

Chapitre 5

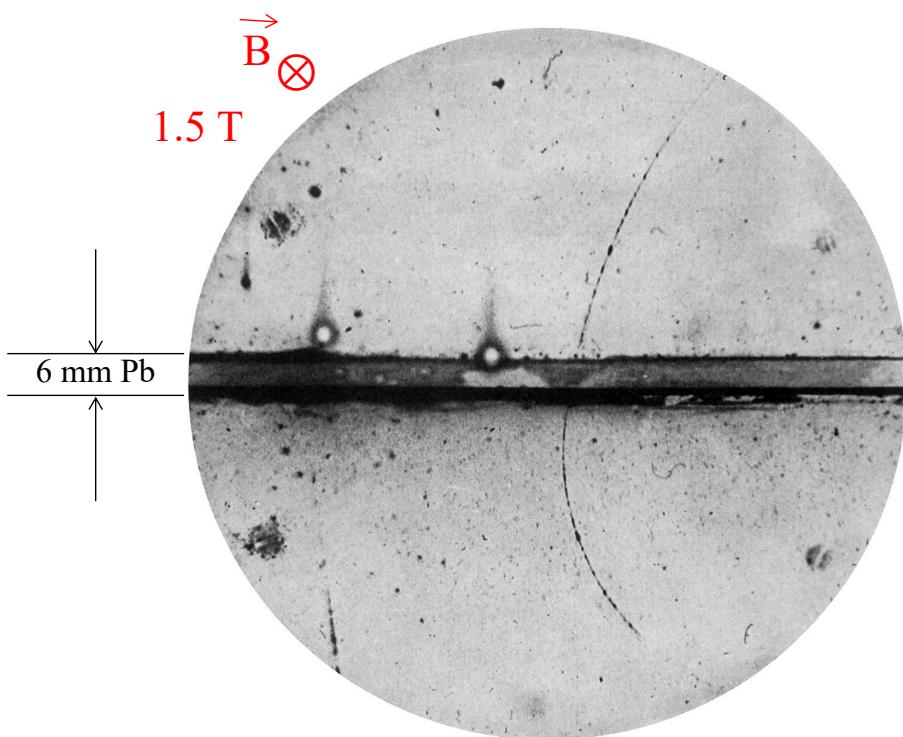
Théoriciens et expérimentateurs à l'oeuvre
à l'aube de la physique des particules

Prédictions et ...
... découvertes

e^+	positons (anti-matière)
ν	neutrinos
π	pions
μ	muons

Découverte du positon (1932)

la même année
que le neutron



Chambre de Wilson:



diamètre 14 cm
épaisseur 1 cm

Anderson observe
15 positons
dans 1300 clichés:

$$0 < q_{e^+} < 2 q_p \text{ si } q_{e^+} = q_p, m_{e^+} < 20 m_e$$

[Carl D. Anderson, "The Positive Electron", Physical Review 43 (1933) 491–494]

Découverte antiproton, ...

- Au Bevatron à Berkeley (USA)

– 1955: $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$

[Phys. Rev. 100 (1955) 947]

– 1956: $\bar{p} + p \rightarrow \bar{n} + n$

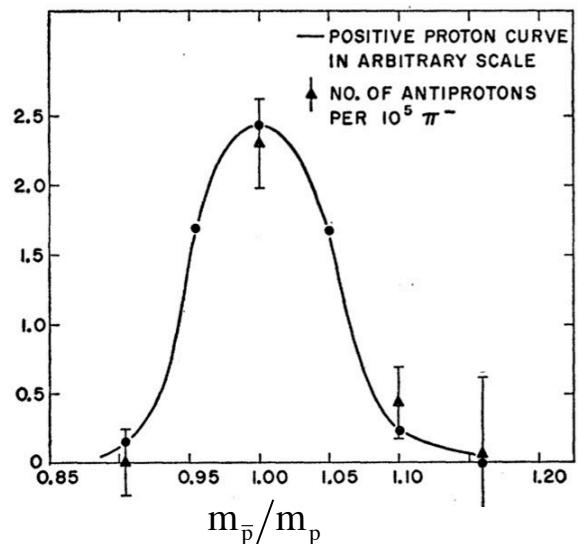
[Phys. Rev. 104 (1956) 1193]

- etc ...

- Au CERN

– dès 1995: anti-atome d'hydrogène

état lié $\bar{p} e^+$



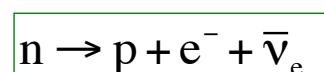
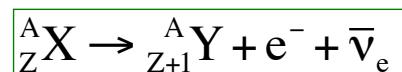
Radioactivité β et neutrino

1898: Rutherford distingue radioactivités α et β

~ 1900: rayons β = électrons

1914: Chadwick et Rutherford constatent que la désintégration β viole la conservation de l'énergie

1930: Pauli postule l'existence d'une nouvelle particule pour rétablir les lois de conservation de l'énergie et du moment cinétique



Neutrino: masse nulle

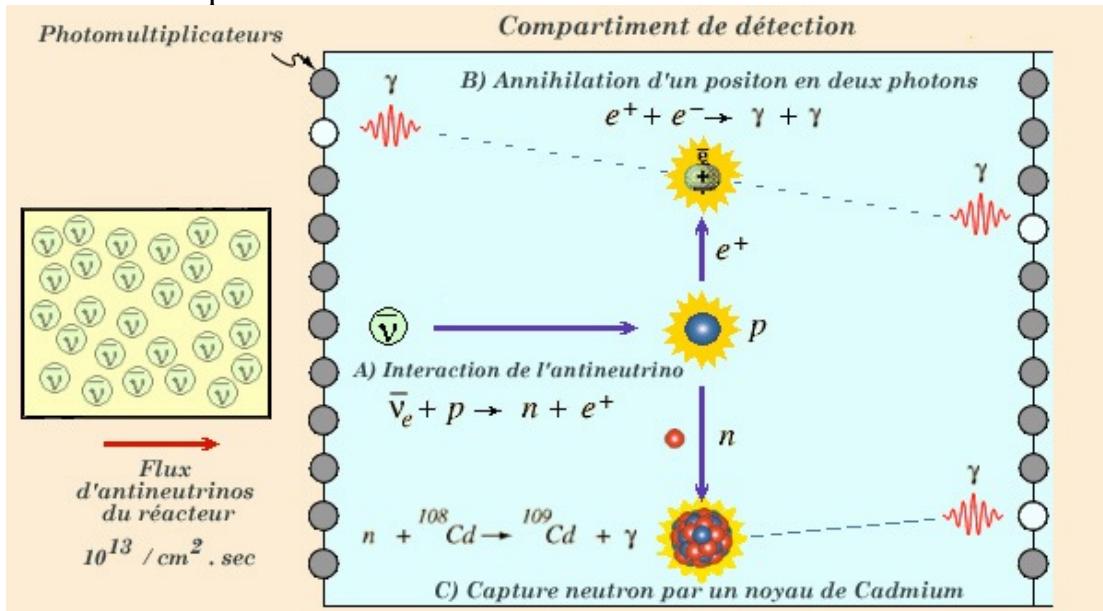
insensible à l'interaction é.m. (charge électrique nulle)

insensible à l'interaction forte

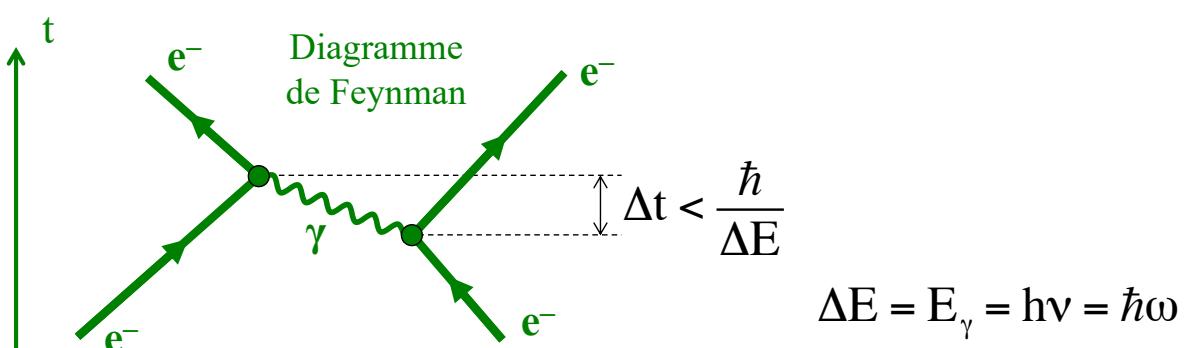
spin 1/2

Découverte du neutrino

- 1956: Reines & Cowan observent directement des anti-neutrinos au réacteur de Savannah River (USA)
- interactions dans un cuve de 200 l d'eau avec scintillateur liquide et chlorure de cadmium



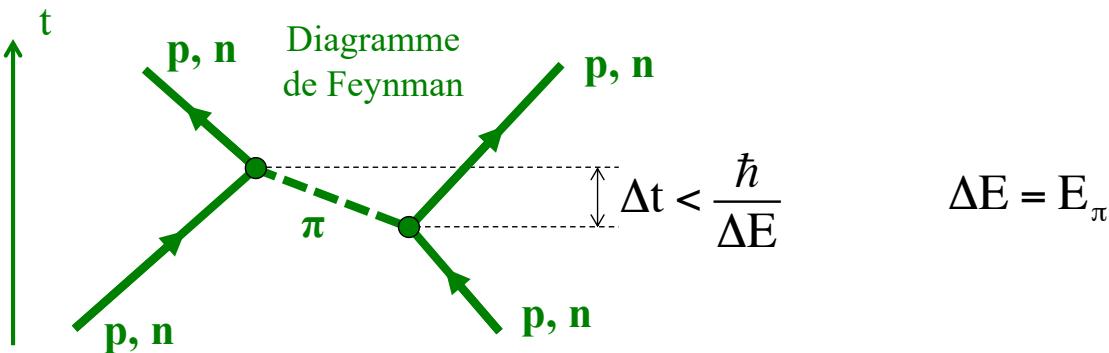
Photon = particule d'échange des forces électromagnétiques



- Effet du photon virtuel se propage sur une distance d : $d = c\Delta t \leq \frac{\hbar c}{\Delta E} = \frac{\hbar c}{\hbar\omega} = \frac{c}{\omega}$
- Si le photon est de très faible énergie, d est très grande
- Dans la limite $E_\gamma \rightarrow 0$, d n'est plus limitée

L'interaction électromagnétique a une portée infinie

Méson de Yukawa = particule d'échange des forces nucléaires

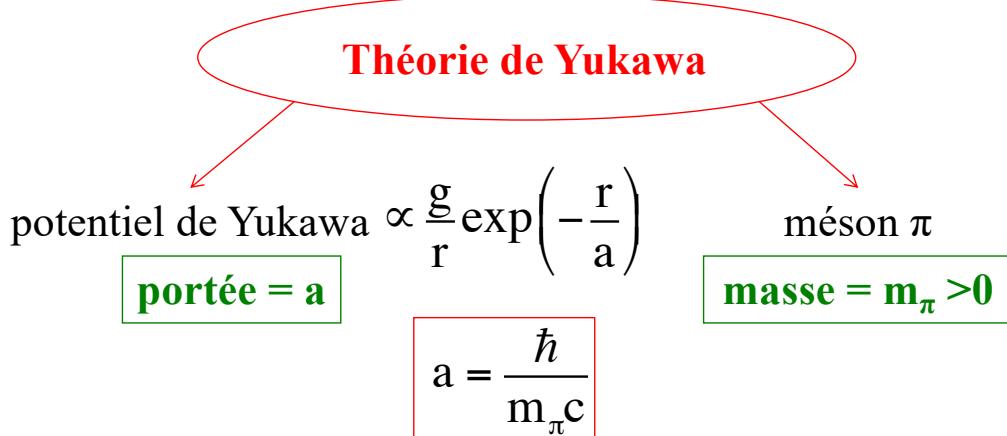
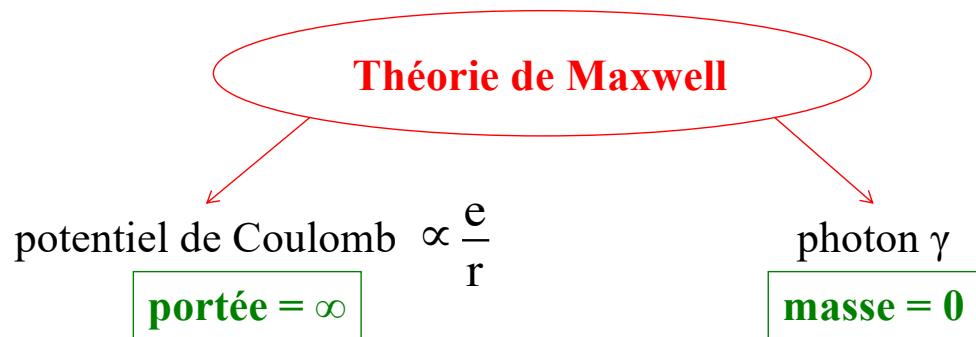


- 1934: Yukawa décrit les forces entre nucléons (protons, neutrons) par l'échange d'une nouvelle particule virtuelle, le méson π
- Il donne une masse à ce méson pour limiter la portée de l'interaction

$$d \leq c\Delta t \leq \frac{\hbar c}{\Delta E} \leq \frac{\hbar c}{m_\pi c^2} = a$$

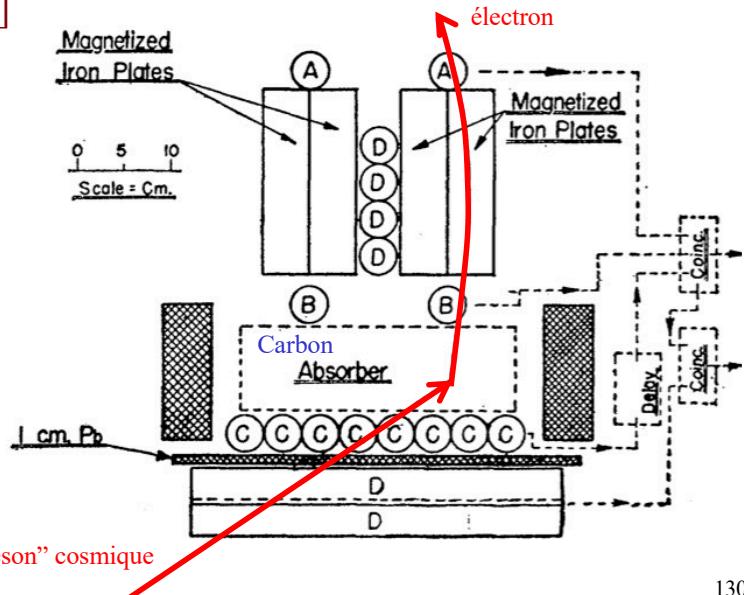
a = $\hbar/(m_\pi c)$
= portée (finie) de l'interaction nucléaire

Maxwell et Yukawa



Découverte de “mésons” cosmiques

- 1938–1943: plusieurs expériences confirment l’existence de “mésons” dans les rayons cosmiques
 - mésons instables, se désintègrent en électrons ($\tau \simeq 2 \mu\text{s}$)
- 1947: expérience de Conversi, Pancini, Piccioni
[Phys. Rev. 71 (1947) 209]
 - les “mésons” positifs et négatifs se désintègrent de la même façon
 - “méson⁺” $\rightarrow e^+$
 - “méson⁻” $\rightarrow e^-$



Découverte de “mésons” cosmiques

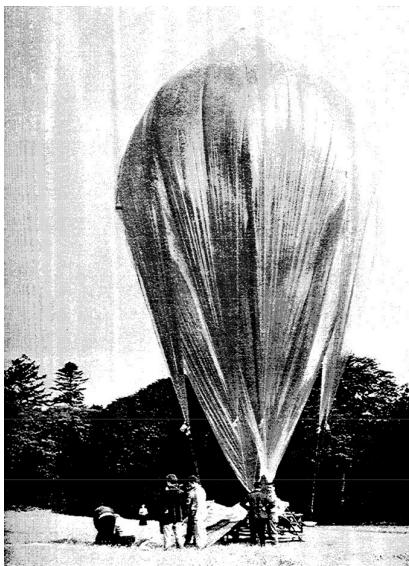
- Pour les théoriciens, ce “méson” cosmique ne peut pas être le méson de Yukawa
- Raisons:
 - temps de vie devrait être ~ 100 fois plus court
 - section efficace de diffusion méson-nucléon devrait être ~ 100 fois plus grande
 - mésons de Yukawa stoppés dans la matière devraient se comporter différemment
 - les π^+ sont repoussés par les noyaux positifs et se désintègrent normalement
 - les π^- sont attirés par les noyaux positifs, capturés sur une orbite de Bohr de rayon r_n , et une fois sur l’orbite la plus interne ($n=1$), sont absorbés par les noyaux (réaction nucléaire)

$$r_n = n^2 \frac{\hbar c}{Z \alpha m_\pi c^2}$$

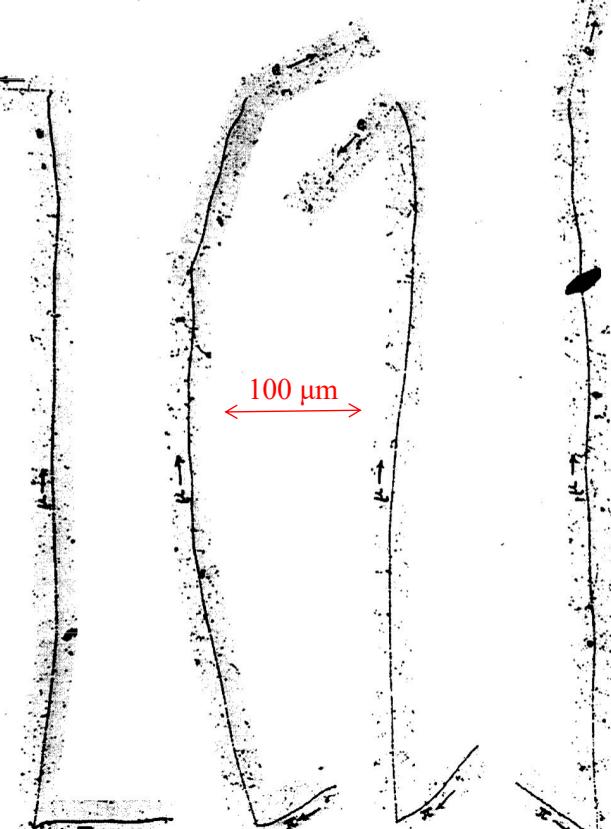
Découverte méson π

par C. Powell en 1947
(Nobel de physique en 1950)

- rayons cosmiques enregistrés par des émulsions photographiques à haute altitude (~ 25 – 30 km)



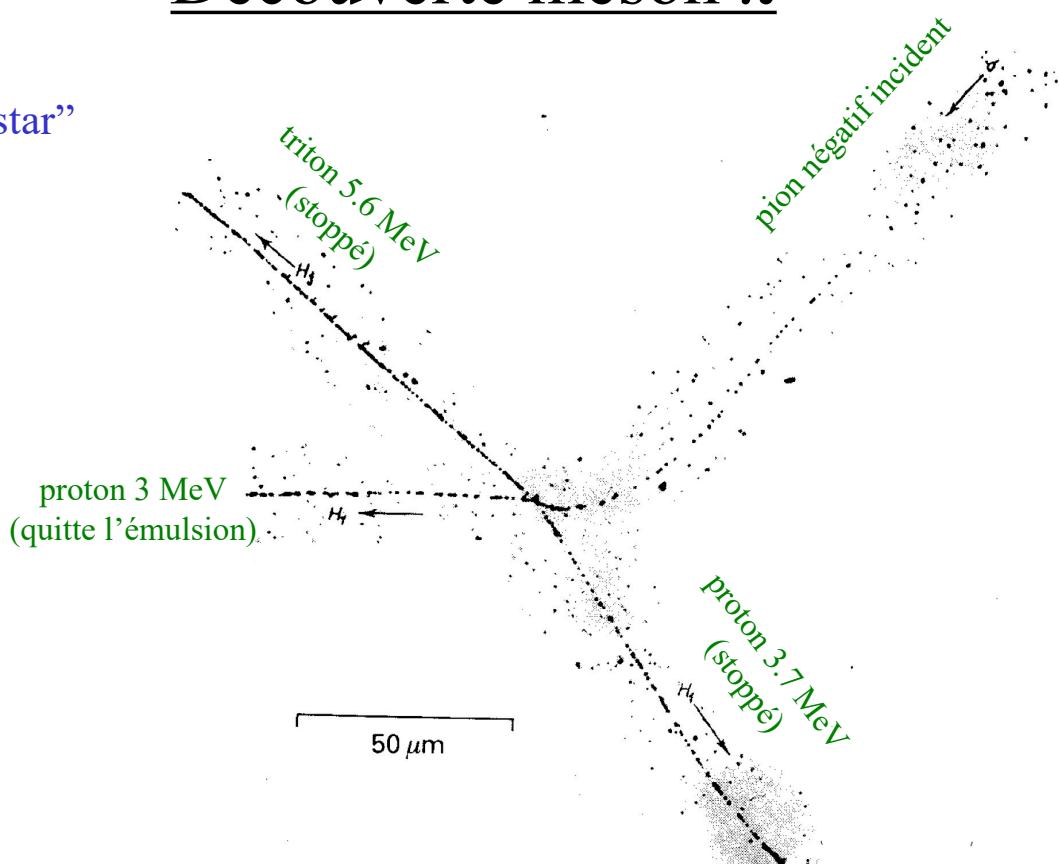
OS, 16 avril 2025



132

Découverte méson π

- “star”

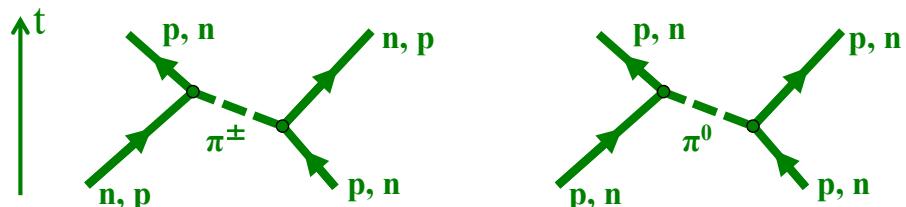


OS, 16 avril 2025

133

Pion neutre: π^0

- Première particule à être
 - prédite par des arguments de symétrie (indépendance de charges des forces nucléaires)
 - ~1938: la force nucléaire s'exerçant entre deux nucléons ne dépend pas de leurs charges électriques



- ~1940: prédiction désintégration $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ avec $\tau \sim 10^{-16}$ s

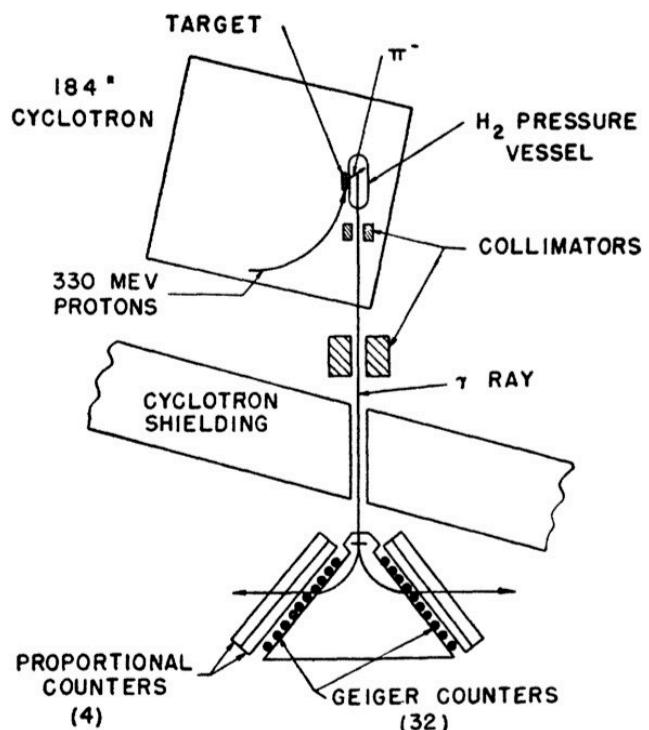
- découverte à l'aide d'un accélérateur
 - ~1950: synchrocyclotron de 184 pouces (4.7 m) de diamètre à Berkeley avec protons de 330 MeV

Mesure de la masse du π^0

[Panofsky, Aamodt, Hadley, Phys. Rev. 81 (1951) 802]

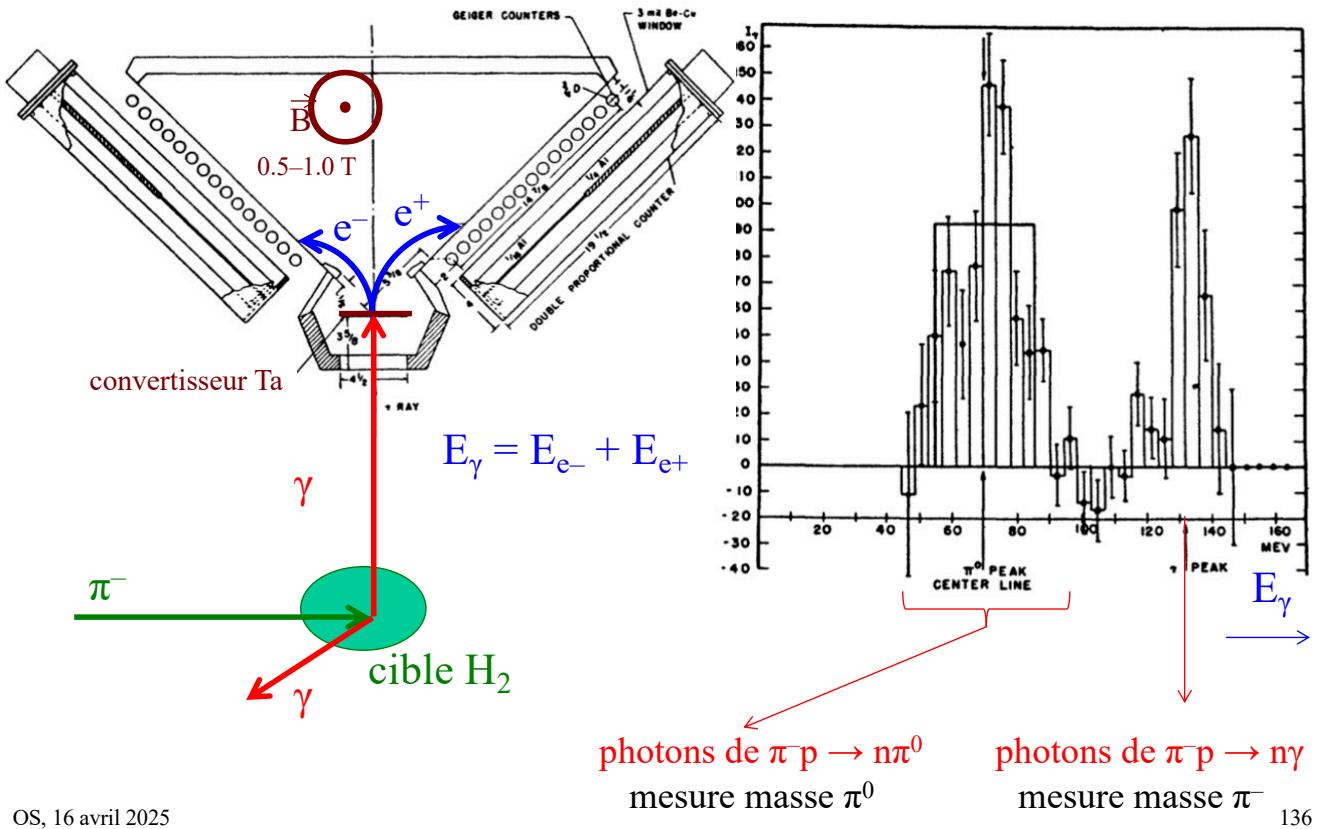
- Pions négatifs
 - produits par les protons de 330 MeV
 - puis stoppés dans une cible d'hydrogène
 - puis capturés sur l'orbite de Bohr la plus basse
- Réactions:

$\pi^- + p \rightarrow n + \gamma$
 $\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0, \pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$



Mesure de la masse des pions

[Panofsky, Aamodt, Hadley, Phys. Rev. 81 (1951) 802]



Mésons et muons

- Mésons de Yukawa = mésons π = pions

	Contenu en quarks	Masse (MeV/c ²)	Temp de vie (s)	Mode de désintégration
π^-	$\bar{u}d$	139.57	2.6×10^{-8}	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
π^+	$u\bar{d}$			$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
π^0	$u\bar{u}$ ou $d\bar{d}$	134.98	8.4×10^{-17}	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

antiparticules

- Muons = leptons μ (\neq mésons)

	Masse (MeV/c ²)	Temp de vie (s)	Mode de désintégration
μ^-	105.66	2.2×10^{-6}	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
μ^+			$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

antiparticules