

# Théorie quantique des champs

## ■ Présentation

La **physique quantique classique** (Cf. *fiche PC4*) décrit un ensemble de **particules** via une **fonction d'onde**, de norme au carré permettant d'évaluer leur **probabilité spatiale** de présence, et soumise temporellement à l'équation de **Schrödinger**.

Mais le **développement expérimental**, notamment des **accélérateurs de particules**, et les **problèmes théoriques** ont fait apparaître les **carences** du **formalisme classique**, comme en **physique des hautes énergies** :

- . **Création et annihilation** de **particules**, identifiée lors des **désintégrations**, ou **collisions énergétiques**, **particulaires**.
- . **Relativité restreinte non comprise** par l'équation de **Schrödinger**, **non invariante** de **Lorentz** (Cf. *expériences des accélérateurs de particules ou observations des rayonnements cosmiques*). La **résolution** des équations de **Klein-Gordon** ou de **Dirac**, l'incluant potentiellement, **amènent** notamment à la **non conservation** du **nombre de particules** en **interaction**.
- . **Interactions** des **champs** générés par les **particules** et de **celles-ci**, **empêchant** une **définition différenciée**.

## ■ Contexte historique

. La **théorie quantique des champs** (« TQC ») a **émergé** en **parallèle** des **expérimentations** en **physique de hautes énergies** des **accélérateurs de particules**. L'**électrodynamique quantique** réunissant le **champ électromagnétique** et la **matière chargée électriquement** comme **éléments de mécanique quantique** est due à **Dirac** en 1927. L'**électrodynamique quantique renormalisée (QED)** dès les années 1940, a suivi fin des années 1970, la **théorie de jauge** de la **force nucléaire forte** et **force nucléaire faible**, établissant le **modèle standard** de la **physique des particules (MS)**. Depuis, l'**intégration** de la **gravité**, la **quatrième interaction** avec ces **outils** est toujours en **cours**. La **théorie** de la **désintégration  $\beta$**  de **Fermi** en 1934 avec la **non-conservation** des **espèces de fermions** découlait de la **seconde quantification**. La **TQC** s'est **imposée** dans la **description** de la **création** et l'**annihilation** de **fermions** comme dans les **désintégrations** de **particules**.

. **Intégration** de la **relativité restreinte**

L'**interprétation** de l'équation de **Dirac** comme une **équation à une seule particule** avec des **états d'énergie négative** compris par **redéfinition** comme **équation de champ** correspondant à des **antiparticules**. La **généralisation relativiste** est l'équation de **Klein-Gordon** sans **spin**. Toutes les **équations d'onde relativistes** qui **décrivent** des **particules de spin zéro** sont de **type Klein-Gordon**.

. **Incertitude**

Cette **limitation** est **essentielle** à la **formulation** et l'**interprétation** d'une **TQC** en **perturbations** comme pour les **champs de photons** et d'**électrons** (Cf. *électrodynamique quantique*).

Les **fluctuations** des **valeurs** du **champ électromagnétique** qui **diffèrent** des **valeurs classiques** montre que les **limites** et les **implications physiques** du **principe d'incertitude** s'**appliquent** à **tous** les **systèmes dynamiques**, **champs** ou **particules**. Les **champs** doivent être **quantifiés**.

#### . **Deuxième quantification**

Pour l'**étude adéquate** des **statistiques** des **systèmes** à **plusieurs particules**, on a **étendu** la **quantification canonique** des **champs** aux **fonctions d'onde** à **plusieurs corps** de **particules identiques** par une **procédure formalisée**, la **seconde quantification**. Le **champ quantique** décrivant les **fermions** est **étendu** à l'aide d'**opérateurs** de **création** et d'**annihilation**, **anticommutation** du fait du **principe d'exclusion de Pauli**.

#### . **Problème des infinis**

Les **quantités physiques fondamentales**, comme la « **self-énergie** » des **particules fondamentales**, le **déplacement d'énergie** des **états électroniques** dû à la présence du **champ électromagnétique**, ont donné des **contributions infinies** et **divergentes**.

#### . **Procédure de renormalisation**

Tous les **infinis** en **électrodynamique quantique** sont **liés** à l'**énergie propre** de l'**électron / positron** (*anti électron*) et la **polarisation** du **vide**.

La **renormalisation** distingue des **aspects** « **nu** » et « **habillé** ». Les **aspects nus** apparaissant dans les **équations de champ libre** (sans **interaction**), sont des **abstractions inatteignables** par l'**expérience** (car **induisant** une **interaction**). On **renormalise** avec des **valeurs habillées** par rapport à leurs **valeurs nues**.

. Le **vide** est **polarisable** et, ainsi, **peuplé** de **particules virtuelles** ce qui sert à l'**identification** de la **résolution** des **problèmes des infinis** ou des **divergences**.

#### . **Invariance**

**Représentation d'interaction** une **covariante** de **Lorentz** et **invariante** de **jauge** **généralisation** de la **théorie des perturbations** dépendant du **temps** utilisé en **mécanique quantique** ordinaire **schéma relativiste covariant** pour représenter les **commutateurs de champ** et les **opérateurs de champ intermédiaires** entre les **deux représentations principales** d'un **système quantique**, les **représentations** de **Schrödinger** et de **Heisenberg**. Les **commutateurs de champ** à des **points séparés** peuvent y être **évalués** comme **opérateurs de création** et d'**annihilation** de **champ nus** montrant l'**évolution** des **valeurs nues** et **renormalisées** ou **perturbées**, de l'**hamiltonien** et exprime l'**ensemble** en termes d'**équations de champ nues** couplées et **invariantes de jauge**. Les **diagrammes** de **Feynman** depuis la **matrice de diffusion** (Cf. *matrice S, diagrammes de Feynman*) correspondent (Cf. *équation de Schwinger-Dyson*) aux **processus physiques mesurables** : **sections efficaces**, **amplitudes de probabilité**, **largeurs de décroissance** et **durées de vie** des **états excités**.

#### . **Théories non abéliennes**

**Généralisation** de la **classe de théories quantiques des champs** : **théories de jauge**, où les **symétries régissent** l'**interaction** entre **particules**. Un **exemple de théorie de jauge non abélienne** est la **théorie de Yang-Mills**, une **théorie de jauge** est le **modèle standard** de la **physique des particules (MS)**, décrivant les **particules élémentaires**

et leurs **interactions**. La **chromodynamique quantique (QCD)** décrit les **interactions fortes** avec la **structure de groupe SU(3)**, l'**électrodynamique quantique (QED)** les **interactions électrofaibles** avec la **structure de groupe SU(2)×U(1)** de la **théorie électrofaible de Glashow-Weinberg-Salam (théorie GWS)**, **renormalisable**, et qui a été **vérfiée** comme l'**électrodynamique quantique**.

#### . **Chromodynamique quantique (QCD)**

La **QCD** est la **théorie des champs de jauge des interactions fortes** pour lesquelles l'**obtention des résultats expérimentaux à courte distance/haute énergie** est **ardue** et **indirecte**. Entre les **interactions fortes** et les **champs électrofaibles**, la **force de couplage**, la **génération de masse des porteurs de force** et leurs **auto-interactions non linéaires** posent **problème**. Il n'y a **pas encore de validation expérimentale** d'une **théorie unifiée des champs quantiques comprenant les forces électromagnétiques, faible et forte**.

#### . **Gravité**

La **gravitation**, comme **interaction attractive de portée infinie** est un **champ tenseur** nécessairement de **quantum en nombre illimité**, un **boson de jauge de masse nulle**, de **spin 2** et **hélicité ±2**, le « **graviton** ». La **quantification gravitationnelle** a des **problèmes inhérents à la constante de couplage gravitationnel à des dimensions impliquant des puissances inverses de la masse** et donc **induisant des auto-interactions non linéaires perturbatrices**. La **gravité** est en effet **elle-même source de gravité**, comme les **théories de jauge de couplages sans dimension**, **conduisant à des divergences incontrôlables aux ordres croissants de la théorie des perturbations**. La **gravité se couple** par ailleurs à **toutes les énergies** selon le **principe d'équivalence**, et **coexiste** avec la **structure même de l'espace-temps**. Une **TQC en espace-temps courbe validée** s'opposerait à une **théorie de la gravité quantique**.

### ▪ **Méthodes de quantifications**

. **Deux types de quantifications – liées entre elles par ailleurs – existent :**

.. Via les **fonctionnelles** donnant les **propagateurs, fonctions à n points** des **intégrales de chemins du lagrangien de champs variant dans l'espace-temps** avec **opérateurs locaux agissant sur eux**,

.. Via la **procédure de Dirac** où l'**hamiltonien** peut être issu par **transformation de Legendre du lagrangien déterminant les états caractérisant l'ensemble du système à un instant donné** et des **opérateurs de champs qui agissent sur eux**, qui, dans une **théorie de jauge**, ne sont pas **locaux dans l'espace-temps** mais **locaux invariants à droite** sur le **faisceau de jauge principal**, et des **sections locales** suivant une **partie du faisceau de jauge**, pouvant **générer quelques images de Dirac**.

Le **système** comme **ensemble de champs** comporte de **nombreux ddl redondants** : on **définit des classes d'équivalence (Cf. espaces quotients et cohomologie)** de **transformations de jauge de configurations de champ** afin de **spécifier le système physique**. Dans une **théorie de jauge**, on doit a priori **fixer une jauge** et **ajouter des termes à la densité lagrangienne** qui **brisent sa symétrie** afin d'**éliminer ces ddl non physiques** avant d'**entreprendre des calculs perturbatifs**.

### . Quantifications Becchi-Rouet-Stora-Tyutin (« BRST ») et espaces de Fock

La méthode BRST rend efficace la renormalisabilité dans les théories de YM et où le mécanisme de Higgs induit une rupture spontanée de symétrie. Le formalisme BRST permet la mise en place de contraintes de première classe concernant les TQC. Il permet de paramétrer les variations associées à toutes les transformations de jauge actives en considérant leur pertinence physique lors de la conversion lagrangien-hamiltonien. La densité hamiltonienne correspondant à la dérivée de Lie de la densité lagrangienne par rapport à un champ vectoriel horizontal de temps unitaire sur le faisceau de jauge, par intégration par parties sur une section efficace, on obtient l'expression de l'intégrand usuel de la quantification canonique. L'hamiltonien nécessite ainsi un champ vectoriel de temps unitaire sur l'espace de base, un foncteur horizontal vers l'espace du faisceau et une surface représentant l'espace normal (*en métrique de Minkowski*) à ce champ vectoriel de temps en tout point, dépendant de la connexion et du repère de Lorentz utilisé localement. L'hamiltonien H quantifié ensuite perturbativement par série de Dyson, on rassemble la configuration sur une section transversale horizontale tridimensionnelle entière en un état de Fock (*qui contient des états propres multi-particules sans interaction relatifs à l'hamiltonien non perturbé,  $H_0$* ) dont on étudie l'évolution avec l'image d'interaction. La description instantanée de tout état de Fock est donc une somme pondérée en amplitude complexe d'états propres de  $H_0$ . En représentation d'interactions, chaque état propre de  $H_0$  varie avec un facteur constant de rotation de phase, proportionnel à la valeur propre correspondante de  $H_0$  pour des états de Fock à différents moments.

### . Renormalisation actuelle

Si le lagrangien de la théorie est constitué de produits d'opérateurs de champ de dimensions trop élevées en unités d'énergie, le nombre de contre-terms diverge vers l'infini, nécessitant également une infinité de paramètres libres. Cela dévalue la prédictibilité physique de la théorie, alors dite « non renormalisable ».

. Basées sur le groupe de renormalisation (« GR »), la reformulation classifie, en explicitant, l'évolution des théories de champ effectives par l'échelle. Le GR étudie ainsi les changements de la théorie avec cette échelle, unifiant formellement les outils de TQC, de physique des particules et de la matière condensée.

*La QCD utilise ce GR pour identifier la liberté asymptotique et le confinement.*

### ▪ Observations sur la physique des particules

L'étude des interactions fondamentales telles que l'électromagnétisme et les forces faible et forte, et la complexification par la théorie quantique des champs a permis l'élaboration d'un modèle effectif pour les particules fondamentales que de nombreuses expérimentations ont confirmé. Les modèles respectant la relativité restreinte doivent émerger des théories fondamentales à la limite classique. Ils ont produit un cadre unificateur de l'électromagnétisme avec l'interaction faible.

- **Schéma** du processus de calculs vers l'expérimentation d'une TQC (Cf. TQC 1-8)

On distingue les domaines de l'étude en TQC d'un système :

. « *Nature* » : relatif à la physique, telle qu'elle est observée ou déduite.

. « *Théorie* » : relatif aux concepts et théorèmes établis en TQC.

. « *Système* » : relatif à l'objet d'étude, phénomènes tels que propagation, diffusion.

Les cadres réunissent les adéquations ou conformités entre ces domaines en vue d'obtenir les seuls résultats pouvant être vérifiés ou infirmés expérimentalement et qui sont liés aux probabilités quantiques comme les sections efficaces de diffusion.

