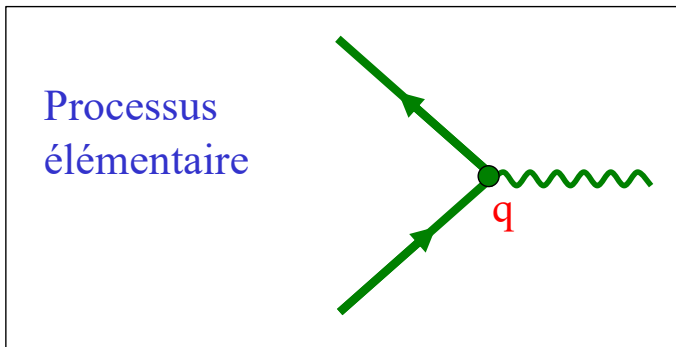


# Electrodynamique quantique

(QED = quantum electrodynamics)



= particule chargée ( $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\mu^-$ ,  $\mu^+$ , ...)

= photon = champ électromagnétique

= vertex = couplage entre particule chargée et champ électromagnétique

$q$  = « force » du couplage = charge électrique

OS, 26 mars 2025

66

## Diffusion électron-électron

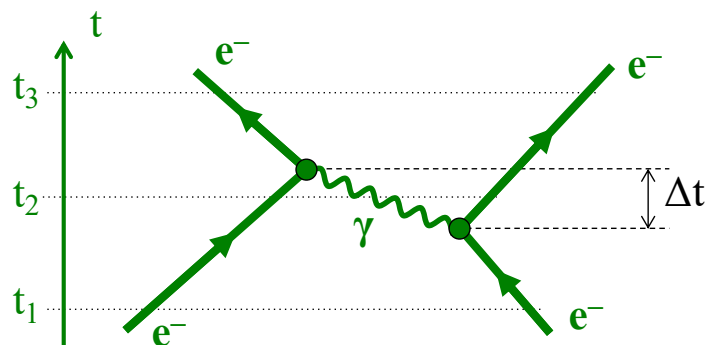
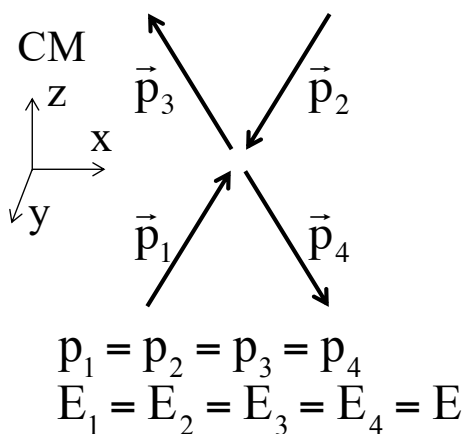


Diagramme de Feynman

Avant:  $E_{\text{tot}}(t_1) = E_1 + E_2 = 2E$

Pendant:  $E_{\text{tot}}(t_2) = E_1 + E_4 + E_\gamma = 2E + E_\gamma$

Après:  $E_{\text{tot}}(t_3) = E_3 + E_4 = 2E$

Energie violée d'une quantité  
 $\Delta E = E_\gamma$  pendant un temps  $\Delta t$

Alternative: énergie et quantité de mouvement conservées à chaque vertex

$$\Rightarrow \begin{cases} E_\gamma = 0 \\ \vec{p}_\gamma = \vec{p}_3 - \vec{p}_1 = \vec{p}_2 - \vec{p}_4 \neq 0 \end{cases} \Rightarrow E_\gamma \neq p_\gamma c \quad \text{photon virtuel}$$

OS, 26 mars 2025

67

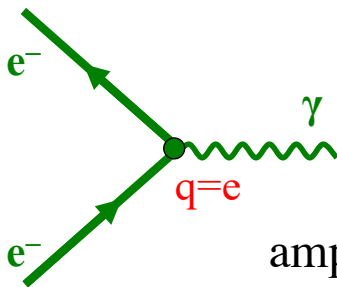
# Particule d'énergie E et d'impulsion $\vec{p}$

- Si  $E^2 - \vec{p}^2 c^2 = m^2 c^4$   
alors la particule est **réelle** (“on shell”)
  - la particule existe (comme particule libre)  
dans l'état initial ou l'état final d'un processus
- Si  $E^2 - \vec{p}^2 c^2 \neq m^2 c^4$   
alors la particule est **virtuelle** (“off shell”)
  - la particule n'apparaît pas dans l'état initial ou final d'un processus;  
elle est échangée au cours du processus, entre deux vertex d'un diagramme de Feynman

OS, 26 mars 2025

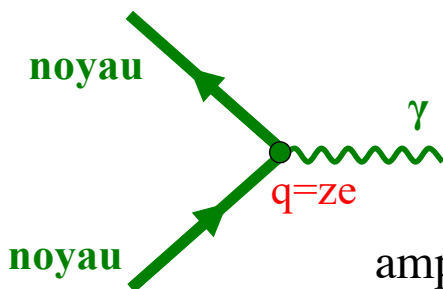
68

## QED



amplitude  $\propto$  constante de couplage =  $e$

$$\text{probabilité} = |\text{amplitude}|^2 \propto \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \cong \frac{1}{137}$$



amplitude  $\propto ze$

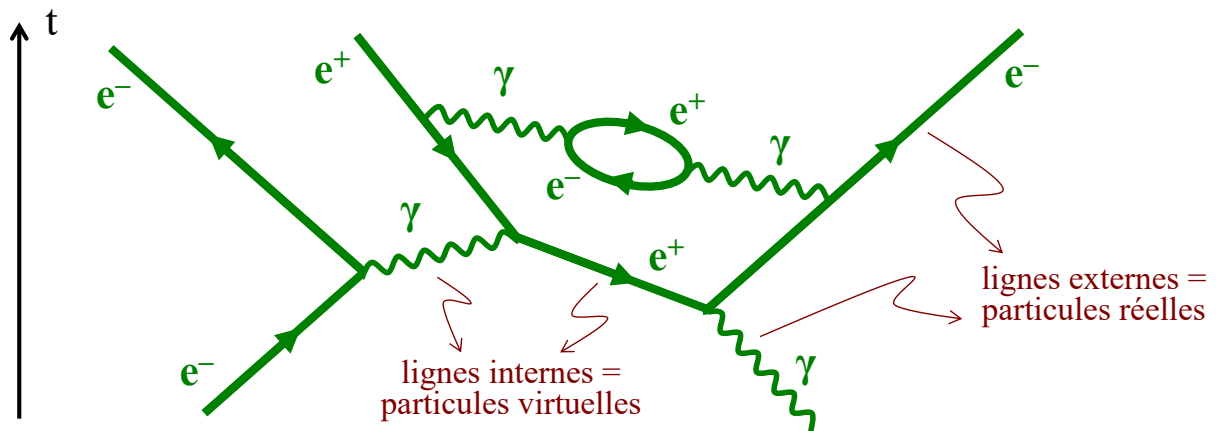
$$\text{probabilité} \propto z^2 \alpha \cong \frac{z^2}{137}$$

OS, 26 mars 2025

69

## QED (suite)

Toute interaction électromagnétique est décrite par une combinaison de processus élémentaires → **diagrammes de Feynman**



NB: – une particule ( $e^-$ ) a sa flèche dans le sens du temps  
 – une antiparticule ( $e^+$ ) a sa flèche dans le sens opposé au temps  
 – le photon ( $\gamma$ ), qui est sa propre antiparticule, n'a pas de flèche

$$\text{amplitude} \propto \prod_{\text{vertex } i} q_i$$

$$\text{section efficace} \propto |\text{amplitude}|^2$$

OS, 26 mars 2025

70

## QED (suite)

Plusieurs diagrammes de Feynman peuvent décrire le même processus (même état initial et même état final)

$$\sigma \propto |A_{\text{tot}}|^2 \quad \text{avec} \quad A_{\text{tot}} = \sum_i A_i$$

somme sur tous les diagrammes de Feynman possibles

$A_i$  = amplitudes complexes → phénomène d'interférences (constructives ou destructives) entre diagrammes

$$A_{\text{tot}} = \sum_k c_k \alpha^k = \sum_k c_k \left( \frac{1}{137} \right)^k = c_1 \frac{1}{137} + c_2 \left( \frac{1}{137} \right)^2 + c_3 \left( \frac{1}{137} \right)^3 + \dots$$

négligeable

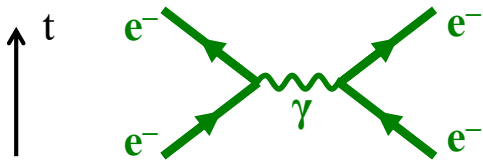
En première approximation, on ne considère que les diagrammes à l'ordre le plus bas en  $\alpha$ , donc avec le plus petit nombre de vertex

OS, 26 mars 2025

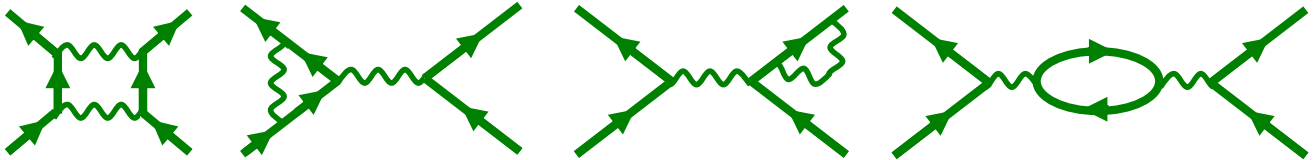
71

# Diffusion électron-électron (suite)

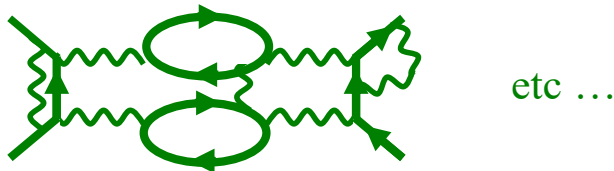
- Amplitude proportionnelle à  $e^2$ , donc  $\alpha = 1/137$



- Amplitudes proportionnelles à  $e^4$ , donc  $\alpha^2 = (1/137)^2$

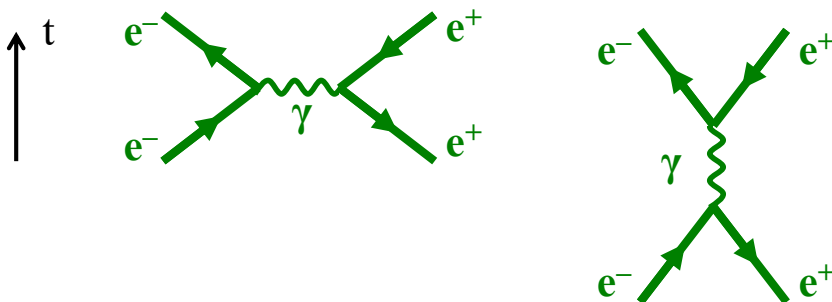


- Amplitudes proportionnelles à  $e^{14}$ , donc  $\alpha^7 = (1/137)^7$



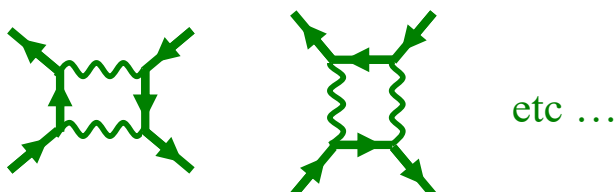
# Diffusion électron-positon

- Amplitude proportionnelle à  $e^2$ , donc  $\alpha = 1/137$



$$\Rightarrow \sigma(e^+e^- \rightarrow e^+e^-) \neq \sigma(e^-e^- \rightarrow e^-e^-)$$

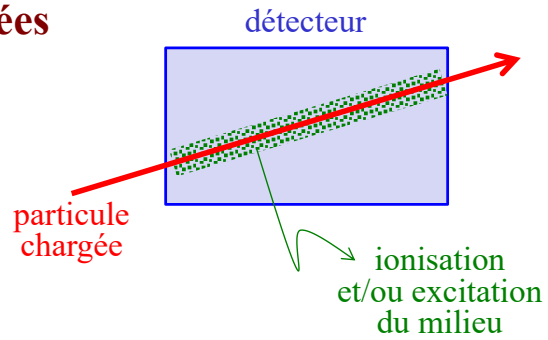
- Amplitudes proportionnelles à  $e^4$ , donc  $\alpha^2 = (1/137)^2$



# Chapitre 3: Détecteurs

- **Détection des particules chargées**

- plaques photographiques
- chambres à bulles
- scintillateurs
- détecteurs à gaz, chambres à fils
- détecteurs à semi-conducteur
- ...



- **Détection des particules neutres ( $n$ ,  $\gamma$ , ...)**

- particule neutre interagit dans le détecteur en produisant (ou donnant de l'énergie à) une particule chargée, qu'on détecte

- **“Calorimétrie”**

- calorimètre électromagnétique
- calorimètre hadronique

