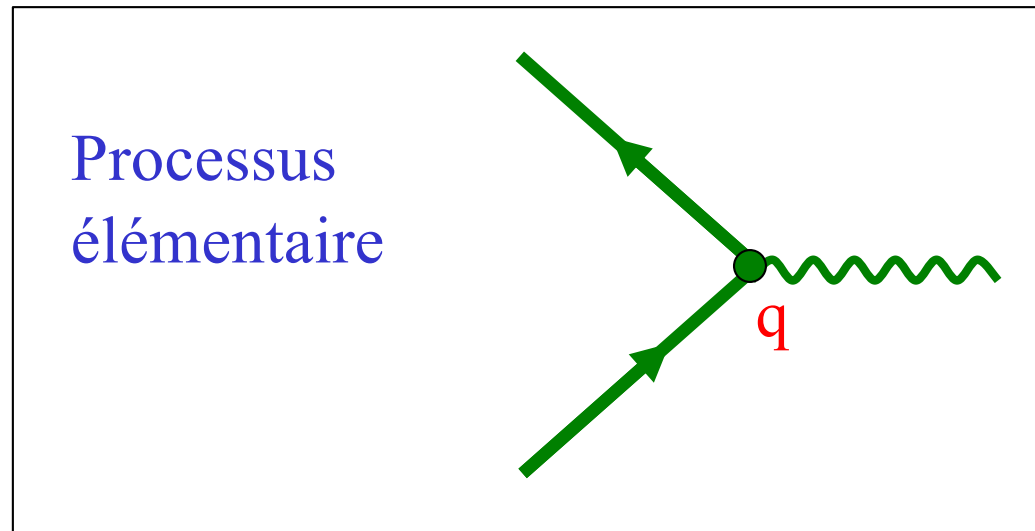


Electrodynamique quantique

(QED = quantum electrodynamics)



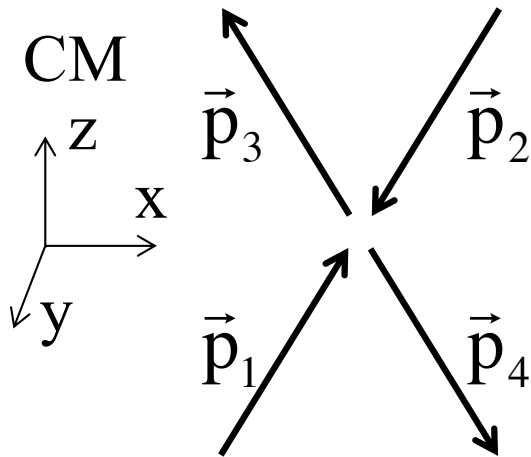
 = particule chargée (e^- , e^+ , μ^- , μ^+ , ...)

 = photon = champ électromagnétique

 = vertex = couplage entre particule chargée
et champ électromagnétique

q = « force » du couplage = charge électrique

Diffusion électron-électron



$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4$$

$$E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E$$

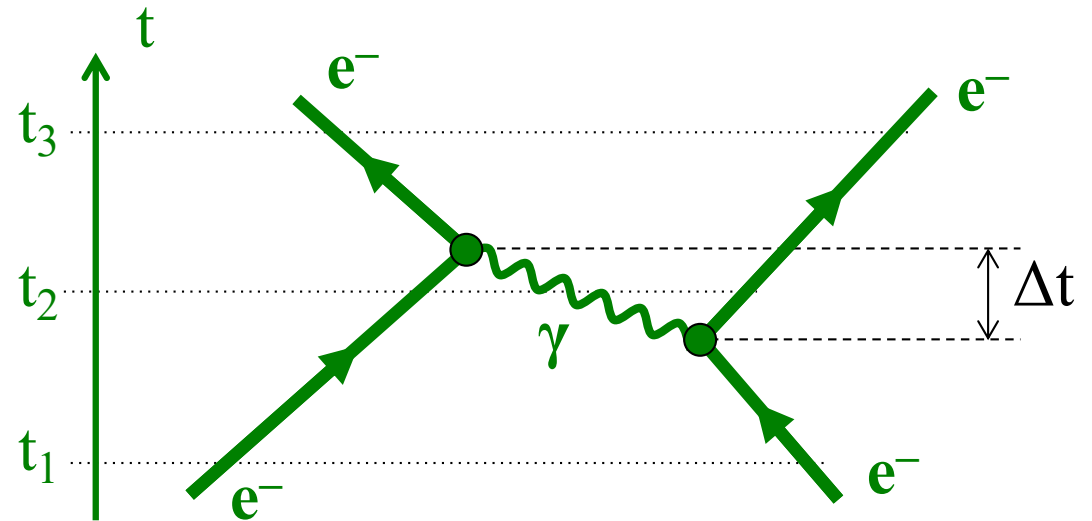


Diagramme de Feynman

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 Δt

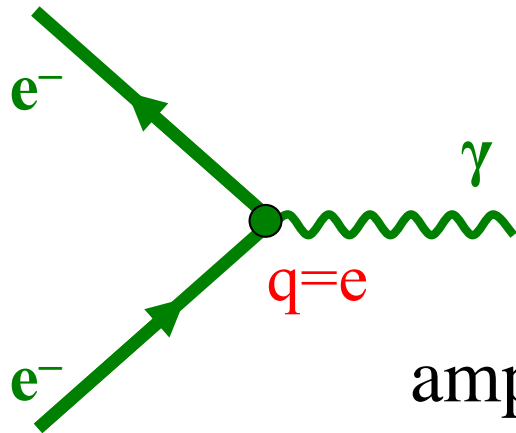
Alternative: énergie et quantité de mouvement conservées à chaque vertex

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

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

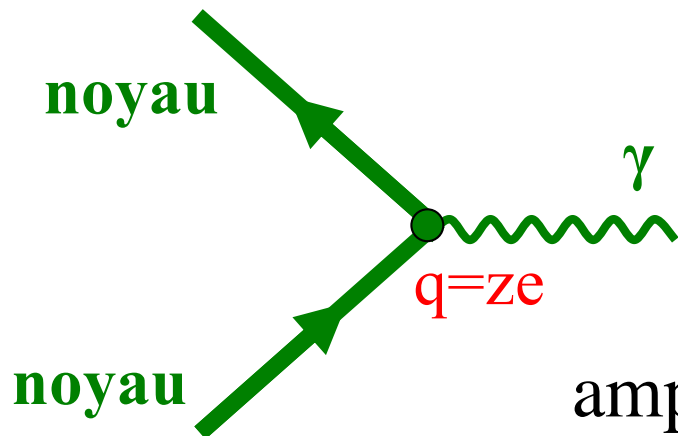
- Si $E^2 - \vec{p}^2 c^2 = m^2 c^4$
alors la particule est **réelle** (“on shell”)
 - la particule existe (comme particule libre)
dans l'état initial ou l'état final d'un processus
- Si $E^2 - \vec{p}^2 c^2 \neq m^2 c^4$
alors la particule est **virtuelle** (“off shell”)
 - la particule n'apparaît pas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

QED



amplitude \propto constante de couplage = e

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

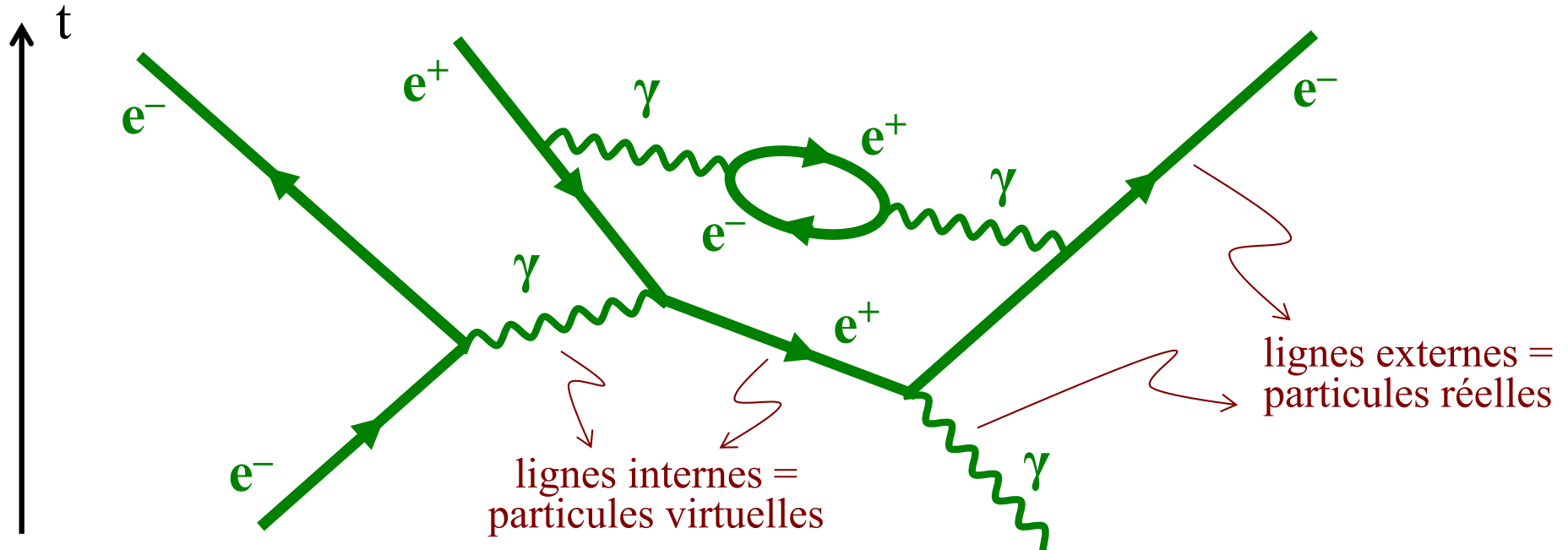


amplitude $\propto ze$

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

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 (γ), qui est sa propre antiparticule, n'a pas de flèche

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

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

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 \rightarrow phénomène d'interférences (constructives ou destructives) entre diagrammes

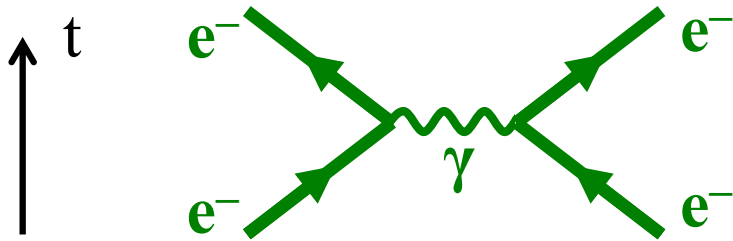
$$A_{\text{tot}} = \sum_k c_k \alpha^k = \sum_k c_k \left(\frac{1}{137} \right)^k = c_1 \frac{1}{137} + c_2 \left(\frac{1}{137} \right)^2 + c_3 \left(\frac{1}{137} \right)^3 + \dots$$

négligeable

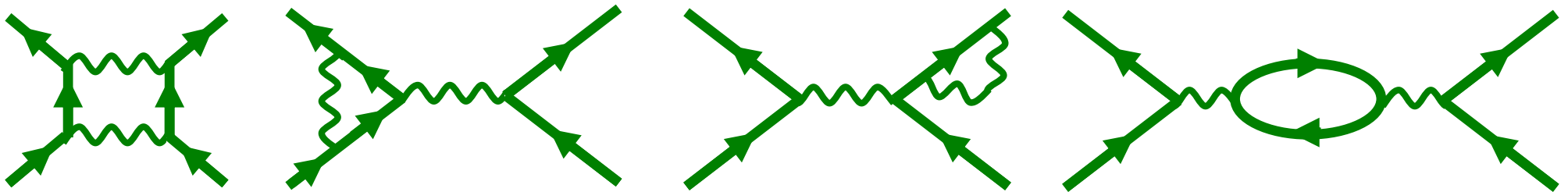
En première approximation, on ne considère que les diagrammes à l'ordre le plus bas en α , donc avec le plus petit nombre de vertex

Diffusion électron-électron (suite)

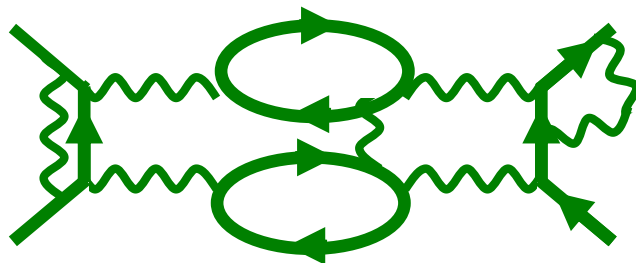
- Amplitude proportionnelle à e^2 , donc $\alpha = 1/137$



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



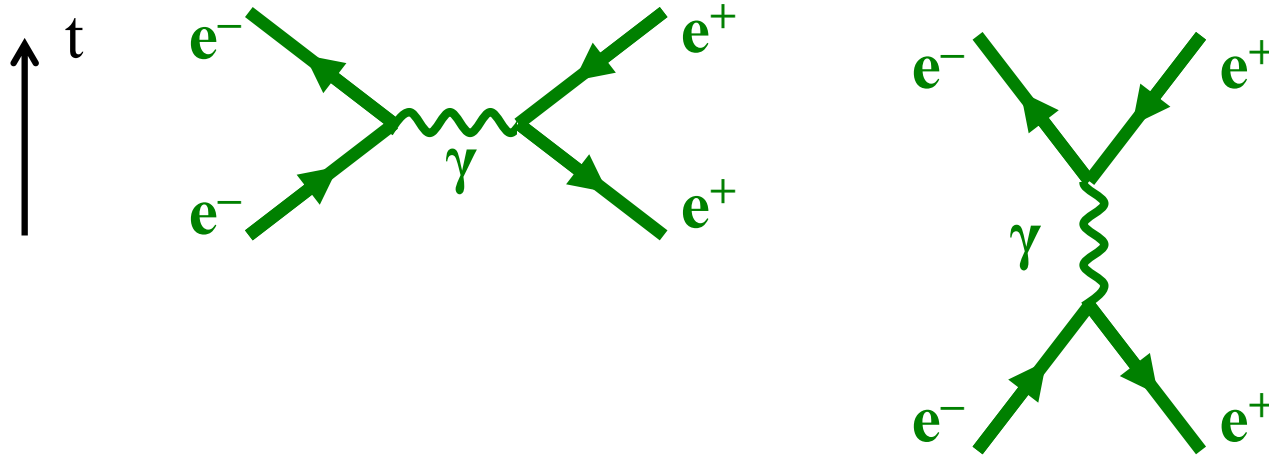
- Amplitudes proportionnelles à e^{14} , donc $\alpha^7 = (1/137)^7$



etc ...

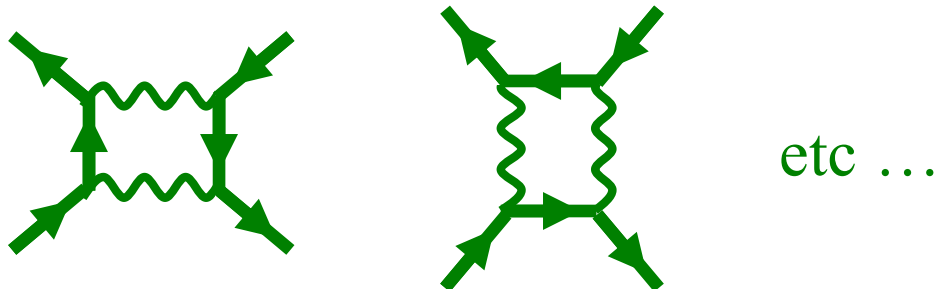
Diffusion électron-positon

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



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

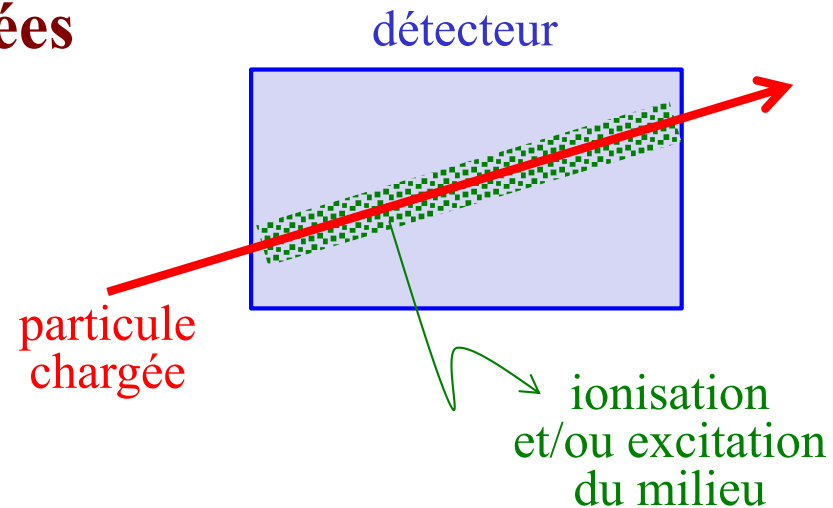
- Amplitudes proportionnelles à e^4 , donc $\alpha^2 = (1/137)^2$



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 , γ , ...)**

- 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

