
LP 43 : Évolution temporelle d'un système quantique à deux niveaux.

Présentée par : BENSMILI Mohamed
Correcteurs : Alexandre Alles & Jérémy Ferrand

1 Extraits des rapports de jury

- **2017** : Il est intéressant que les candidats s'appuient sur un exemple de système quantique à deux niveaux d'énergie pour construire cette leçon.
- **2015** : Il est étonnant de voir cette leçon s'appuyer sur les états stationnaires sans aucun élément de justification. L'évolution d'un système quantique en régime forcé est trop souvent totalement négligée.
- Jusqu'en 2014, le titre était : *Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique et en mécanique quantique.*
- Jusqu'en 2013, le titre était : *Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique : modes propres. Systèmes à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences.*
- **2009, 2010** : Le phénomène de battement (comme son analogue quantique) est au coeur de la leçon.
- **2005** : La notion de mode propre doit être parfaitement maîtrisée.
- **2002** : Trop souvent les leçons privilégient la partie classique par rapport à la partie quantique. Différences et analogies sont rarement mises en lumière.
- **2000** : Dans la partie relevant de la mécanique classique, il n'est pas utile d'envisager le cas le plus général, l'important étant de dégager les effets physiques avec un minimum de calculs. Les aspects énergétiques méritent d'être considérés. Il faut réserver un temps suffisant pour traiter le point « analogie et différences ». Bien que couramment utilisé comme exemple de système quantique à deux niveaux, l'inversion de l'ammoniac est un exemple délicat, car le terme de couplage y est difficile à interpréter physiquement. On peut trouver d'autres systèmes à deux niveaux, plus simples à présenter.
- **1999** : Le choix du système quantique à traiter doit être bien réfléchi. Les candidats doivent être conscients que le couplage par effet tunnel est délicat à traiter. Il faut bien prendre le temps de dégager les analogies et les différences des systèmes classiques et quantiques.
- **1997** : La notion de mode propre doit être définie avec précision.

2 Plan proposé par le candidat

Niveau L3.

Prérequis : formalisme de Dirac, équation de Schrödinger, matrice de Pauli, algèbre linéaire, moment cinétique.

1 Résonance magnétique nucléaire (15min)

1.1 Présentation

1.2 Résolution

1.3 Phénomène d'inversion

2 Molécule d'ammoniac (19min)

2.1 Modélisation par un double puits

2.2 Couplage

2.3 Phénomènes d'inversion

3 Évolution forcée : effet MASER (13min)

3.1 Principe de fonctionnement

3.2 Champ oscillant et applications

3 Questions posées

1 Résonance magnétique nucléaire

- Dans la relation $\hat{H} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$, quel produit est représenté par le \cdot ?
- Pouvez-vous justifier la formule de changement de base pour passer dans la référentiel tournant pour le problème de RMN ?
- On observe un basculement de spin dans le problème de RMN, ce dernier permet de déterminer la pulsation propre du système ω_0 et d'en déduire le rapport gyromagnétique γ . Quelle est la relation entre ω_0 et γ ?

2 Molécule d'ammoniac

- Pouvez-vous justifier l'allure du double puits de potentiel proposé pour modéliser la molécule d'ammoniac ? Peut-on vraiment considérer les barrières "extérieures" comme infinies ? Quel est la hauteur de la barrière centrale ?
- Existe-t-il un lien entre le coefficient de couplage par effet tunnel introduit dans la matrice hamiltonienne et la barrière de potentiel centrale ? Si oui, pouvez-vous l'expliciter ?
- Pour une molécule d'ammoniac dans un piège à température ambiante, quelles sont les modes qu'on excite réellement ? A-t-on vraiment 2 niveaux ?

3 Régime forcé

- Quel est l'effet d'un gradient de champ électrique sur un dipôle ? Les particules sont-elle déviées quel que soit leur état ?
- Qu'est-ce que l'émission stimulée ?
- Pourquoi les termes de couplages liés au dipôles et au champ extérieure apparaissent sur l'antidiagonale de la matrice hamiltonienne ?
- A propos de l'utilisation du MASER en astronomie : est-ce qu'on crée un jet d'ammoniac ? Place-t-on une cavité résonante dans l'espace ? On excite les molécules d'ammoniac dans le domaine micro-onde mais est-ce avec des sources artificielles sur Terre ou des sources naturelles astrophysiques ?
- A propos de l'horloge atomique et du césium 133 : quelle transition sert à définir la seconde ?

4 Commentaires

Le piège de cette leçon est d'en faire une présentation de formalisme de 50 minutes.

La RMN et l'oscillateur à ammoniac sont les deux exemples standard de cette leçon, il faut veiller à présenter l'un des deux de façon précise afin de traiter le second de façon plus compacte. Traiter le plus simple/visuel des deux serait le plus judicieux : d'après nous il s'agit de la molécule d'ammoniac.

Parler d'un régime forcé est intéressant et attendu par le jury : on peut parler du MASER à ammoniac avec forçage et/ou de la RMN mais il faut éviter les redondances trop importantes, on pourra présenter l'un des deux exemples précédent en détail (là aussi le plus simple et visuel serait le mieux a priori) et éventuellement présenter le second plus succinctement (mais ce n'est pas une obligation, cela dépend de vous et votre gestion du temps).

Si l'on veut parler d'horloge atomique et de laser, il est préférable de la faire en ouverture et pas comme une application intégrée à la leçon car ces systèmes ne sont pas des systèmes à deux niveaux mais au moins trois niveaux.

5 Améliorations possibles

Il est attendu par le jury que le candidat réalise un calcul dans son ensemble, c'est-à-dire le faire au tableau et sans recopier son brouillon. Les autres calculs pourront être "passés sous silence", si ils ont été fait en préparation bien évidemment, pour gagner du temps sur la leçon afin de présenter un tout cohérent.

Le formalisme est à maîtriser mais pas au détriment de la physique sous-jacente au problème. Le formalisme introduit dans cette leçon doit autant que possible reposer sur des représentations visuelles et des considérations physiques afin de le rendre le plus digeste possible : la molécule d'ammoniac est un bon exemple pour cela. Autant que possible il faudrait faire des allers-retours entre le problème physique et ce que l'on écrit au tableau (matrice hamiltonienne, fonction d'onde...) afin de pouvoir au minimum se convaincre de leur forme. Pour les leçons de mécanique quantique le jury n'attend pas forcément de vous de faire des calculs et du formalisme ultra compliqué mais que vous arriviez à faire comprendre la physique à un élève. Ce concours est là pour recruter des enseignants.

Ne pas survoler à moitié les calculs, soit on le fait, soit on ne le fait pas. Il est possible de gagner du temps afin de s'attarder plus longuement sur le problème physique.

La leçon gagnerait en efficacité en commençant par la molécule d'ammoniac (plus visuel que la RMN). D'autant plus que l'approche de la RMN proposée ici commençait d'entrée de jeu par des matrices de Pauli et du formalisme et beaucoup trop peu de physique.