

3PN3140 - Théorie quantique des champs

Responsables : **Igor KORNEV**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **45**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **27**

Année académique : **2024-2025**

Niveau avancé : **non**

Présentation, objectifs généraux du cours :

La théorie quantique des champs (TQC) est le langage qui décrit les systèmes physiques avec une infinité de degrés de liberté. Elle a de nombreuses applications en physique des particules, en physique statistique ou en physique de la matière condensée. Ses réalisations sont impressionnantes, l'électrodynamique quantique (QED) étant probablement la théorie existante la plus précise. C'est le cadre conceptuel du Modèle Standard de la physique des particules, qui décrit avec succès tous les phénomènes connus liés aux interactions électromagnétiques, faibles et fortes.

Née au cours de la première moitié du XX siècle, la TQC bénéficie d'une compréhension physique moderne depuis la fin des années 1970. Elle peut être considérée comme un algorithme fournissant des prédictions expérimentalement vérifiables avec une précision systématiquement améliorable. Cependant, la description formelle de cet algorithme ne répond pas encore au standard de rigueur mathématique. D'importantes questions physiques sont également restées sans réponse jusqu'à présent, comme les raisons de la courte portée de l'interaction forte, ou le confinement des quarks à l'intérieur des protons et des neutrons. L'institut mathématique CLAY a identifié la recherche d'une compréhension détaillée de la TQC comme l'un des 7 problèmes clés qui devraient guider la recherche mathématique au cours du XXI siècle. La résolution de ce problème nécessite de nouvelles idées mathématiques et physiques.

Le cours présente le type de base des champs jouant un rôle important en physique nucléaire et des particules : scalaire, spinoriel et vectoriel, et discute de leur quantification. L'invariance relativiste et la symétrie de jauge sont traitées dans le cadre lagrangien. Une approche perturbative traitant des champs en interaction est développée, et le rôle du diagramme de Feynman est expliqué. Le formalisme d'intégrale de chemin est introduit. Le cours se termine par le calcul de certains processus de diffusion impliquant des électrons, des positrons et des photons en QED.

Réfs. Halzen-Martin, Sakurai et Griffiths sont des lectures d'introduction utiles. Réfs. Bell, Rivers, Mandl-Shaw, Peskin-Schroeder et Ryder contiennent le matériel qui sera couvert dans le cours. Réfs. Jaffe-Witten, Douglas et Witten sont des textes avancés qui donnent une idée de la complexité mathématique qui sous-tend la TQC ; ce cours est un pré-requis pour les comprendre. Réf. Wilczek et Delamotte offrent une perspective sur les notions avancées de TQC et leur pertinence pour la Nature.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence) :

SM11

Prérequis :

Une sélection de documents peut être fournie sur demande :

- Mécanique quantique

Mécanique quantique de base, fonctions d'onde, amplitudes et probabilités. Relations de commutation entre les coordonnées et les quantités de mouvement correspondantes. Représentations de Schrödinger et Heisenberg. Formalisme des bra et des ket de Dirac. Idée de spin. Sections efficaces et amplitudes de diffusion. Fermions et bosons. Cela correspond au contenu du cours de mécanique quantique de première année.

- Cinématique relativiste

Transformations de Lorentz. Espace-temps de Minkowski, tenseur métrique et 4-vecteurs. Conservation de la 4-impulsion et de l'énergie-impulsion. Les sections 3.1-3.4 de Griffiths, ou les sections 3.1-3.2 de Halzen-Martin présentent ces sujets à un niveau approprié.

- Électrodynamique

Formulation manifestement covariante de l'électrodynamique classique utilisant le tenseur de champ et la densité lagrangienne. Équation de Dirac. Les pré-requis sont expliqués au mieux dans les sections 7.1, 7.4, 11.1 et 11.2 de Griffiths. Voir également les sections 5.1, 5.2 et 14.1 de Halzen-Martin.

- Outils mathématiques

Utilisation de base de la distribution de Dirac et de la transformée de Fourier. Propriétés de base des groupes et idée d'une représentation linéaire. Utilisation de base du calcul du tenseur, y compris la convention de sommation d'Einstein. Les chapitres 3.2, 4.1, 4.2 et l'annexe A de Griffiths sont adaptés au niveau des cours.

Déroulement, organisation du cours :

16 cours de 1h30 chacun. Lectures conseillées pour préparer une séance. Devoirs maison pour acquérir les techniques de calculs nécessaires.

Organisation de l'évaluation :

Devoirs maison et examen oral final.

Moyens :

Cours en salles, fiches d'exercices.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

A la fin de cet enseignement, l'élève sera capable de calculer des diagrammes de Feynman pour la théorie du champ scalaire au niveau des arbres, de comprendre la formulation de QED, et d'appréhender la complexité mathématique qui sous-tend la théorie quantique du champ.

Bibliographie :

- J.S. Bell, Experimental Quantum Field Theory, CERN-JINR School of Physics, 1977.
- S. Chatterjee, Yang-Mills for probabilists, arXiv:1803.01950 [math.PR].
- B. Delamotte, A hint of renormalization, <http://arXiv.org/pdf/hep-th/0212049>.
- M.R.Douglas, Report on the Status of the Yang-Mills Millenium Prize Problem.
- D.Griffiths, Introduction to Elementary Particles, John Wiley & Sons, 1987 (first edition).
- F. Halzen and A.D. Martin, Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics, John Wiley & Sons, 1984.
- A. Jaffe and E. Witten, Quantum Yang-Mills theory.
- F. Mandl and G. Shaw, Quantum Field Theory, John Wiley & Sons, 1993 (revised edition).
- M.E. Peskin and D.V. Schroeder, An Introduction to Quantum Field Theory, Addison-Wesley, 1995.
- R.J. Rivers, Path Integral Methods in Quantum Field Theory, Cambridge University Press, 1988.
- L.H. Ryder, Quantum Field Theory, Cambridge University Press, 1996 (second edition).
- J.J. Sakurai, Modern Quantum Mechanics, Addison-Wesley, 1985.
- F. Wilczek, What QCD tells us about nature - and why we should listen, <http://arXiv.org/pdf/hep-ph/9907340>.
- E. Witten, The Problem of Gauge Theory, <http://arxiv.org/pdf/0812.4512v3.pdf>.