

**Théorie quantique des champs I**  
**PHY-7006**  
**Département de Physique, génie physique et optique, Université Laval**  
**Session: Hiver 2013**

---

**Responsables**

---

**Professeur:** Luc Marleau, VCH-1654  
tél : (418) 656 2643  
fax: (418) 656 2040  
email: lmarleau@phy.ulaval.ca  
www: <http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/marleau.html>

**Dépanneur/correcteur:** (aucun)

---

**Horaire**

---

Lectures dirigées, cours magistral ou les deux (selon le nombre d'inscriptions)

---

**Références**

---

Livre obligatoire:

M. E. Peskin and D.V. Schroeder., An introduction to quantum field theory, Addison-Wesley, 1995. [Référence classique en théorie des champs. Nous couvrirons essentiellement les sujets de la partie I de l'ouvrage.]

Corrections au livre M. E. Peskin and D.V. Schroeder., An introduction to quantum field theory, Addison-Wesley: <http://www.slac.stanford.edu/~mpeskin/QFT.html>

Références complémentaires:

F. Mandl et G.Shaw., Quantum field theory, Addison-Wesley, 1993.[Référence classique en théorie des champs, moins d'emphase sur la renormalisation que Peskin & Schroeder]

L.H. Ryder, Quantum field theory, Cambridge, 2<sup>e</sup> ed. 1996.[Référence classique en théorie des champs, moins d'emphase sur la renormalisation que Peskin & Schroeder]

J.-P. Derendinger, Théorie quantique des champs, Presses polytechnique et universitaires romandes, 2001.[Bonne référence en théorie des champs, rédigée en français]

Autres références complémentaires:

J.D. Bjorken and S.D. Drell, Relativistic quantum mechanics, McGraw-Hill, 1964. [La référence standard pour la mécanique quantique relativiste; présentation intuitive des règles de Feynman (sans l'introduction des champs); contient plusieurs calculs détaillés; un peu vieillot toutefois.]

J.D. Bjorken and S.D. Drell, Relativistic quantum fields, McGraw-Hill, 1965. [Redérivation des règles de Feynman du point de vue de la théorie des quantique champs.]

J.J. Sakurai, Advanced quantum rnechanics, Addison-Wesley, 1967. [Une autre classique de la mécanique quantique relativiste (sans théorie des champs); notation non conventionnelle.]

C. Itzykson and J.-B. Zuber Quantum field theory, McGraw-Hill, 1980. [Traitement exhaustif et assez formel de la théorie quantique des champs précédé d'un long chapitre sur l'équation de Dirac du point de vue mécanique quantique relativiste.]

S. Weinberg, Quantum theory of fields, 3 vols, Cambridge University Press, 1995,1996 [Traitement rigoureux et complet de la théorie quantique des champs; excellente introduction historique.]

---

## But du Cours

---

Le cours de mécanique quantique relativiste consiste en une introduction à la théorie quantique des champs via l'électrodynamique quantique, soit à la description des interactions entre électrons et photons. En première approximation, les électrons sont décrits par une fonction d'onde, elle-même solution d'une version relativiste de l'équation de Schrödinger, soit l'équation de Dirac. Toutefois, dans le contexte de la mécanique quantique, cette équation soulève plusieurs paradoxes, le premier étant la nécessité de transformer tout problème à un corps en un problème à plusieurs corps (lié à la possibilité de création ou d'annihilation de particules). En d'autres termes, tout problème de mécanique quantique relativiste doit, formellement, être reformulé en un problème de la théorie des champs quantiques qui est le cadre théorique adéquat pour la description des processus où le nombre de particules n'est pas conservé.

Au point de vue conceptuel, il est donc préférable d'introduire le formalisme de la théorie des champs quantiques d'abord. L'équation de Dirac est donc introduite comme une théorie de champ classique, qui est ensuite quantifiée par la méthode canonique. De cette façon, l'équation d'onde relativiste apparaît comme une approximation bien contrôlée, à laquelle n'est associée aucun problème d'interprétation. C'est l'approche développée dans ce cours. Elle a l'avantage supplémentaire de traiter sur un même pied les électrons et les photons, qui sont les excitations quantiques du champ électrodynamique.

Le formalisme de la quantification des champs est présenté dans le contexte simple d'un champ scalaire. Cet exemple permet de clarifier la relation particule-champ et fournit un premier exemple d'équation de champ invariante sous les transformations de Lorentz. L'équation de Dirac est ensuite analysée en détail du point de vue d'une théorie de champ libre. Le formalisme perturbatif permettant le traitement des électrons en interaction avec les photons est ensuite introduit, de même que des règles simples (règles de Feynman) codant ces interactions aux différents ordres perturbatifs. Ces techniques sont ensuite utilisées pour des calculs spécifiques en électrodynamique quantique. Toutefois, au delà des calculs au premier ordre, une difficulté nouvelle surgit: les corrections perturbatives, en principe de plus en plus petites, sont infinies. L'extraction de résultats finis à partir de ces expressions passe par le formalisme de la renormalisation.

---

## Contenu et objectifs

---

(essentiellement la partie I de Peskin & Schroeder. ch.1-7):

1. Théorie classique des champs
  - Approche lagrangienne · Approche hamiltonienne · Théorème de Noether.
2. Champs de Klein-Gordon
  - Introduction · Champs et oscillateurs harmoniques · Champs dans l'espace-temps · Causalité et propagateur · Création de particules par une source.
3. Champs de Dirac
  - Invariance de Lorentz · Équation de Dirac · Spineurs de Weyl · Solution libre de l'équation de Dirac · Matrice de Dirac et combinaisons bilinéaires · Quantification des champs de Dirac · Propagateur de Dirac · Symétrie sous renversement du temps et conjugaison de charge.
4. Interactions et diagrammes de Feynman
  - Théorie perturbative · Développement perturbatif des fonctions de corrélation · Théorème de Wick · Diagrammes de Feynman · Sections efficaces et matrice- $S$  · Calculs des éléments de matrice · Règles de Feynman.
5. Processus élémentaires en électrodynamique quantique
  - Étude du processus  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  : section efficace, hélicité et limite non relativiste · Symétrie de croisement · Diffusion de Compton.
6. Corrections radiatives: une introduction
  - Rayonnement de freinage · Étude de la fonction de vertex de l'électron: structure, évaluation, test de QED · Divergences infrarouges
7. Corrections radiatives: plus de détails
  - Renormalisation des champs · Formule de réduction LSZ · Théorème optique · Identité de Ward-Takahashi · Renormalisation de la charge électrique.

---

## Mode d'évaluation<sup>1</sup>

---

L'évaluation est basée sur deux examens partiels obligatoires et une série de devoirs à remettre. La note est calculée selon:

| Évaluation         | Travaux                         | Pondération |
|--------------------|---------------------------------|-------------|
| Séries d'exercices | à remettre à des dates précises | 100%        |

La note de passage est de 50% et correspondra à la frontière entre les cotes *D* et *E*. Les notes supérieures à la note de passage couvriront le reste du spectre de cotes, soit de *D* à *A*<sup>+</sup> comme établi dans le tableau ci-bas.

| Tableau de conversion: Notes vs Cotes |   |                       |   |     |    |   |                       |   |    |
|---------------------------------------|---|-----------------------|---|-----|----|---|-----------------------|---|----|
| 90                                    | ≤ | <i>A</i> <sup>+</sup> | ≤ | 100 | 74 | ≤ | <i>B</i> <sup>-</sup> | < | 77 |
| 86                                    | ≤ | <i>A</i>              | < | 90  | 70 | ≤ | <i>C</i> <sup>+</sup> | < | 74 |
| 82                                    | ≤ | <i>A</i> <sup>-</sup> | < | 86  | 65 | ≤ | <i>C</i>              | < | 70 |
| 80                                    | ≤ | <i>B</i> <sup>+</sup> | < | 82  | 0  | ≤ | <i>E</i>              | < | 65 |
| 77                                    | ≤ | <i>B</i>              | < | 80  |    |   |                       |   |    |

La cotation est établie en fonction des objectifs du cours et non la force du groupe mais on pourra tenir compte de la difficulté des questionnaires. Dans la correction, l'importance est accordée aux hypothèses de départ et à la justesse du raisonnement plus qu'à l'exactitude des calculs numériques. La qualité de la langue est aussi un critère de correction.

---

<sup>1</sup>Règles disciplinaires:

Tout étudiant qui commet une infraction au Règlement disciplinaire à l'intention des étudiants de l'Université Laval dans le cadre du présent cours, notamment en matière de plagiat, est passible des sanctions qui sont prévues dans ce règlement. Il est très important pour tout étudiant de prendre connaissance des articles 28 à 32 du Règlement disciplinaire. Celui-ci peut être consulté à l'adresse suivante: [http://www.ulaval.ca/sg/reg/reglements/reglement\\_disciplinaire.pdf](http://www.ulaval.ca/sg/reg/reglements/reglement_disciplinaire.pdf)

Plagiat: Tout étudiant est tenu de respecter les règles relatives à la protection du droit d'auteur. Constitue notamment du plagiat le fait de:

- copier textuellement un ou plusieurs passages provenant d'un ouvrage sous format papier ou électronique sans mettre ces passages entre guillemets et sans en mentionner la source;
- résumer l'idée originale d'un auteur en l'exprimant dans ses propres mots (paraphraser) sans en mentionner la source;
- traduire partiellement ou totalement un texte sans en mentionner la provenance;
- remettre un travail copié d'un autre étudiant (avec ou sans l'accord de cet autre étudiant);
- remettre un travail téléchargé d'un site d'achat ou d'échange de travaux scolaires.