

Les surprises de la désintégration β (et donc de l'interaction faible)

- 1930: découverte “théorique” (postulation) du **neutrino**
- 1956: découverte expérimentale du neutrino
- 1957: découverte de la non-conservation de la **parité**,
c'est-à-dire de la violation de la symétrie gauche-droite
- 1958: découverte que le neutrino a toujours une **hélicité** de -1 ,
c'est-à-dire qu'il est toujours gauche
(et que l'anti-neutrino a toujours une hélicité $+1$,
c'est-à-dire qu'il est toujours droit)
- ...

Radioactivité β et neutrino

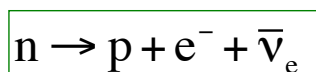
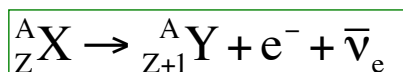
1898: Rutherford distingue les radioactivités α et β

~ 1900 : rayons β = électrons

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

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

*“I have done a terrible thing today,
something which no theoretical
physicist should ever do. I have
suggested something that can never
be verified experimentally” (W. Pauli)*

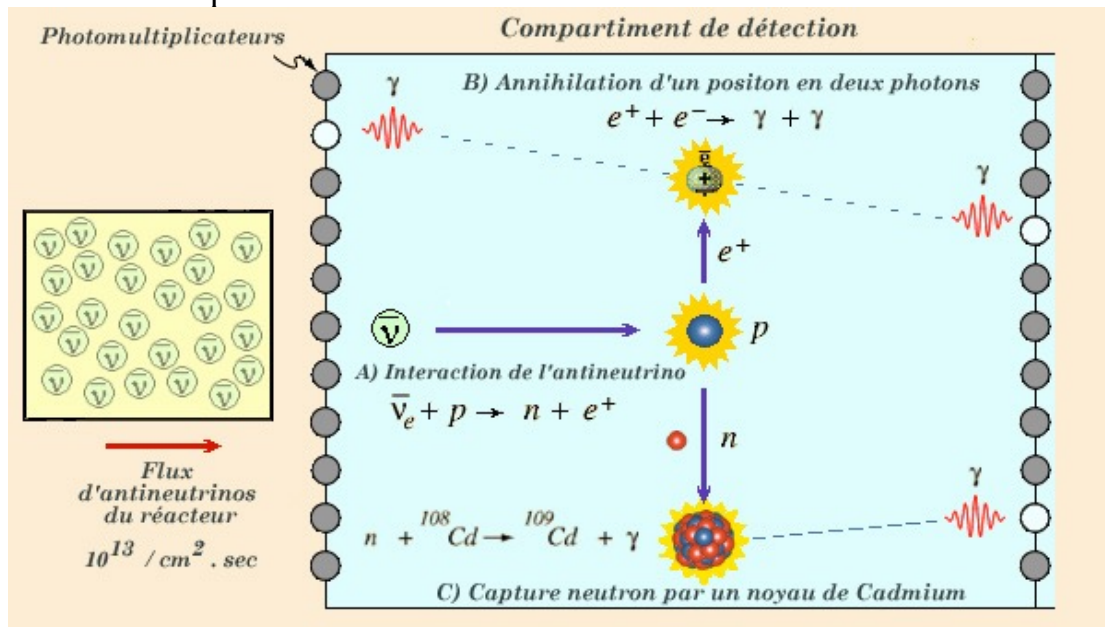


Neutrino: **masse nulle**
insensible à l'interaction é.m. (charge électrique nulle)
insensible à l'interaction forte
spin $1/2$

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



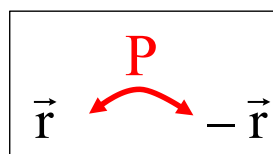
OS, 9 octobre 2024

<http://www.laradioactivite.com>

70

Une symétrie discrète: la parité P

- Opération de parité P = « inversion d'espace »



- Réflexion (par un miroir)
= inversion d'une seule des 3 coordonnées de l'espace
= opération P suivie d'une rotation de 180 degrés autour d'un axe perpendiculaire au miroir

CONSERVATION DE LA PARITE:

E. Wigner, 1927

On dit que « la parité est conservée » si les lois de la physique sont invariantes par rapport à une inversion d'espace (ou une réflexion dans un miroir), c'est-à-dire si l'image dans un miroir d'un phénomène physique correspond à un phénomène physique de même probabilité

OS, 9 octobre 2024

71

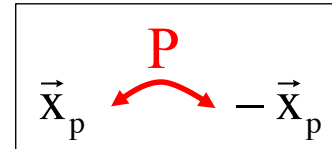
Vecteurs polaires et axiaux

- Un vecteur peut se transformer de deux façons différentes sous une inversion spatiale P:

- **vecteur polaire**

parité = -1

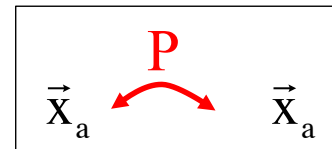
- direction avec une signification physique
- exemple: vitesse \vec{v} , force \vec{F} , champ électrique \vec{E}



- **vecteur axial (ou pseudo-vecteur)**

parité = +1

- direction conventionnelle (règle du « tire-bouchon »)
- exemple: champ magnétique \vec{B}



- Produit vectoriel:

$$\vec{X}_p \wedge \vec{Y}_p = \vec{Z}_a \quad \text{par ex.} \quad \vec{r} \wedge \vec{p} = \vec{L}$$

$$(-1) \times (-1) = +1$$

$$\vec{X}_p \wedge \vec{Y}_a = \vec{Z}_p \quad \text{par ex.} \quad q\vec{v} \wedge \vec{B} = \vec{F}$$

$$(-1) \times (+1) = -1$$

$$\vec{X}_a \wedge \vec{Y}_a = \vec{Z}_a$$

$$(+1) \times (+1) = +1$$

→ la parité est conservée

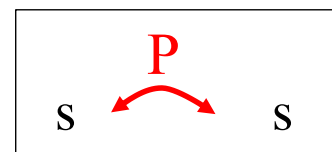
Scalaires et pseudo-scalaires

- Un scalaire peut se transformer de deux façons différentes sous une inversion spatiale P:

- **(vrai) scalaire**

parité = +1

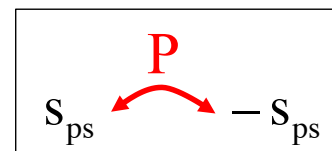
- signe avec une signification physique
- exemple: masse m , charge électrique q



- **pseudo-scalaire**

parité = -1

- signe conventionnel
- exemple: hélicité H (voir plus loin)



- Produit scalaire:

$$\vec{X}_p \cdot \vec{Y}_p = s \quad \text{par ex.} \quad \vec{F} \cdot \vec{\ell} = W$$

$$(-1) \times (-1) = +1$$

$$\vec{X}_p \cdot \vec{Y}_a = s_{ps} \quad \text{par ex.} \quad \vec{p} \cdot \vec{S} \propto H$$

$$(-1) \times (+1) = -1$$

$$\vec{X}_a \cdot \vec{Y}_a = s \quad \text{par ex.} \quad -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = E$$

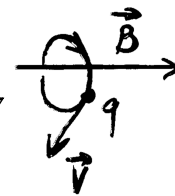
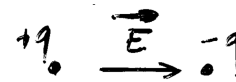
$$(+1) \times (+1) = +1$$

→ la parité est conservée

Parité des quantités physiques

| Quantité physique | P |
|---|---|
| position \vec{r} | - |
| temps t | + |
| vitesse $\vec{v} = d\vec{r}/dt$ | - |
| masse m | + |
| quantité de mouvement $\vec{p} = m\vec{v}$ | - |
| moment cinétique $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$ | + |
| spin \vec{S} | + |
| force $\vec{F} = d\vec{p}/dt$ | - |
| énergie $E = \int \vec{F} \cdot d\vec{r}$ | + |
| charge électrique q | + |
| champ électrique \vec{E} | - |
| champ magnétique \vec{B} | + |

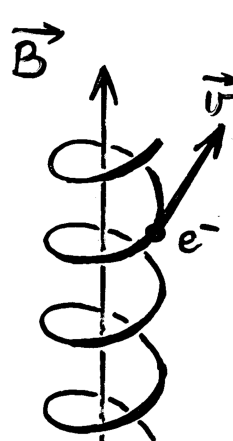
la quantité physique est multipliée par ce signe sous une inversion d'espace



Hélicité (pseudo-scalaire)

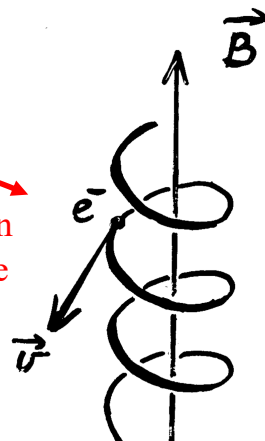
- Hélicité de l'orbite d'une particule dans un champ magnétique B :

$$H = \frac{\vec{v}}{c} \cdot \frac{\vec{B}}{\|\vec{B}\|}$$



hélice droite

P
inversion
d'espace



hélice gauche

- Hélicité d'une particule de spin S :

$$H = \frac{\vec{v}}{c} \cdot \frac{\vec{S}}{\|\vec{S}\|} = \frac{\vec{S} \cdot \vec{p}c}{\|\vec{S}\|E}$$



hélicité droite

P
inversion
d'espace



hélicité gauche

Parité en mécanique quantique

- Inversion d'espace: opérateur \mathbf{P}

$$\begin{array}{ll} \psi(\vec{r}) \rightarrow \psi(-\vec{r}) & \text{fonction d'onde} \\ |\psi\rangle \rightarrow \mathbf{P}|\psi\rangle & \text{"ket"} \\ \mathbf{P}^2|\psi\rangle = |\psi\rangle & \Rightarrow \text{valeurs propres} = \pm 1 \end{array}$$

- Conservation de la parité $\Leftrightarrow [\mathbf{P}, \mathbf{H}] = 0$ (\mathbf{H} = Hamiltonien)
- Cas d'une particule dans un potentiel central:
 - conservation du moment cinétique $\Leftrightarrow [\mathbf{L}_x, \mathbf{H}] = [\mathbf{L}_y, \mathbf{H}] = [\mathbf{L}_z, \mathbf{H}] = 0$
 - Les états propres simultanés de \mathbf{H} , \mathbf{L}^2 et \mathbf{L}_z , de moment cinétique ℓ

$$\psi_{n\ell m}(\vec{r}) = R_{n\ell}(r)Y_{\ell}^m(\theta, \varphi) \quad \text{où } (r, \theta, \varphi) = \text{coordonnées sphériques}$$

sont aussi états propres de \mathbf{P} , pour la valeur propre $(-1)^{\ell}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} \psi_{n\ell m}(\vec{r}) &= \psi_{n\ell m}(-\vec{r}) = R_{n\ell}(r)Y_{\ell}^m(\pi - \theta, \varphi + \pi) \\ &= R_{n\ell}(r)(-1)^{\ell}Y_{\ell}^m(\theta, \varphi) = (-1)^{\ell} \psi_{n\ell m}(\vec{r}) \end{aligned}$$

$$\mathbf{P} = (-1)^{\ell}$$

Parité et moment cinétique intrinsèques

- Chaque hadron (et donc chaque noyau) possède, comme les vecteurs ou les scalaires, une **parité intrinsèque \mathbf{P} ($= \pm 1$)** qui décrit la manière dont son état quantique se transforme sous une inversion d'espace

Exemples:

- Chaque particule (et donc chaque noyau) a un **moment cinétique intrinsèque ou spin \mathbf{J} ($= 0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$)**
- Spin et parité intrinsèque sont souvent noté $\mathbf{J}^{\mathbf{P}}$

| | \mathbf{P} | \mathbf{J} | $\mathbf{J}^{\mathbf{P}}$ |
|---|--------------|--------------|---------------------------|
| Proton (p) | +1 | 1/2 | 1/2 ⁺ |
| Neutron (n) | +1 | 1/2 | 1/2 ⁺ |
| Pion (π) | -1 | 0 | 0 ⁻ |
| Deuteron (d) | +1 | 1 | 1 ⁺ |
| Helium 4 (${}^4_2\text{He} = \alpha$) | +1 | 0 | 0 ⁺ |
| Lithium 6 (${}^6_3\text{Li}$) | +1 | 1 | 1 ⁺ |
| Lithium 7 (${}^7_3\text{Li}$) | -1 | 3/2 | 3/2 ⁻ |
| Bore 10 (${}^{10}_5\text{B}$) | +1 | 3 | 3 ⁺ |
| Oxygène 17 (${}^{17}_8\text{O}$) | +1 | 5/2 | 5/2 ⁺ |

Conservation du moment cinétique et de la parité dans un processus $1+2 \rightarrow 3+4$

- **Conservation du (vecteur !) moment cinétique total**

$$\vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{L}_{12} = \vec{J}_3 + \vec{J}_4 + \vec{L}_{34}$$

Attention: composition des moments cinétiques

- J_i = spin de la particule i
- L_{ij} = moment cinétique orbital relatif entre les particules i et j

- **Conservation de la parité (par les interactions fortes et é.m.)**

$$P_1 \cdot P_2 \cdot (-1)^{L_{12}} = P_3 \cdot P_4 \cdot (-1)^{L_{34}}$$

Attention: les parités sont multiplicatives

- P_i = parité intrinsèque de la particule i
- L_{ij} = moment cinétique orbital relatif entre les particules i et j

- **Exemple (voir exercice):**

- capture pionique par le deuton: $\pi^- + d \rightarrow n + n$

Le « problème τ - θ » en 1956

- Observation de nouvelles particules étranges τ et θ , se désintégrant par interaction faible:

$$\begin{array}{ll} \tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ & P = (-1)^3 = -1 \\ \theta^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 & P = (-1)^2 = +1 \end{array}$$

- Parités opposées, mais toutes les autres propriétés identiques:
 - masse
 - durée de vie moyenne
 - charge électrique (+1)
 - section efficace de production par interaction forte
 - etc.

Comment deux particules différentes peuvent-elles se ressembler autant ?

Question of Parity Conservation in Weak Interactions*

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG,† *Brookhaven National Laboratory, Upton, New York*

(Received June 22, 1956)

The question of parity conservation in β decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.

RECENT experimental data indicate closely identical masses¹ and lifetimes² of the θ^+ ($\equiv K_{\pi 2}^+$) and the τ^+ ($\equiv K_{\pi 3}^+$) mesons. On the other hand, analyses³ of the decay products of τ^+ strongly suggest on the grounds of angular momentum and parity conservation that the τ^+ and θ^+ are not the same particle. This poses a rather puzzling situation that has been extensively discussed.⁴

One way out of the difficulty is to assume that parity is not strictly conserved, so that θ^+ and τ^+ are two different decay modes of the same particle, which necessarily has a single mass value and a single lifetime. We wish to analyze this possibility in the present paper against the background of the existing experimental evidence of parity conservation. It will become clear that existing experiments do indicate parity conservation in strong and electromagnetic interactions to a high degree of accuracy, but that for the weak inter-

[...]

The reason for the absence of interference terms CC' is actually quite obvious. Such terms can only occur as a pseudoscalar formed out of the experimentally measured quantities. For example, if three momenta \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 , \mathbf{p}_3 are measured, the term $CC' \mathbf{p}_1 \cdot (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{p}_3)$ may occur. Or if a momentum \mathbf{p} and a spin $\boldsymbol{\sigma}$ are measured, the term $CC' \mathbf{p} \cdot \boldsymbol{\sigma}$ may occur. In all the β -decay phenomena mentioned above, no such pseudoscalars can be formed out of the measured quantities.

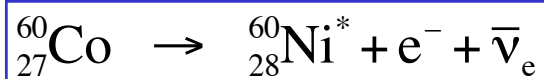
→ il faut mesurer un pseudo-scalaire dans un processus d'interaction faible !

80

Idée de Lee et Yang

Lee & Yang, Phys. Rev. 104, 254 (1956)

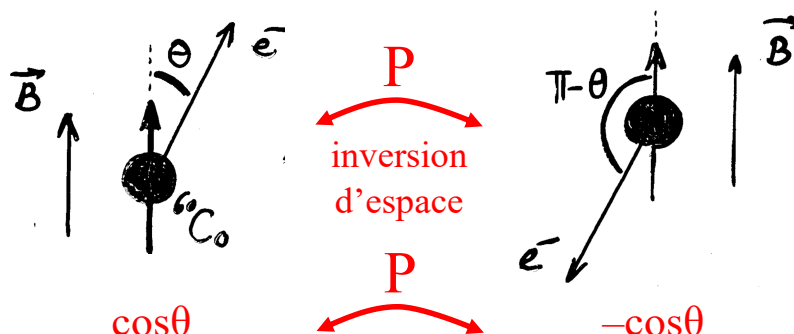
- Désintégration β du cobalt 60 (par interaction faible):



- ① aligner les spins S de tous les noyaux ${}^{60}\text{Co}$ par un champ magnétique B
- ② mesurer $N(\theta)$ = nombre d'électrons émis à un angle θ par rapport à B
- ③ comparer $N(\theta)$ et $N(\pi - \theta)$

$$\cos \theta = (\vec{p}_e \cdot \vec{B}) / (p_e B)$$

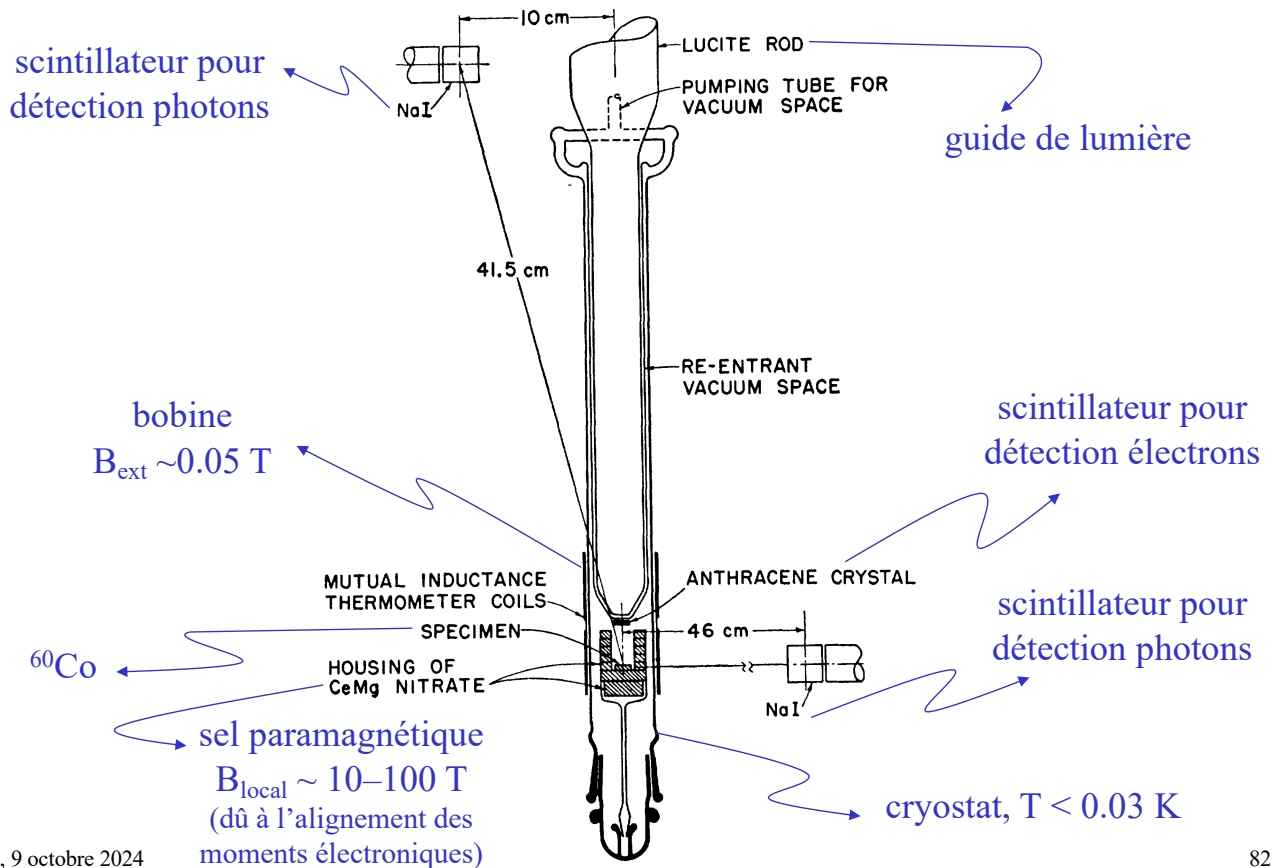
$$\text{conservation de } P \Leftrightarrow N(\theta) = N(\pi - \theta)$$



Pseudo-scalaire !

Expérience de Mme Wu

Wu et al., Phys. Rev.
105, 1413 (1957)

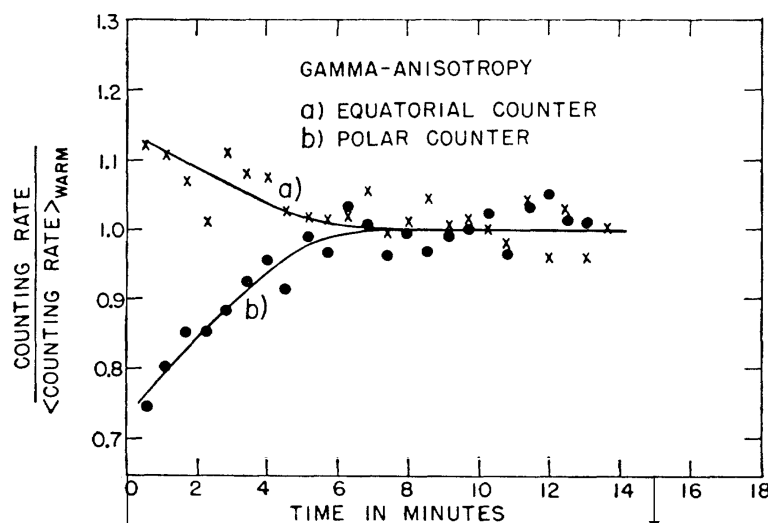
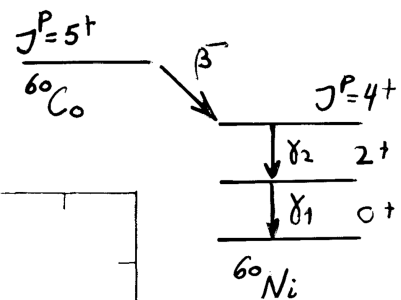


OS, 9 octobre 2024

82

Expérience de Mme Wu (comptage γ)

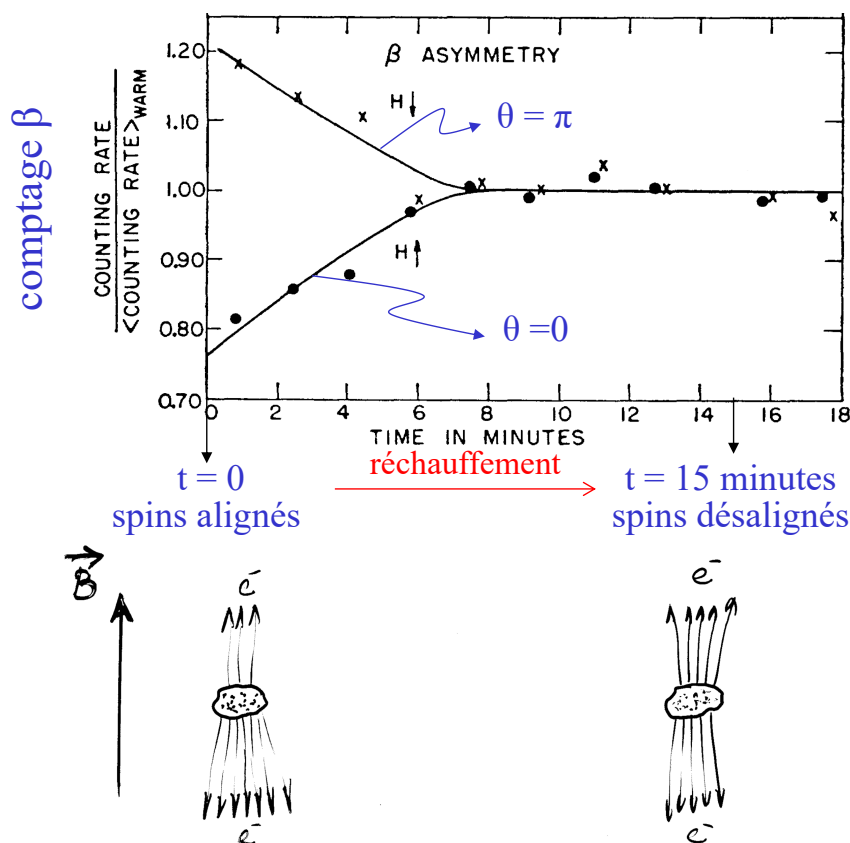
- La polarisation des noyaux de ^{60}Co est démontrée par l'anisotropie des γ émis par le $^{60}\text{Ni}^*$



OS, 9 octobre 2024

83

Découverte de la violation de la parité



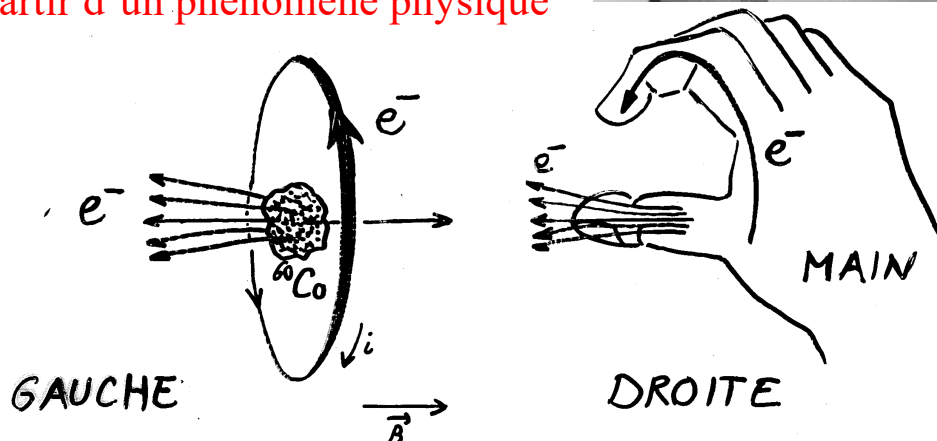
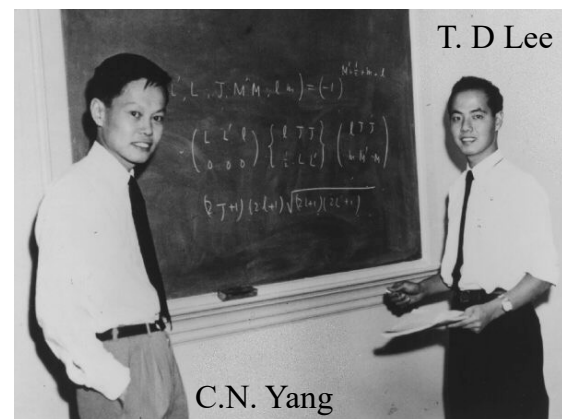
Wu et al., Phys. Rev. 105, 1413 (1957)

OS, 9 octobre 2024

84

Deux conséquences

- Lee et Yang reçoivent le prix Nobel (en 1957 !)
– à l'âge de 31 et 35 ans
- Nous pouvons définir « GAUCHE » et « DROITE » à partir d'un phénomène physique



OS, 9 octobre 2024

85