

Interpréter la Physique Quantique

Cours d'interprétation de la théorie quantique des champs

Sébastien Fauvel

Remerciements

Avant-propos

Table des matières

I	Préliminaires épistémologiques	1
1	Qu'est-ce qu'interpréter ?	2
1.1	Interpréter des observations	2
1.2	Interpréter une théorie effective	2
1.3	Interpréter une théorie fondamentale	2
2	Que puis-je connaître ?	3
2.1	L'impasse solipsiste	3
2.2	L'objectivisme fondateur	3
2.3	La connaissance dans un monde aléatoire	3
II	Modéliser le monde matériel	5
3	Régulariser la théorie quantique des champs	6
3.1	Inexistence d'une théorie quantique des champs	6
3.2	Régularisation physique maximale	6
3.3	L'espace physique	6
4	L'espace des états quantiques	7
4.1	Etats localisés du champ	7
4.2	Opérateurs de création et d'annihilation	7
4.3	Ondes planes	7
5	Interactions physiques	8
5.1	Evolution hamiltonienne	8
5.2	Représentation d'interaction	8
5.3	Développement perturbatif	8

III	Modéliser le monde mental	9
6	L'expérience subjective	10
6.1	Conscience déclarative	10
6.2	Subconscient	10
6.3	Expérience subjective	10
7	Le champ d'expériences subjectives	11
7.1	Objectivation des expériences subjectives	11
7.2	Réalisation physique d'un état mental	11
7.3	Indiscernabilité des sujets	11
8	Interactions psycho-physiques	12
8.1	Dynamique stochastique	12
8.2	Mesure quantique	12
8.3	Décohérence quantique	12
IV	Applications	13
9	Electrodynamique quantique	14
9.1	Opérateurs de charge, de courant et de potentiel	14
9.2	Hamiltonien d'interaction	14
9.3	Exemple : La section efficace de Rutherford	14
10	Théorème de réincarnation	15
10.1	Un théorème de récurrence des états mentaux	15
10.2	Démonstration	15
10.3	Discussion	15
V	Appendices	17
A	Fonctions usuelles	18
A.1	La fonction sinus cardinal	18
A.2	La fonction esinc	18
A.3	La fonction δ de Dirac	18
B	Matrices de Dirac et de Pauli	19
B.1	Matrices de Pauli	19
B.2	Matrices de Dirac	19
C	Opérateurs spinoriels	21

C.1	Opérateurs de polarisation photoniques	21
C.2	Opérateurs d'antisymétrisation fermioniques	21
C.3	Opérateurs spinoriels de Dirac	21

Première partie

Préliminaires
épistémologiques

Chapitre 1

Qu'est-ce qu'interpréter ?

1.1 Interpréter des observations

1.2 Interpréter une théorie effective

1.3 Interpréter une théorie fondamentale

Chapitre 2

Que puis-je connaître ?

2.1 L'impasse solipsiste

2.2 L'objectivisme fondateur

2.3 La connaissance dans un monde aléatoire

Deuxième partie

Modéliser le monde matériel

Chapitre 3

Régulariser la théorie quantique des champs

- 3.1 Inexistence d'une théorie quantique des champs
- 3.2 Régularisation physique maximale
- 3.3 L'espace physique

Chapitre 4

L'espace des états quantiques

4.1 Etats localisés du champ

4.2 Opérateurs de création et d'annihilation

4.3 Ondes planes

Chapitre 5

Interactions physiques

5.1 Evolution hamiltonienne

5.2 Représentation d'interaction

5.3 Développement perturbatif

Troisième partie

Modéliser le monde mental

Chapitre 6

L'expérience subjective

6.1 Conscience déclarative

6.2 Subconscient

6.3 Expérience subjective

Chapitre 7

Le champ d'expériences subjectives

- 7.1 Objectivation des expériences subjectives
- 7.2 Réalisation physique d'un état mental
- 7.3 Indiscernabilité des sujets

Chapitre 8

Interactions psycho-physiques

8.1 Dynamique stochastique

8.2 Mesure quantique

8.3 Décohérence quantique

Quatrième partie

Applications

Chapitre 9

Electrodynamique quantique

- 9.1 Opérateurs de charge, de courant et de potentiel
- 9.2 Hamiltonien d'interaction
- 9.3 Exemple : La section efficace de Rutherford

Chapitre 10

Théorème de réincarnation

10.1 Un théorème de récurrence des états mentaux

10.2 Démonstration

10.3 Discussion

Cinquième partie

Appendices

Annexe A

Fonctions usuelles

A.1 La fonction sinus cardinal

A.2 La fonction esinc

A.3 La fonction δ de Dirac

Annexe B

Matrices de Dirac et de Pauli

B.1 Matrices de Pauli

Pour décrire le spin de l'électron dans la limite non-relativiste, Wolfgang Pauli a été amené à introduire trois automorphismes de \mathcal{H}^2 , notés $\hat{\sigma}_1$, $\hat{\sigma}_2$ et $\hat{\sigma}_3$, dont la propriété essentielle est de vérifier les relations d'anticommutation suivantes :

$$\{\hat{\sigma}_a, \hat{\sigma}_b\} := \hat{\sigma}_a \hat{\sigma}_b + \hat{\sigma}_b \hat{\sigma}_a = 2\delta_{a,b} \mathbb{1}$$

Il existe une infinité de familles d'automorphismes vérifiant ces relations algébriques, le choix de l'une d'entre-elles en particulier n'ayant aucune influence sur les prédictions de la théorie. La famille de matrices suivantes :

$$\sigma_1 := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_2 := \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_3 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

représente canoniquement une famille d'automorphismes de \mathcal{H}^2 qui vérifie ces relations d'anticommutation. C'est pour cette convention que nous optons dans ce cours pour définir les matrices de Pauli.

B.2 Matrices de Dirac

De manière similaire, dans le but d'établir une équation d'onde du premier ordre décrivant la propagation libre d'un électron relativiste, Paul Dirac a été amené à introduire quatre automorphismes de \mathcal{H}^4 , notés $\hat{\gamma}^0$, $\hat{\gamma}^1$, $\hat{\gamma}^2$ et $\hat{\gamma}^3$, dont la propriété essentielle est de vérifier les relations d'anticommutation suivantes :

$$\{\hat{\gamma}^\mu, \hat{\gamma}^\nu\} := \hat{\gamma}^\mu \hat{\gamma}^\nu + \hat{\gamma}^\nu \hat{\gamma}^\mu = 2g^{\mu\nu} \mathbb{1}$$

Dans cette expression, vous aurez reconnu le tenseur de Minkowski, pour lequel nous choisissons dans ce cours la signature suivante :

$$g := \text{diag}(1, -1, -1, -1)$$

Ici encore, il existe une infinité de familles d'automorphismes vérifiant ces relations algébriques, le choix de l'une d'entre-elles en particulier n'ayant aucune influence sur les prédictions de la théorie. La famille de matrices suivantes, construites par blocs à l'aide des matrices de Pauli :

$$\gamma^0 := \begin{pmatrix} I_2 & 0 \\ 0 & -I_2 \end{pmatrix} \quad \gamma^1 := \begin{pmatrix} 0 & \sigma_1 \\ -\sigma_1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\gamma^2 := \begin{pmatrix} 0 & \sigma_2 \\ -\sigma_2 & 0 \end{pmatrix} \quad \gamma^3 := \begin{pmatrix} 0 & \sigma_3 \\ -\sigma_3 & 0 \end{pmatrix}$$

représente canoniquement une famille d'automorphismes de \mathcal{H}^4 qui vérifie ces relations d'anticommutation. C'est pour cette convention que nous optons dans ce cours pour définir les matrices de Dirac. Nous serons également amenés à faire usage de la notation vectorielle condensée :

$$\boldsymbol{\gamma} := \begin{pmatrix} \gamma^1 \\ \gamma^2 \\ \gamma^3 \end{pmatrix}$$

pour exprimer le Hamiltonien d'interaction de l'électrodynamique quantique.

Annexe C

Opérateurs spinoriels

C.1 Opérateurs de polarisation photoniques

C.2 Opérateurs d'antisymétrisation fermioniques

C.3 Opérateurs spinoriels de Dirac

Bibliographie