

# Chapitre 5

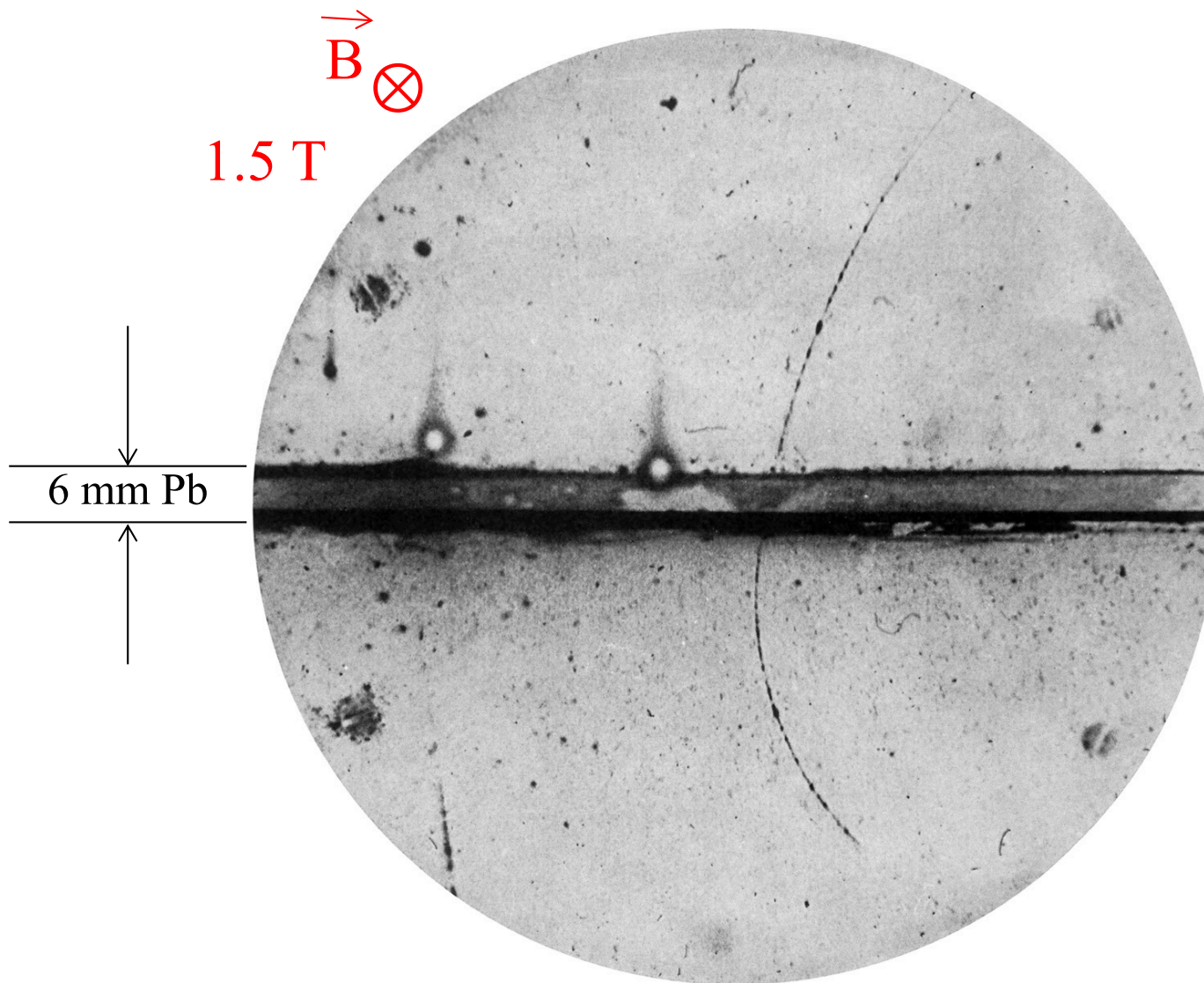
Théoriciens et expérimentateurs à l'oeuvre  
à l'aube de la physique des particules

**Prédictions et ...  
... découvertes**

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

# 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:

$0 < q_{e+} < 2 q_p$   
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]

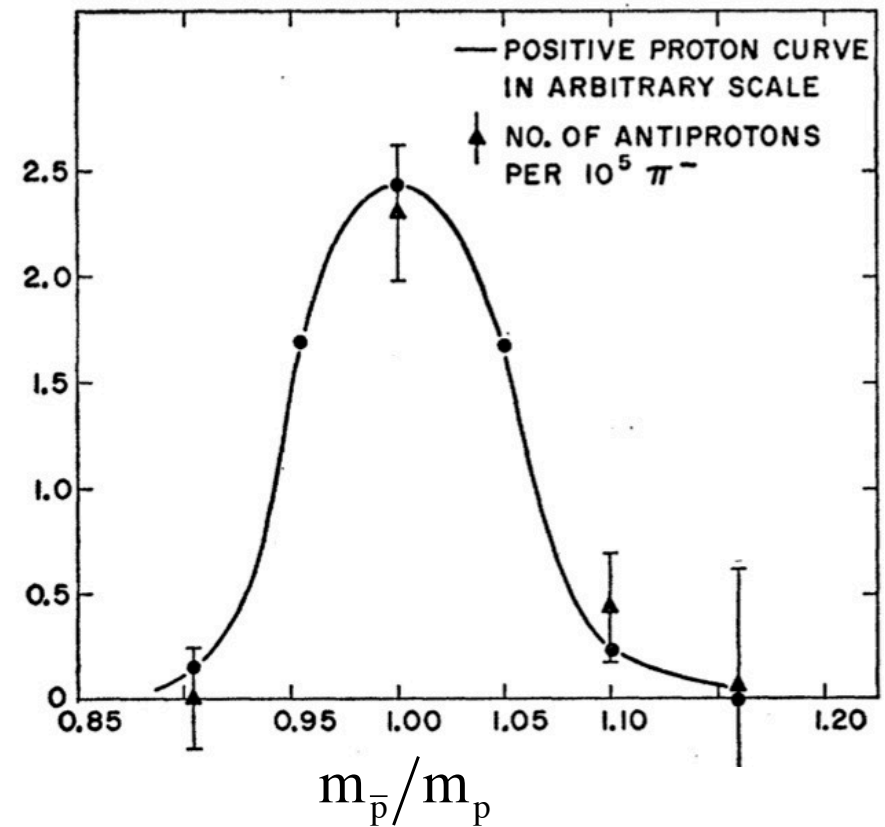
- 1956:  $\bar{p} + p \rightarrow \bar{n} + n$   
[Phys. Rev. 104 (1956) 1193]

- etc ...

- Au CERN

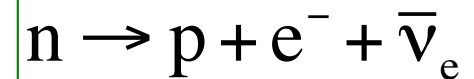
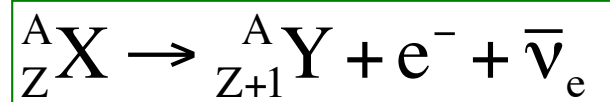
- dès 1995: anti-atome d'hydrogène

état lié  $\bar{p} e^+$



# Radioactivité $\beta$ 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

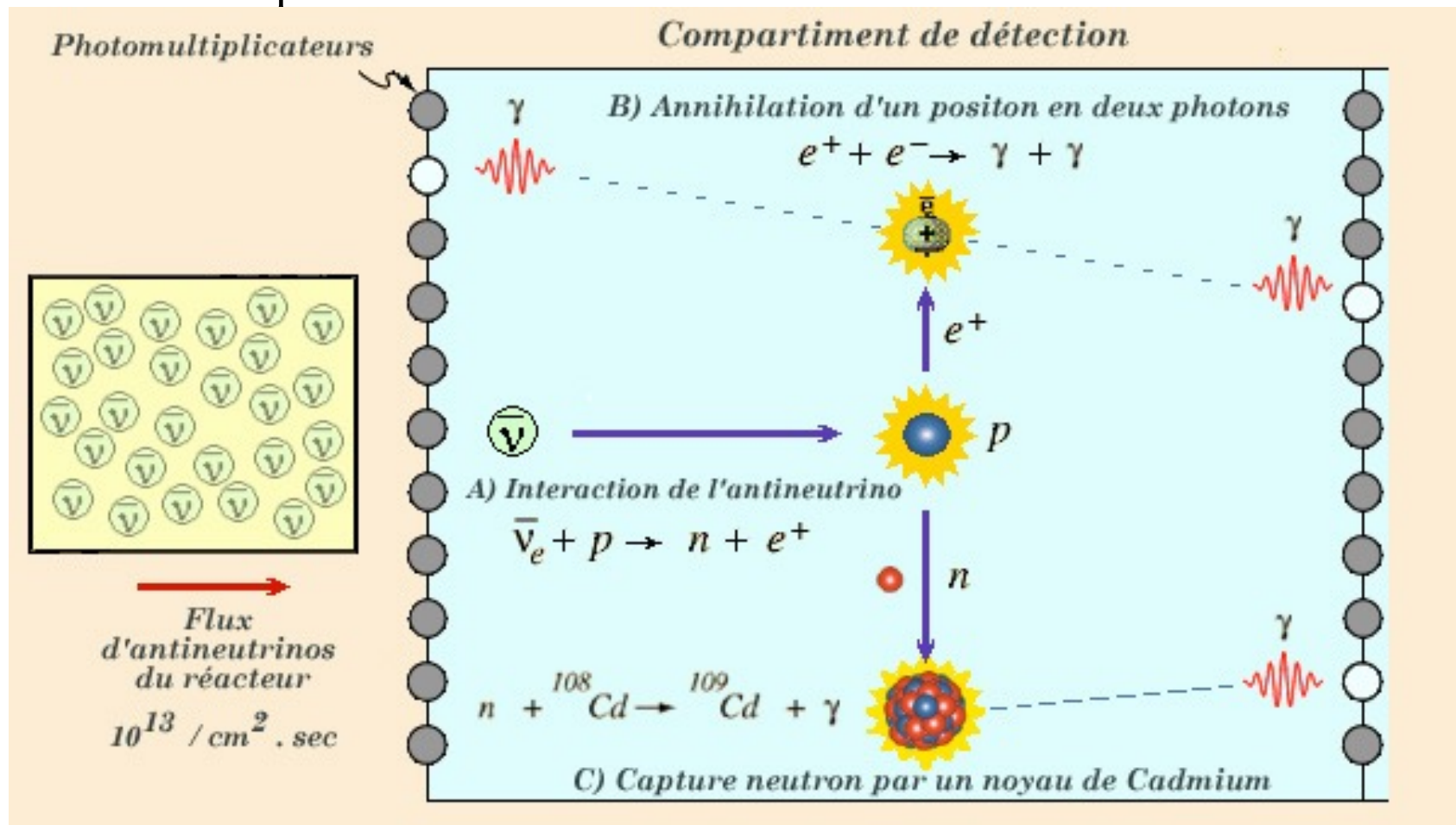


Neutrino: masse nulle  
insensible à l'interaction é.m. (charge électrique nulle)  
insensible à l'interaction forte  
spin 1/2

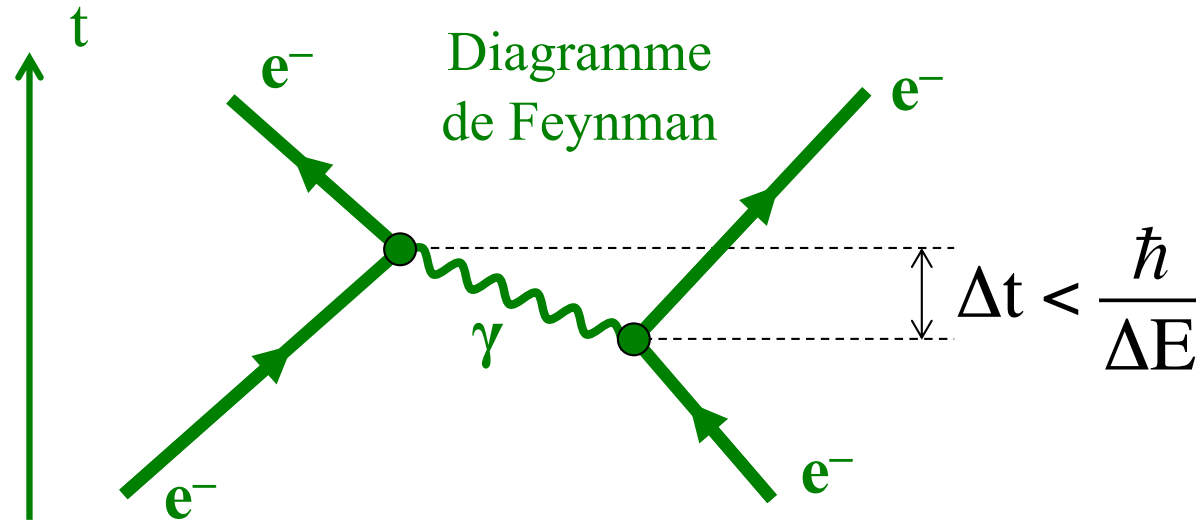
# Découverte du neutrino

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

- interactions dans un cuve de 200 l d'eau avec scintillareur liquide et chlorure de cadmium



# Photon = particule d'échange des forces électromagnétiques



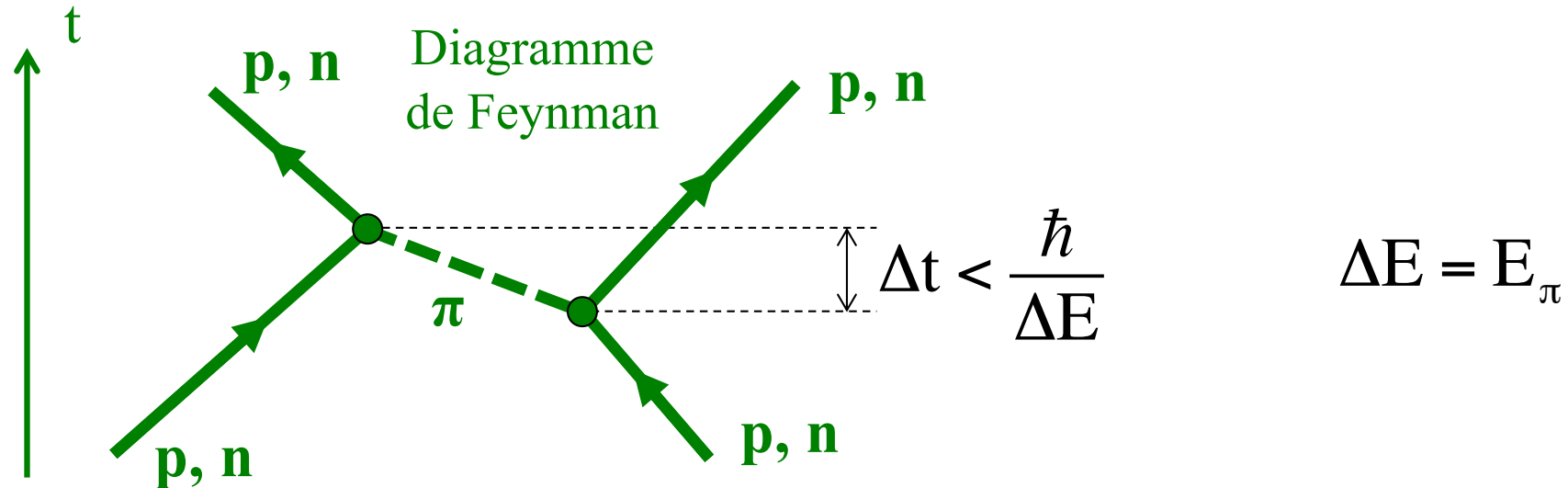
$$\Delta E = E_{\gamma} = h\nu = \hbar\omega$$

- Effet du photon virtuel se propage sur une distance d:
- Si le photon est de très faible énergie, d est très grande
- Dans la limite  $E_{\gamma} \rightarrow 0$ , d n'est plus limitée

$$d = c\Delta t \leq \frac{\hbar c}{\Delta E} = \frac{\hbar c}{\hbar\omega} = \frac{c}{\omega}$$

**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  $\pi$
- 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

## Théorie de Maxwell

potentiel de Coulomb  $\propto \frac{e}{r}$

**portée =  $\infty$**

photon  $\gamma$

**masse = 0**

## Théorie de Yukawa

potentiel de Yukawa  $\propto \frac{g}{r} \exp\left(-\frac{r}{a}\right)$

**portée =  $a$**

méson  $\pi$

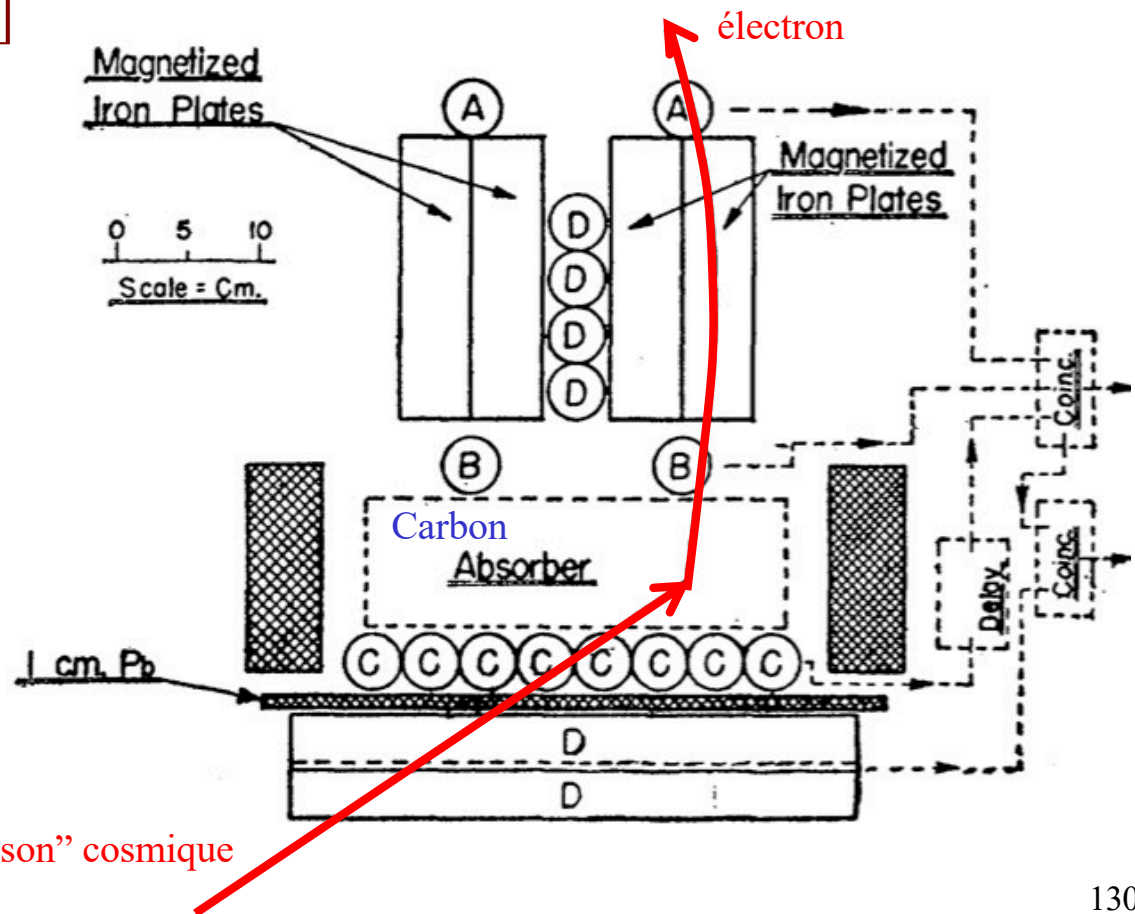
**masse =  $m_\pi > 0$**

$$a = \frac{\hbar}{m_\pi c}$$



# 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>”  $\rightarrow e^-$



# Découverte de “mésons” cosmiques

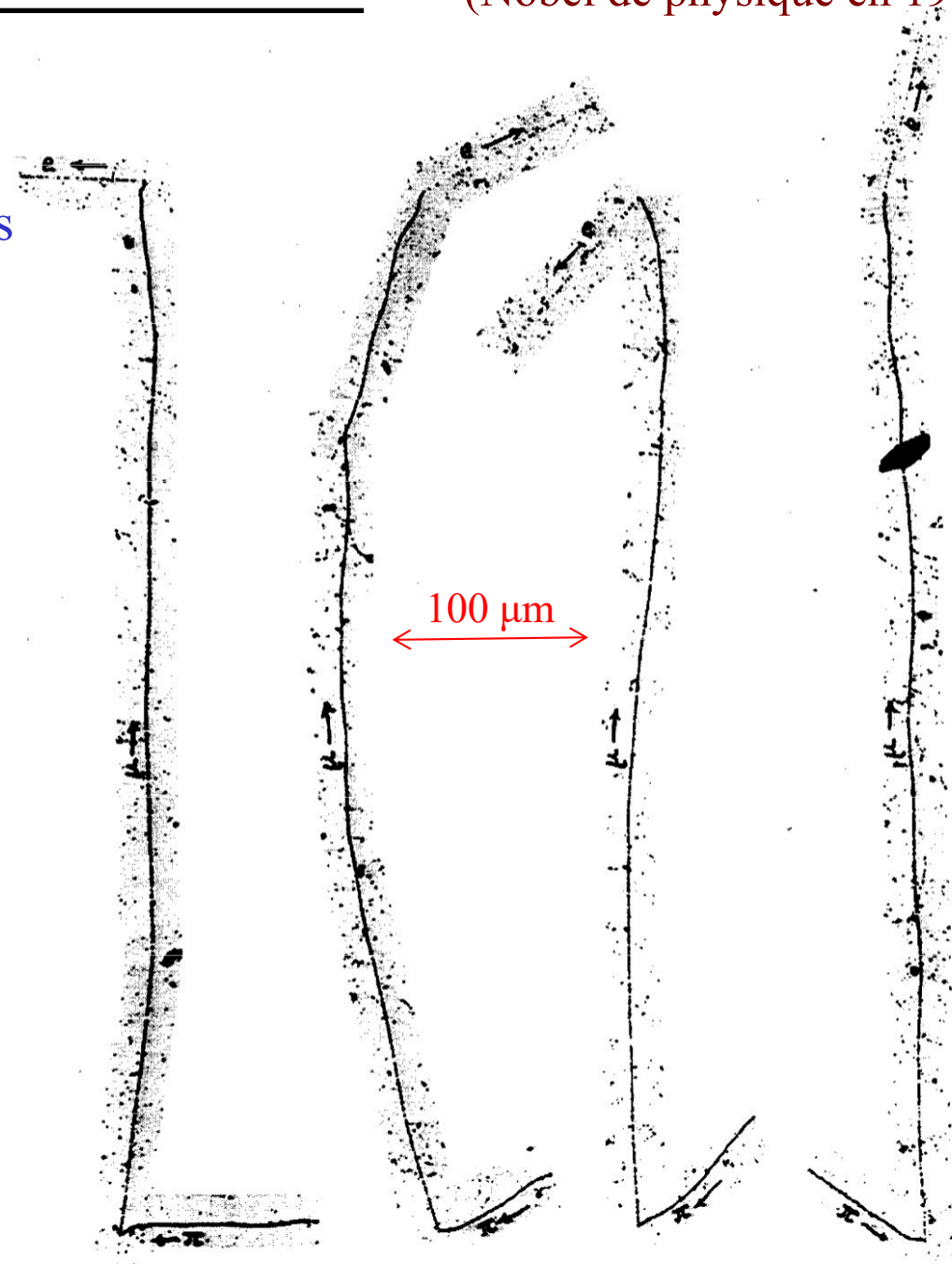
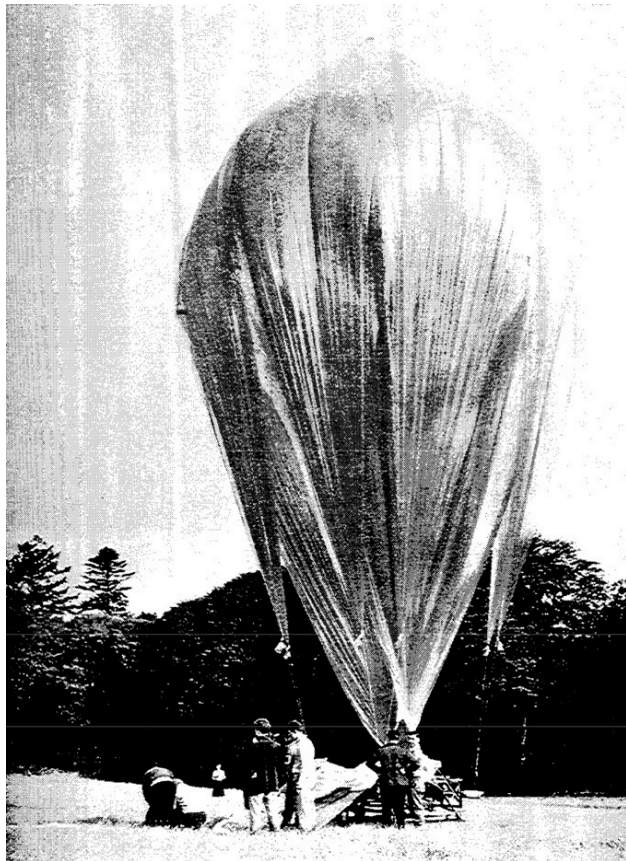
- Pour les théoriciens, ce “méson” cosmique ne peut pas être le méson de Yukawa
- Raisons:
  - temps de vie devrait être  $\sim 100$  fois plus court
  - section efficace de diffusion méson-nucléon devrait être  $\sim 100$  fois plus grande
  - mésons de Yukawa stoppés dans la matière devraient se comporter 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)

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

# Découverte méson $\pi$

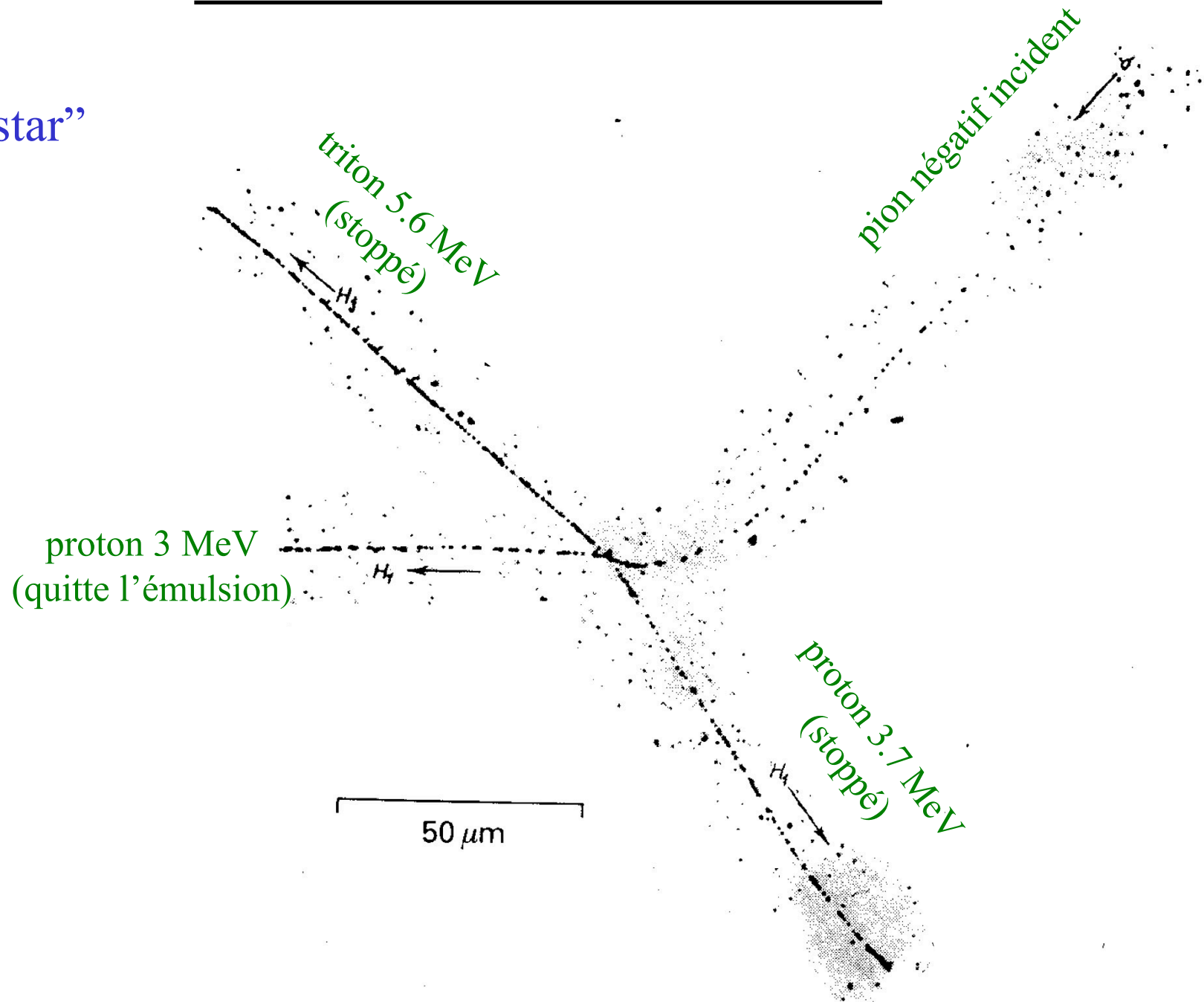
par C. Powell en 1947  
(Nobel de physique en 1950)

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



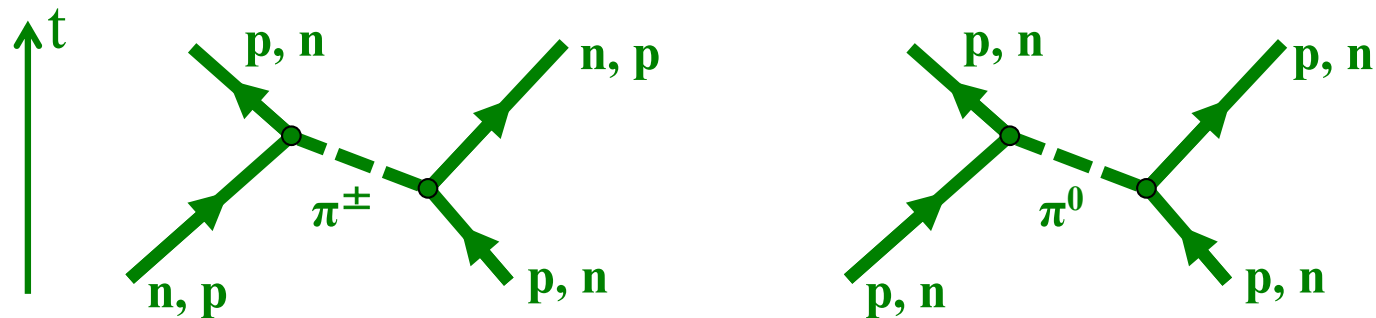
# Découverte méson $\pi$

- “star”



# Pion neutre: $\pi^0$

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



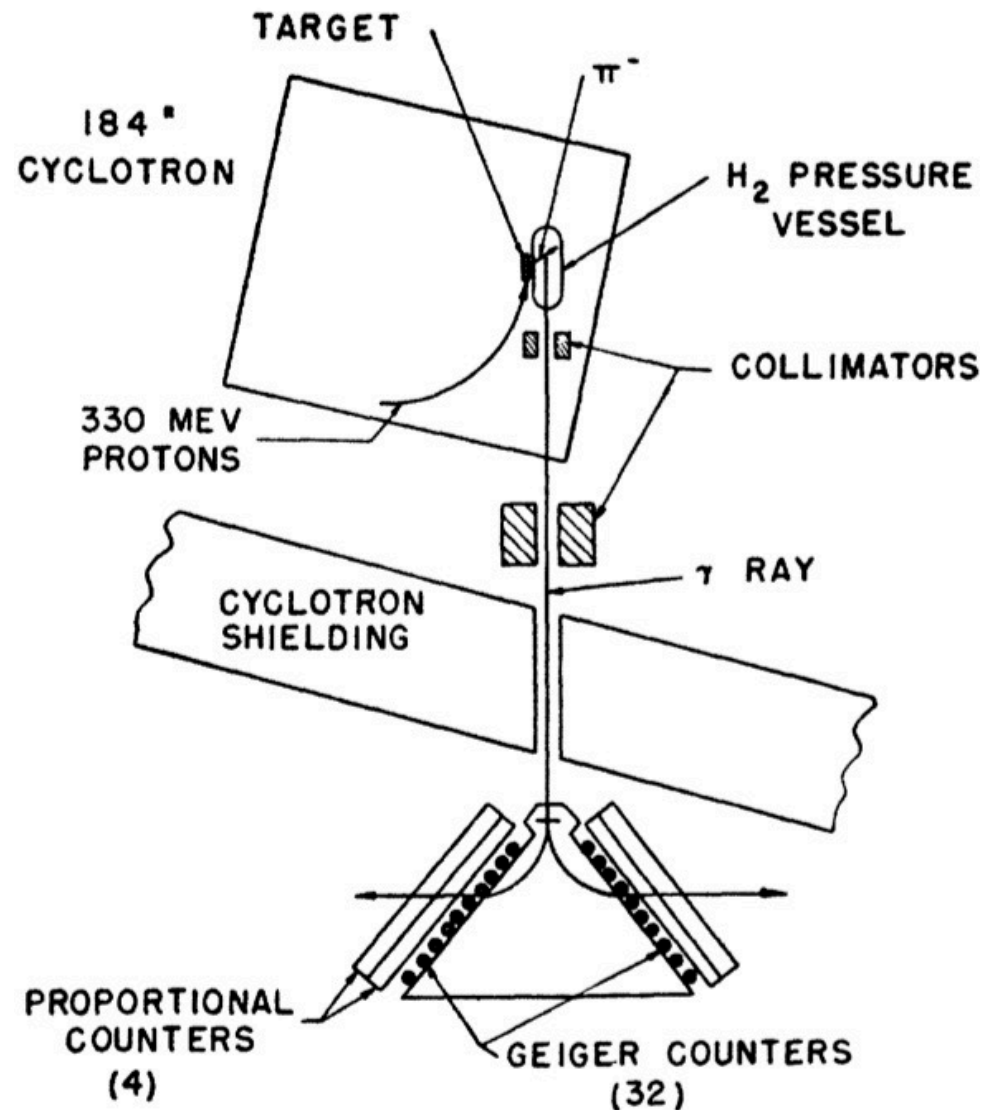
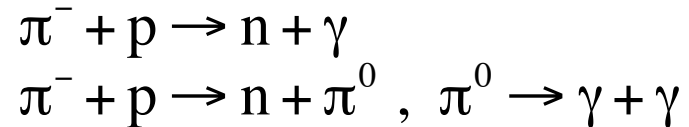
- $\sim 1940$ : prédiction désintégration  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  avec  $\tau \sim 10^{-16}$  s
- découverte à l'aide d'un accélérateur
  - $\sim 1950$ : synchrocyclotron de 184 pouces (4.7 m) de diamètre à Berkeley avec protons de 330 MeV

# 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

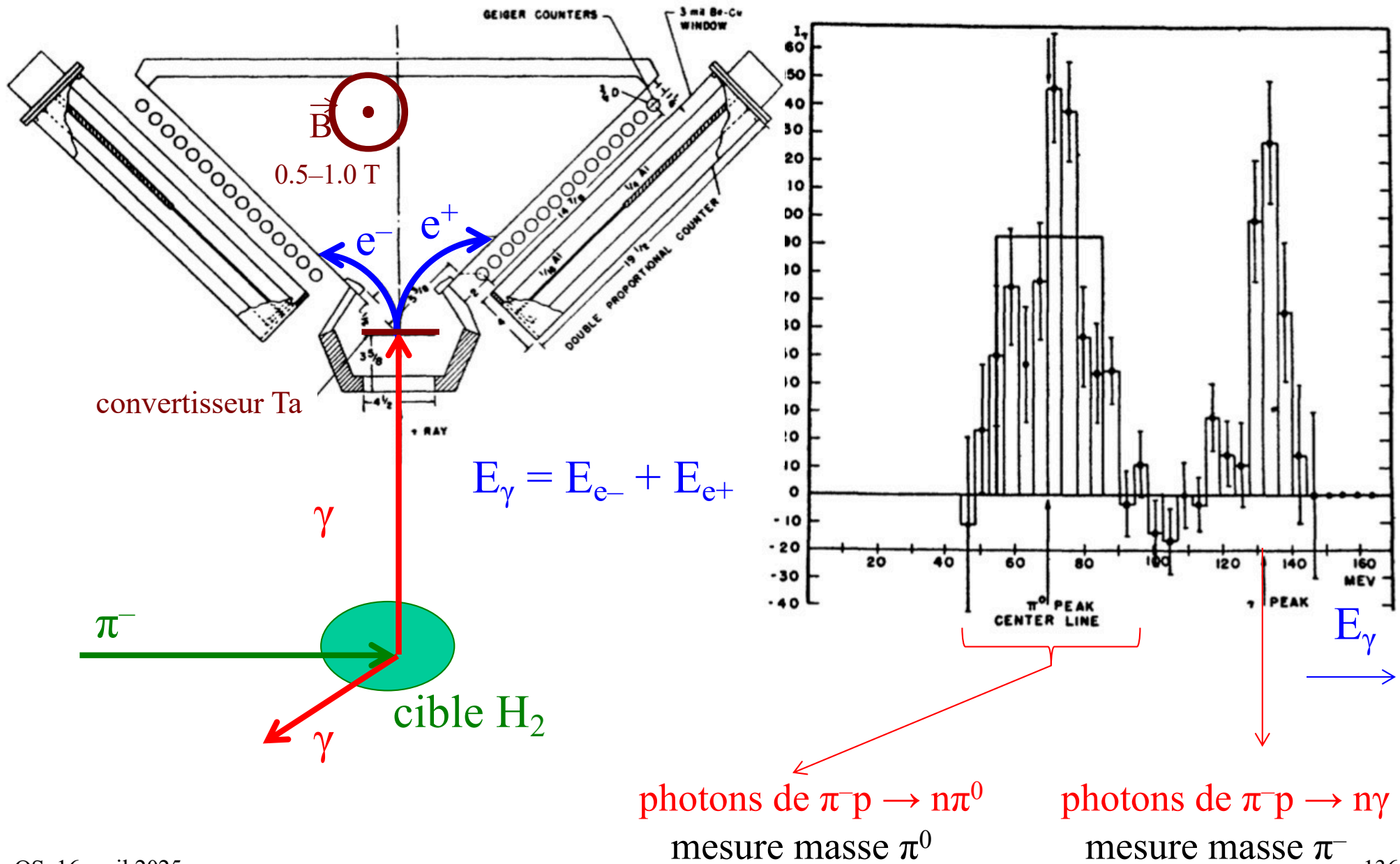
- Réactions:





# Mesure de la masse des pions

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



# 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