

Physique des Particules et Physique Nucléaire

PHYS-F305

Année 2024-2025

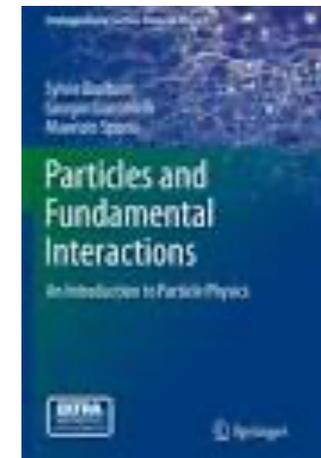
Première partie - L. Favart

II - Moyens d'investigation

Références Bibliographiques

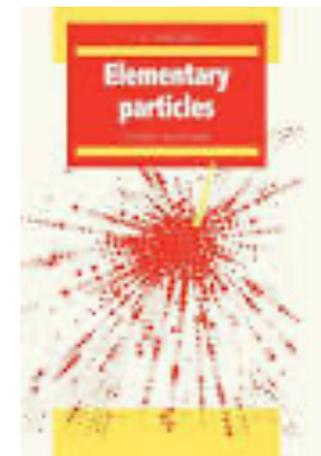
1. Particles and Fundamental Interactions

Sylvie Braibant, Giorgio Giacomelli, Maurizio Spurio
Ed. Springer



2. Elementary particles

I. S. Hughes
Ed. Cambridge University Press



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

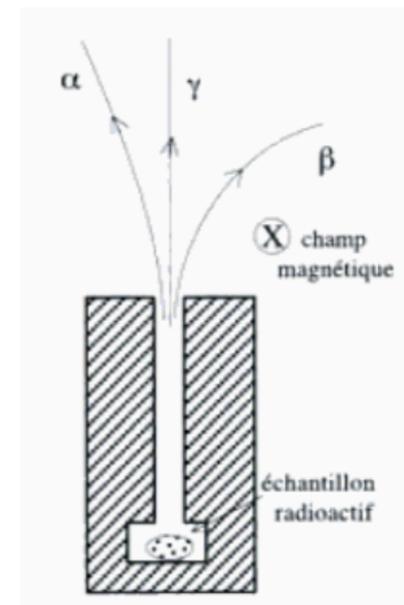
- 1896 Henri Becquerel : découverte de la radioactivité - Uranium
- juste après - Marie Curie - Radium

Sources radioactives

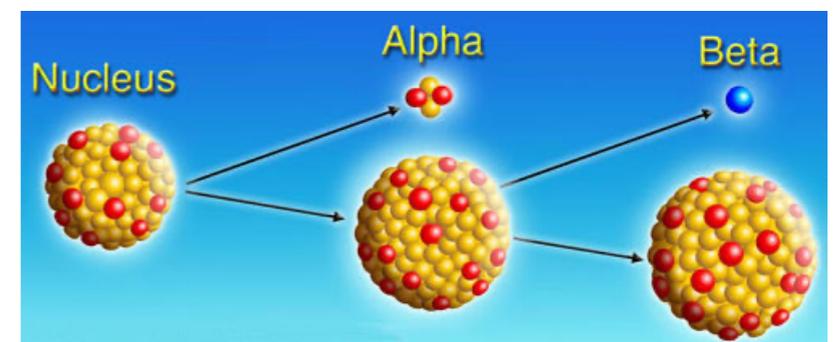
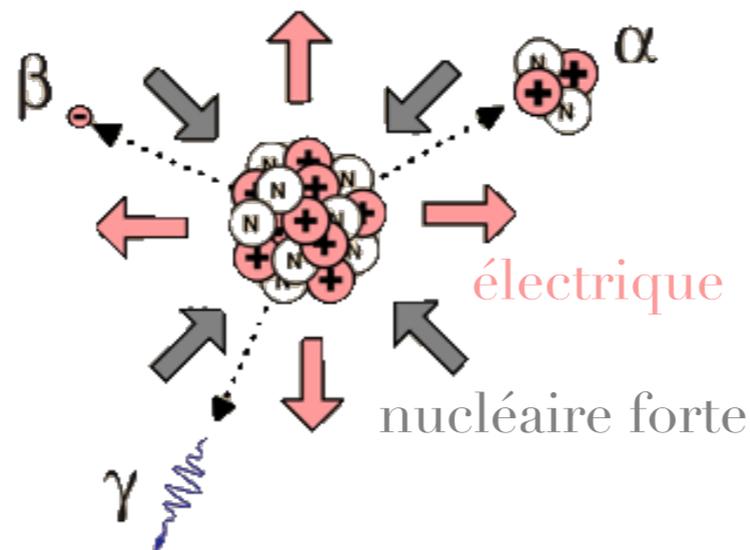
- alpha (α) - émission de particules α , c'est-à-dire des noyaux d'He
- bêta (β) - émission d'électrons (en fait aussi de neutrinos)
- gamma (γ) - émission de photons

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



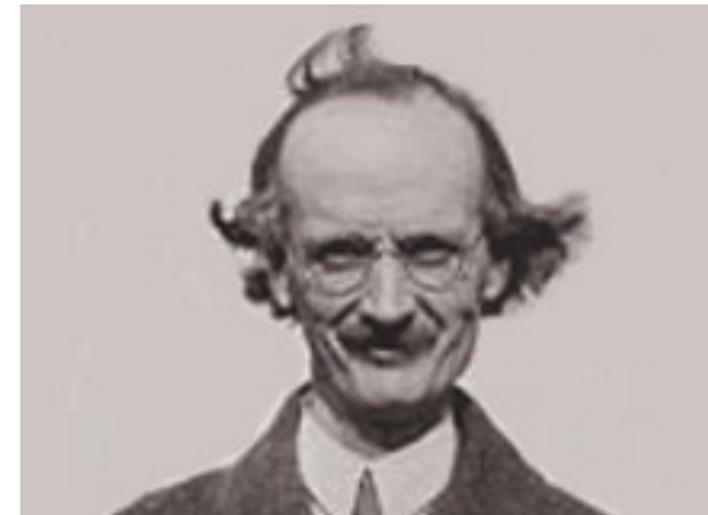
+désintégration du n :
force nucléaire faible



Rayonnement cosmique



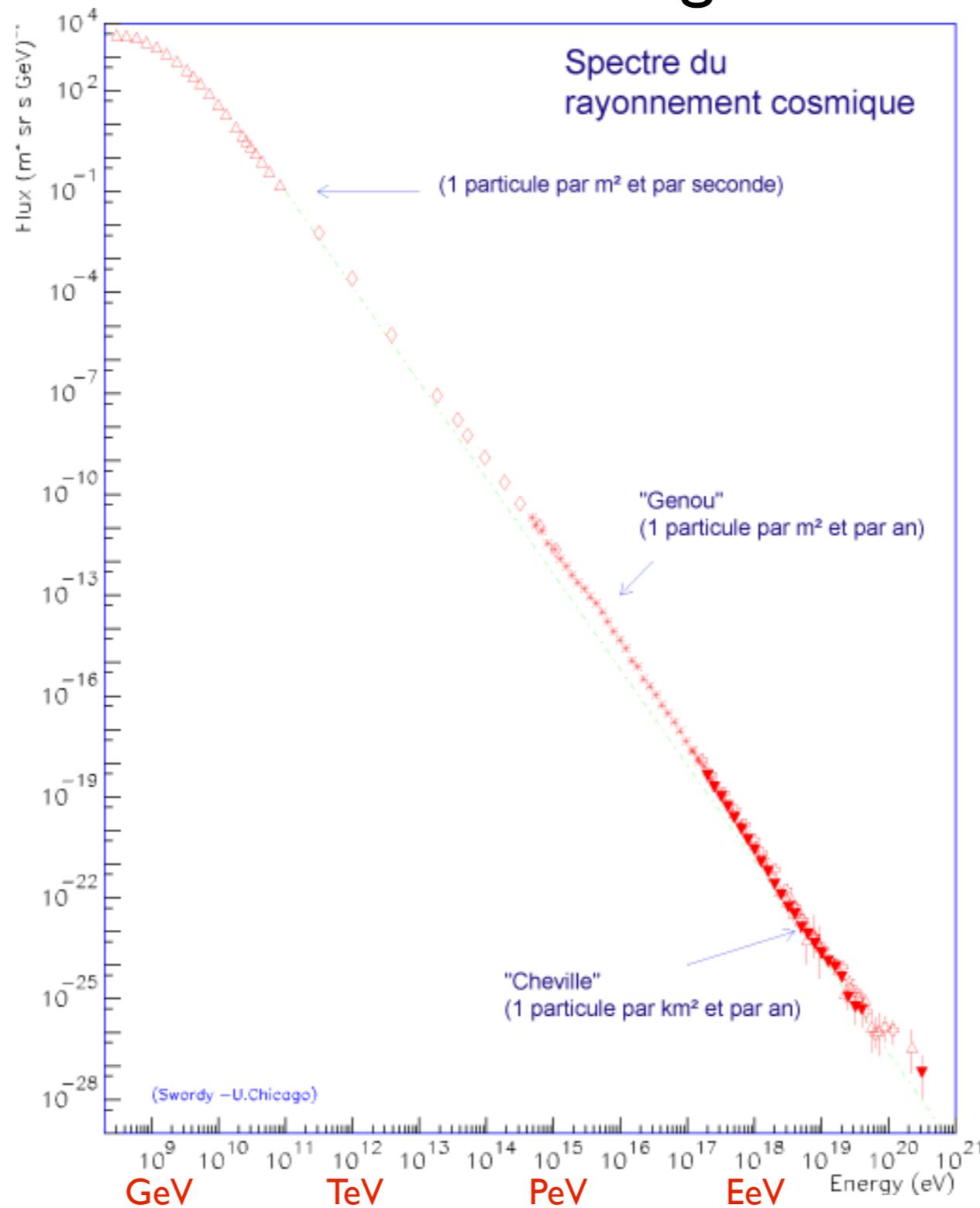
- 1938 Pierre Auger



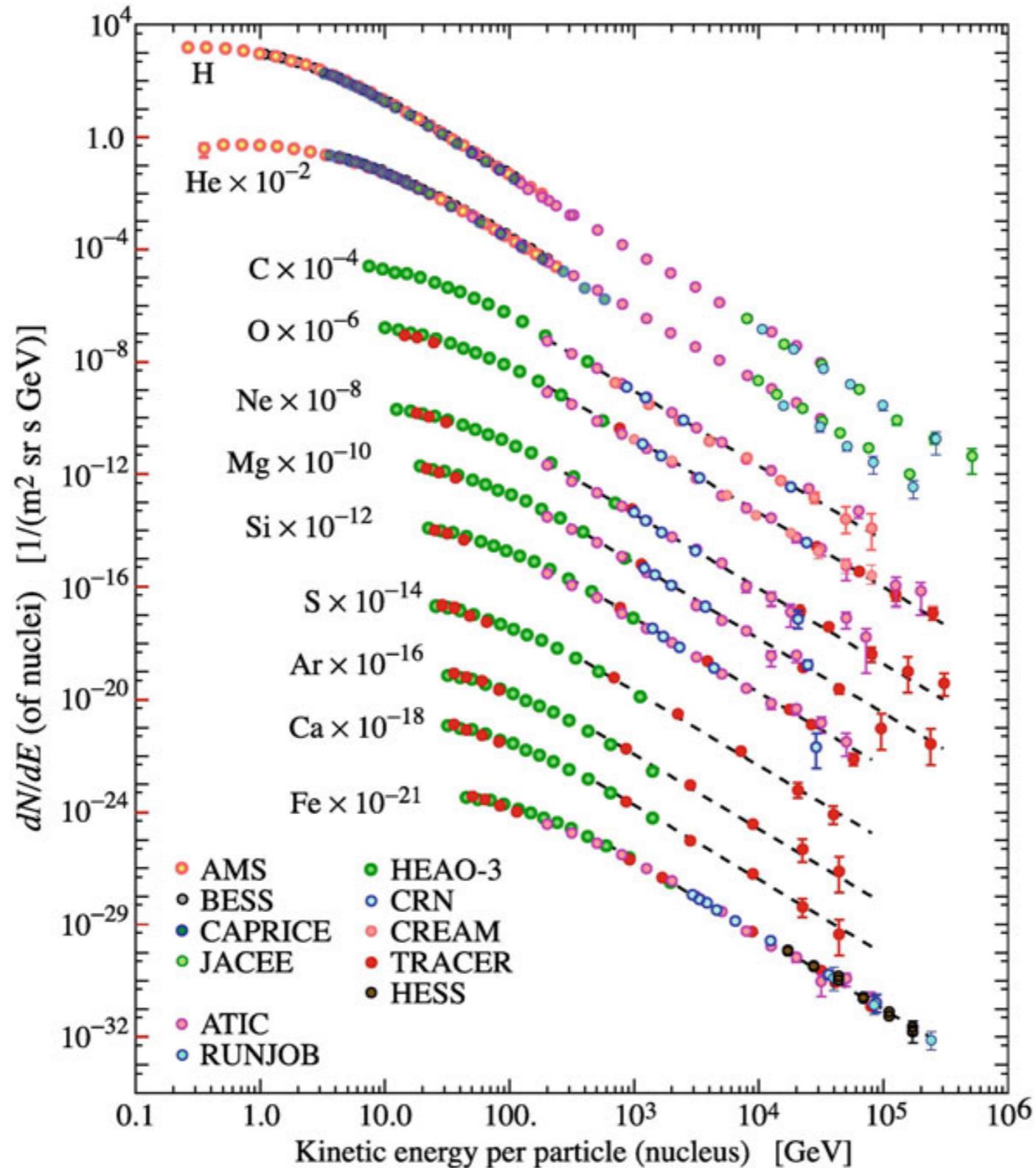
Prof. Piccard (ULB): 1931 premier vol stratosphérique

Rayonnement cosmique

Particules chargées



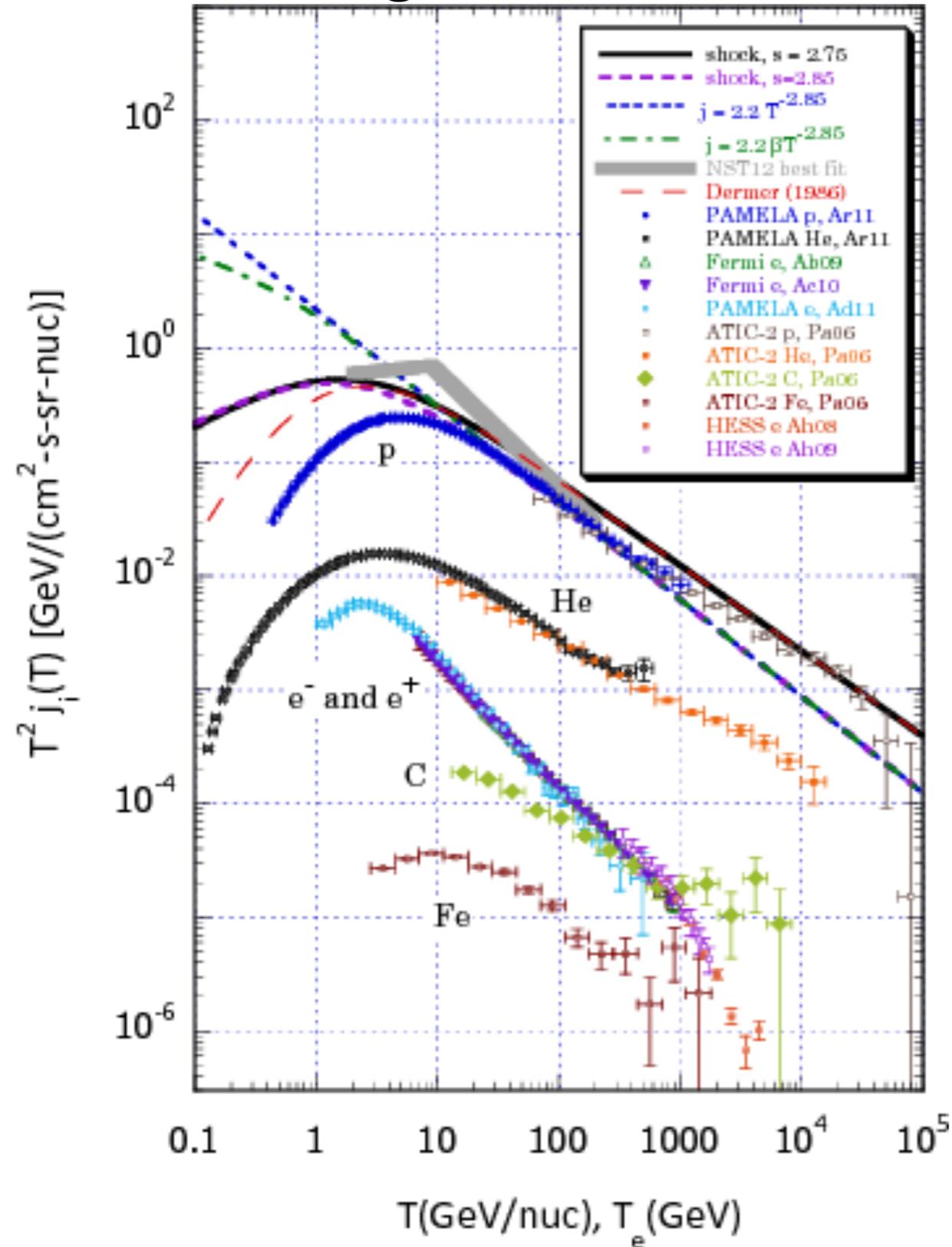
Rayonnement cosmique noyaux (chargés)



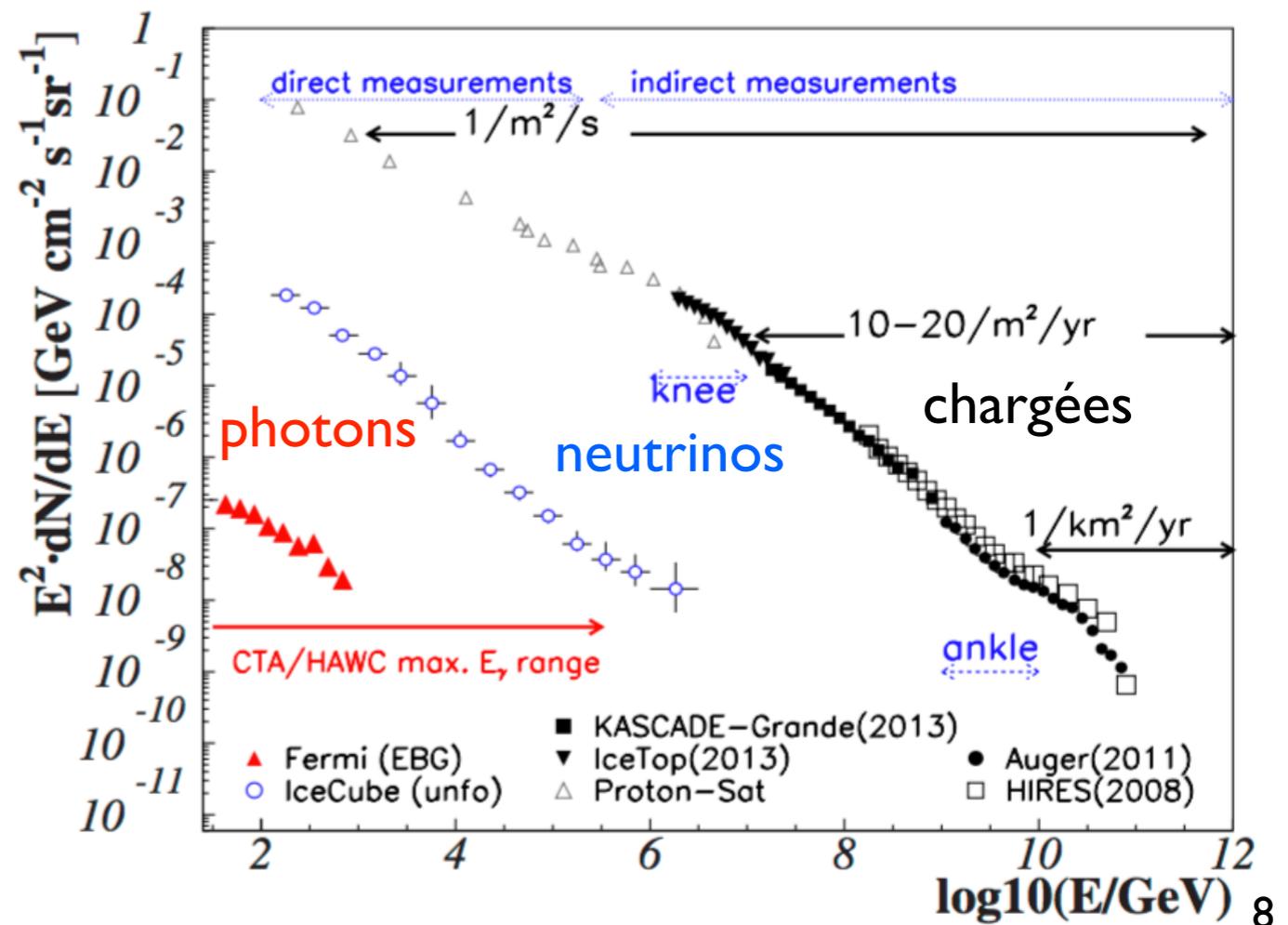
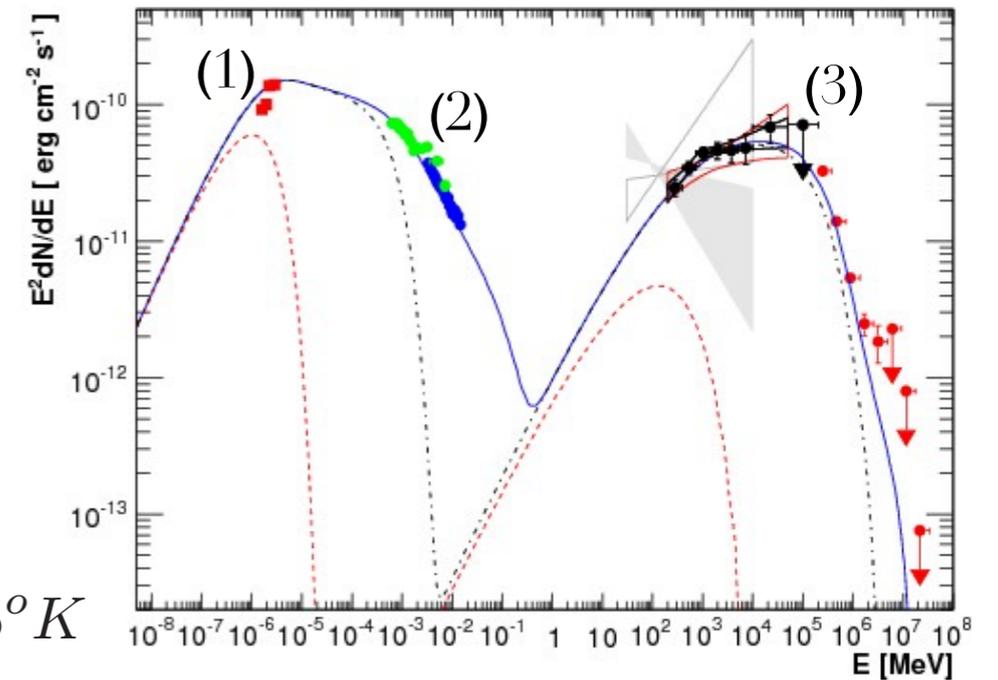
Rayonnement cosmique

Photons

Chargées



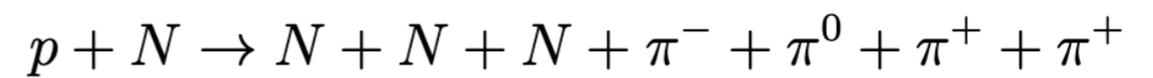
$$1\text{eV}/k_b = 11605^\circ\text{K}$$



Rayonnement cosmique

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

par exemple:

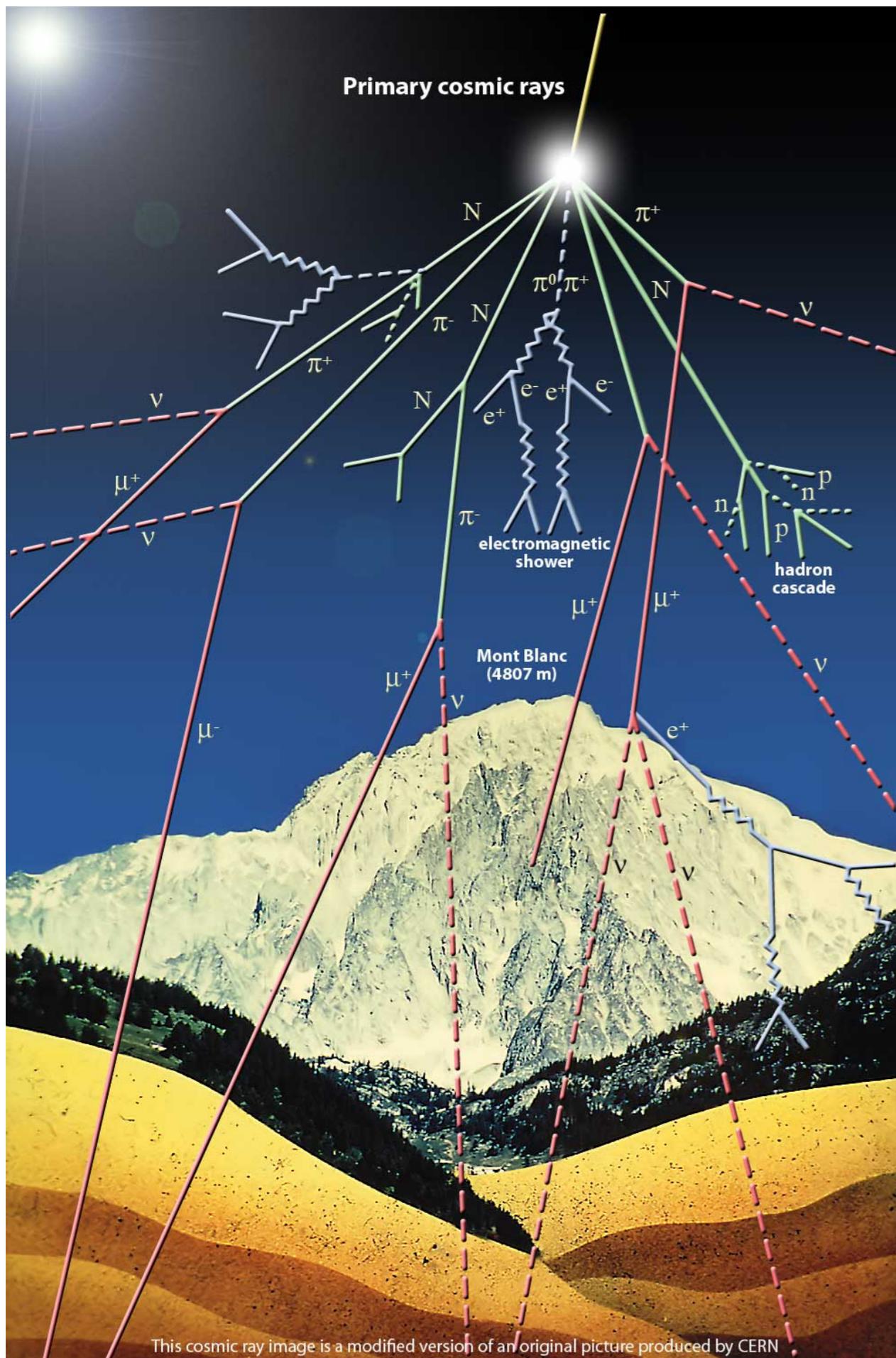


désintégration	temps de vie (τ)
$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	10^{-16} s
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	10^{-8} s
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	10^{-6} s

distance parcourue:

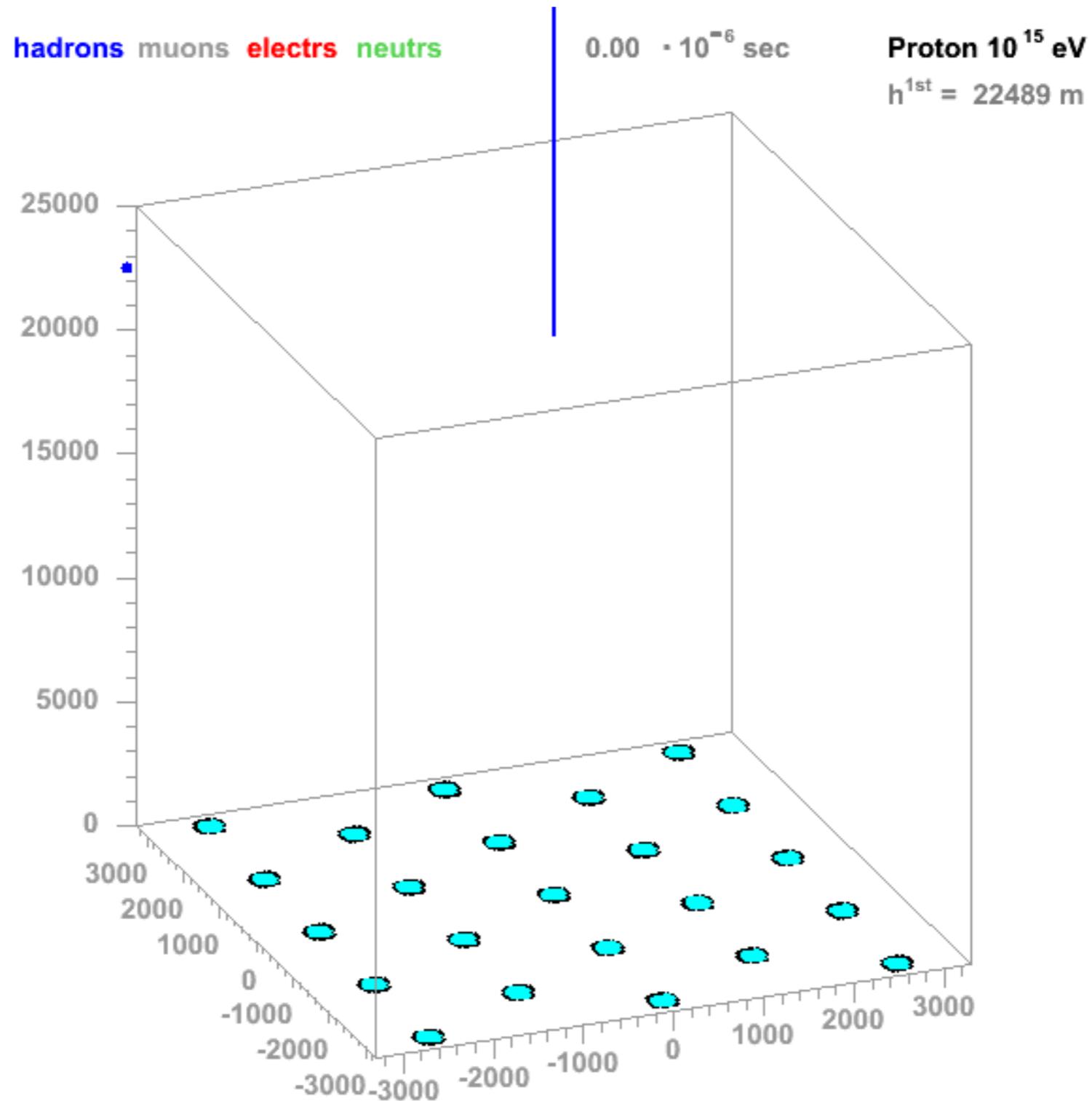
$$d = \beta\gamma c\tau \quad \text{où} \quad \beta = v/c \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

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



This cosmic ray image is a modified version of an original picture produced by CERN

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 :

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

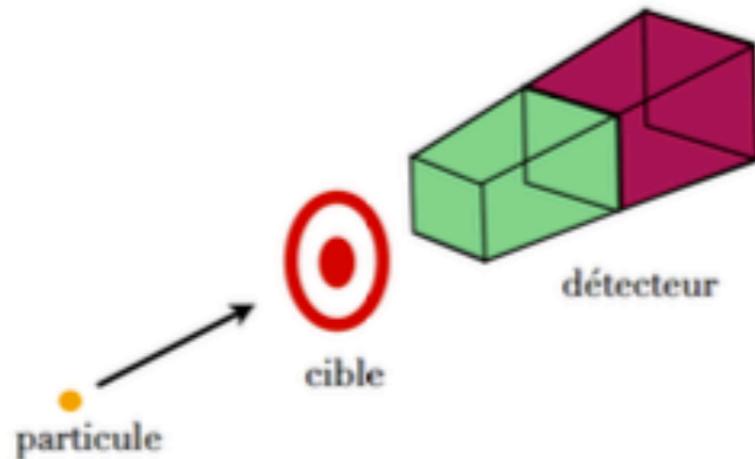
Accélérateurs

Cible fixe

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

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

$$\rightarrow s = 2E_A m_B$$



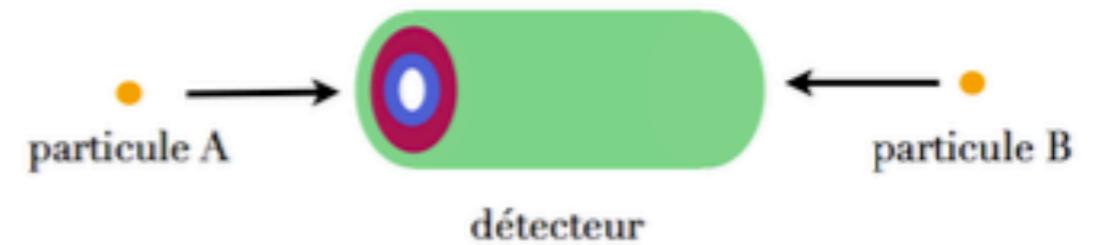
Mode collisionneur

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

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

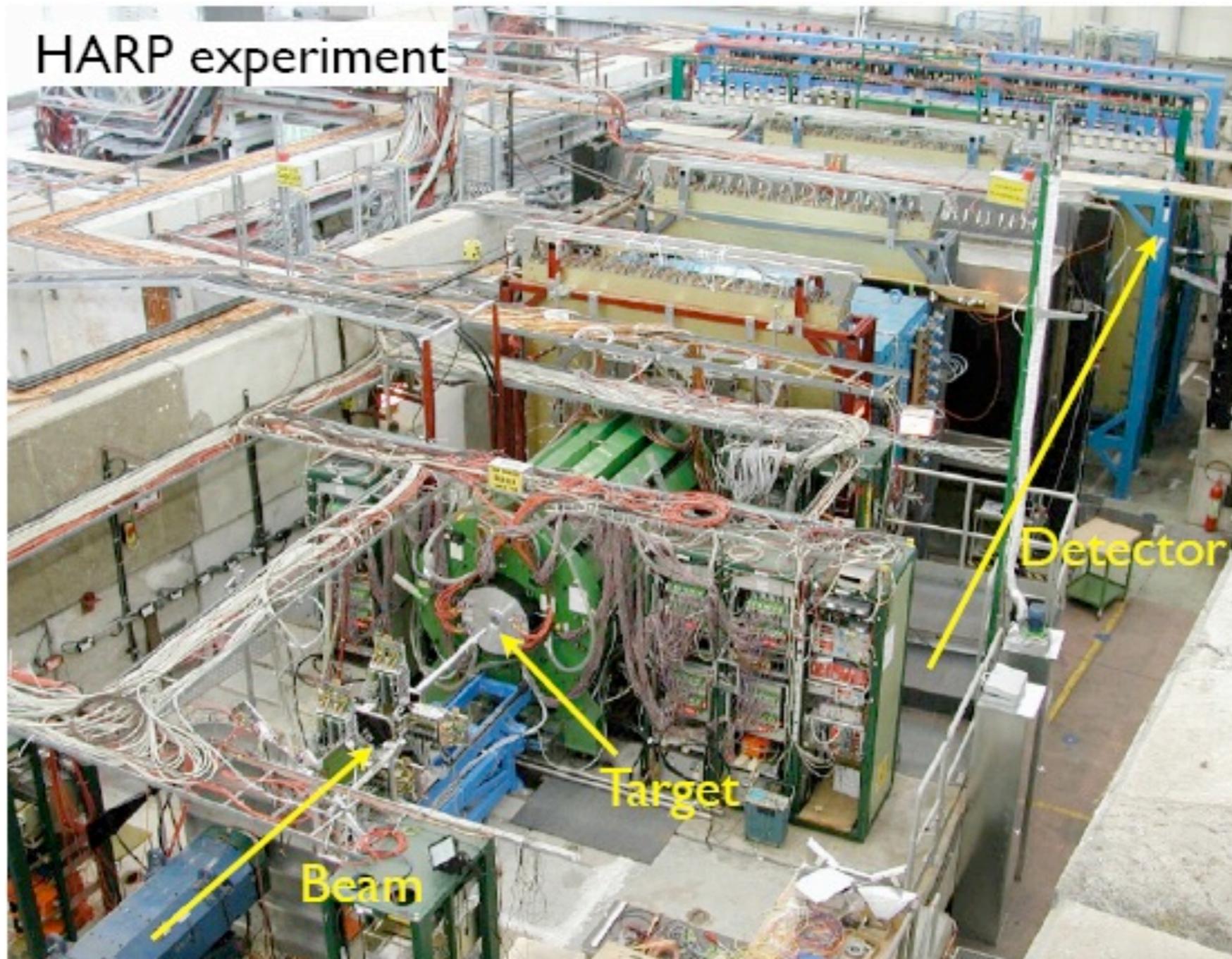
$$\rightarrow s = 4E_A E_B$$

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

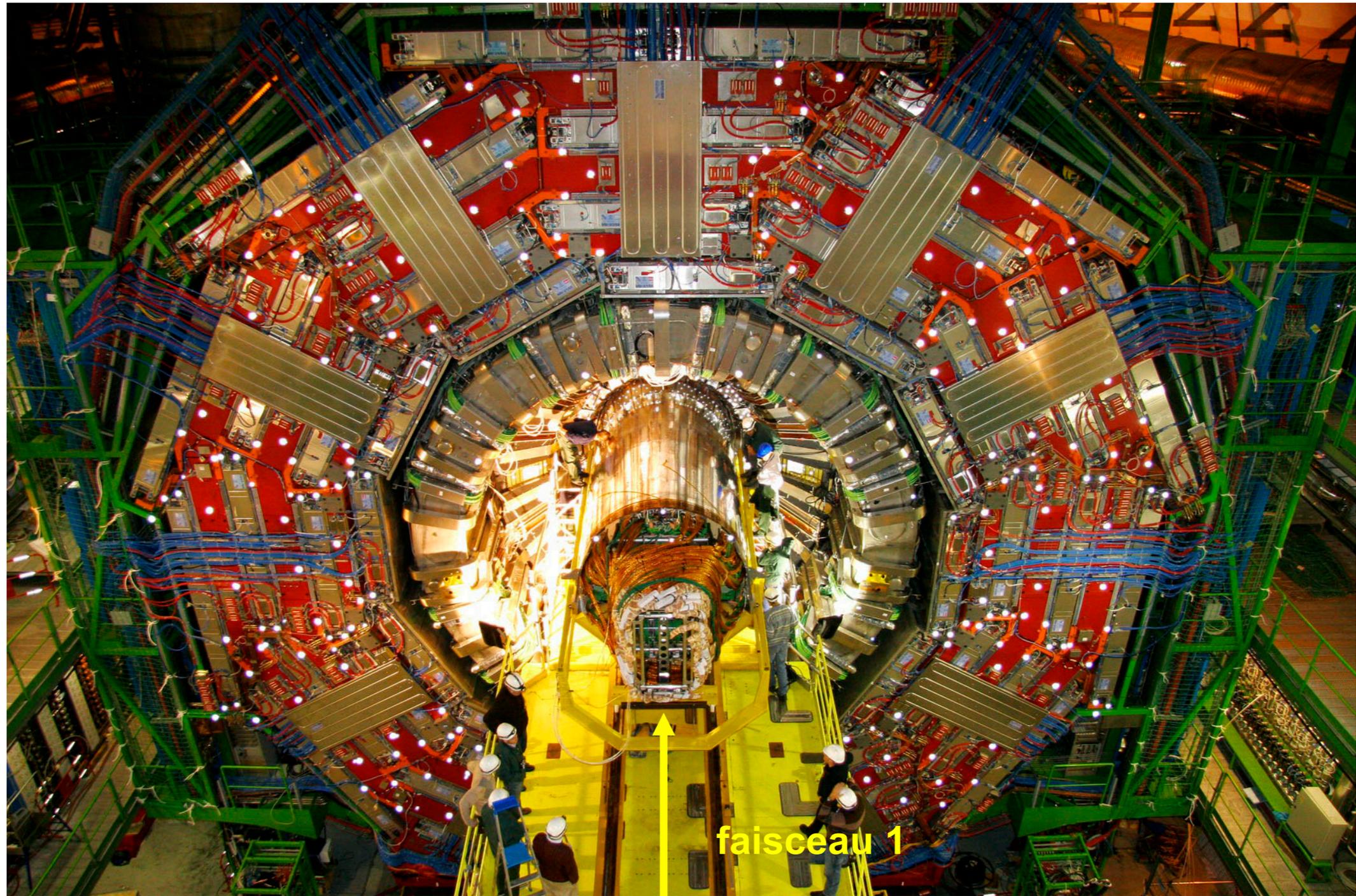


$$s = m_{AB}^2 = (p_{A+B})^\mu (p_{A+B})_\mu = (E_A + E_B)^2 - (\vec{p}_A + \vec{p}_B)^2$$

Accélérateurs - cible fixe



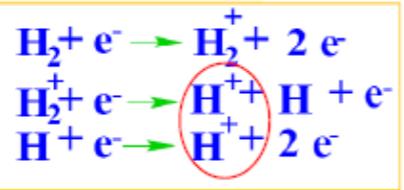
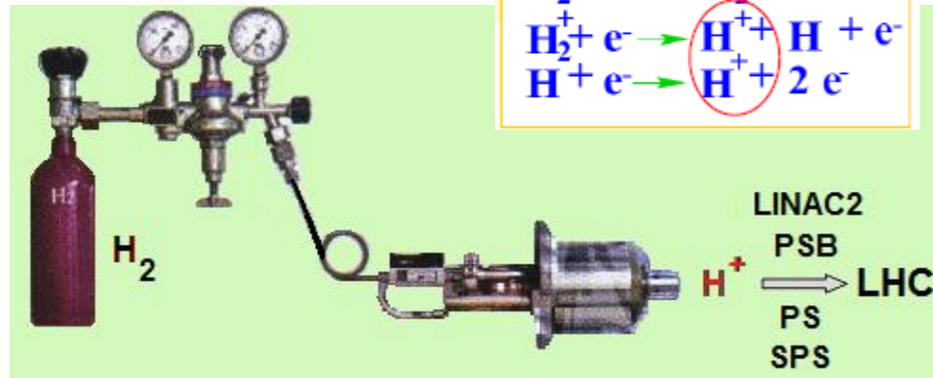
Accélérateurs - collisionneur



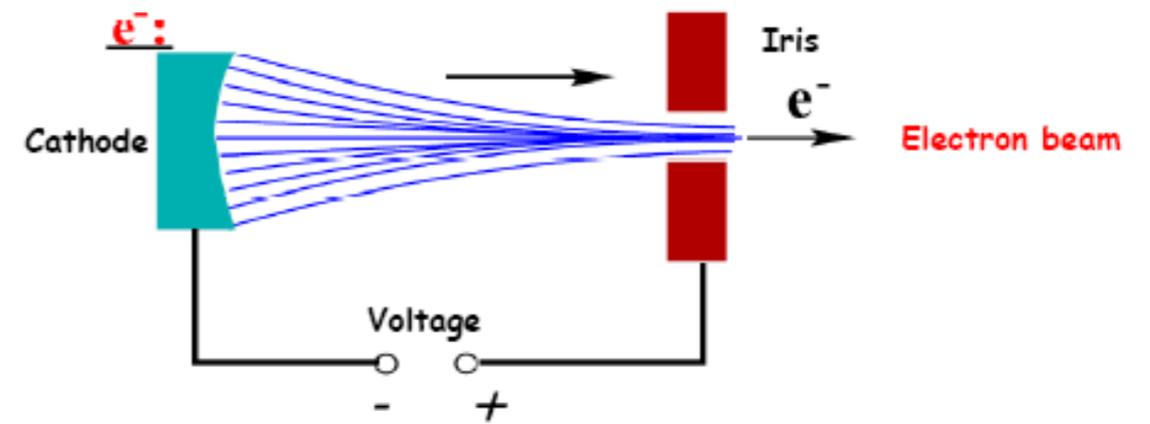
Entrée du tube à vide dans le détecteur CMS

Sources de protons/électrons

source de protons
du CERN

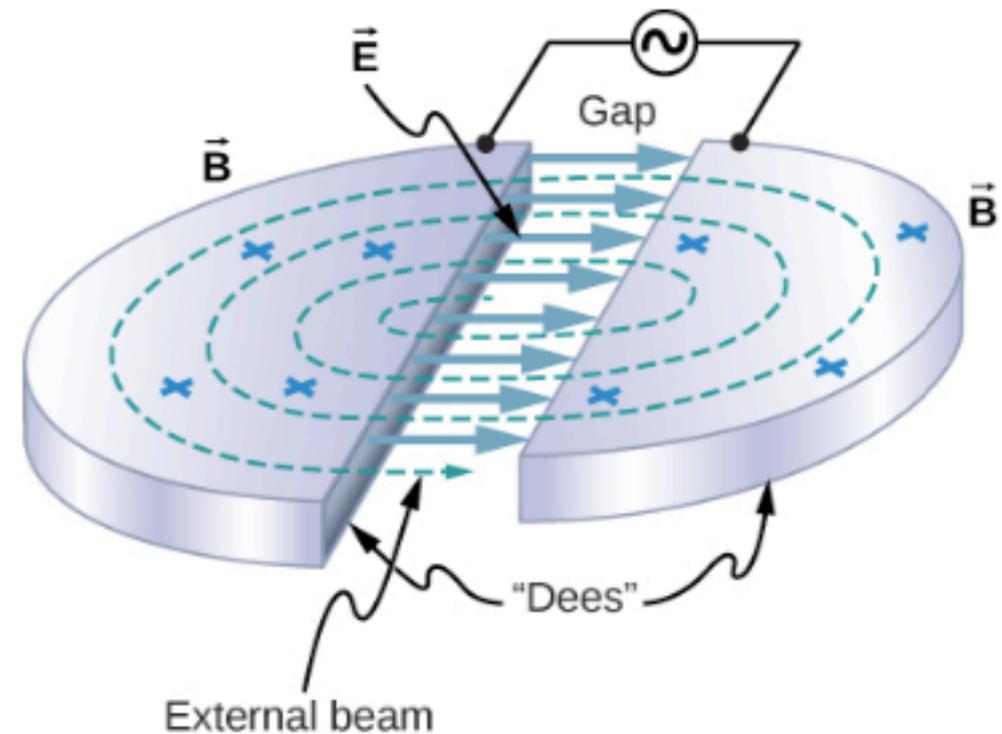
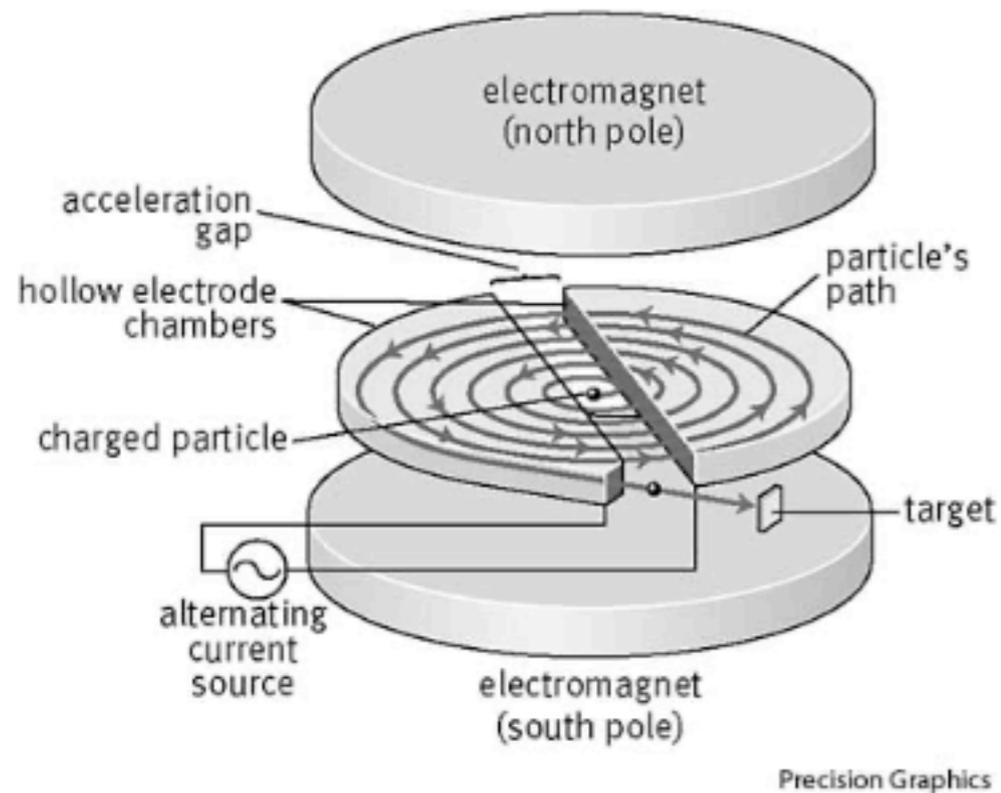


principe d'une
source d'électrons



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

Le cyclotron



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

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

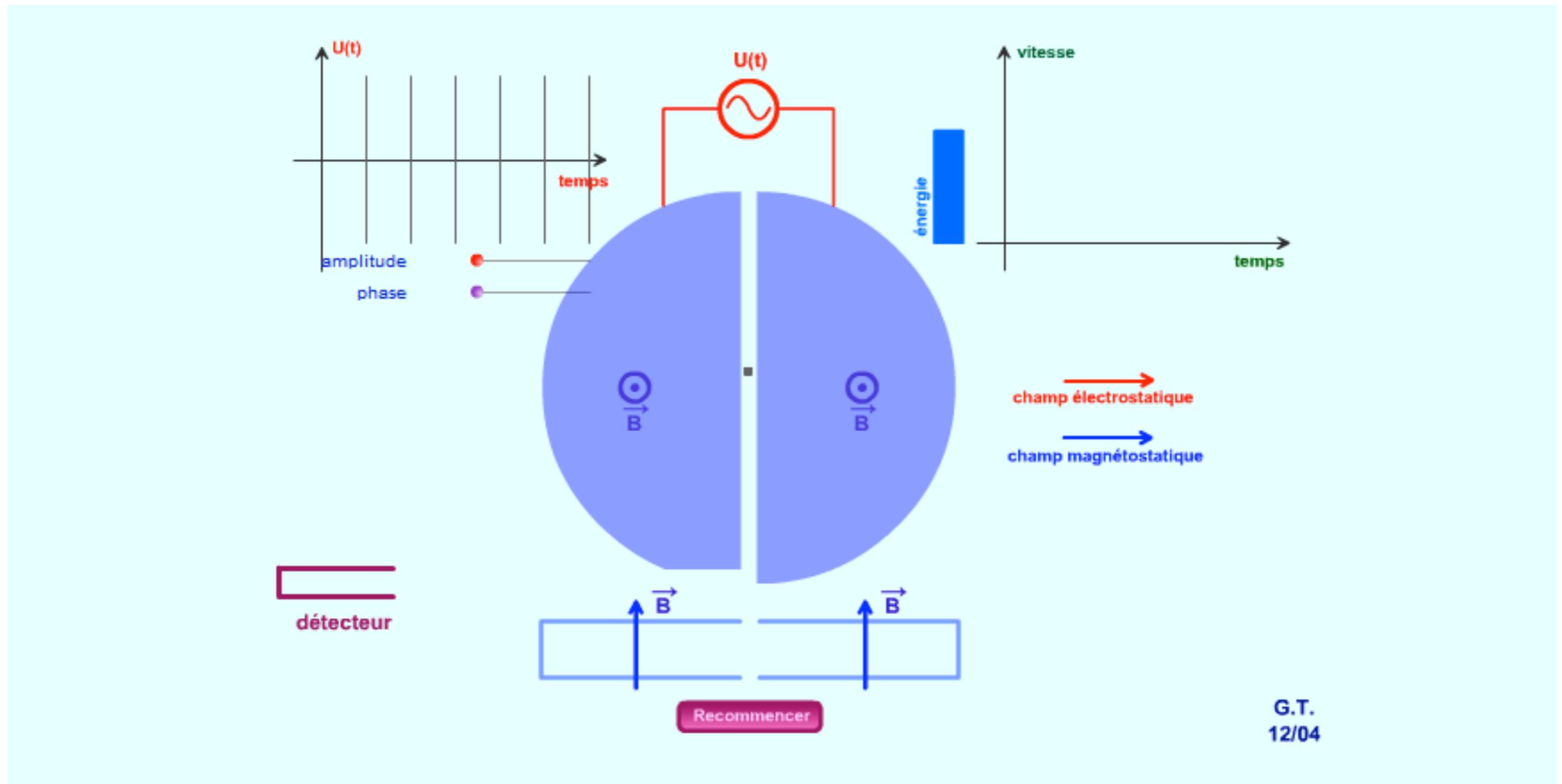
$$\text{rayon de courbure : } R = \frac{m v}{q B}$$

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

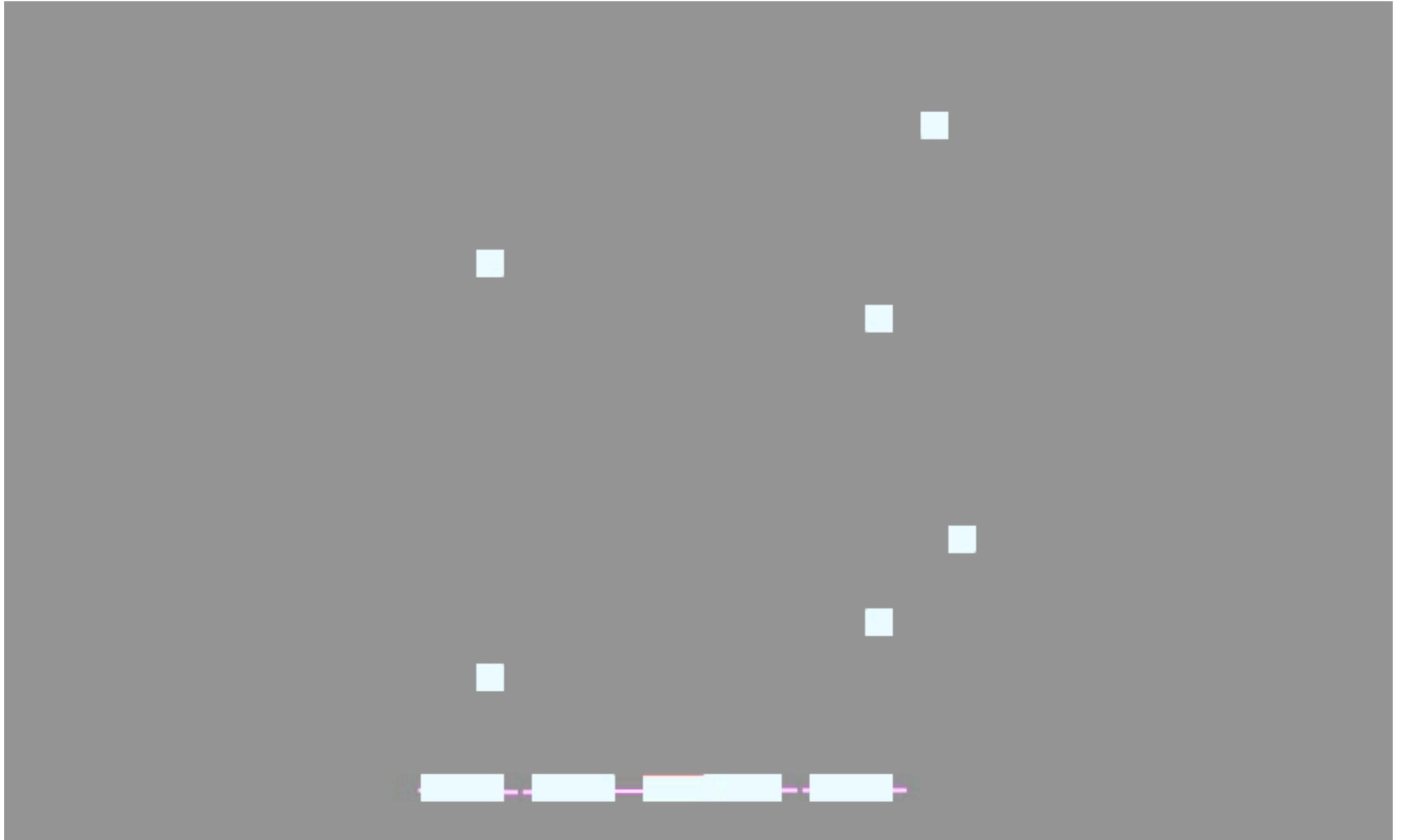
$$\text{correction relativiste : } R = \frac{\gamma m v}{q B} \quad \text{et} \quad \omega = \frac{q B}{\gamma m} \quad \text{non constante}$$

Le cyclotron

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

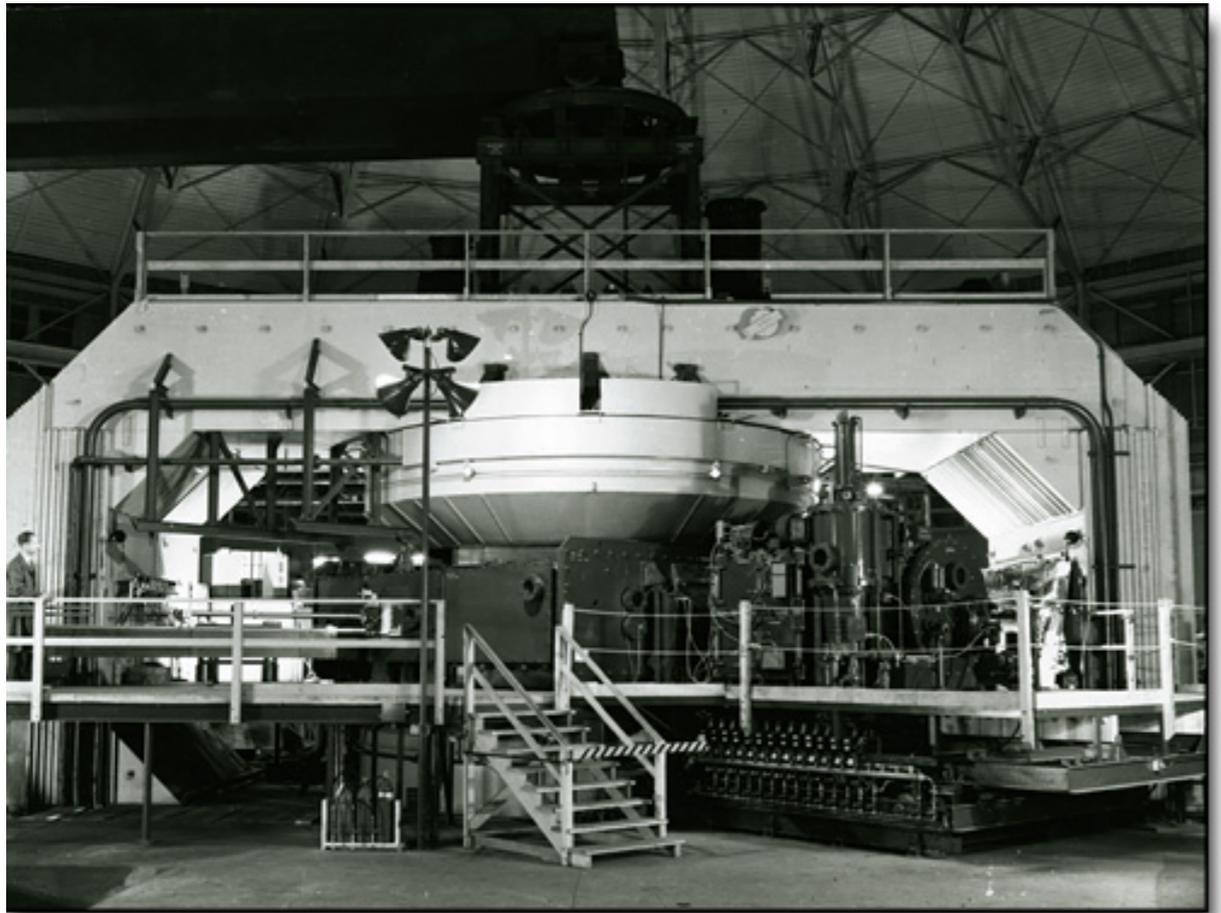


Le cyclotron (animation)



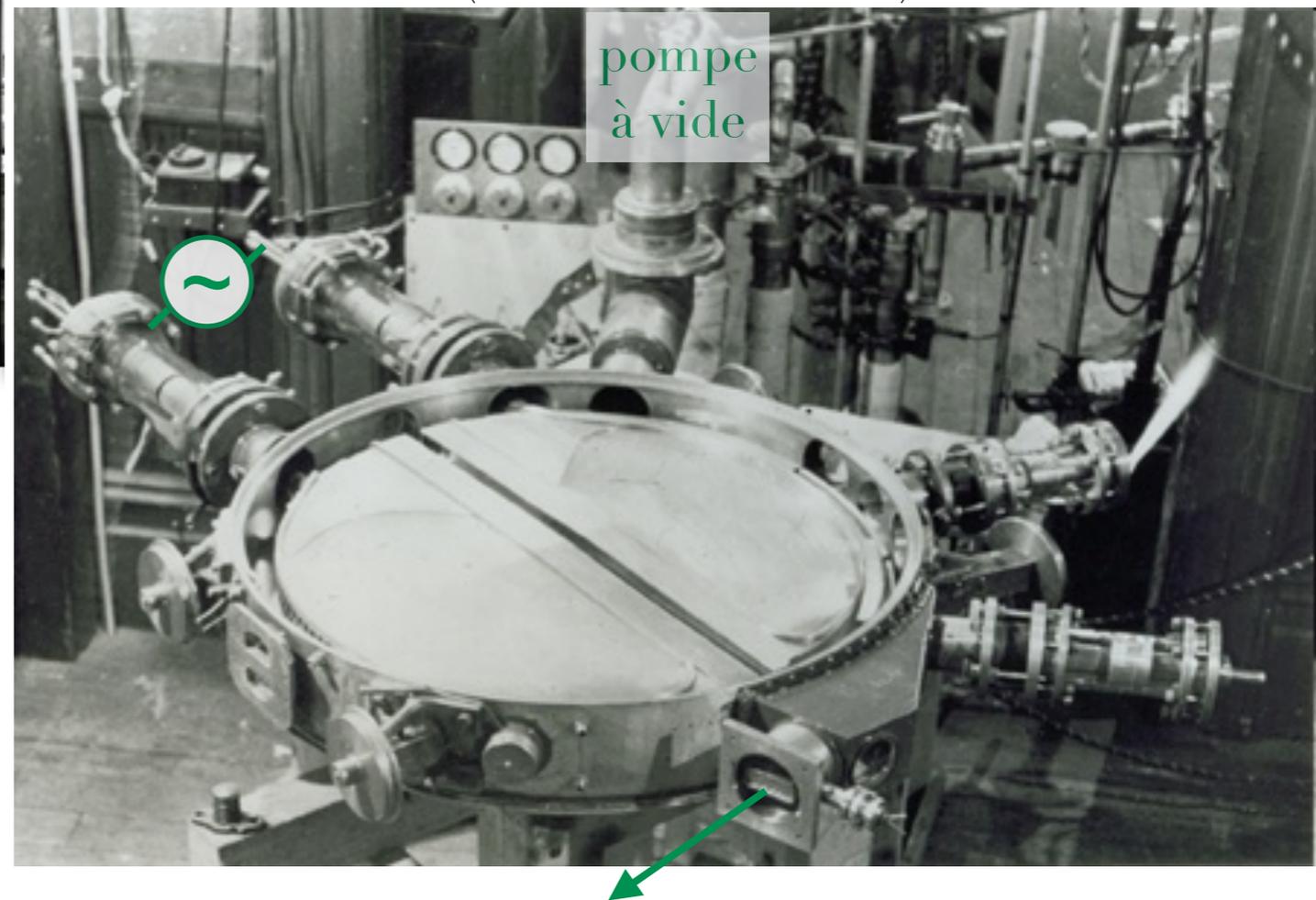
Animation: <https://www.iihe.ac.be/~lfavart/cyclotron.html>

Le cyclotron



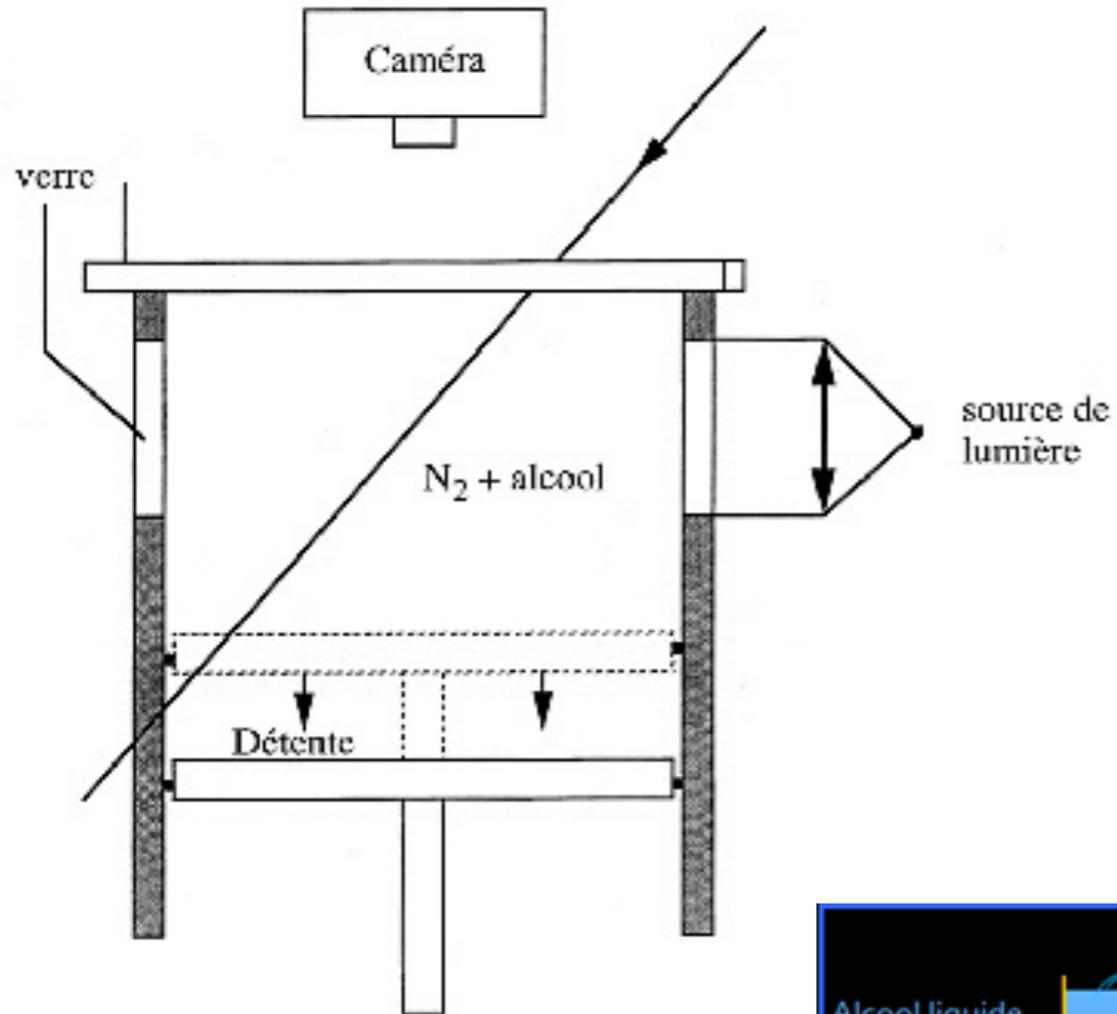
Le Cyclotron de Berkley de 184" (4,6m)
en 1940, lors de son installation

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

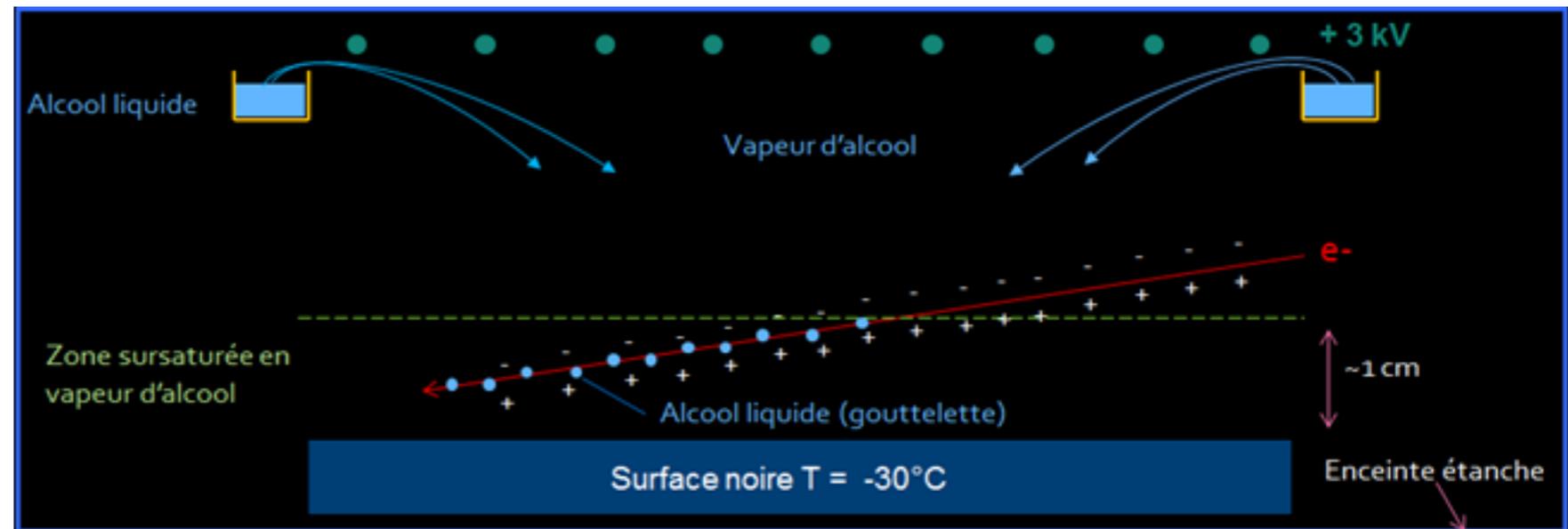
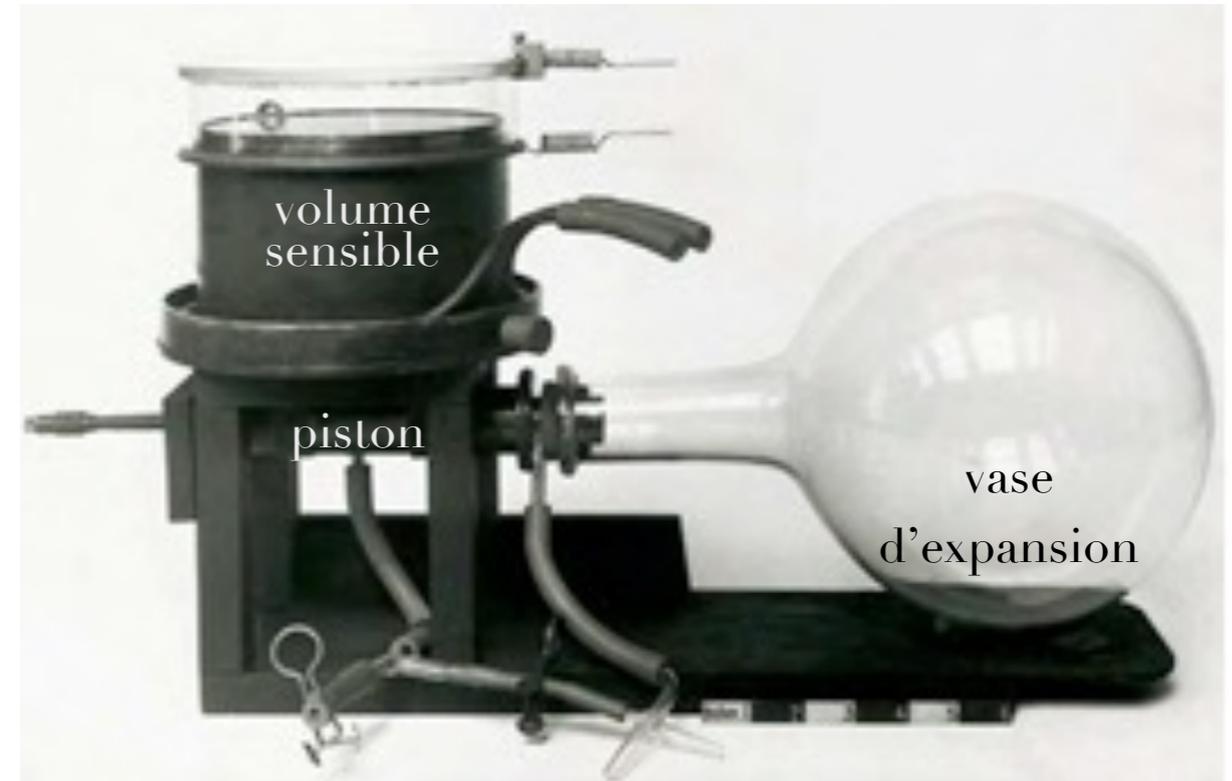


Chambre à brouillard

ionisation d'un gaz sursaturé en alcool



Chambre à brouillard de Wilson - 1911

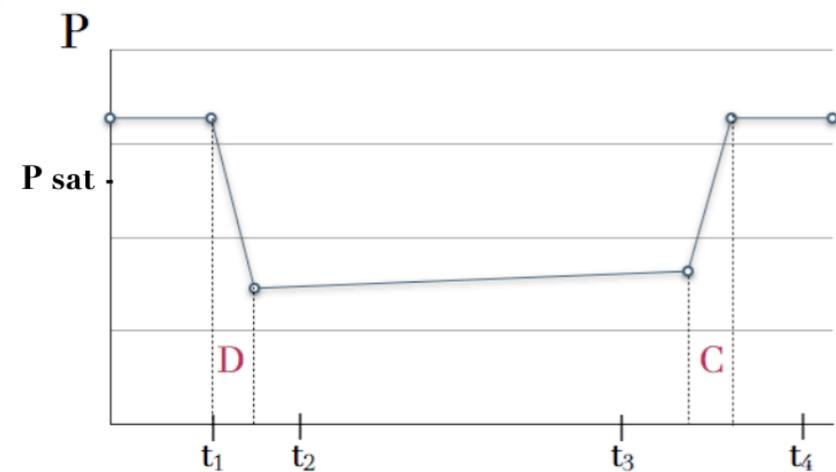
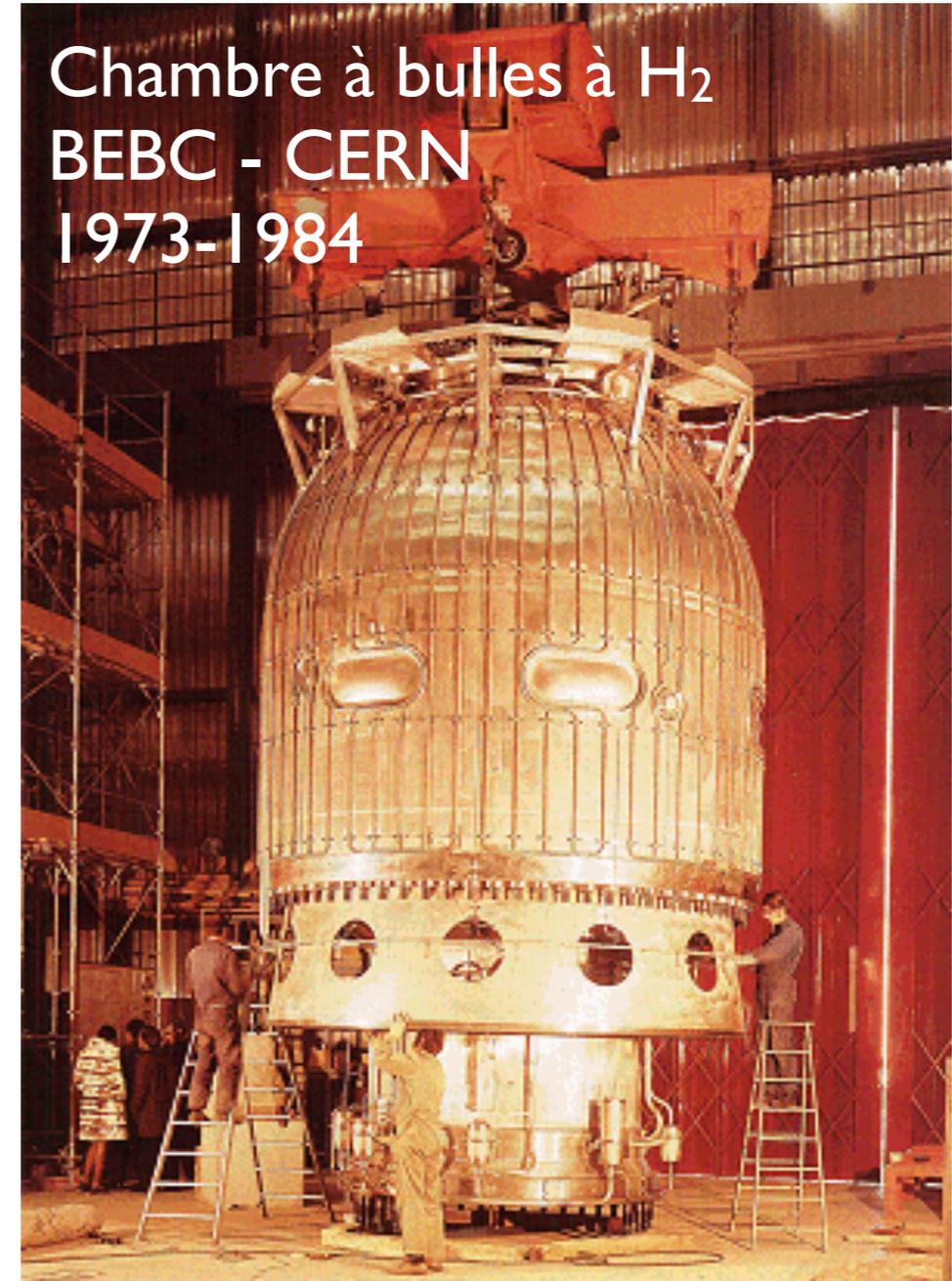
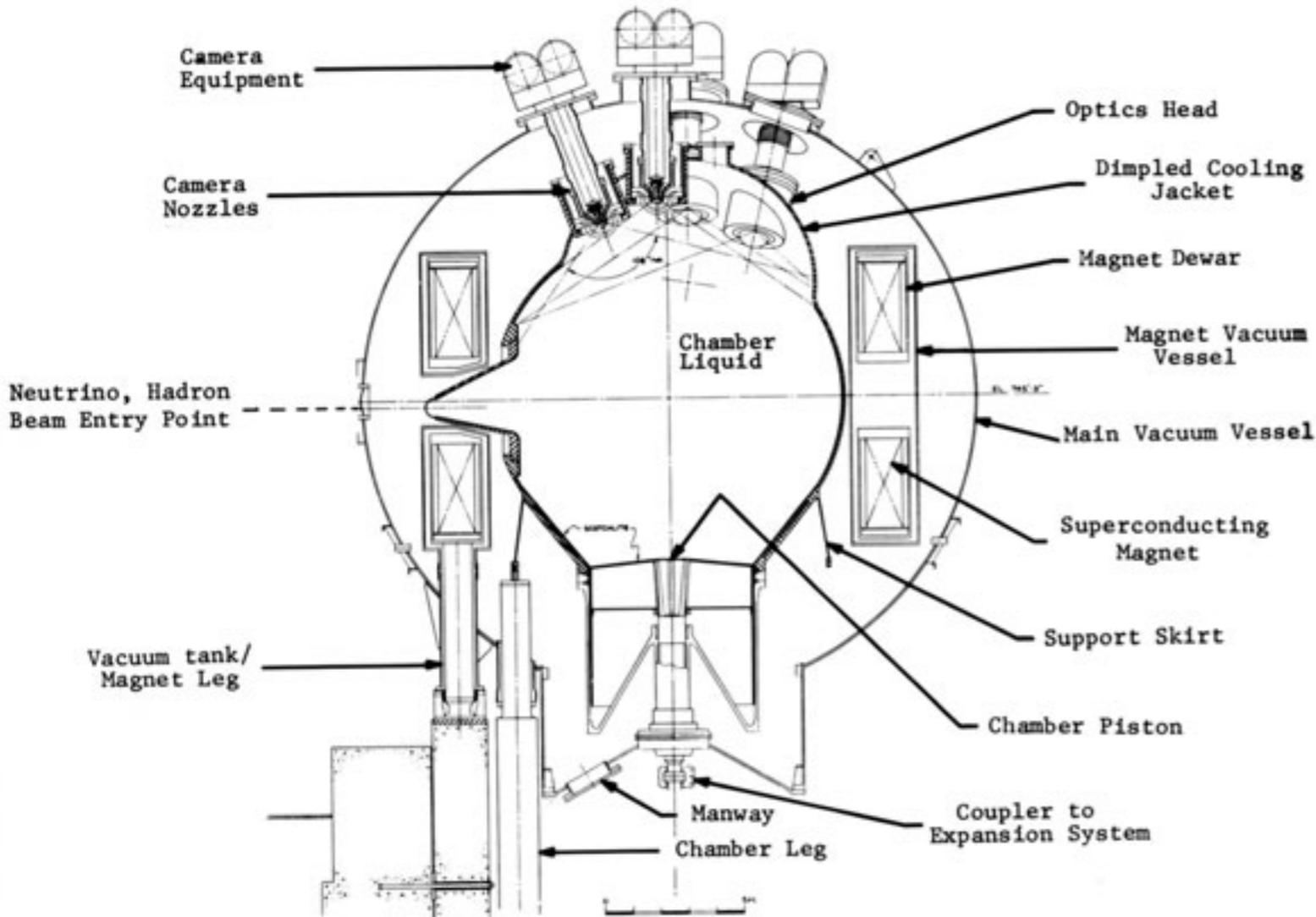


Chambre à brouillard (vidéo)



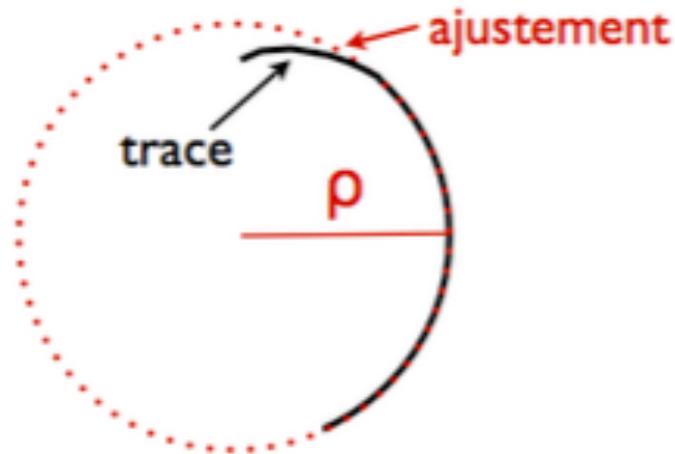
La chambre à bulles

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



- D décompression
- C compression
- t₁ signal arrivée faisceau moins 1 ms
- t₂ arrivé du faisceau
- t₃ prise des clichés photographiques
- t₄ avancement du film

Mesure de l'impulsion



ρ : le rayon de courbure

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

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

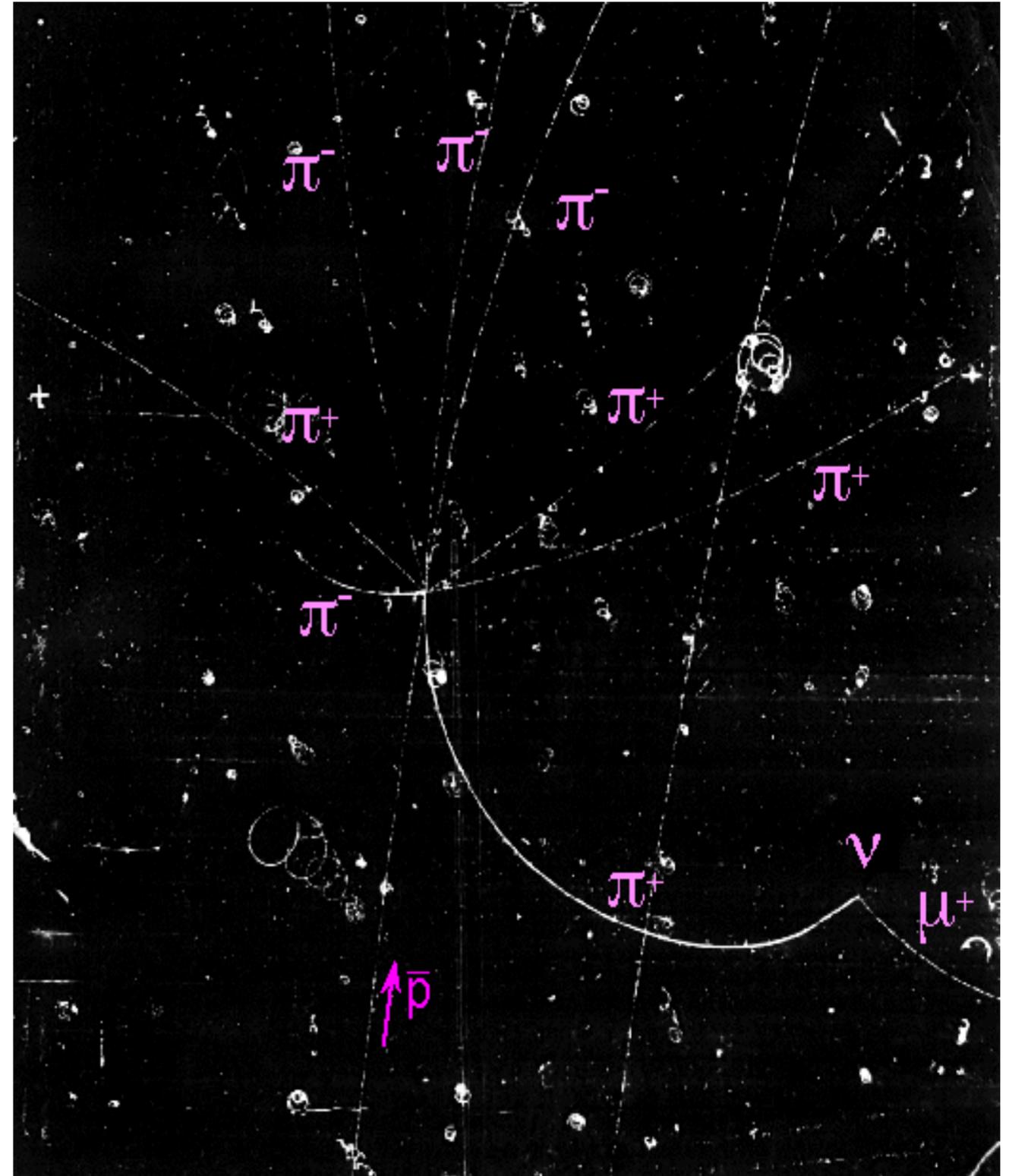
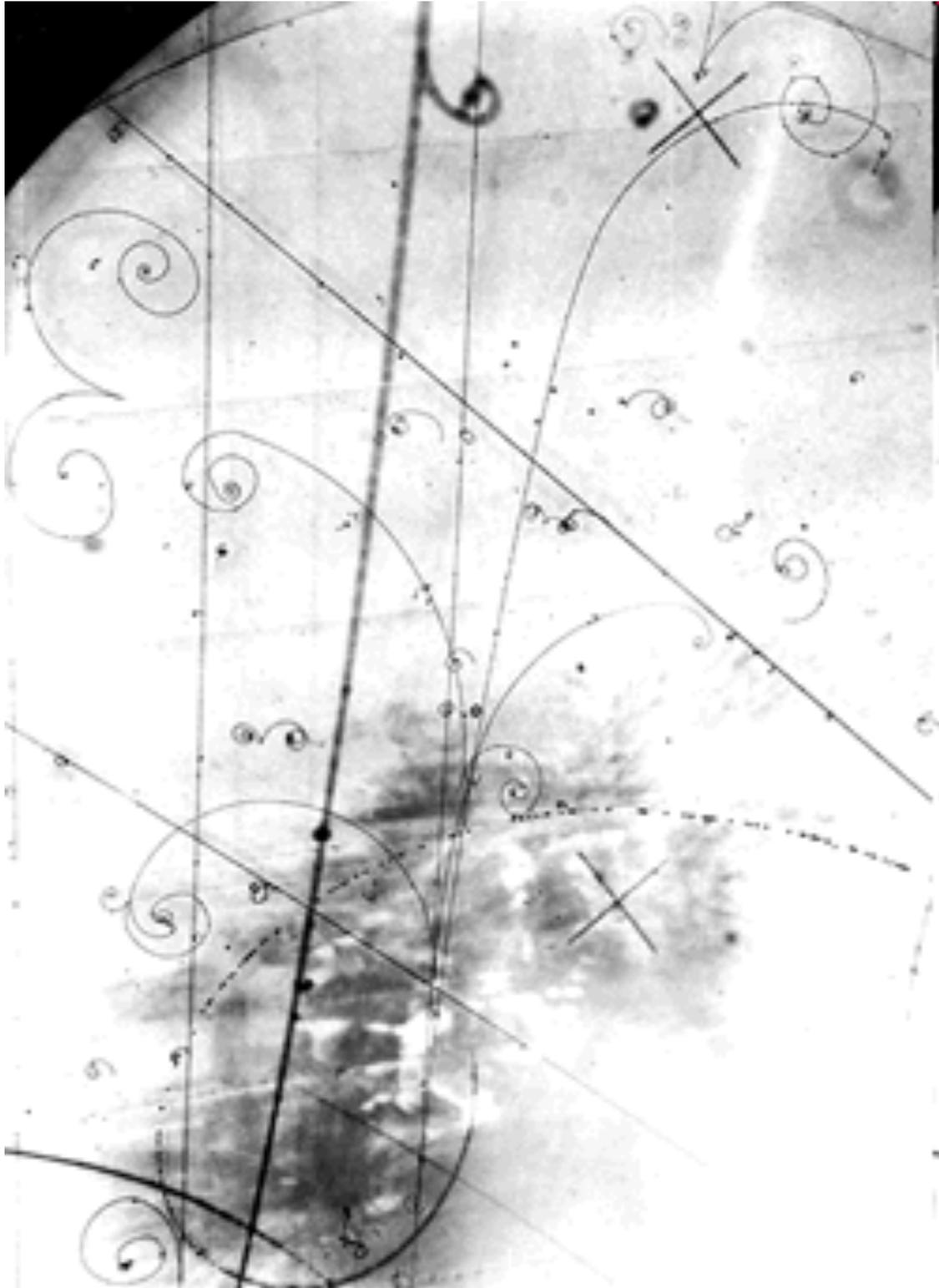
pour une charge Z en unité de charge électrique

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

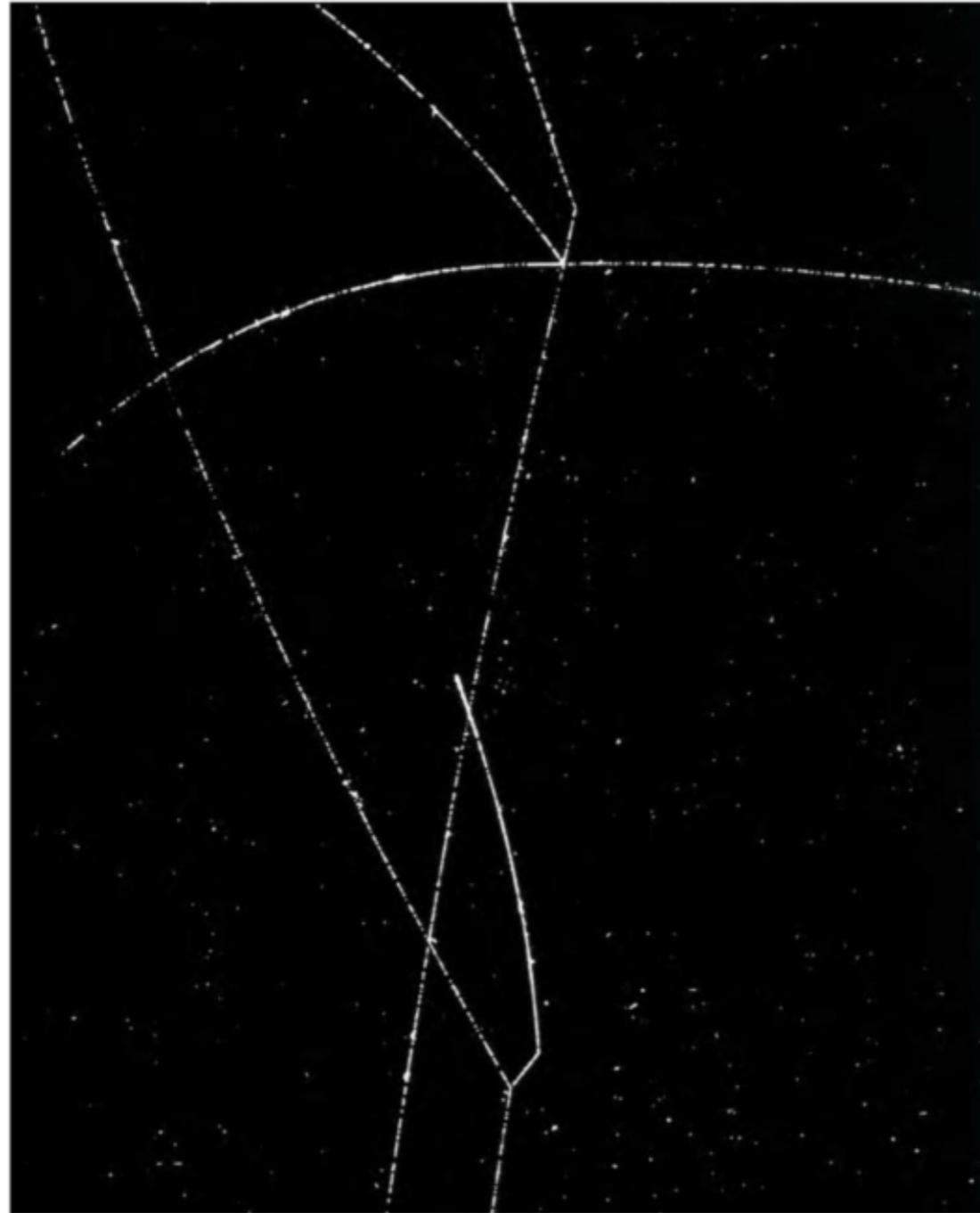
$$\begin{aligned} |p| &= p_T / \sin \theta & p_x &= |p| \sin \theta \cos \phi \\ p_z &= |p| \cos \theta & p_y &= |p| \sin \theta \sin \phi \end{aligned}$$

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

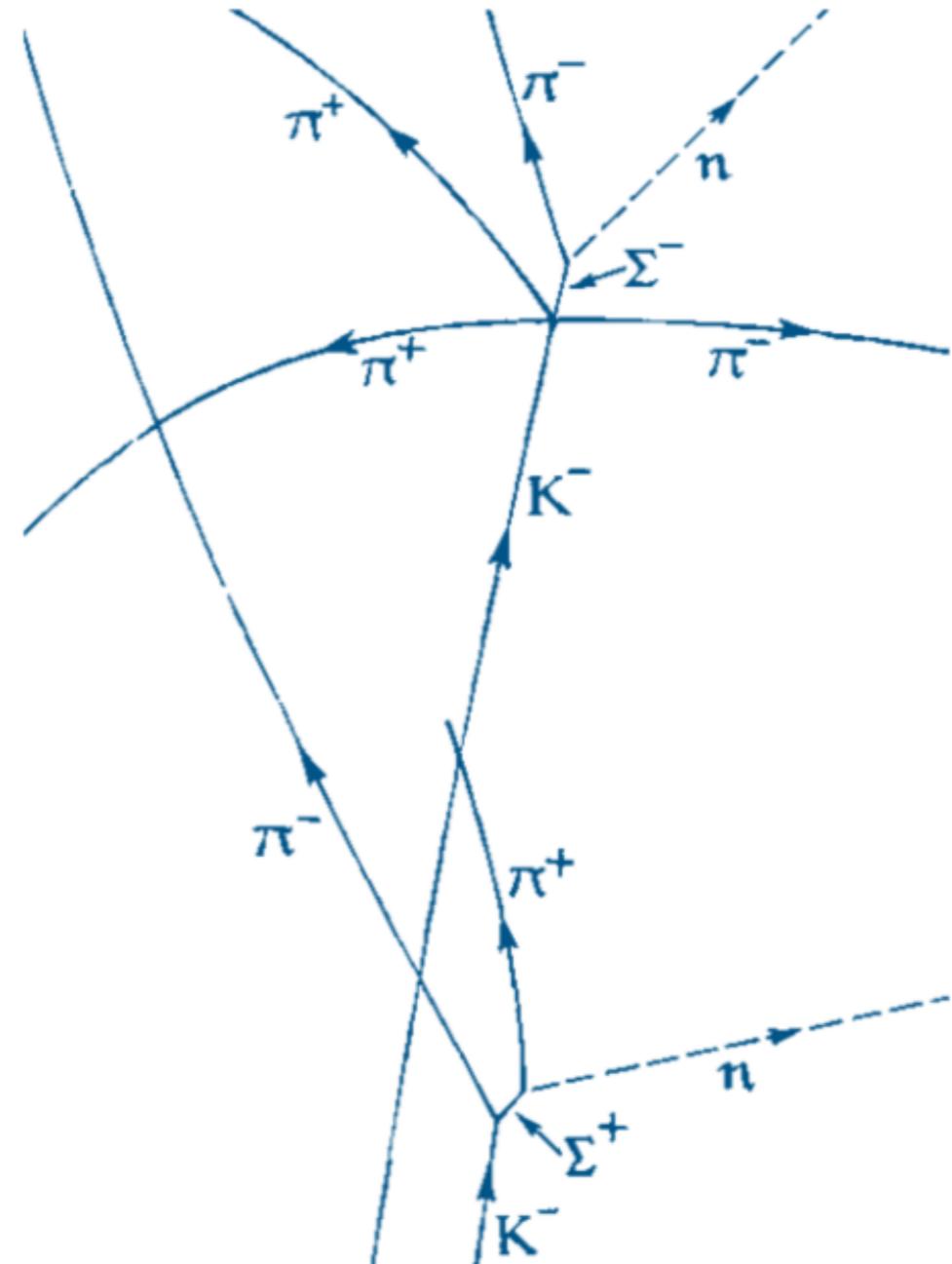
Clichés de chambre à bulles



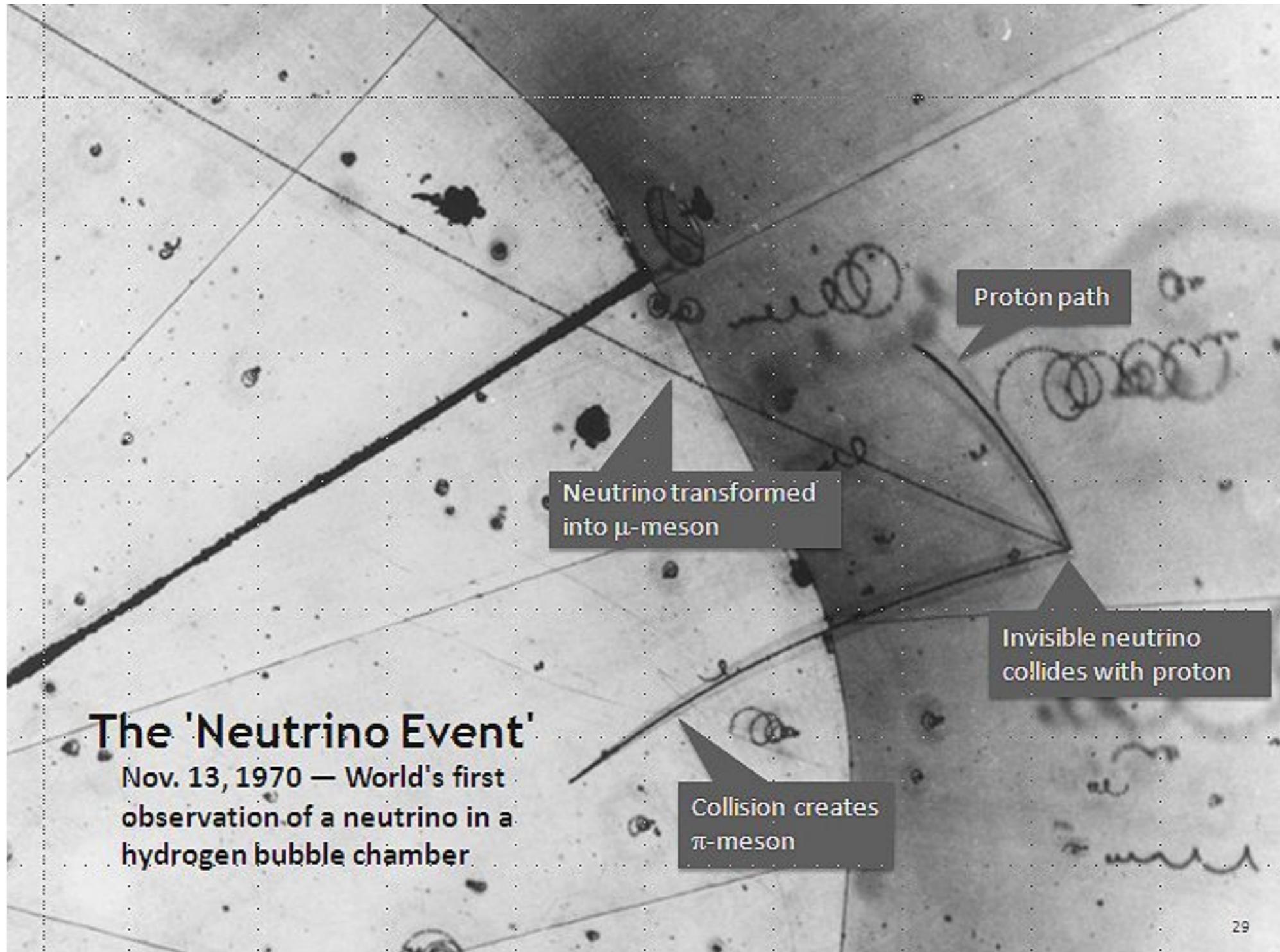
Clichés de chambre à bulles



↑
Faisceau de K^-



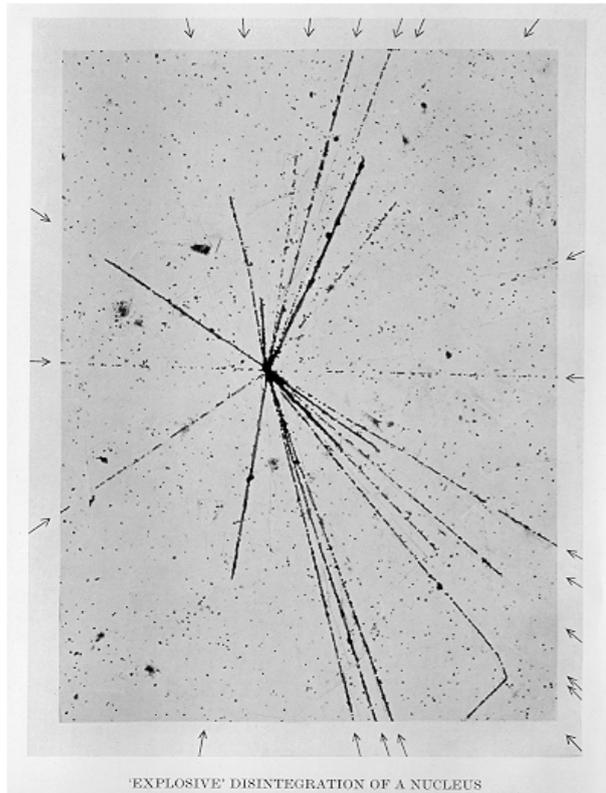
Clichés de chambre à bulles



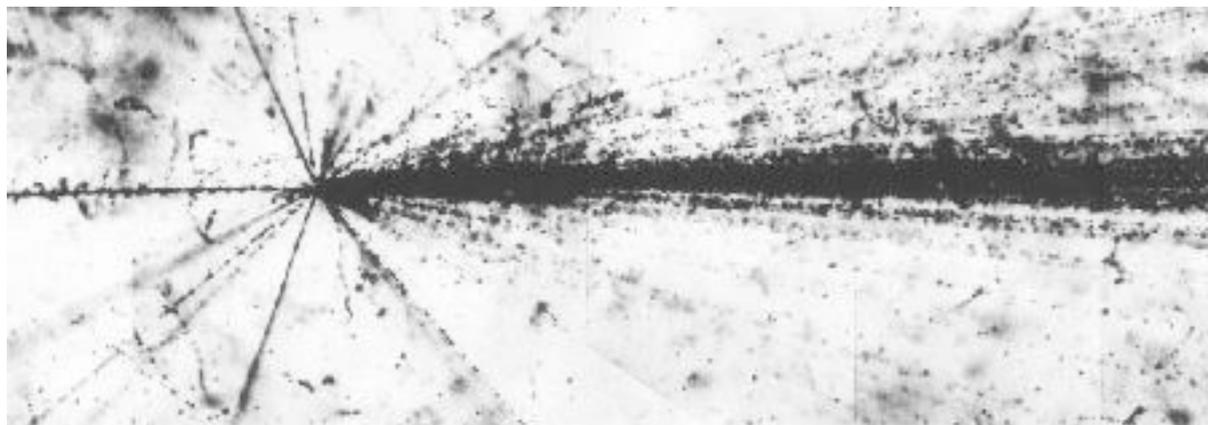
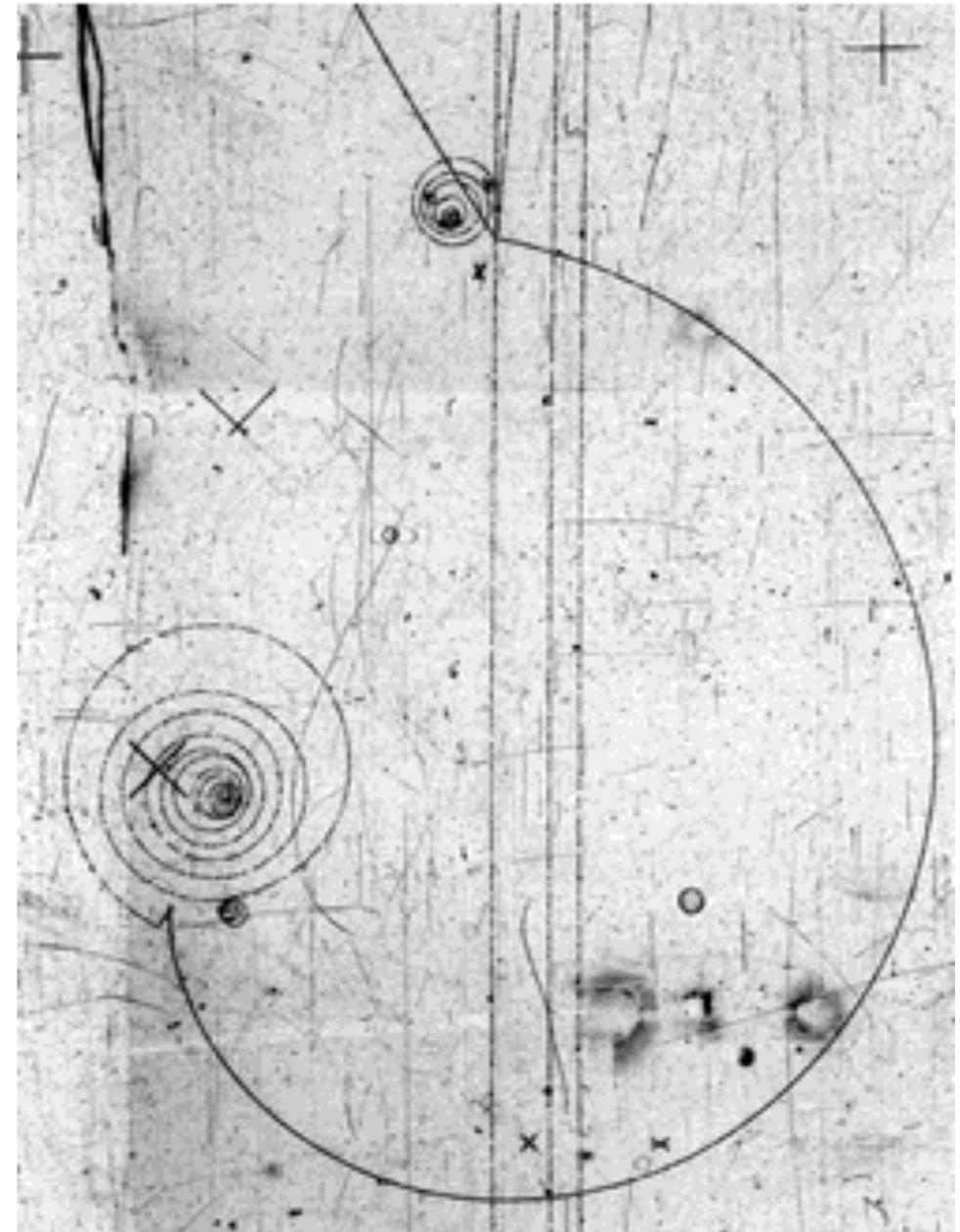
← Faisceau de neutrinos

Emulsion nucléaire

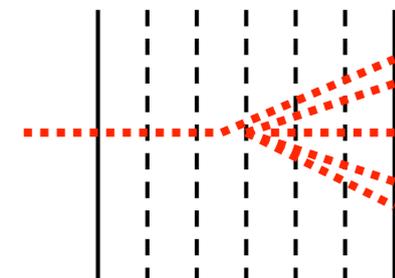
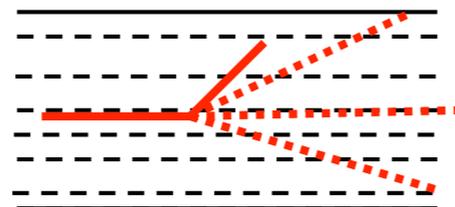
Effet chimique : noircissement des halogénures d'argent (AgBr) sous l'action de la lumière



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

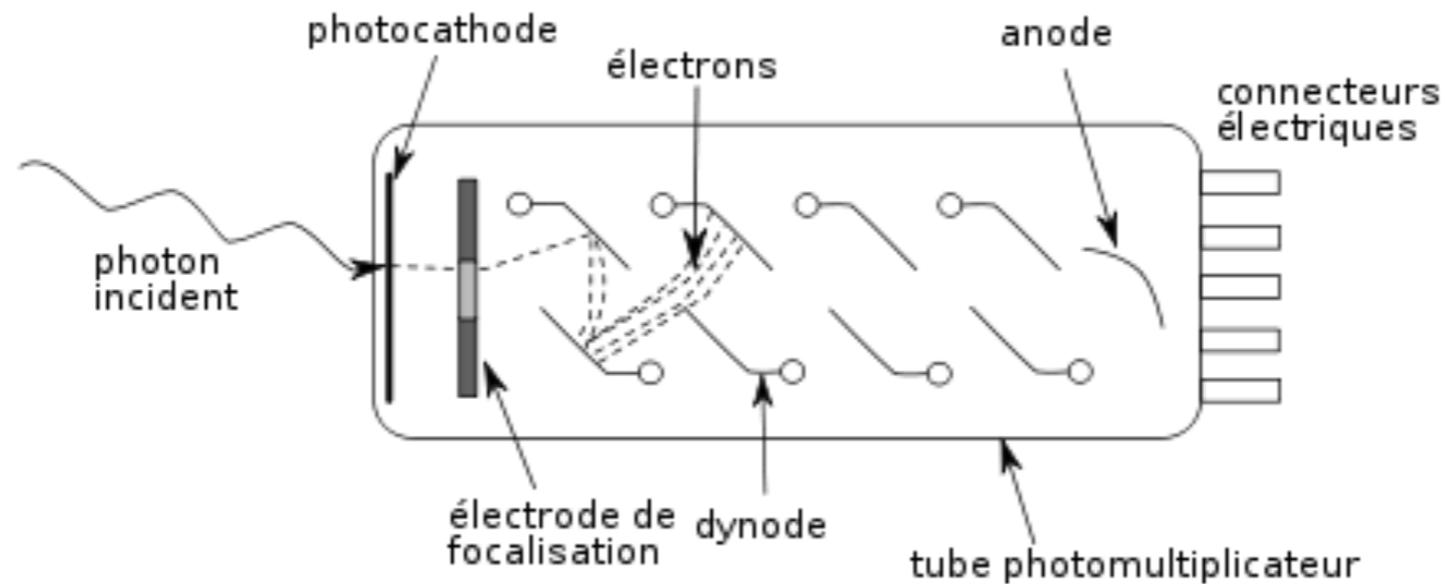
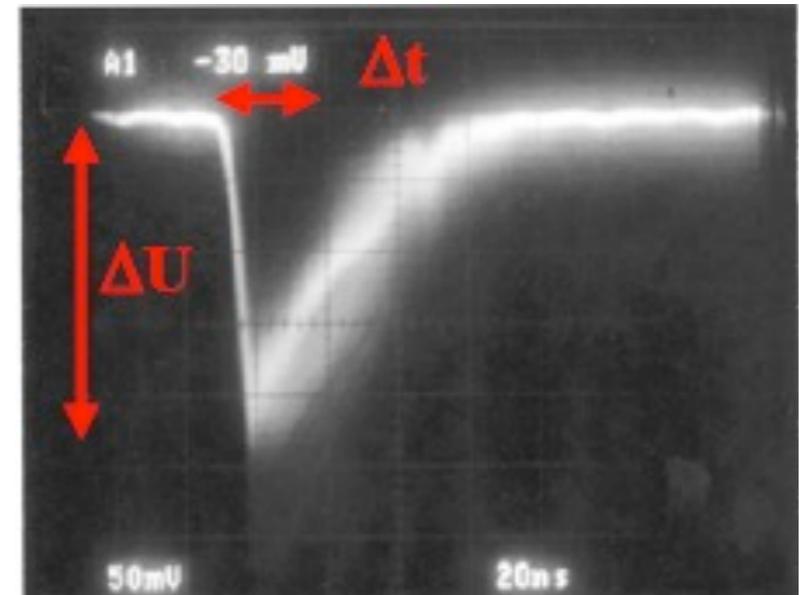
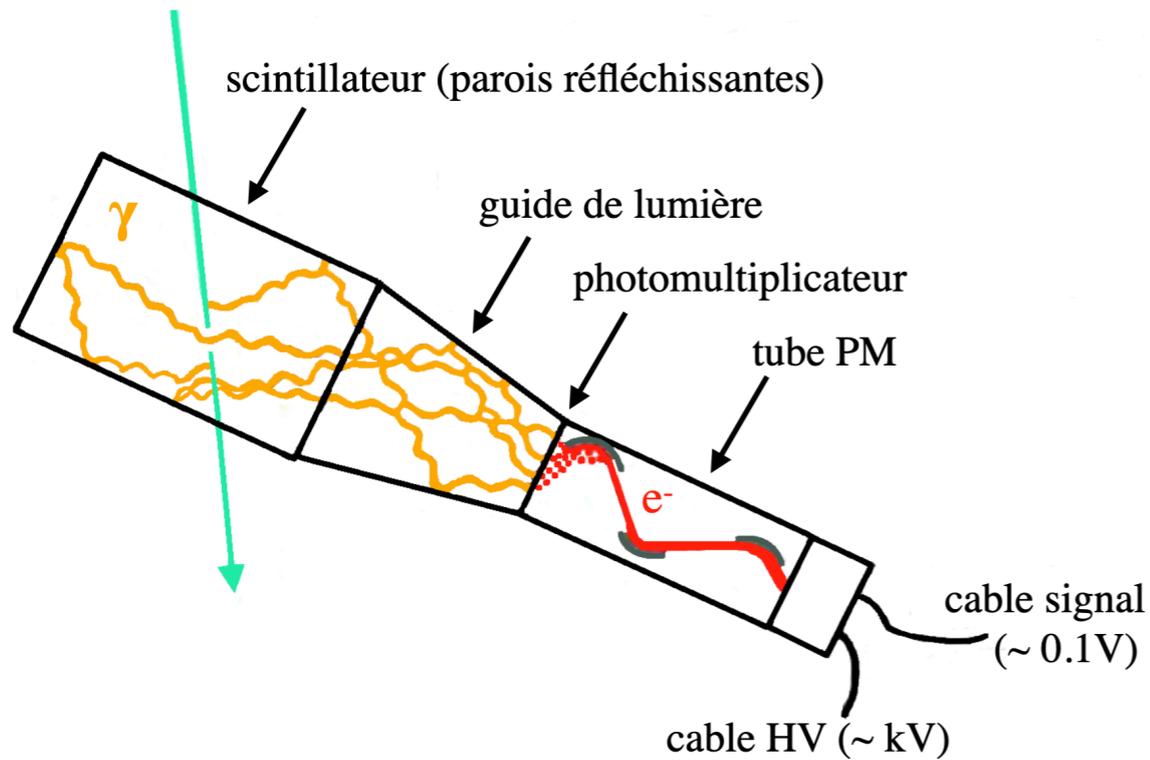


Faisceau
→

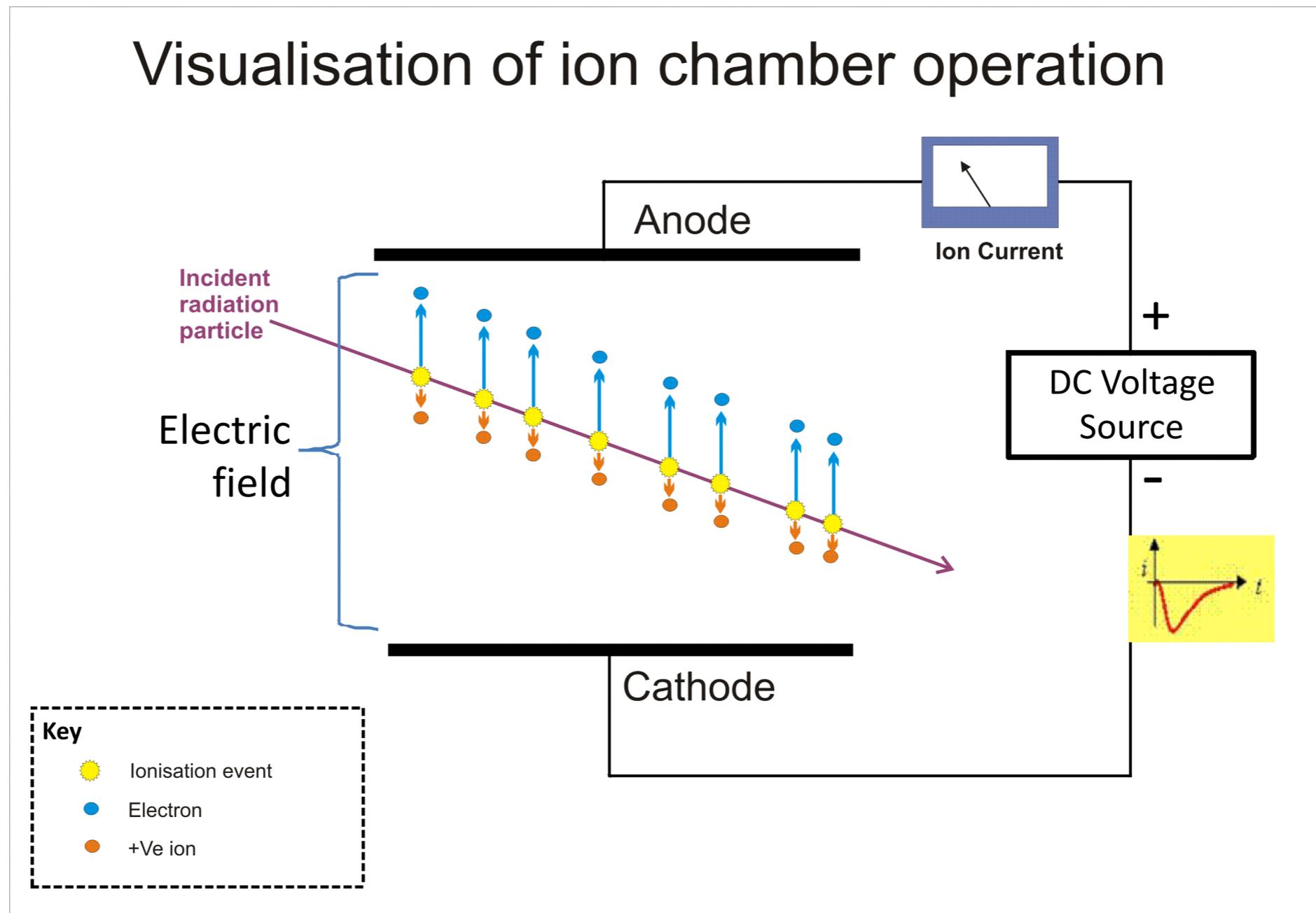


Détecteurs électroniques: Scintillateur

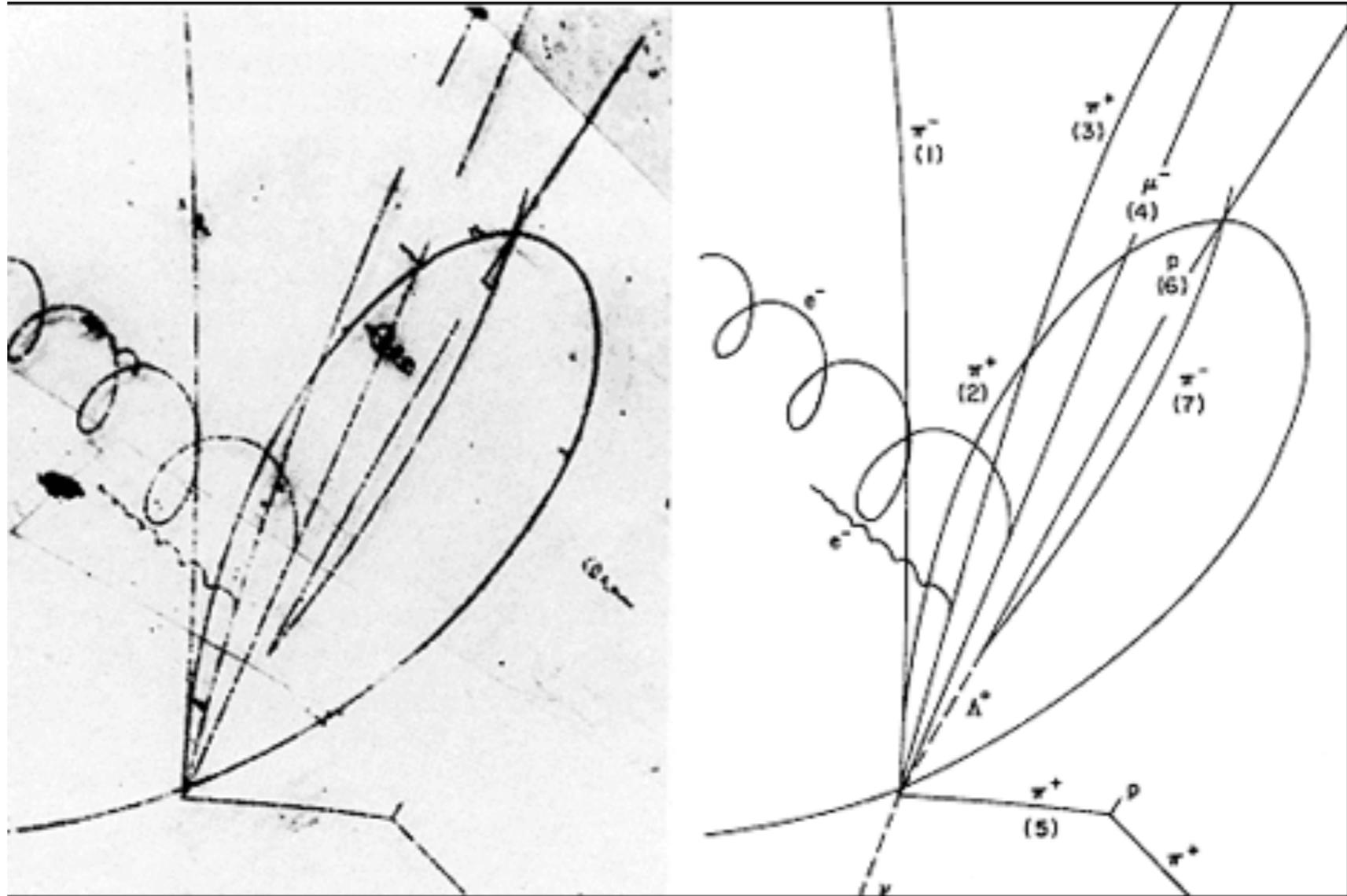
excitation d'un réseau cristallin par la particule chargée incidente

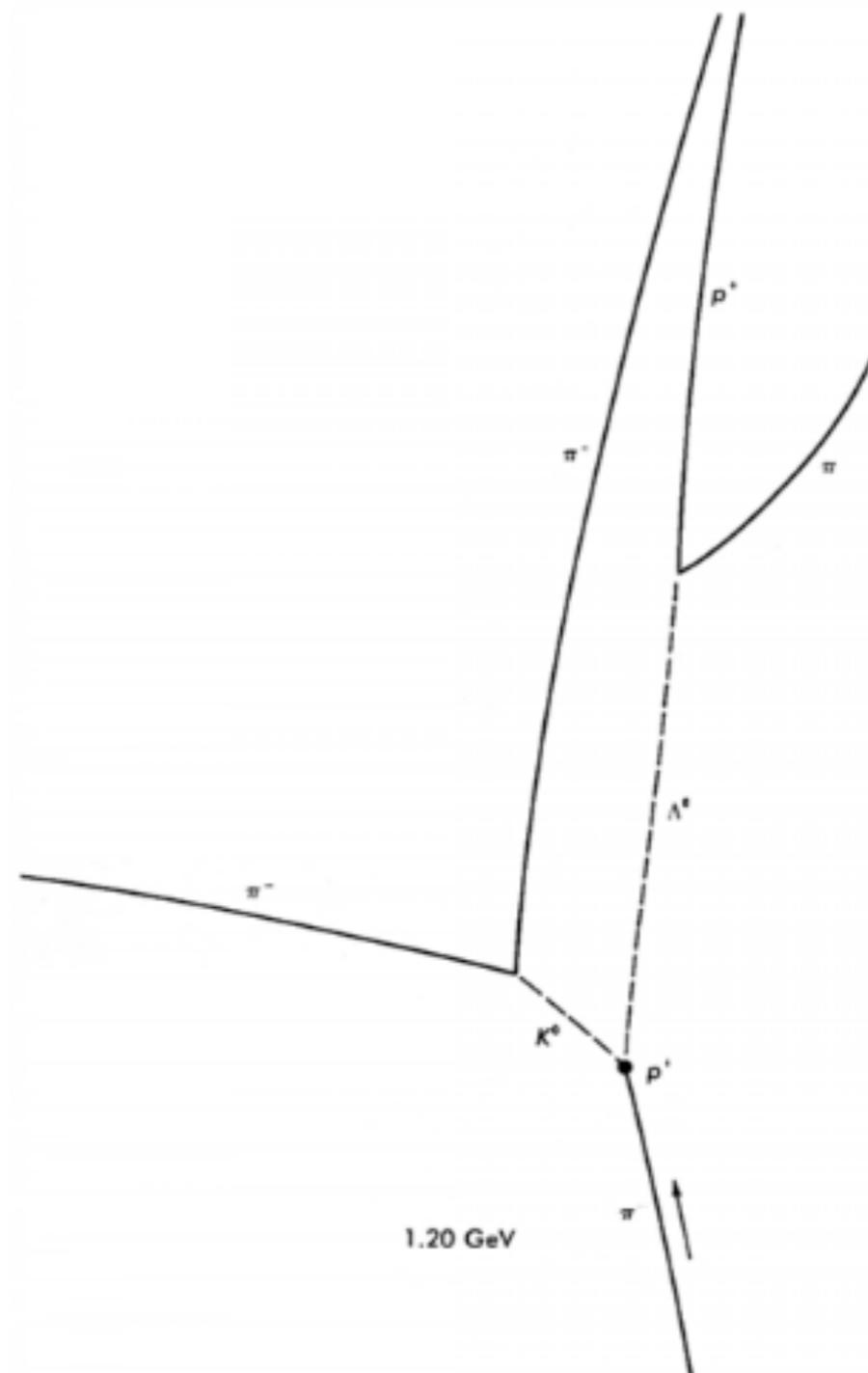
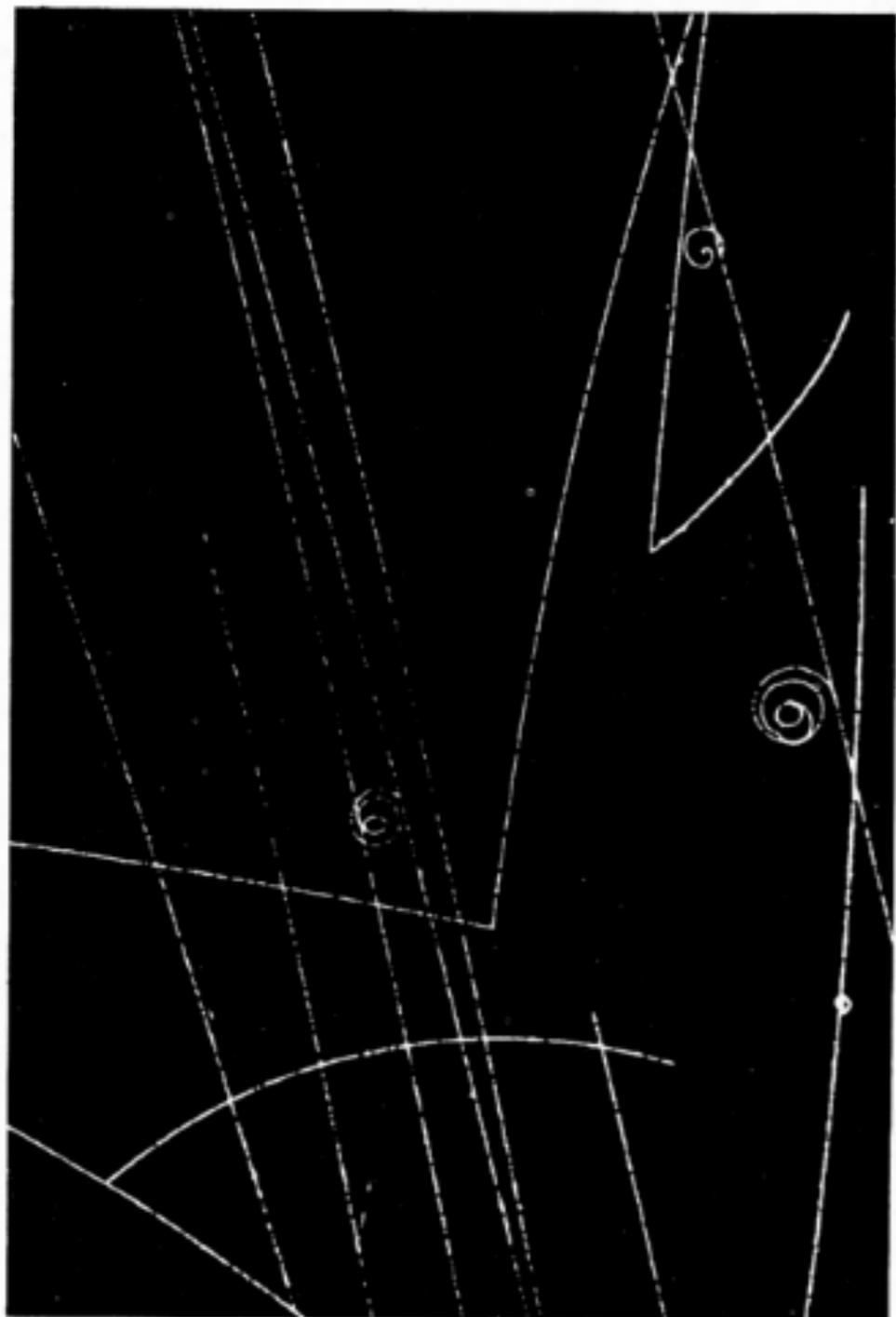


Détecteur à volume sensible gazeux

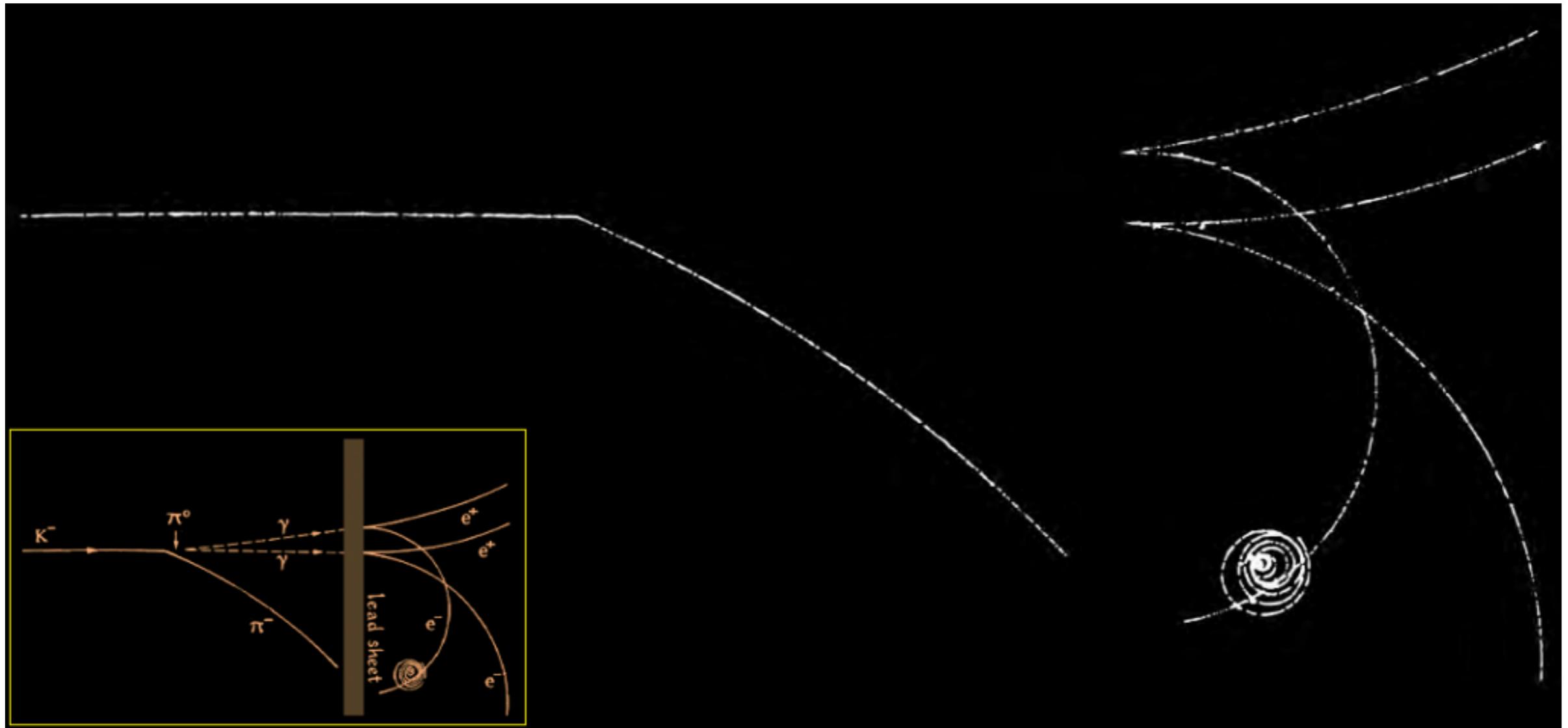


Détection particules neutres





Détection de particules neutres



matérialisation de photons

- Back-up

Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter

Conclusion

We have searched for evidence of the effect of gravity on the motion of particles of neutral antimatter. The best fit to our measurements yields a value of $(0.75 \pm 0.13 \text{ (statistical + systematic)} \pm 0.16 \text{ (simulation)}) g$ for the local acceleration of antimatter towards the Earth. We conclude that the dynamic behaviour of antihydrogen atoms is consistent with the existence of an attractive gravitational force between these atoms and the Earth. From the asymptotic form of the distribution of the likelihood ratio as a function of the presumed acceleration, we estimate a probability of 2.9×10^{-4} that a result, at least as extreme as that observed here, could occur under the assumption that gravity does not act on antihydrogen. The probability that our data are consistent with the **repulsive gravity** simulation is so small as to be quantitatively meaningless (**less than 10^{-15}**). Consequently, we can rule out the existence of repulsive gravity of magnitude $1g$ between the Earth and antimatter. The results are thus far in conformity with the predictions of General Relativity. Our results do not support cosmological models relying on repulsive matter–antimatter gravitation.

Rayonnement cosmique

Particules chargées

