

---

# PHYSIQUE QUANTIQUE

Master "Physique et Applications" de Sorbonne Université

Parcours Physique Générale, 2018-2019

---

## **Alice Sinatra, CM**

Laboratoire Kastler Brossel, Ecole Normale Supérieure, Tél : 01 44 32 25 72,

[alice.sinatra@lkb.ens.fr](mailto:alice.sinatra@lkb.ens.fr)

## **Clément Sayrin, TD1**

Laboratoire Kastler Brossel, Collège de France, Tél : 01 44 27 11 99,

[clement.sayrin@lkb.ens.fr](mailto:clement.sayrin@lkb.ens.fr)

## **Jérôme Tignon, TD2**

Laboratoire Pierre Aigrain, Ecole Normale Supérieure, Tél : 01 44 32 33 54,

[jerome.tignon@lpa.ens.fr](mailto:jerome.tignon@lpa.ens.fr)

6 septembre 2018

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Prérequis : Formulation générale de la mécanique quantique</b>	<b>3</b>
1.1	Le vecteur d'état et l'espace de Hilbert . . . . .	3
1.1.1	Les "bra" et les "kets" . . . . .	3
1.2	Opérateurs et grandeurs physiques . . . . .	3
1.2.1	Exemples d'opérateurs auto-adjoints . . . . .	3
1.3	Équation aux valeurs propres et fluctuations . . . . .	3
1.4	Théorème spectral . . . . .	3
1.4.1	Spectre discret, spectre continu, cas général . . . . .	3
1.4.2	Projecteurs et relation de fermeture . . . . .	3
1.4.3	Représentations "position" et "impulsion" . . . . .	3
1.5	Postulats de la mécanique quantique . . . . .	3
1.6	Conséquences physiques . . . . .	3
1.6.1	Caractère intrinsèquement probabiliste de la théorie . . . . .	3
1.6.2	Non-commutativité des opérateurs . . . . .	3
1.7	Structure de l'espace de Hilbert pour plusieurs degrés de liberté . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Théorie des perturbations stationnaires</b>	<b>4</b>
2.1	Principe de la méthode . . . . .	4
2.2	Perturbation d'un niveau d'énergie au premier ordre : cas non dégénéré . . . . .	4
2.3	Perturbation d'un niveau d'énergie au premier ordre : cas dégénéré . . . . .	4
2.4	Modification des états propres au premier ordre : cas non dégénéré . . . . .	4
2.5	Perturbation d'un niveau d'énergie au second ordre : cas non dégénéré . . . . .	4
2.6	Exemples de comparaison de la solution perturbative avec la solution exacte . . . . .	4
2.6.1	Potentiel harmonique de raideur modifiée . . . . .	4
2.6.2	Système à deux niveaux : cas non dégénéré et cas dégénéré . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Exemples de solution de l'équation Schrödinger</b>	<b>5</b>
3.1	Problèmes à une dimension . . . . .	5
3.1.1	Étalement du paquet d'ondes : points de vue de Schrödinger et de Heisenberg . . . . .	5
3.1.2	Potentiel périodique . . . . .	5
3.1.3	Application d'une force constante en présence du potentiel périodique : oscillations de Bloch . . . . .	5
3.2	Problèmes à trois dimensions . . . . .	5
3.2.1	potentiel central . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Atome d'hydrogène</b>	<b>6</b>
4.1	Modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène (rappel) . . . . .	6
4.2	Résolution de l'équation radiale pour l'atome d'hydrogène . . . . .	6
4.3	Fonctions propres et spectre . . . . .	6
4.4	Séries spectrales . . . . .	6
4.5	Règles de sélection pour les transitions dipolaire électriques . . . . .	6

<b>5</b>	<b>Théorie générale du moment cinétique</b>	<b>7</b>
5.1	Définition d'un moment cinétique : règles de commutation . . . . .	7
5.2	Valeurs propres de $\hat{J}^2$ et $\hat{J}_z$ . . . . .	7
5.3	Composition de moments cinétiques . . . . .	7
5.3.1	Composition de deux spins 1/2 : triplet et singulet . . . . .	7
5.3.2	Cas général . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Quelques théorèmes utiles</b>	<b>8</b>
6.1	Théorème Hellmann-Feynman . . . . .	8
6.2	Théorème du viriel . . . . .	8
6.3	Théorème de Ritz et méthode variationnel . . . . .	8
6.3.1	Autre démonstration du théorème du viriel, en utilisant le théorème de Ritz . . . . .	8
<b>7</b>	<b>Applications de la théorie des perturbations à l'atome d'hydrogène</b>	<b>9</b>
7.1	Correction relativiste à l'énergie cinétique . . . . .	9
7.2	Effet Stark pour le niveau $n = 2$ . . . . .	9
7.3	Couplage spin-orbite . . . . .	9
7.4	Structure fine du niveau $n = 2$ . . . . .	9
7.5	Règles de sélection en présence de structure fine . . . . .	9
<b>8</b>	<b>Théorie des perturbations dépendant du temps</b>	<b>10</b>
8.1	Transitions entre deux états discrets : principe de la méthode . . . . .	10
8.2	Comparaison avec le calcul exacte (oscillations de Rabi) . . . . .	10
8.3	Exemples physiques de perturbation oscillante . . . . .	10
8.3.1	Spin 1/2 dans un champ magnétique tournant . . . . .	10
8.3.2	Atome a deux niveaux : absorption et émission induite . . . . .	10
8.4	Etat couplé à un continuum d'états. Règle d'or de Fermi et son domaine de validité . . . . .	10
8.4.1	Application de la règle d'or au calcul d'un section efficace . . . . .	10
8.4.2	Exemple de l'émission spontanée . . . . .	10
<b>9</b>	<b>Particules Identiques</b>	<b>11</b>
9.1	Position du problème . . . . .	11
9.2	Postulat de symétrisation . . . . .	11
9.2.1	Exemples de construction d'états . . . . .	11
9.2.2	Principe d'exclusion de Pauli . . . . .	11
9.3	Conséquences physiques . . . . .	11
9.3.1	Interférence des amplitudes . . . . .	11
9.3.2	Systèmes à plusieurs particules : statistiques quantiques . . . . .	11
<b>10</b>	<b>Travaux Dirigées</b>	<b>12</b>
10.1	Jonction de Josephson . . . . .	12
10.2	Niveaux de Landau et effet Hall quantique . . . . .	12
10.3	Déplacement lumineux et diffraction de Bragg . . . . .	12
10.4	Symétries et Moments cinétiques . . . . .	12
10.5	Effet Zeeman sur la raie 1s-2p de l'atome hydrogène . . . . .	12
10.6	Etat discret couplé à un continuum : un modèle exactement soluble . . . . .	12
10.7	Atome d'hélium . . . . .	12