

# Chapitre 5

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

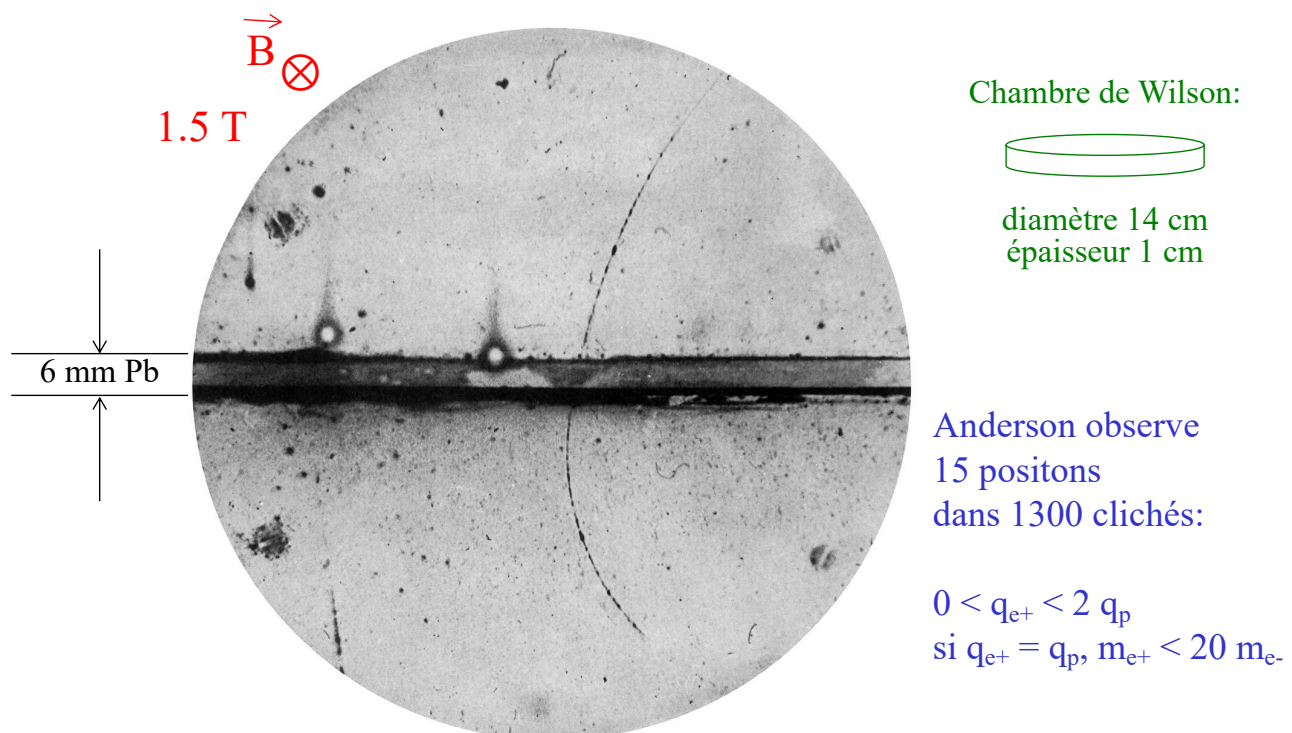
Prédictions et ...  
... découvertes

$e^+$	positons (anti-matière)
$\nu$	neutrinos
$\pi$	pions
$\mu$	muons

OS, 16 avril 2025

122

## Découverte du positon (1932) la même année que le neutron



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

OS, 16 avril 2025

123

# Découverte antiproton, ...

- Au Bevatron à Berkeley (USA)

- 1955:  $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$   
[Phys. Rev. 100 (1955) 947]

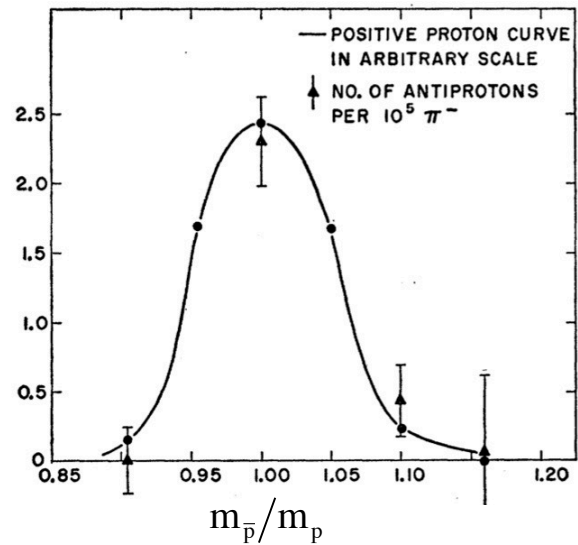
- 1956:  $\bar{p} + p \rightarrow \bar{n} + n$   
[Phys. Rev. 104 (1956) 1193]

- etc ...

- Au CERN

- dès 1995: anti-atome d'hydrogène

état lié  $\bar{p} e^+$



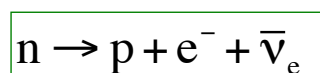
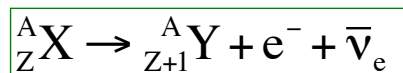
# Radioactivité $\beta$ et neutrino

1898: Rutherford distingue radioactivités  $\alpha$  et  $\beta$

~ 1900: rayons  $\beta$  = électrons

1914: Chadwick et Rutherford constatent que la désintégration  $\beta$  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

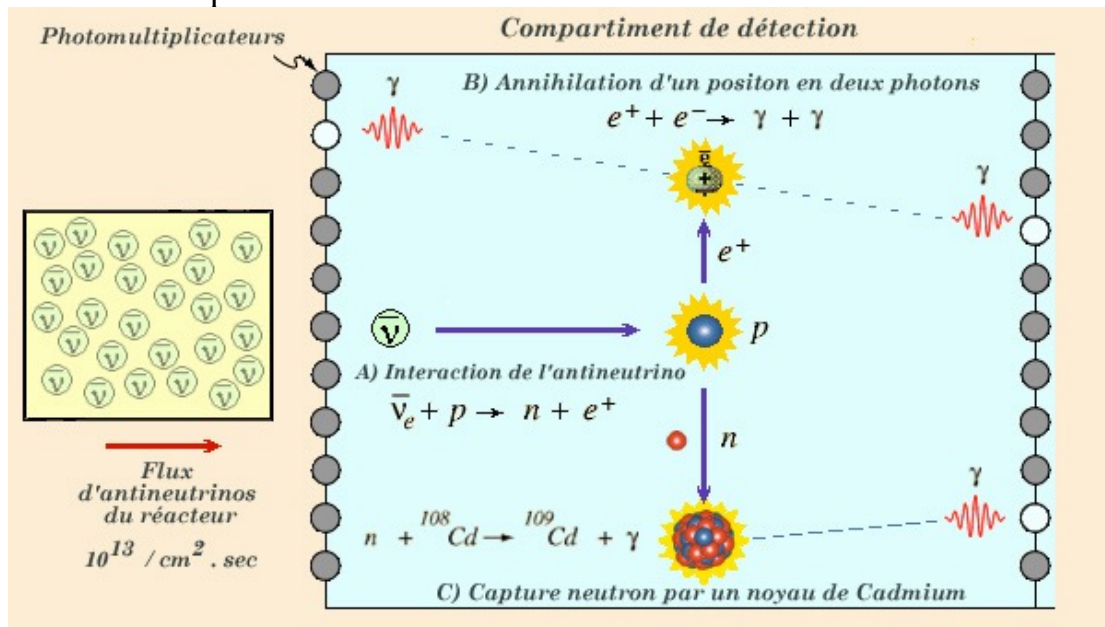


**Neutrino:** masse nulle  
insensible à l'interaction é.m. (charge électrique nulle)  
insensible à l'interaction forte  
spin 1/2

# Découverte du neutrino

1956: Reines & Cowan observent directement des anti-neutrinos au réacteur de Savannah River (USA)

- interactions dans une cuve de 200 l d'eau avec scintillateur liquide et chlorure de cadmium

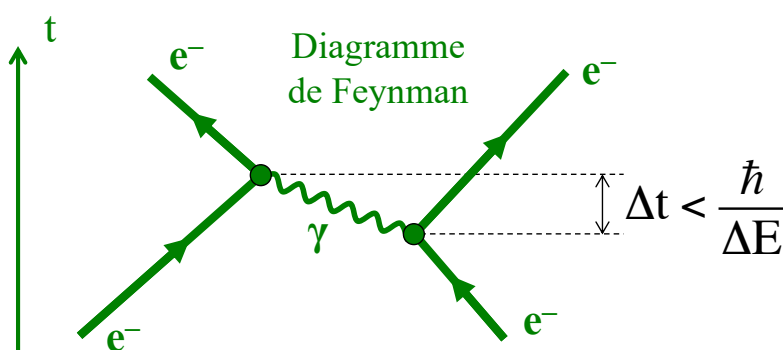


OS, 16 avril 2025

<http://www.laradioactivite.com>

126

## Photon = particule d'échange des forces électromagnétiques



$$\Delta E = E_\gamma = h\nu = \hbar\omega$$

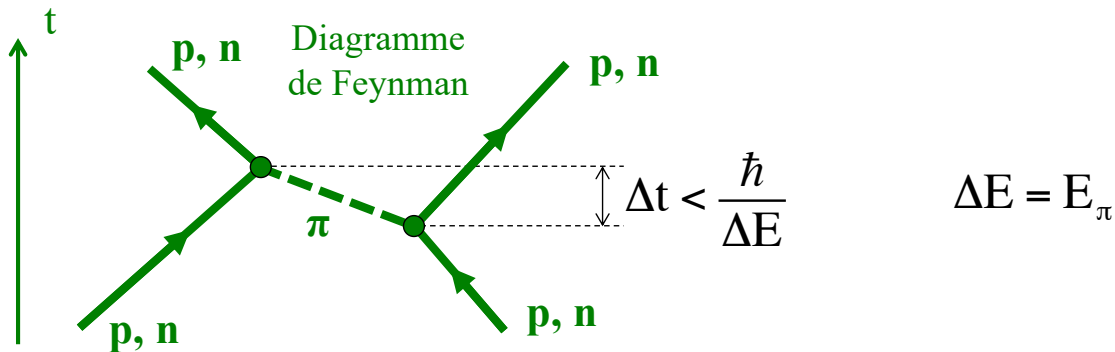
- Effet du photon virtuel se propage sur une distance d:  $d = c\Delta t \leq \frac{\hbar c}{\Delta E} = \frac{\hbar c}{\hbar\omega} = \frac{c}{\omega}$
- Si le photon est de très faible énergie, d est très grande
- Dans la limite  $E_\gamma \rightarrow 0$ , d n'est plus limitée

**L'interaction électromagnétique a une portée infinie**

OS, 16 avril 2025

127

# Méson de Yukawa = particule d'échange des forces nucléaires

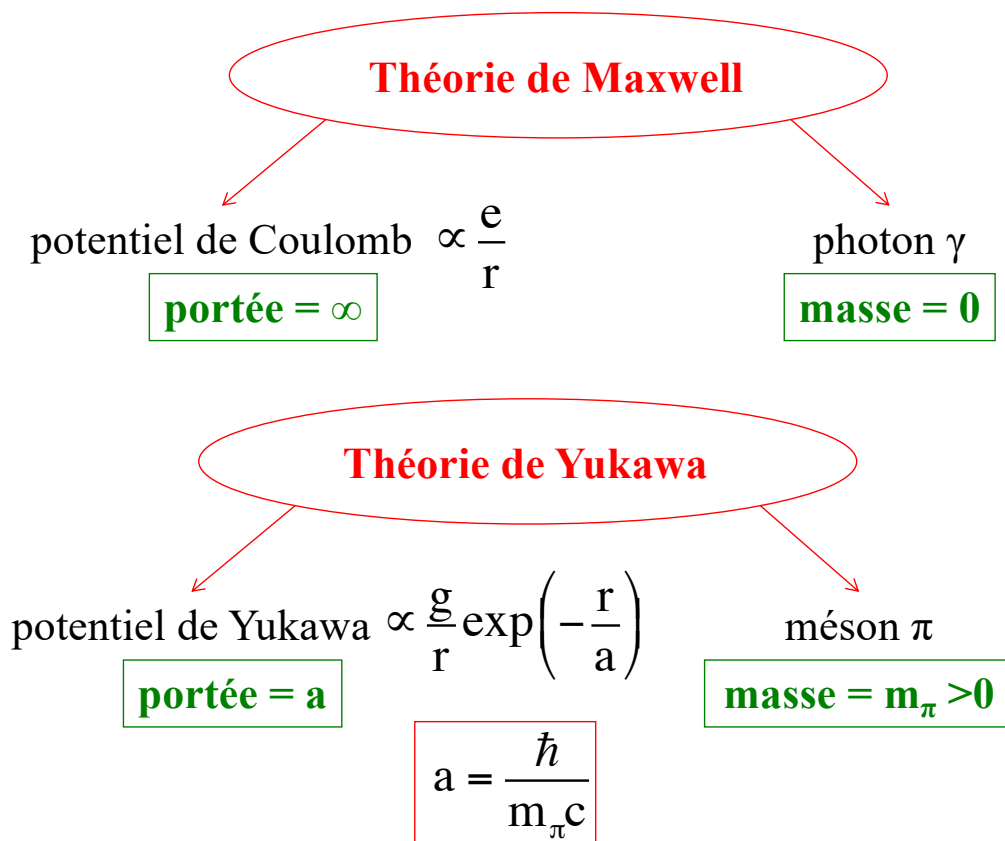


- 1934: Yukawa décrit les forces entre nucléons (protons, neutrons) par l'échange d'une nouvelle particule virtuelle, le méson  $\pi$
- Il donne une masse à ce méson pour limiter la portée de l'interaction

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

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

## Maxwell et Yukawa



# Découverte de “mésons” cosmiques

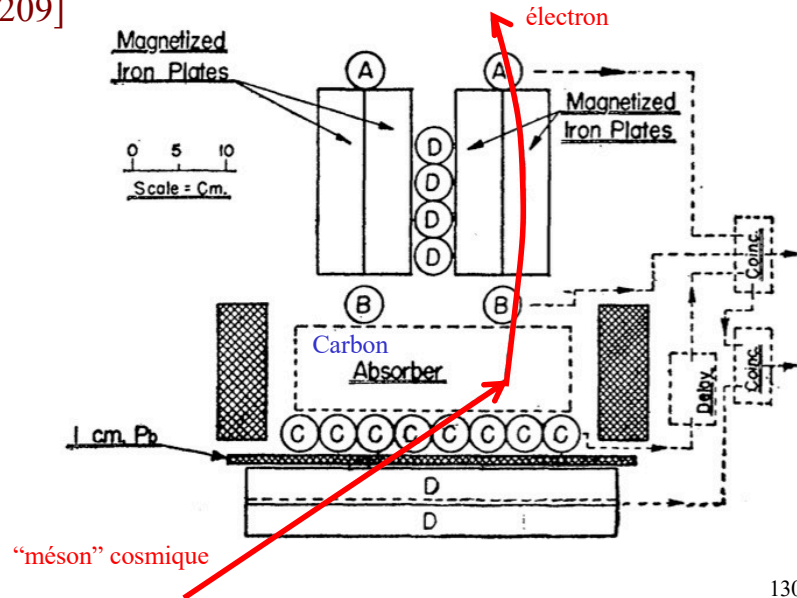
- 1938–1943: plusieurs expériences confirment l’existence de “mésons” dans les rayons cosmiques

- 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<sup>+</sup>”  $\rightarrow e^+$
- “méson<sup>-</sup>”  $\rightarrow e^-$



OS, 16 avril 2025

130

# Découverte de “mésons” cosmiques

- Pour les théoriciens, ce “méson” cosmique ne peut pas être le méson de Yukawa

- Raisons:

- temps de vie devrait être  $\sim 100$  fois plus court
- section efficace de diffusion méson-nucléon devrait être  $\sim 100$  fois plus grande
- mésons de Yukawa stoppés dans la matière devraient se comporter différemment

- les  $\pi^+$  sont repoussés par les noyaux positifs et se désintègrent normalement
- les  $\pi^-$  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)

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

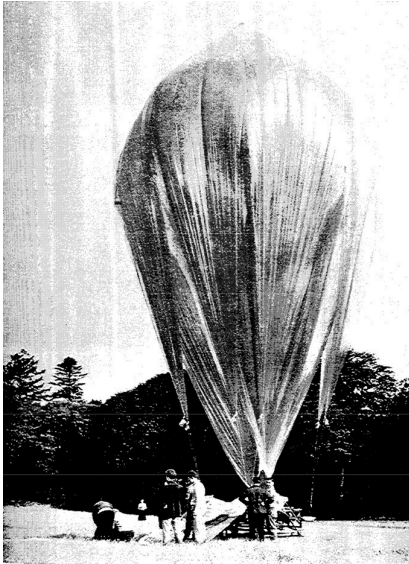
OS, 16 avril 2025

131

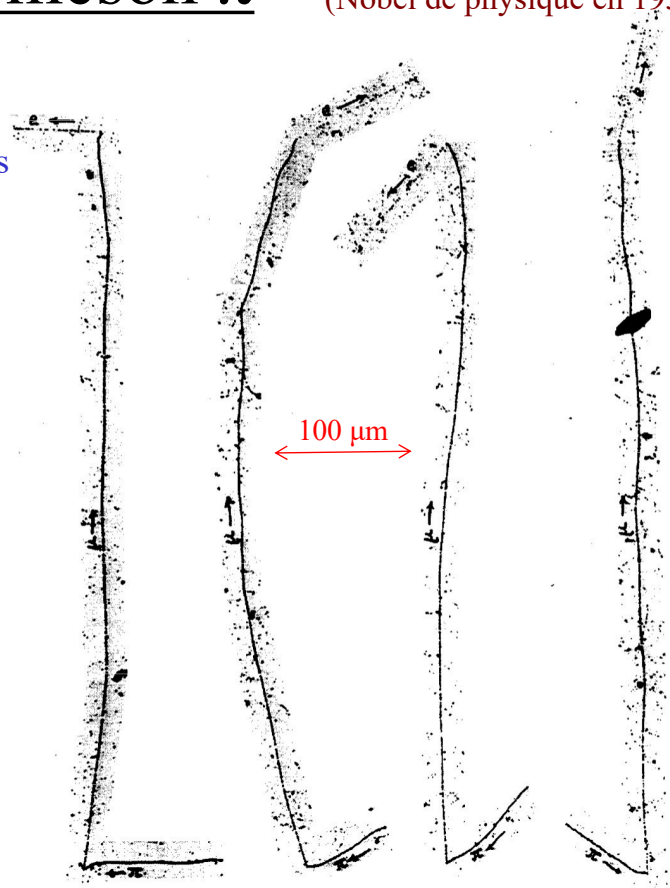
# Découverte méson $\pi$

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

- rayons cosmiques enregistrés par des émulsions photographiques à haute altitude ( $\sim 25\text{--}30\text{ km}$ )



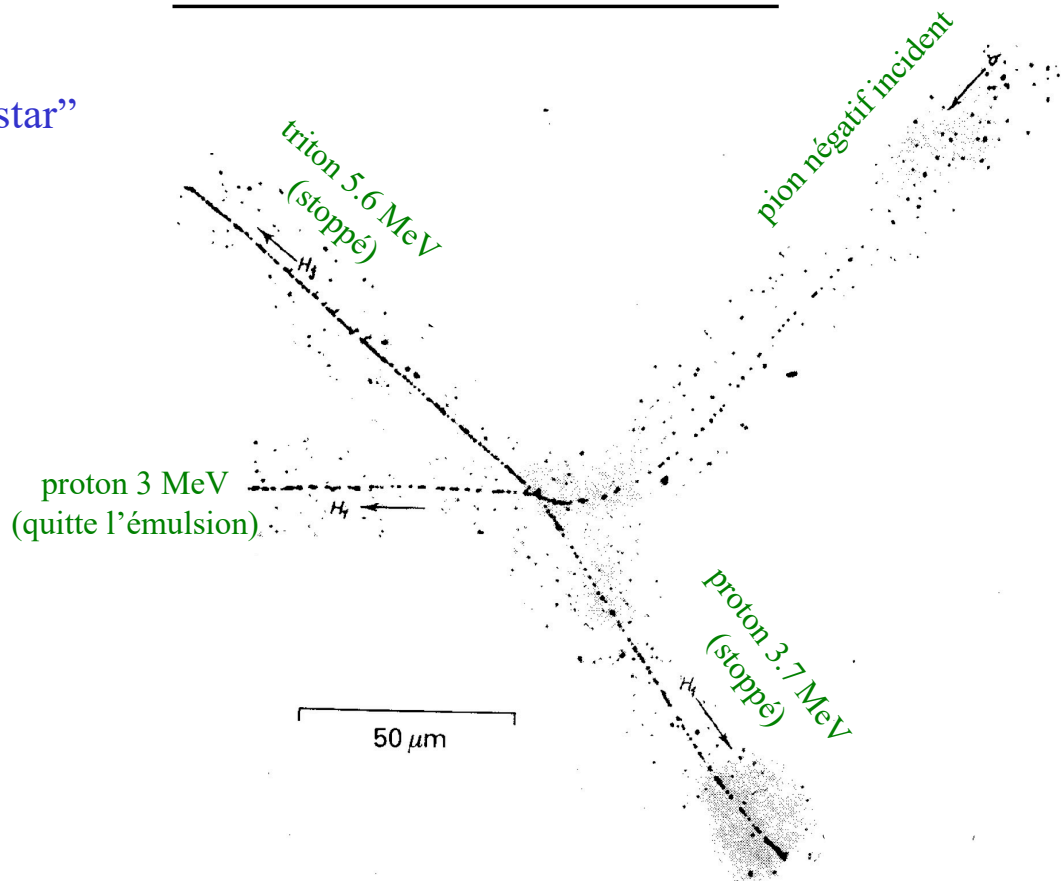
OS, 16 avril 2025



132

# Découverte méson $\pi$

- “star”



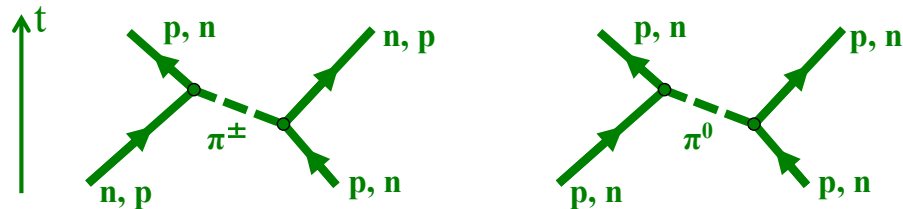
OS, 16 avril 2025

133



# Pion neutre: $\pi^0$

- 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



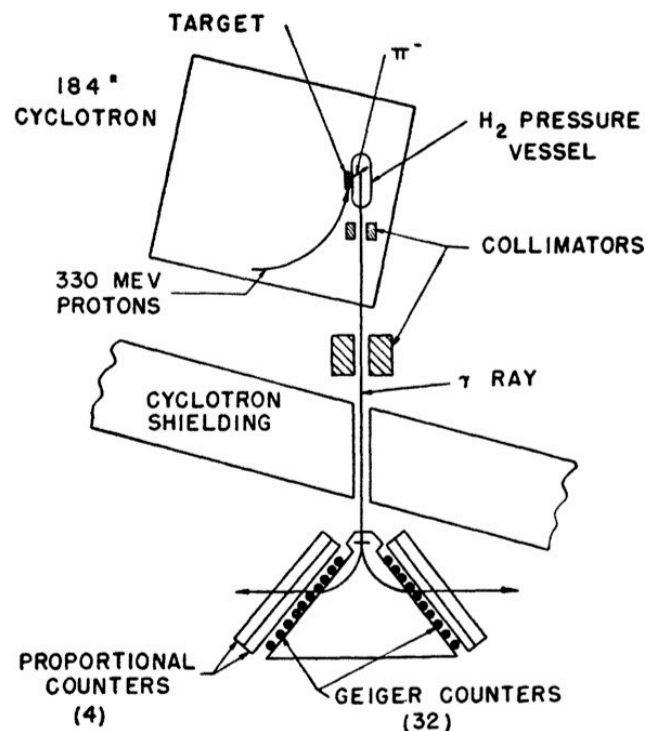
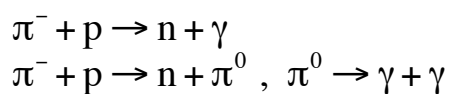
- ~1940: prédiction désintégration  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  avec  $\tau \sim 10^{-16}$  s
- découverte à l'aide d'un accélérateur
  - ~1950: synchrocyclotron de 184 pouces (4.7 m) de diamètre à Berkeley avec protons de 330 MeV

## Mesure de la masse du $\pi^0$

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

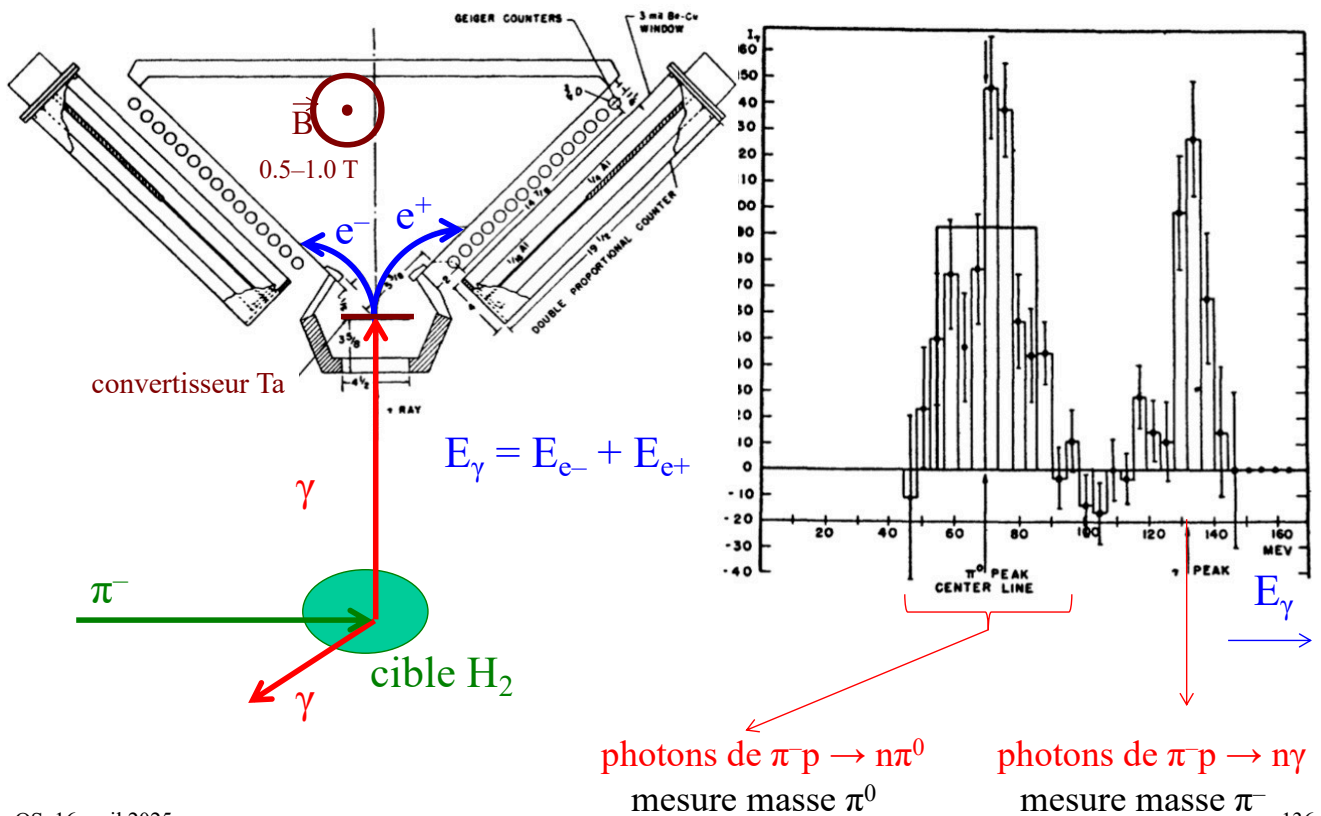
- Pions négatifs
  - produits par les protons de 330 MeV
  - puis stoppés dans une cible d'hydrogène
  - puis capturés sur l'orbite de Bohr la plus basse

- Réactions:



# Mesure de la masse des pions

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



OS, 16 avril 2025

136

## Mésons et muons

- Mésons de Yukawa = mésons  $\pi$  = pions

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

antiparticules

- Muons = leptons  $\mu$  ( $\neq$  mésons)

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

antiparticules

OS, 16 avril 2025

137