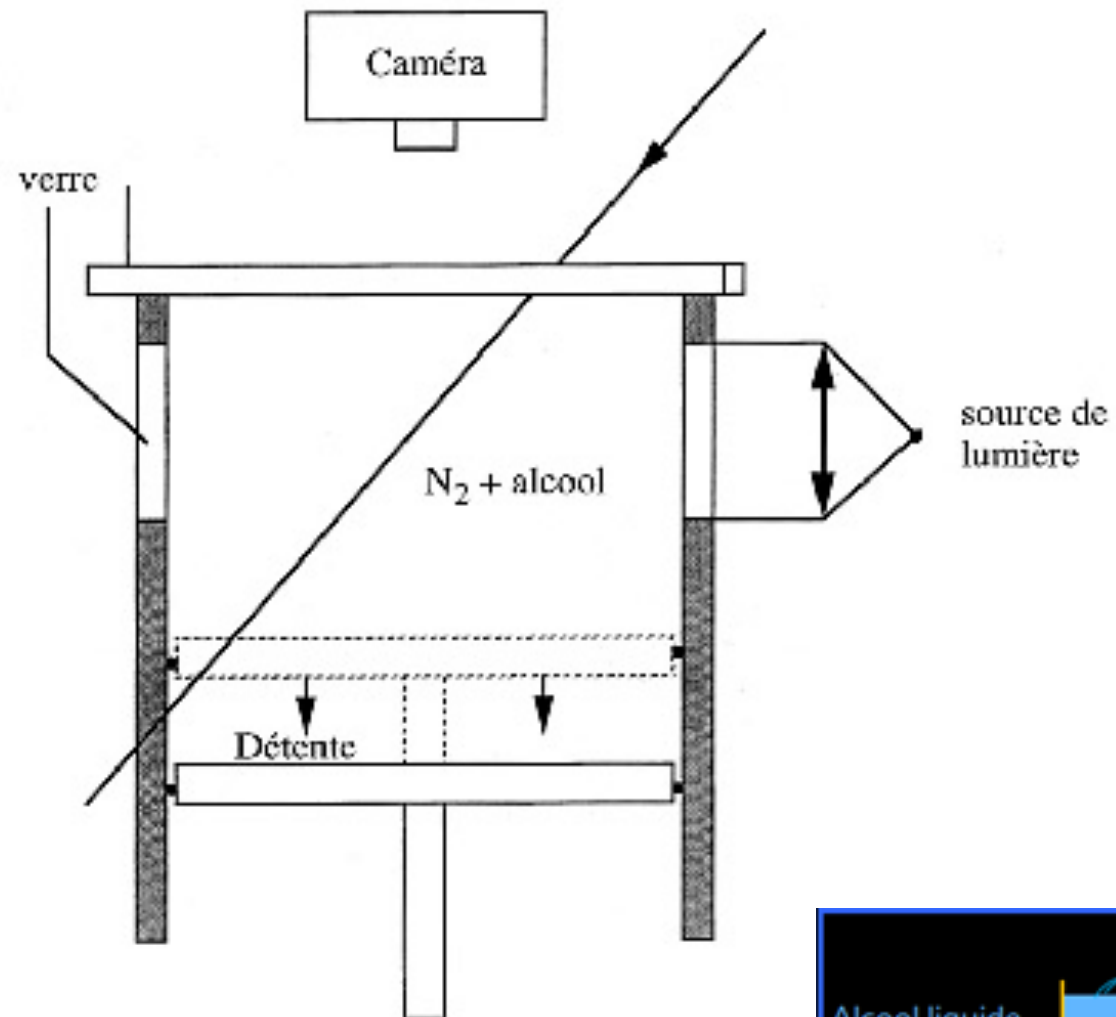
Le Cyclotron de Berkley de 184" (4,6m)
en 1940, lors de son installation

Le Cyclotron de Rutgers de 27" (69cm) - 1932
(sans son aimant)

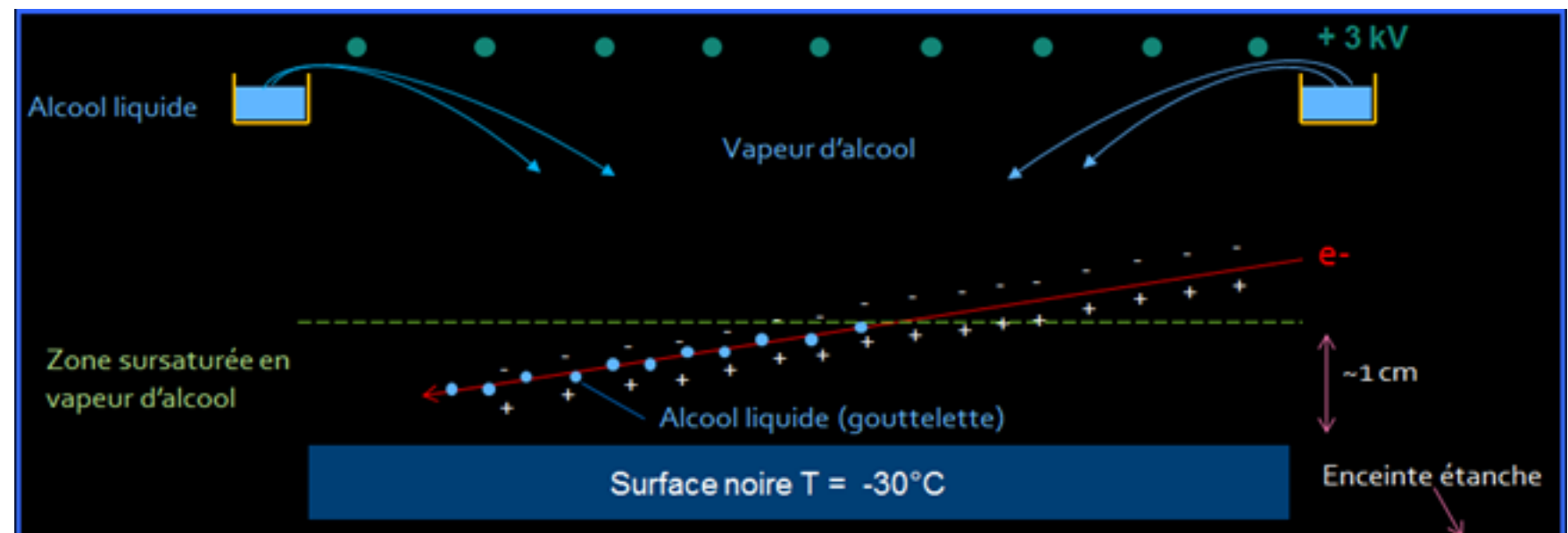
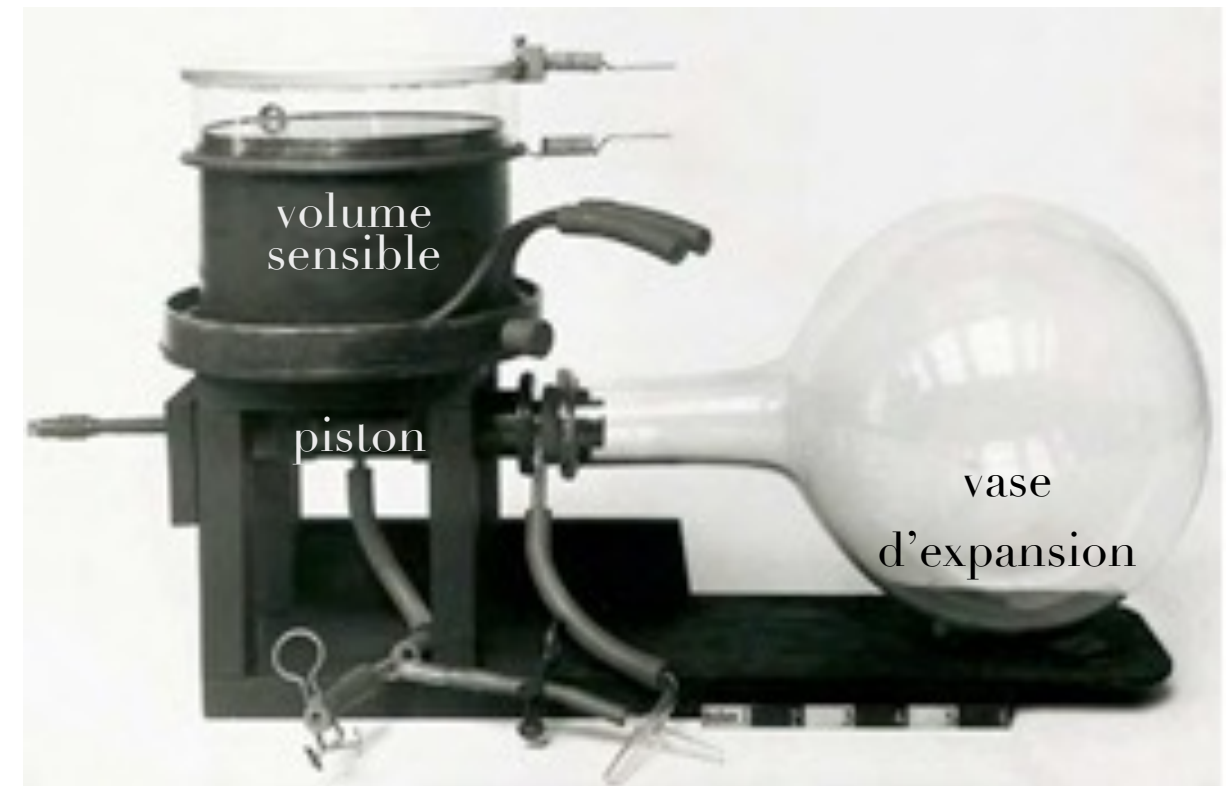


Chambre à brouillard

ionisation d'un gaz sursaturé en alcool



Chambre à brouillard de Wilson - 1911

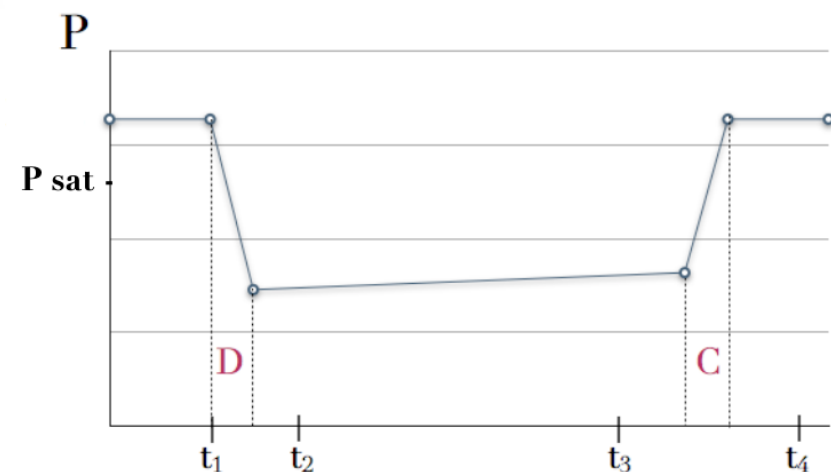
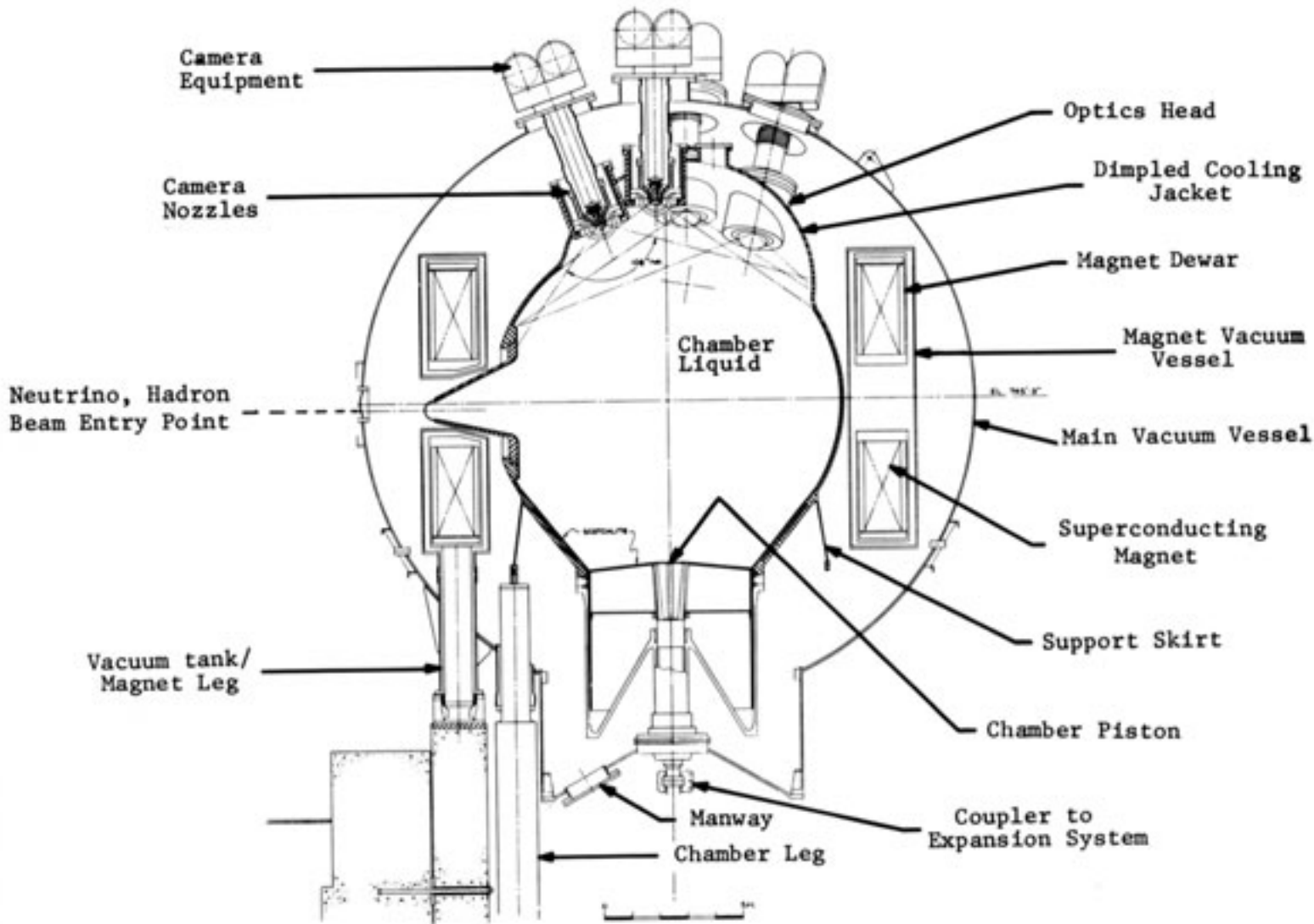


Chambre à brouillard (vidéo)

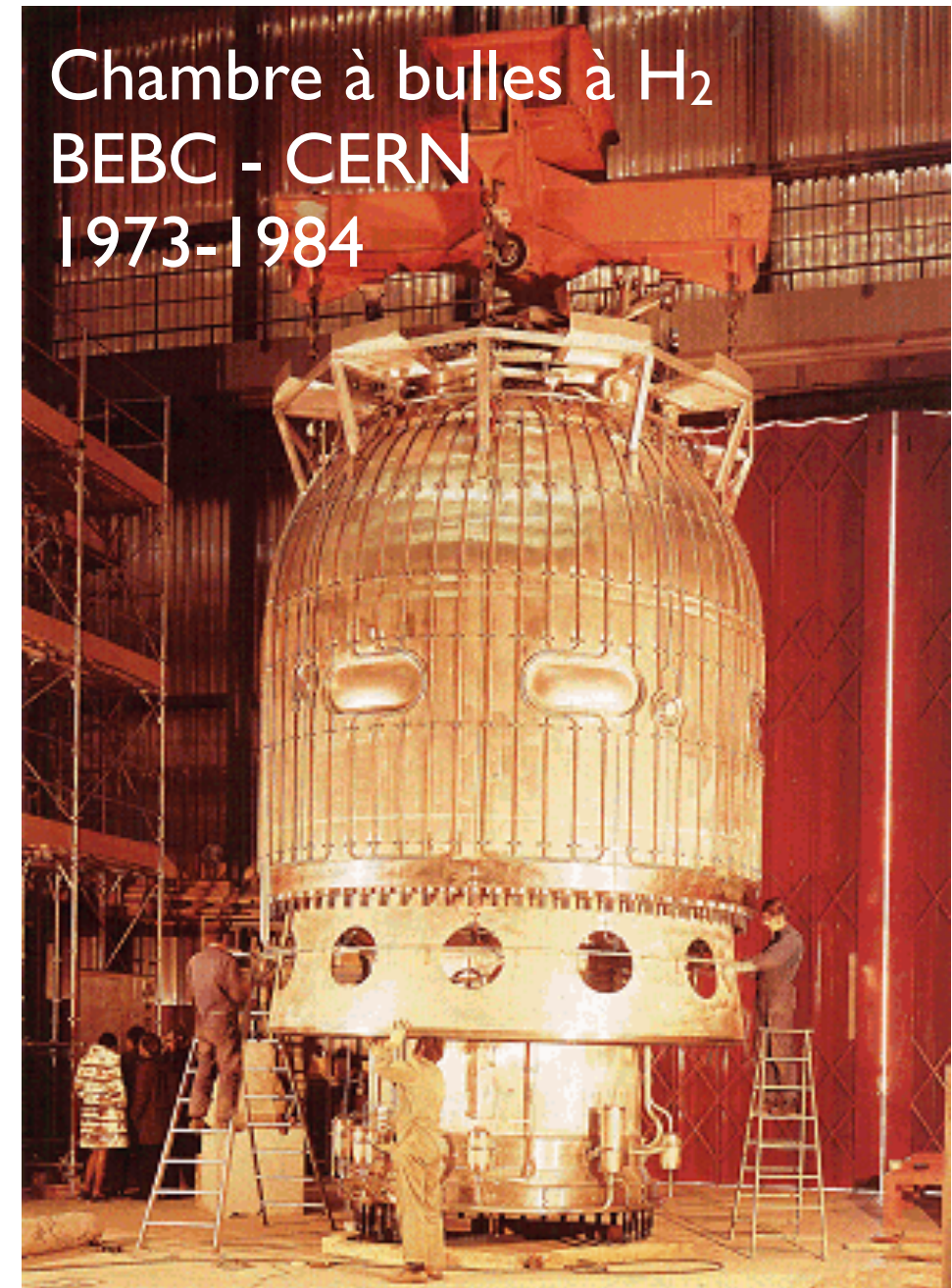


La chambre à bulles

ionisation $\rightarrow$ ébullition locale par d'un liquide dans un état métastable

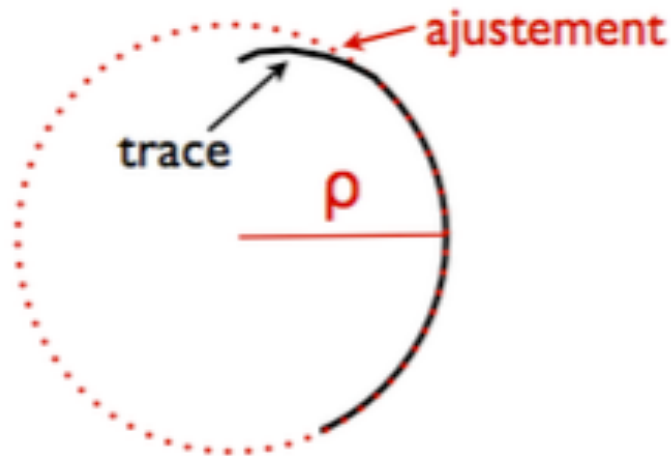


D décompression
 C compression
 t_1 signal arrivée faisceau moins 1 ms
 t_2 arrivé du faisceau
 t_3 prise des clichés photographiques
 t_4 avancement du film



Chambre à bulles à H_2
 BEBC - CERN
 1973-1984

Mesure de l'impulsion



ρ : le rayon de courbure

$\rho = \infty$ pour $\vec{B} = 0$

$$p_T \text{ (MeV/c)} = 299.8 Z \rho \text{ (m)} B \text{ (T)}$$

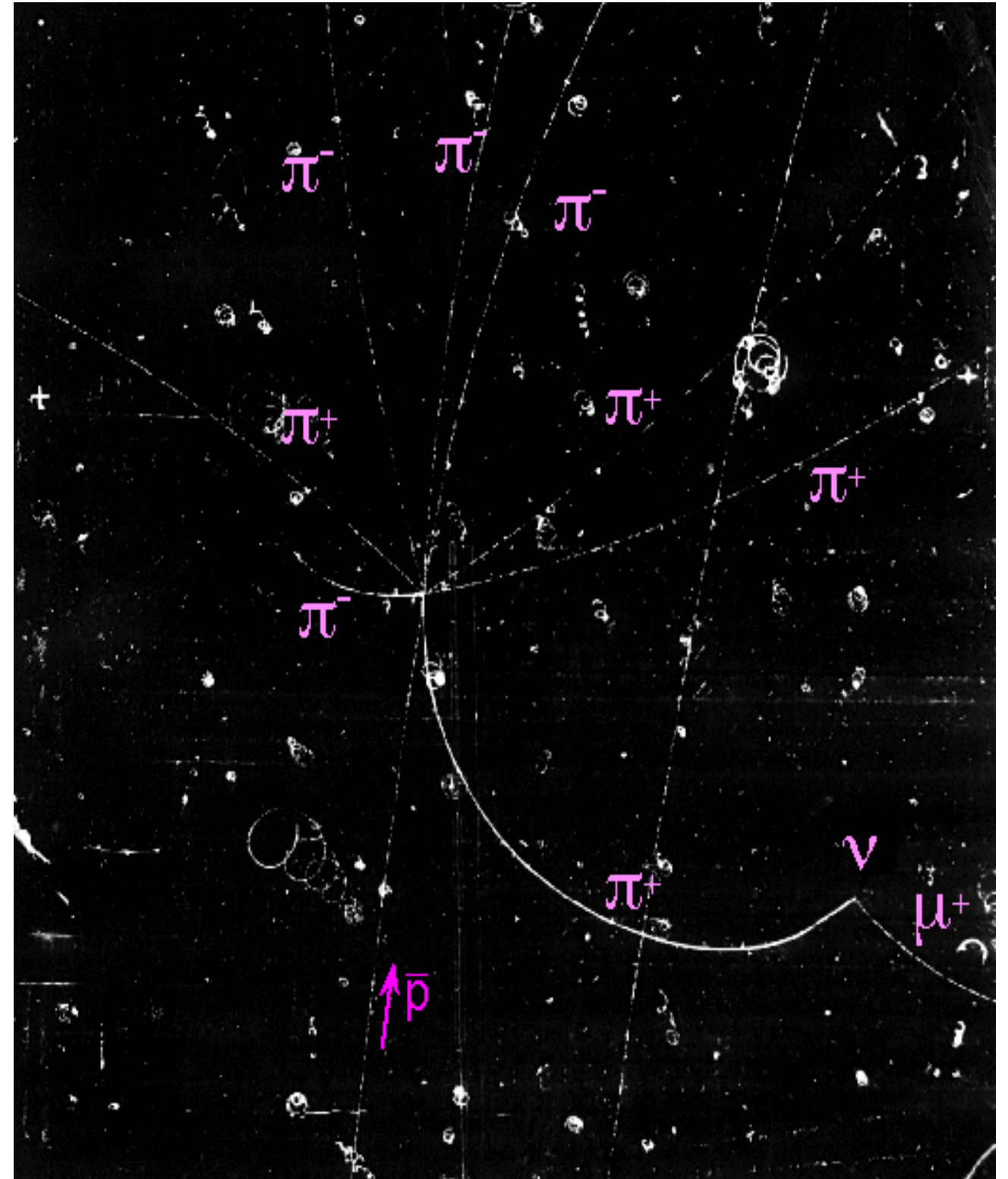
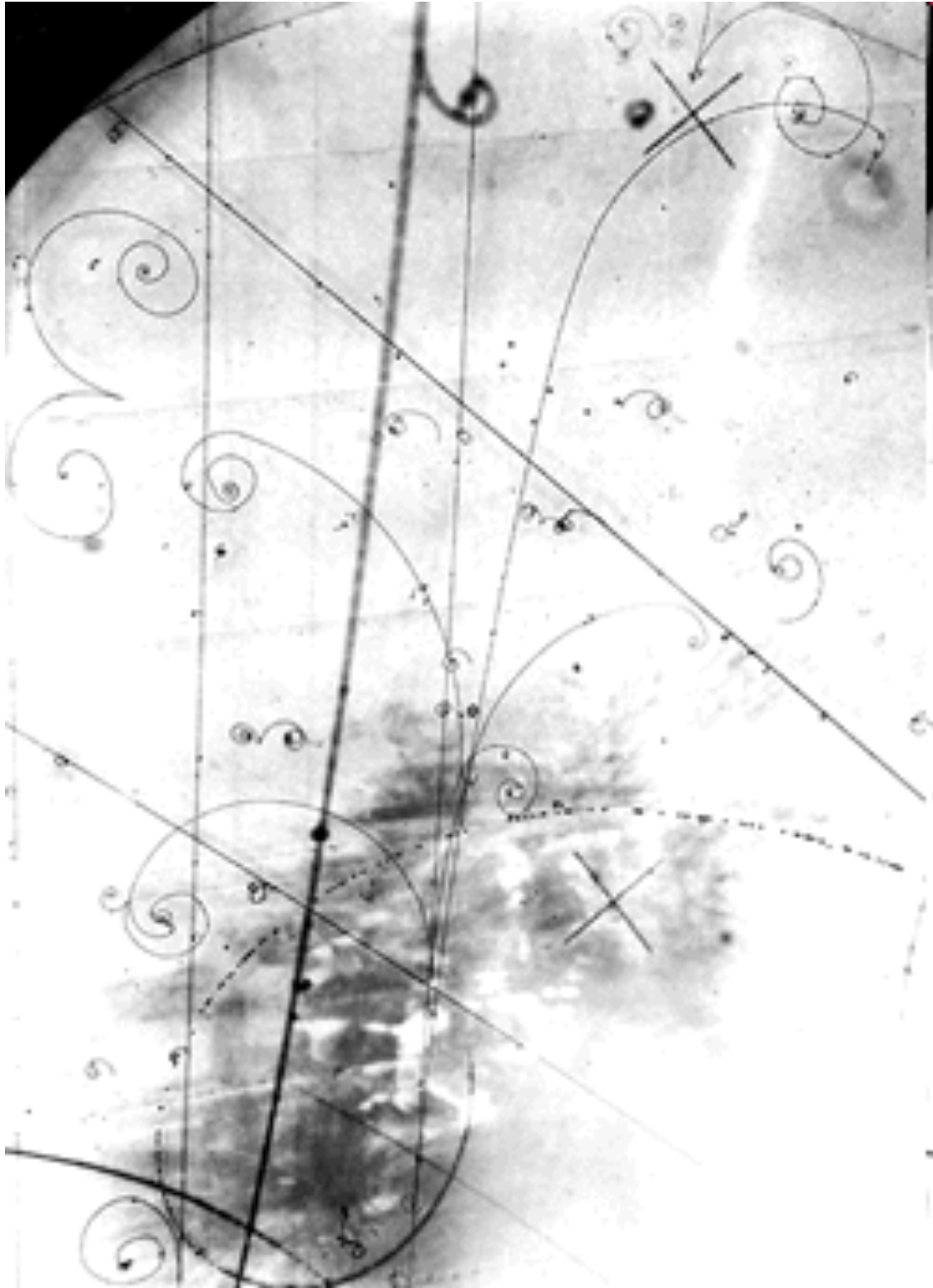
pour une charge Z en unité de charge électrique

- reconstruction des traces en 3D $\rightarrow$ mesure de θ et ϕ
- reconstruction de la 3-impulsion :

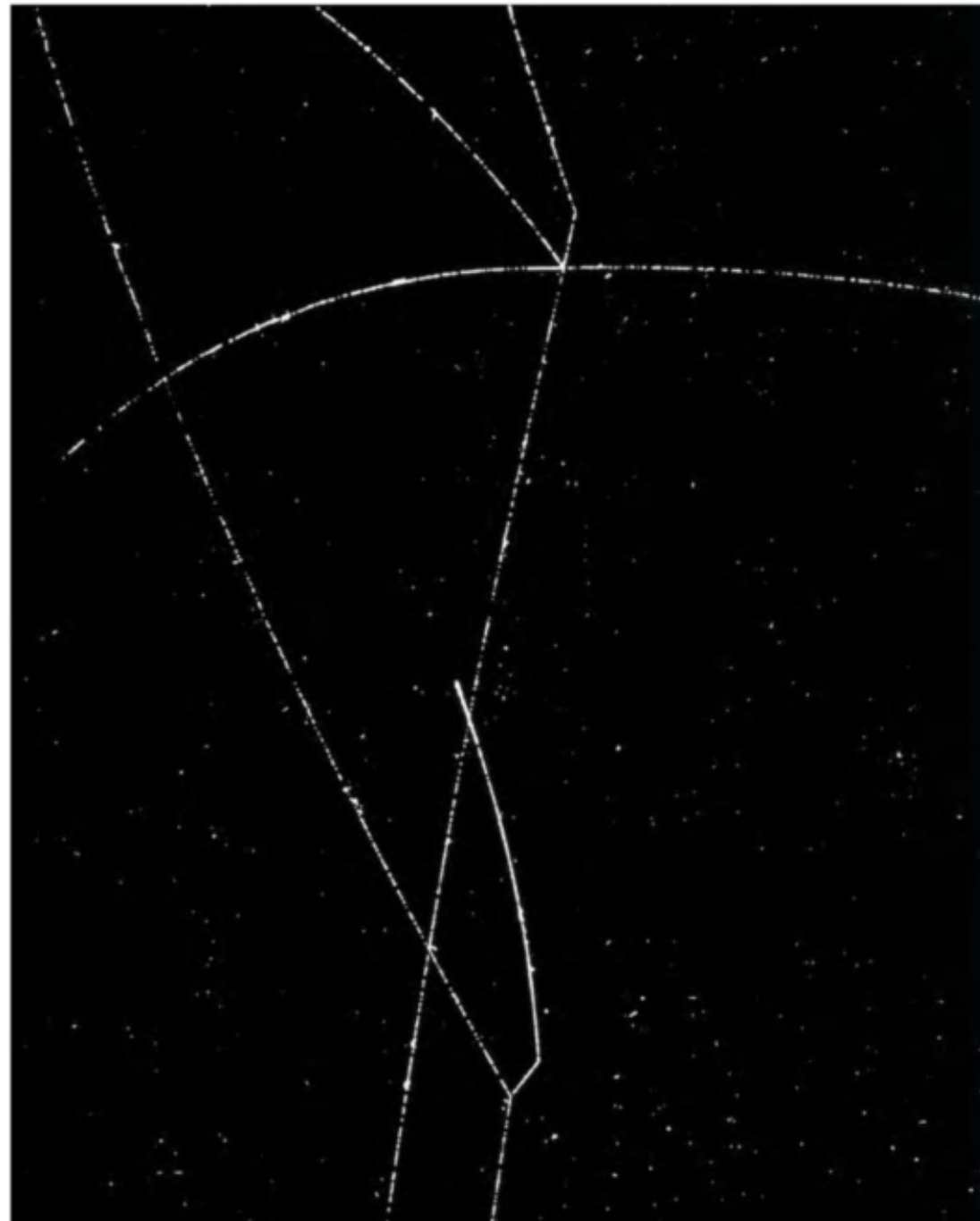
$$\begin{aligned} |p| &= p_T / \sin \theta & p_x &= |p| \sin \theta \cos \phi \\ p_z &= |p| \cos \theta & p_y &= |p| \sin \theta \sin \phi \end{aligned}$$

- reconstruction de l'énergie si identification de la particule ou par perte d'énergie par unité de longueur

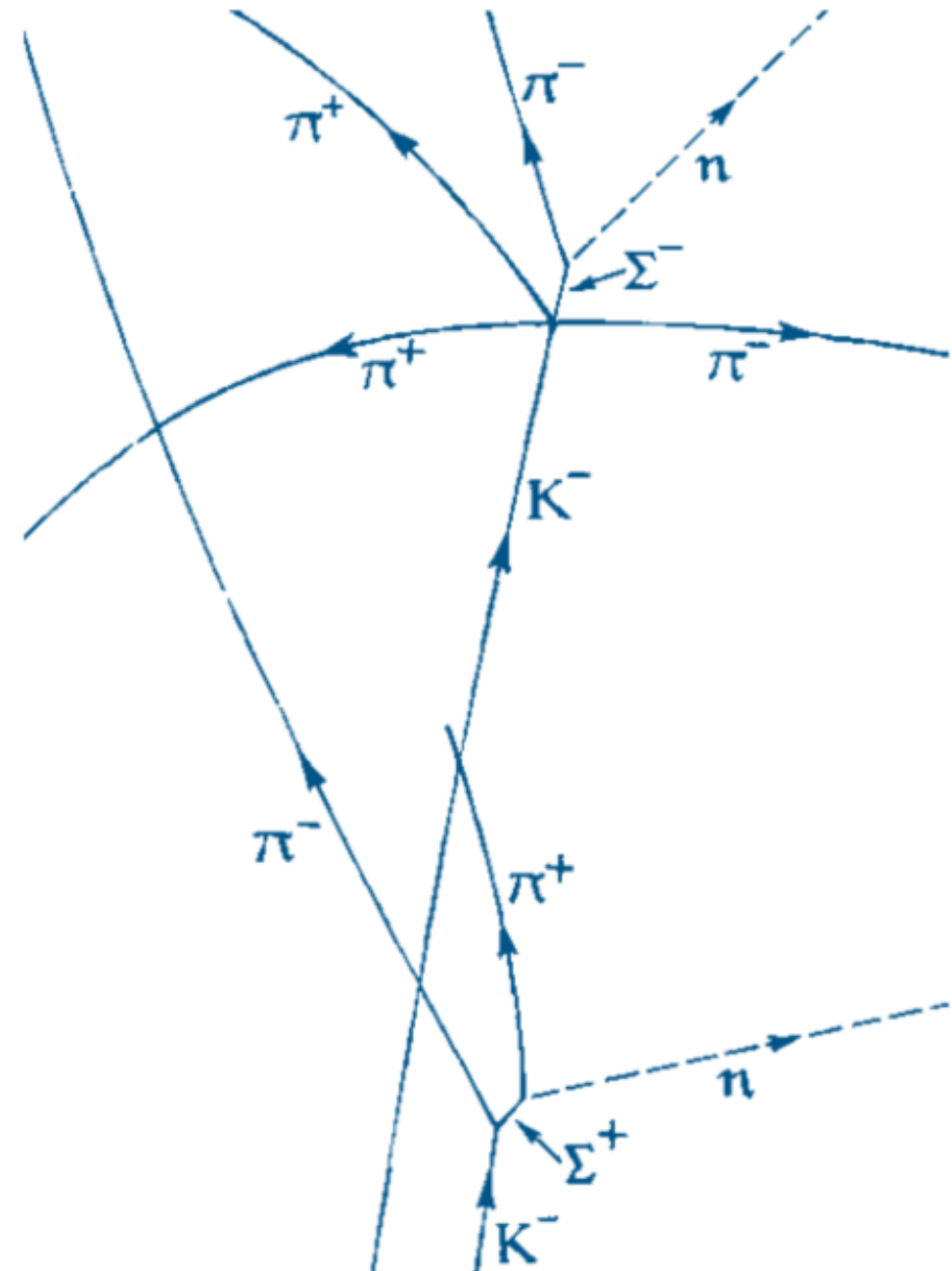
Clichés de chambre à bulles



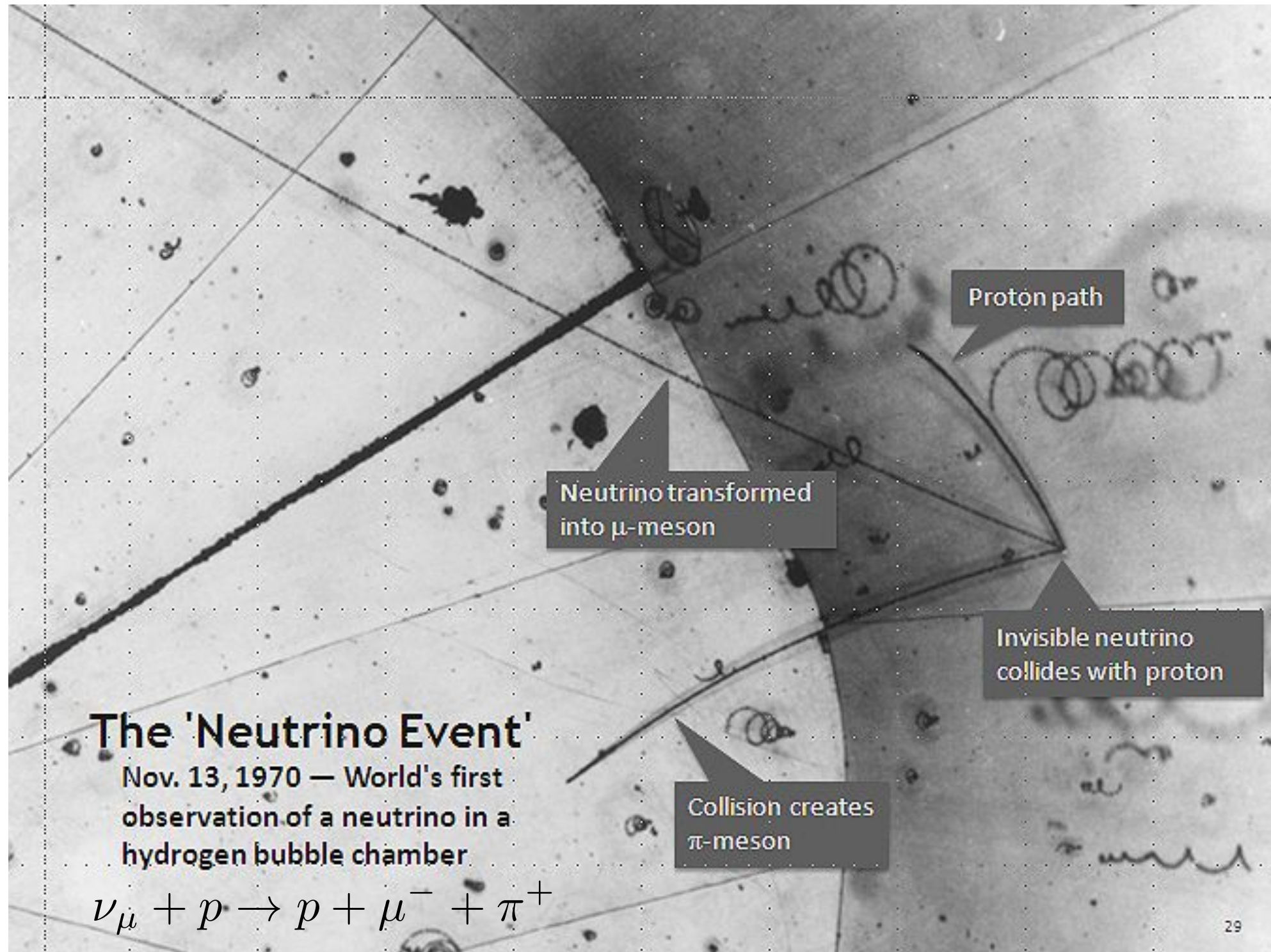
Clichés de chambre à bulles



↑
Faisceau de K^-



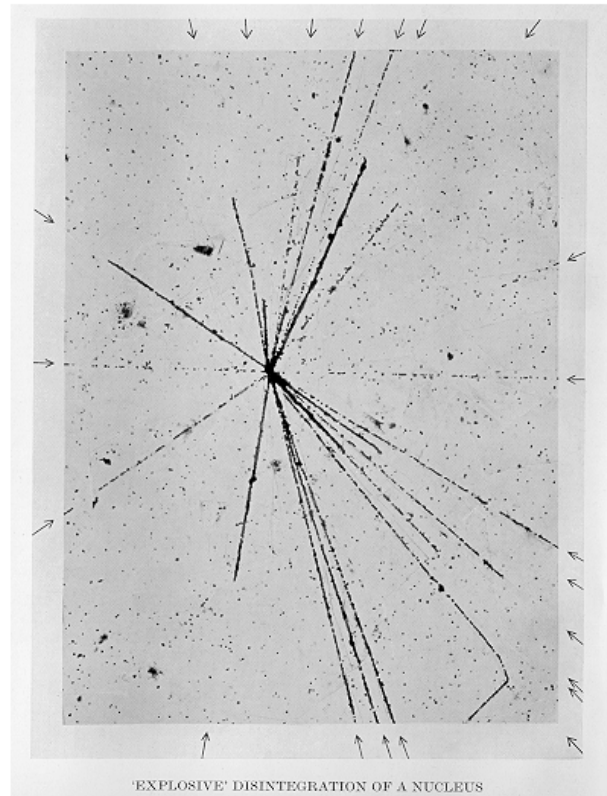
Clichés de chambre à bulles



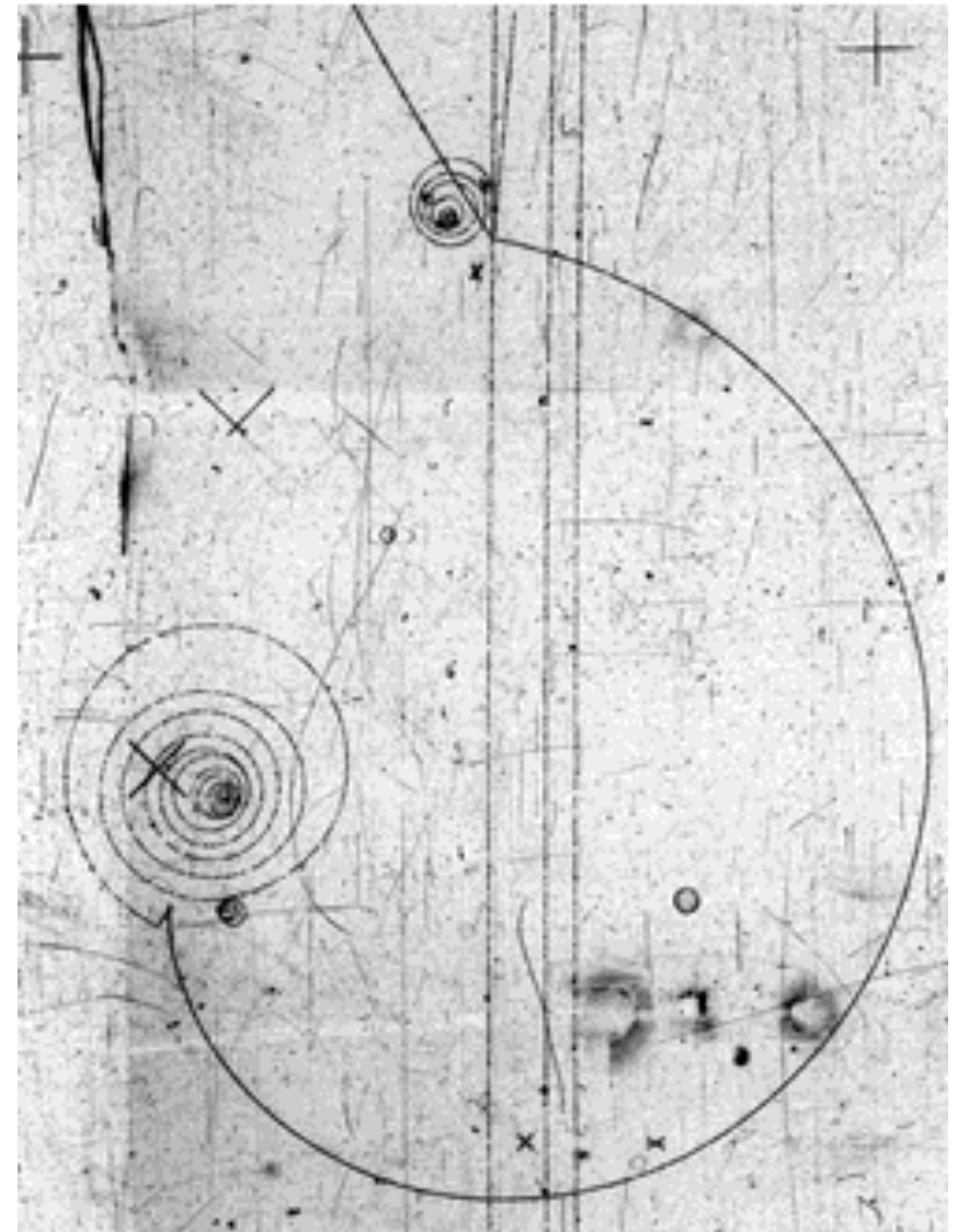
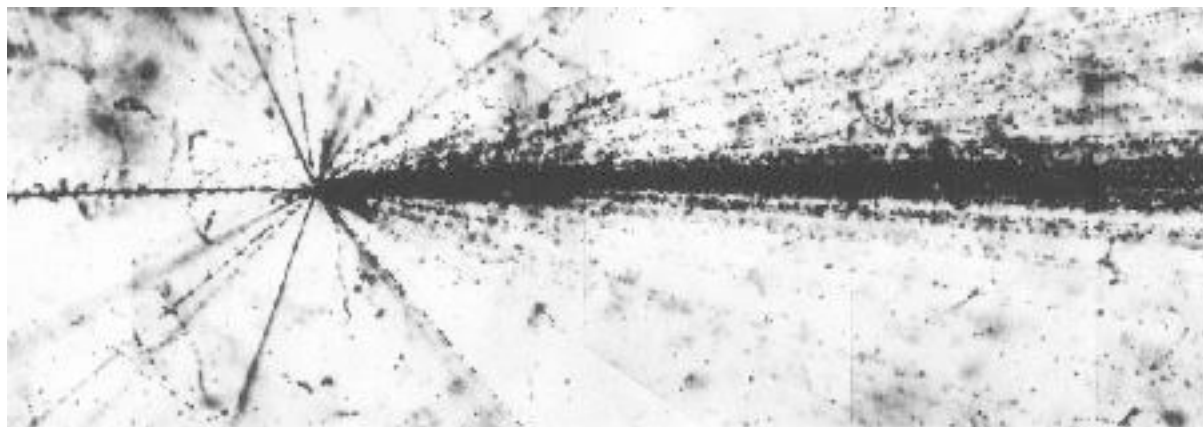
←
Faisceau de
neutrinos

Emulsion nucléaire

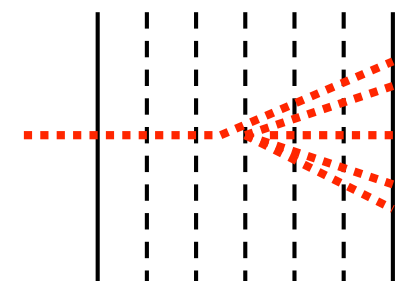
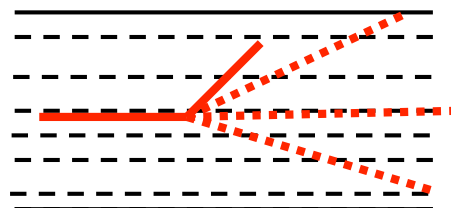
Effet chimique : noircissement des halogénures d'argent (AgBr) sous l'action de la lumière



Eclatement d'un noyau de la haute atmosphère en plusieurs fragments nucléaires, suite à une interaction avec un rayon cosmique - 1937

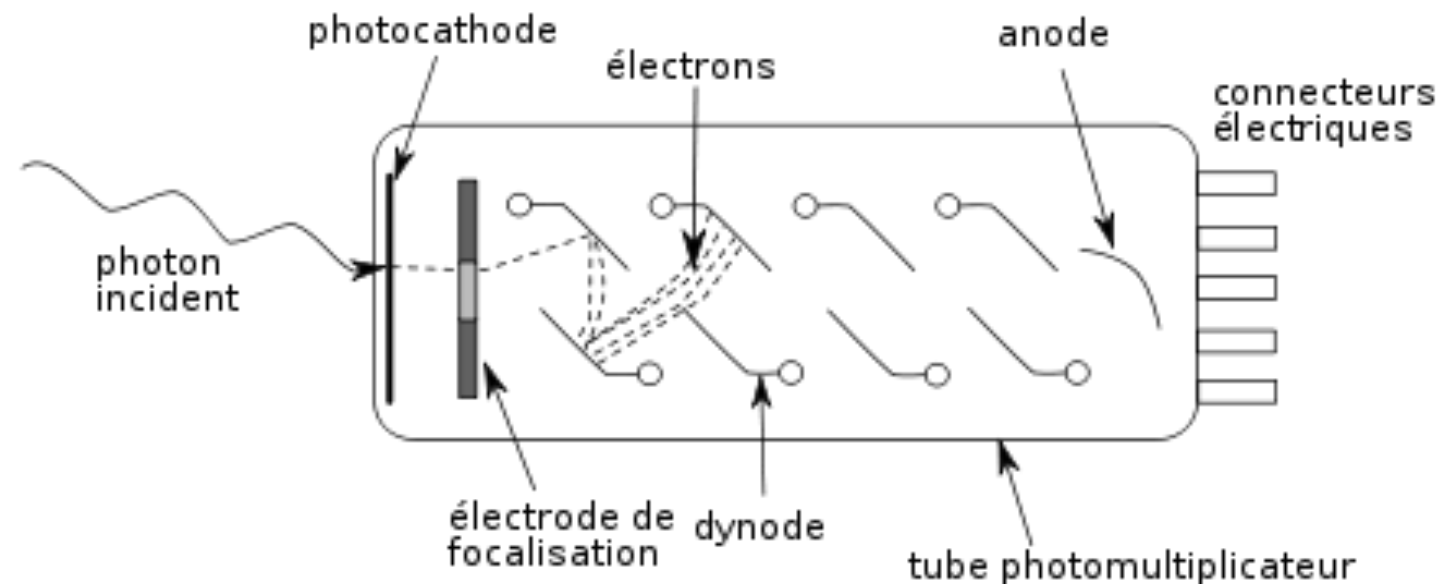
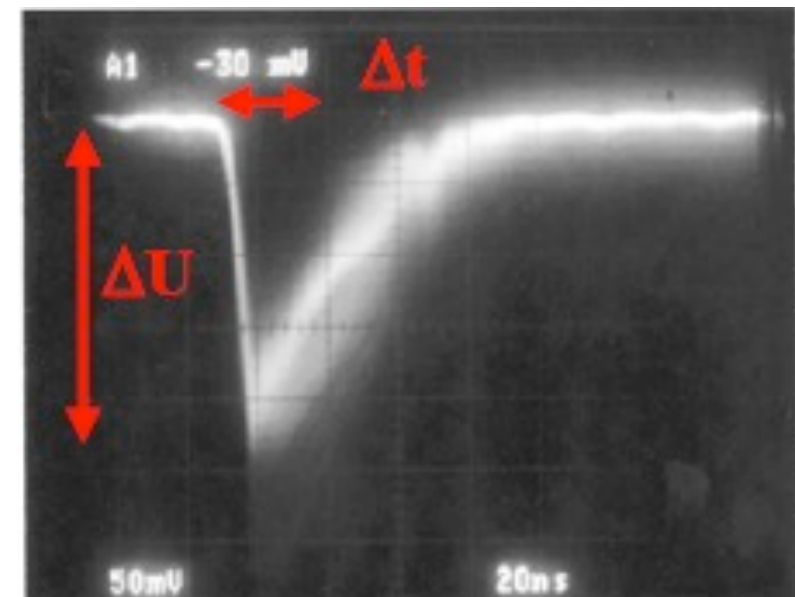
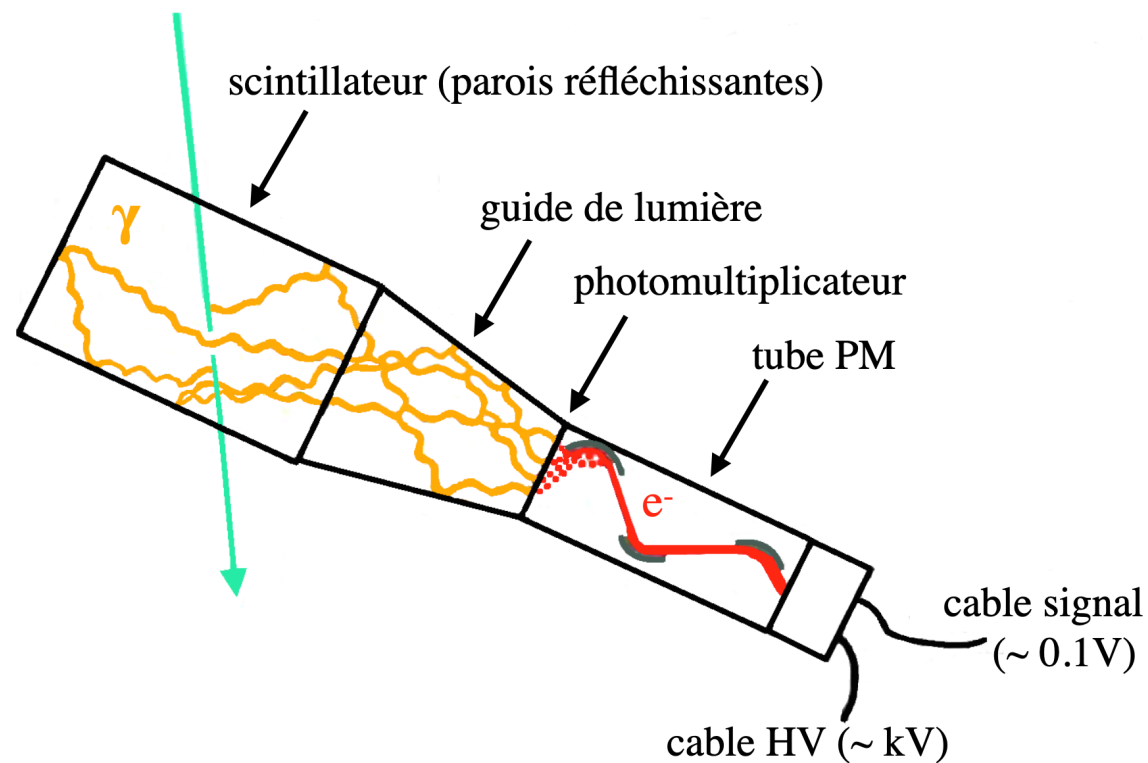


Faisceau
→



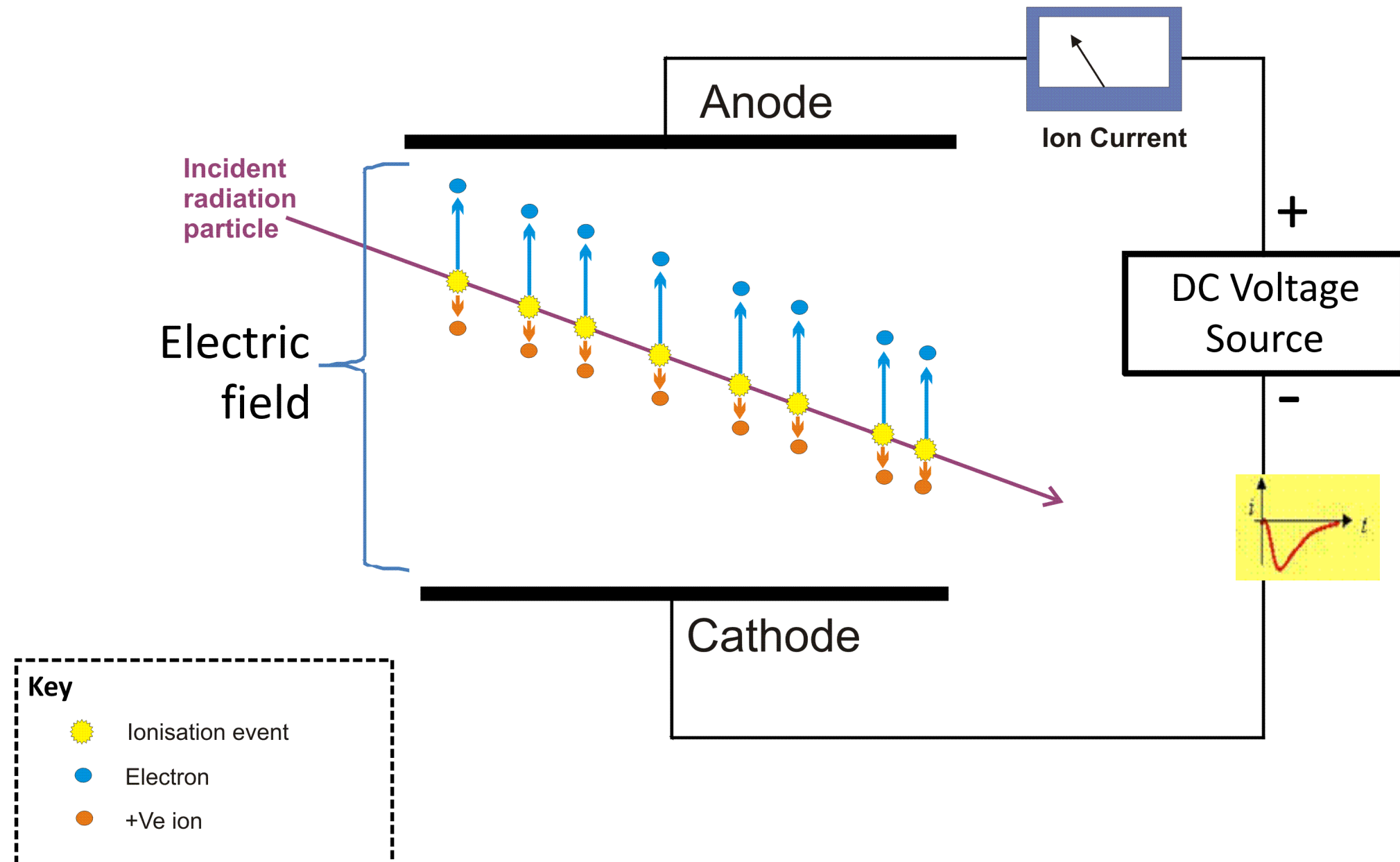
Détecteurs électroniques: Scintillateur

excitation d'un réseau cristallin par la particule chargée incidente

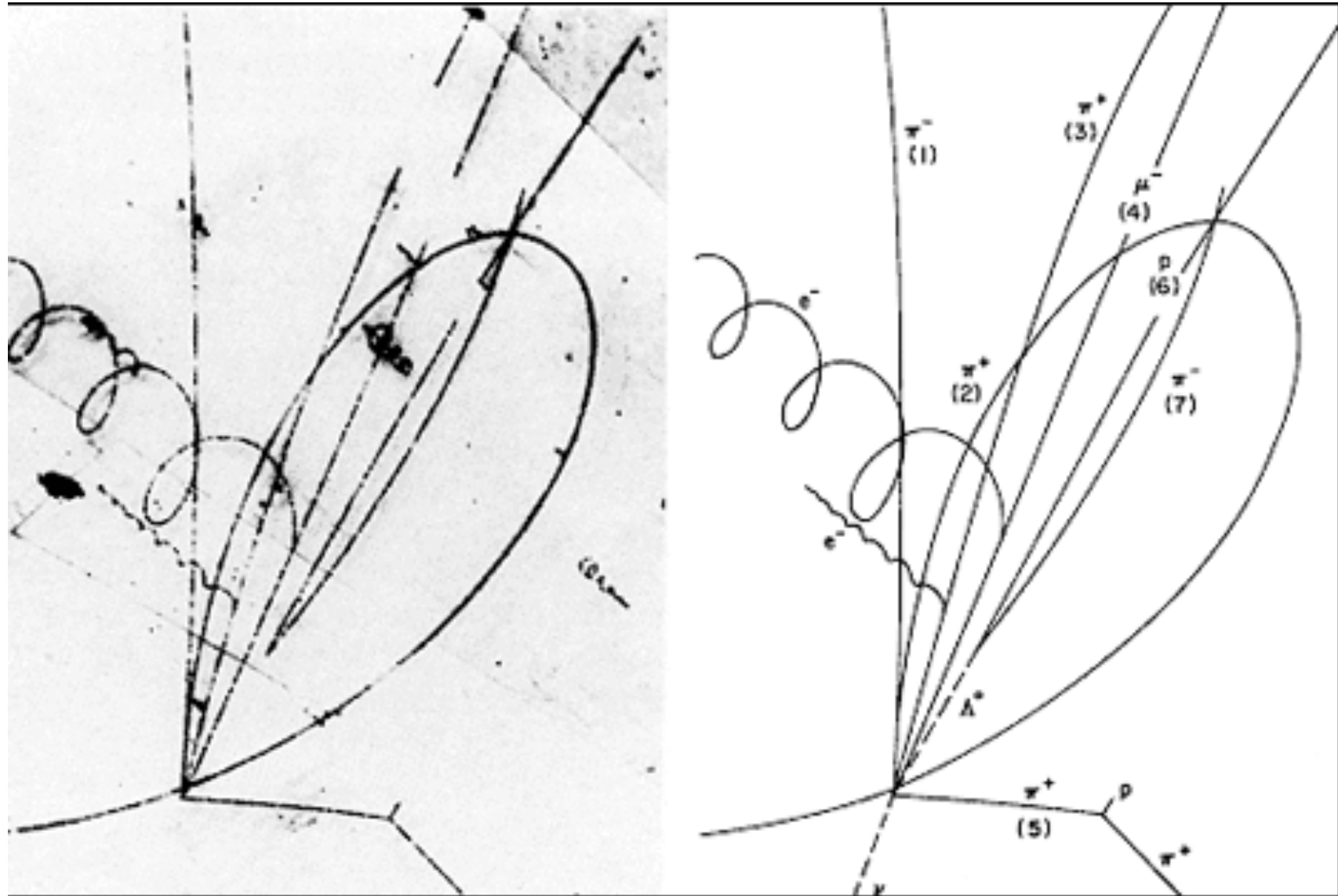


Détecteur à volume sensible gazeux

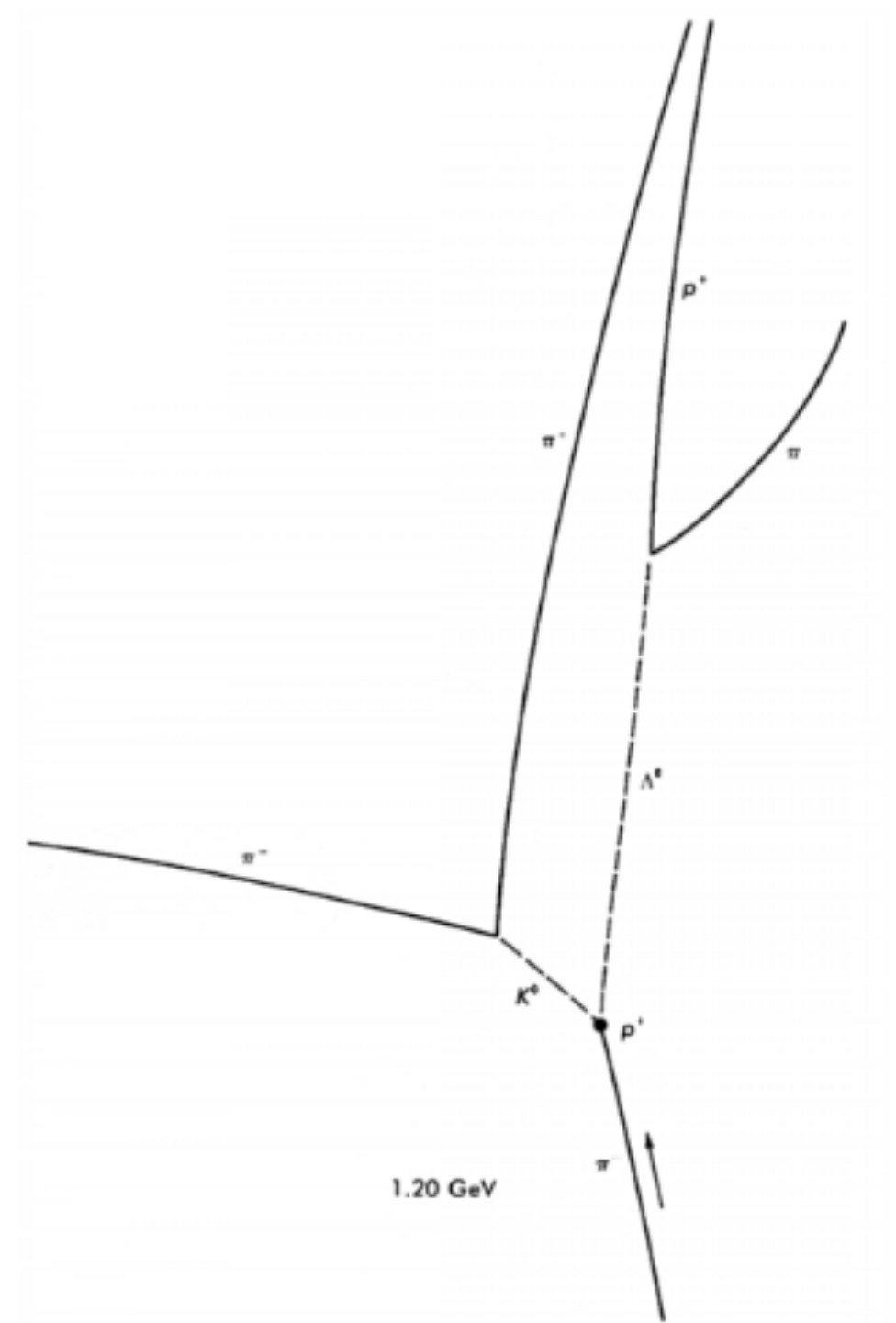
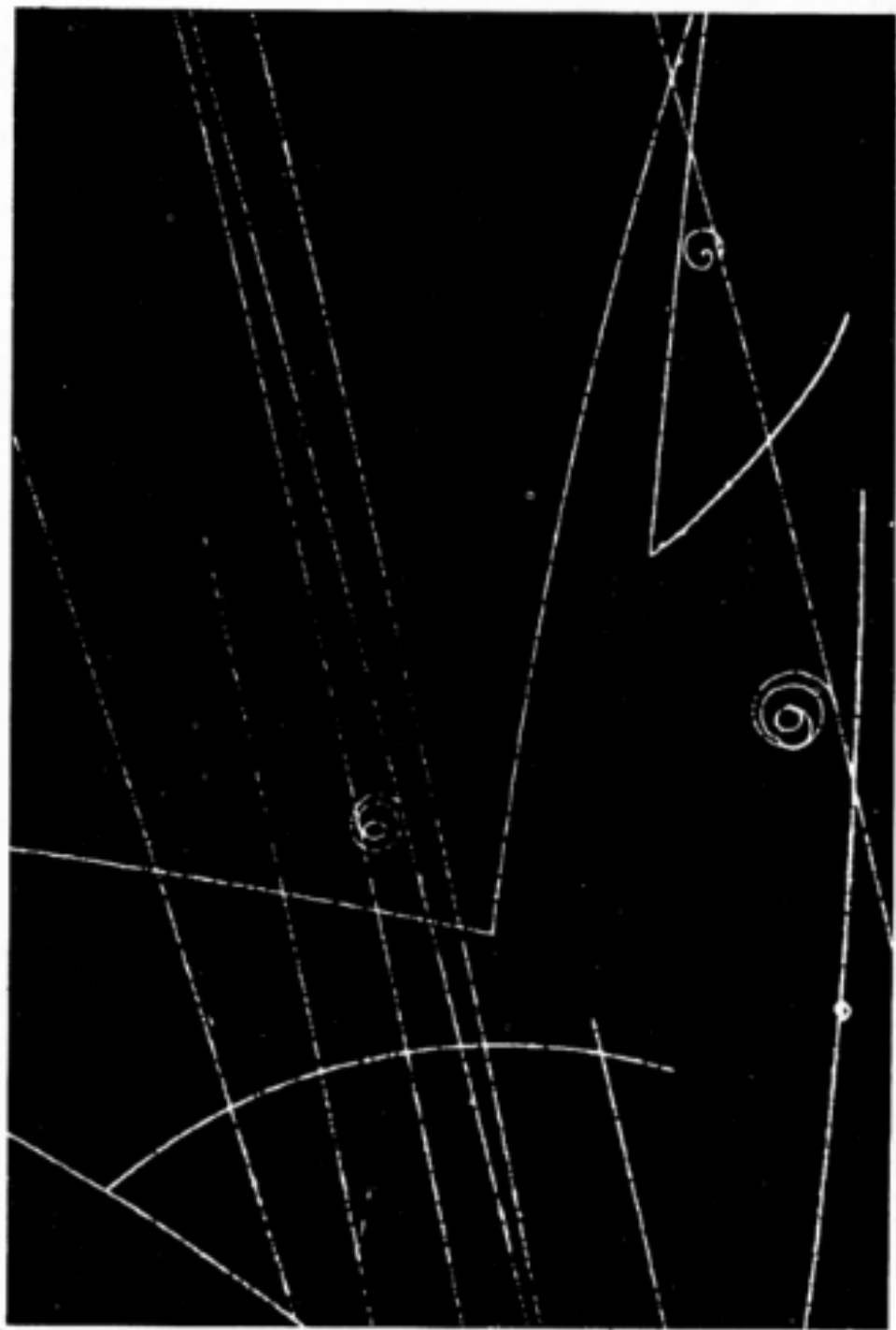
(Chambre à ionisation)



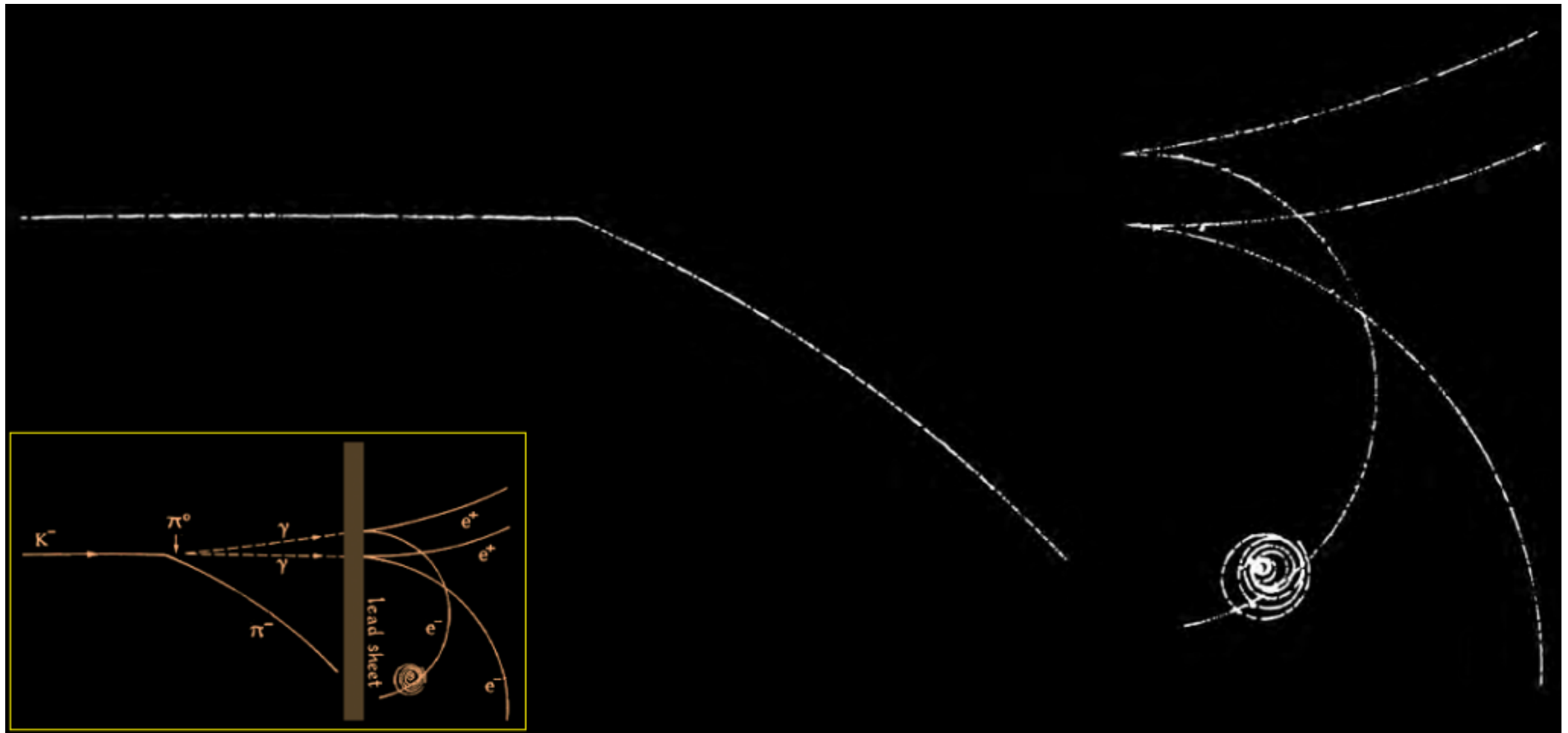
Détection particules neutres



$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$



Détection de particules neutres



matérialisation de photons