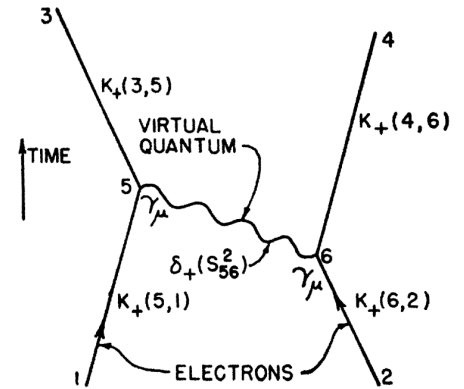


## Annexe X

### Diagrammes de Feynman

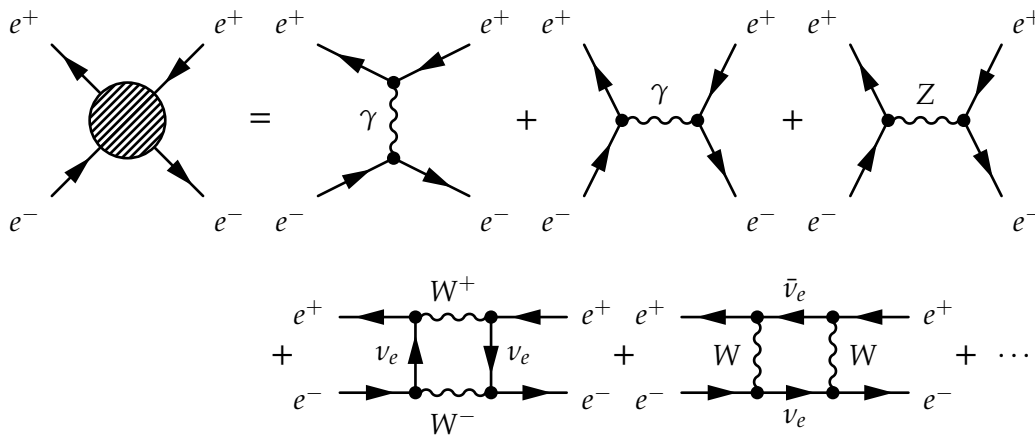
Les diagrammes de Feynman sont des représentations graphiques des équations mathématiques, issues de la théorie quantique des champs, décrivant les interactions entre particules. Grâce à leur aspect visuel simple, ils permettent une approche intuitive de ces équations souvent complexes. Ces diagrammes ont été inventés par Richard Feynman à la fin des années 40 afin de réaliser des calculs de diffusion de particules [1]. Un des tout premiers diagrammes de Feynman présents dans la littérature, sur la figure X.1, représente ainsi la diffusion entre deux électrons. Le temps s'y écoule de bas en haut; l'état initial est donc en bas du diagramme et l'état final en haut. Dans les diagrammes de Feynman du reste de cette thèse, le temps s'écoule de gauche à droite. Ainsi, l'état initial se trouve à gauche et l'état final à droite.



**Figure X.1** – Diagramme de Feynman de la diffusion électron-électron présenté dans la référence [1].

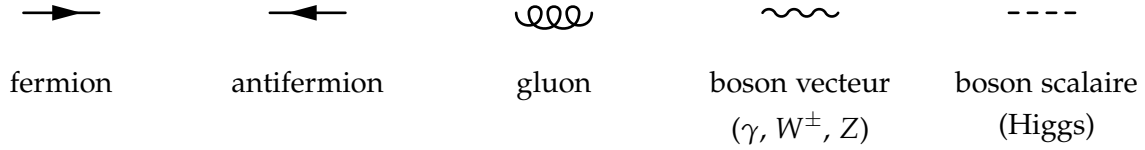
Les diagrammes de Feynman ne représentent pas pour autant la réalité physique des processus étudiés. En effet, seuls les états initiaux et finaux sont réels, les parties internes de chaque diagramme correspondant aux manières de passer d'un état à l'autre. Il faut prendre en compte plusieurs diagrammes de Feynman, parfois de plus en plus complexes, c'est-à-dire d'ordres supérieurs, afin d'obtenir une description fidèle du processus étudié.

Ainsi, pour un processus de type  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ , c'est-à-dire un état initial contenant un anti-électron d'impulsion  $\vec{p}_1$  et un électron d'impulsion  $\vec{p}_2$  et un état final contenant un anti-électron d'impulsion  $\vec{p}_3$  et un électron d'impulsion  $\vec{p}_4$ , l'étude complète du phénomène physique (membre de gauche sur la figure X.2) doit prendre en compte la diffusion (premier terme du membre de droite), l'annihilation et réapparition de la paire  $e^+e^-$  par interaction électromagnétique (deuxième terme) ou faible (troisième terme) mais aussi des processus plus complexes (quatrième et cinquième termes).



**Figure X.2** – Prise en compte de plusieurs diagrammes de Feynman lors de l'étude d'un processus physique donné.

Selon le type de particule se propageant (fermion, photon, boson de Higgs ...), différents types de lignes sont utilisés dans les diagrammes de Feynman. Plusieurs conventions existent, en particulier pour les bosons. La convention utilisée dans cette thèse est illustrée sur la figure X.3.



**Figure X.3** – Types de particules et lignes correspondantes dans les diagrammes de Feynman.

Les interactions entre les particules ont lieu, dans les diagrammes de Feynman, au niveau des connexions entre les lignes correspondant à ces particules. Ces connexions sont les « vertex » du diagramme. Dans le cadre de la théorie quantique des champs, les interactions entre les particules sont possibles grâce aux termes du lagrangien faisant intervenir les champs correspondants à ces particules. Par exemple, dans le cas de l'interaction électromagnétique abordée dans le chapitre 1, un des termes du lagrangien est

$$\bar{\psi} \gamma^\mu e Q A_\mu \psi = \bar{\psi}_a [\gamma^\mu]_{ab} e Q A_\mu \psi_b, \quad (\text{X.1})$$

faisant intervenir le champ  $\psi$  des fermions,  $\bar{\psi}$  pour les antifermions ainsi que le champ  $A_\mu$  des photons. Ce terme correspond directement aux vertex comme celui de la figure X.4, sur laquelle les rôles des différents facteurs présents dans ce terme du lagrangien sont illustrés.

La probabilité de passer d'un état initial  $|i\rangle$  à un état final  $|f\rangle$  s'exprime

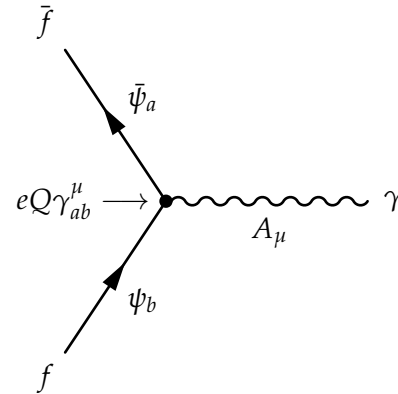
$$P(|i\rangle \rightarrow |f\rangle) = |\mathcal{S}_{fi}|^2, \quad \mathcal{S}_{fi} = \langle f | \mathcal{S} | i \rangle. \quad (\text{X.2})$$

où  $\mathcal{S}$  est la matrice de diffusion ou « matrice  $\mathcal{S}$  » pour *scattering*. Pour déterminer  $\mathcal{S}_{fi}$ , il faut sommer les contributions des différents modes de passage de  $|i\rangle$  à  $|f\rangle$ . Les termes de cette somme correspondent aux diagrammes de Feynman permettant le passage de  $|i\rangle$  à  $|f\rangle$ , comme sur la figure X.2. Chacun de ces termes consiste en un produit de différents facteurs. Certains d'entre eux assurent la conservation de l'énergie et de l'impulsion. De plus, chaque ligne et vertex du diagramme de Feynman correspondant apporte un facteur supplémentaire, dont l'expression exacte est donnée par les règles de Feynman.

Ces diagrammes sont ainsi un outil incontournable en physique des particules. Des diagrammes analogues à ceux de Feynman sont utilisés en physique nucléaire et en physique de la matière condensée, le formalisme étant proche de celui de la physique des particules.

## Références

- [1] R. P. FEYNMAN. « Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics ». *Physical Review* **76.6** (sept. 1949), p. 769-789. DOI : [10.1103/PhysRev.76.769](https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.769).



**Figure X.4** – Diagramme de Feynman issu du terme du lagrangien du modèle standard de l'équation (X.1). Un fermion  $f$  et un antifermion  $\bar{f}$  sont présents dans l'état initial et sont décrits par un champ fermionique  $\psi$  et son adjoint  $\bar{\psi}$ . Le champ  $\psi$  interagit par ses composantes  $a$  et  $b$  avec le champ vectoriel  $A_\mu$  au vertex, avec un couplage donné par  $e Q \gamma^\mu_{ab}$ . Il en résulte un photon  $\gamma$ , décrit par ce champ  $A_\mu$ .

