

Correcteurs : Vincent Krakoviack<sup>1</sup> et Etienne Thibierge<sup>2</sup>

Leçon présentée le jeudi 18 avril 2013

## Extraits des rapports du jury

Je vous rappelle que le préambule des rapports de l'épreuve de leçon présente les attentes et exigences du jury. Je vous encourage vivement à le lire.

**2012 :** Cette leçon ne doit pas se résumer à un catalogue d'expériences retraçant l'histoire de la mécanique quantique, ni à une juxtaposition d'exemples sans une logique didactique. On attend par suite du candidat un choix raisonné d'un petit nombre d'exemples, traités de manière suffisamment approfondie afin de faire ressortir quelques concepts propres à la mécanique quantique.

**2008 :** Cette leçon n'est pas un catalogue d'expériences retraçant l'histoire de la mécanique quantique. Il est indispensable de dégager les aspects propres ou spécifiques à la mécanique quantique dans les exemples choisis. Le jury a relevé que dans les leçons évoquant l'expérience des franges d'Young, la notion de la perturbation de la mesure et son lien avec la disparition du contraste n'est pas comprise.

**2007 :** Le but de cette nouvelle leçon est d'illustrer par des exemples basés sur des expériences de pensée et si possible sur des expériences réelles, en quoi les phénomènes quantiques diffèrent des phénomènes décrits par la physique classique. Il ne s'agit pas de faire un catalogue d'expériences, mais de donner des idées de base sur la physique quantique tout en évitant autant que faire se peut d'aborder son formalisme mathématique. Le choix est très vaste, et dépend de la "culture quantique" des candidats. Il n'est pas non plus envisageable d'être exhaustif sur ce sujet dans le temps limité d'une leçon d'agrégation. Le candidat pourra aborder :

- ▷ la dualité onde-corpuscule : interférences de matière, quantification de l'énergie, effet tunnel. . .
- ▷ l'aspect probabiliste des phénomènes : interférence en lumière très faible ou avec des photons uniques, "sauts quantiques" dans les atomes excités ou les noyaux radioactifs, réflexion et transmission de photons sur une lame semi-réfléchissante. . .
- ▷ la "complémentarité" : mesures simultanées de position et de quantité de mouvement, illustrations de l'inégalité de Heisenberg. . .
- ▷ la mesure en physique quantique : expérience de Stern et Gerlach, exemples de perturbation du système par la mesure, réduction du paquet d'onde, mesures successives.
- ▷ les corrélations quantiques entre mesures : états intriqués. . .

## Commentaires généraux

La leçon présentée était une bonne leçon, et je pense qu'elle répond tout à fait aux attentes du jury sur ce sujet. Des choix sont à faire dans cette leçon, et ceux qui ont été faits sont pertinents. Un point très appréciable est le soin apporté à la discussion des expériences et des résultats expérimentaux.

Le temps imparti a été bien respecté et bien géré, en mettant de côté la dernière partie du plan prévu pour conclure dans les temps.

Sur le plan formel, le seul reproche concerne les titres des paragraphes qui ont été trop souvent écrits à contre-temps, c'est à dire une fois la discussion du paragraphe terminée.

Le positionnement de la leçon fait débat dès la lecture du titre. En particulier il semble difficile de la présenter comme étant la leçon de mécanique quantique n°1 et d'interpréter les résultats expérimentaux avec suffisamment de profondeur. Je pense qu'il faut plutôt la considérer comme une leçon de synthèse, que vous ne présenteriez pas forcément à des étudiants, mais où vous démontrerez au jury que vous avez une vue globale sur la mécanique quantique. En un sens, je trouve que le positionnement de la leçon est comparable p.ex. à celui de la leçon de chimie sur les dosages, qui est la dernière des leçons de lycée.

## Retour sur la leçon présentée

### I) Effet photoélectrique

La discussion expérimentale était rigoureuse et bien menée. La nécessité de la mécanique quantique pour expliquer l'effet a clairement été mise en avant, c'est très bien. Le retour sur l'expérience de l'électroscope avec un ordre de grandeur donné à la fin a été apprécié.

Le recours à la théorie des bandes dans l'interprétation quantique ne semble pas nécessaire. Expliquer qualitativement la notion de travail de sortie avec le modèle type jellium (l'électron est au milieu de cations fixes qui sont pour lui une « colle » chargée positivement) semble suffisant pour intuitiver qu'il faut fournir de l'énergie à l'électron pour l'arracher du métal. De plus, cela peut poser un problème avec les prérequis puisque la théorie des bandes ne fait pas partie des « bases de la mécanique quantique » annoncées. Je pense donc que vous pouvez vous permettre de garder cette interprétation pour les questions.

### II) Interférences de matière

Là encore, la discussion était rigoureuse et bien menée. L'utilisation de l'animation JAVA fournie sur le CD

1. [vincent.krakoviack@ens-lyon.fr](mailto:vincent.krakoviack@ens-lyon.fr), <http://perso.ens-lyon.fr/vincent.krakoviack>

2. [etienne.thibierge@ens-lyon.fr](mailto:etienne.thibierge@ens-lyon.fr), <http://perso.ens-lyon.fr/etienne.thibierge>

de Basdevant est une bonne idée.

On peut enrichir un peu la présentation en disant quelques mots d'une expérience réelle d'interférences de matière, par exemple tirés du premier chapitre de Basdevant et Dalibard. Pour la culture, les interférences ont été observées avec des atomes, des électrons dans le vide et des molécules, jusqu'aux fullerènes (molécules de  $C_{60}$ ). On a également observé des interférences entre électrons dans les solides, d'abord dans une géométrie de fentes d'Young puis dans une géométrie type interféromètre de Mach Zehnder.

Attention à ne pas être trop catégorique : ce n'est pas parce qu'on ne peut pas fabriquer d'appareil capable de mesurer directement une fonction d'onde qu'il faut en conclure que celle-ci n'a pas de signification physique.

L'idée importante concernant l'émergence de la figure d'interférences est que celle-ci ne peut être obtenue que de façon *statistique*, en répétant un grand nombre de fois la même expérience. Pour ce faire, on peut ou bien réaliser plein de fois l'expérience en envoyant les particules une par une sur les fentes, ou bien envoyer un grand nombre de particules en une seule fois, sous réserve qu'elles n'interagissent pas entre elles.

Si on réalisait l'expérience des fentes d'Young en régime de photon unique, les résultats seraient les mêmes qu'avec des atomes uniques. Chaque photon serait détecté en un seul point de l'écran, et la figure d'interférences n'apparaîtrait que pour un grand nombre de photons. C'est d'ailleurs ce qu'on fait habituellement en optique : une source lumineuse envoie énormément de photons d'un coup, ce qui permet d'observer tout de suite la figure d'interférences.

Pour résumer, la particule se comporte du point de vue de la détection comme un corpuscule (elle est détectée en un seul et unique endroit à un seul et unique instant), la probabilité de détection du corpuscule quelque part étant elle donnée par le caractère ondulatoire (étendu en espace et en temps) de la particule.

### III) Expérience de Stern et Gerlach

La discussion de la raison pour laquelle l'expérience de Stern et Gerlach a pu permettre de prouver l'existence du spin, et pas seulement la quantification du moment cinétique orbital, a été très bien conduite.

Il y a eu un peu de confusion sur le temps auquel comparer la période de précession du moment magnétique. Il faut le comparer au temps passé dans l'électroaimant, et pas à la période des variations du champ puisque celui-ci est statique.

## Questions

Les questions servent *d'abord* à éclaircir les points peu clairs de la leçon, puis *ensuite* à tester vos connaissances plus largement. Voilà quelques notions sur des points qui pourraient être discutés lors des questions.

L'effet photoélectrique est l'expérience historique qui a amené à la notion de photon, mais ne constitue *pas* une preuve de son existence. En effet, il s'explique tout aussi

bien par un modèle où la matière est quantifiée mais pas le champ électromagnétique. La vraie preuve expérimentale de l'existence du photon est beaucoup plus récente (1986) et est due à Philippe Grangier, Alain Aspect et Gérard Roger. Je vous laisse vous reporter au corrigé de la leçon sur le photon que j'ai tapé.

Deux exemples de phénomènes quantiques macroscopiques sont la superfluidité et la supraconductivité (la question a été posée sous cette forme et c'était la réponse attendue).

Enfin, je pense que les questions générales posées à la suite des autres leçons de mécanique quantique peuvent aussi vous être posées ici. Je vous laisse donc vous reporter aux autres corrigés.

## Mesure et fentes d'Young

Le jury note des erreurs sur le rôle de la mesure de la fente par laquelle passe la particule dans l'expérience des fentes d'Young. Voilà donc des précisions sur ce point.

On choisit de noter  $\psi(x)$  la fonction d'onde associée au ket  $|\psi\rangle$ ,  $\psi(x) = \langle x|\psi\rangle$ .

En l'absence de détecteur, l'état du système est décrit par le ket

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) \quad (1)$$

où  $|\psi_\alpha\rangle$  est le ket où la particule passe par la fente  $\alpha$ . Sur l'écran on observe alors au point  $x$

$$I(x) = |\langle x|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2} |\langle x|\psi_1\rangle + \langle x|\psi_2\rangle|^2 \quad (2)$$

$$= |\psi(x)|^2 = \frac{1}{2} |\psi_1(x) + \psi_2(x)|^2 \quad (3)$$

$$\neq \frac{1}{2} |\psi_1(x)|^2 + \frac{1}{2} |\psi_2(x)|^2 \quad (4)$$

Si maintenant on ajoute le détecteur, l'état du système contient celui de la particule mais aussi celui du détecteur :

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle \otimes |D_1\rangle + |\psi_2\rangle \otimes |D_2\rangle) \quad (5)$$

où  $|\psi_\alpha\rangle \otimes |D_\alpha\rangle$  est le « ket » où la particule passe par la fente  $\alpha$  et y est repérée. [ Formellement, c'est un produit tensoriel où  $|\psi_\alpha\rangle$  vit dans l'espace des états de la particule et  $|D_\alpha\rangle$  dans celui du détecteur. ]

Une fois que la particule a été repérée dans une des fentes, le postulat de réduction du « paquet d'onde » permet de dire que le système est projeté dans un état propre du détecteur, ce qui donne ici que la partie relative au détecteur de l'état du système après détection est forcément  $|D_1\rangle$  avec probabilité 1/2 ou  $|D_2\rangle$  avec probabilité 1/2. Par conséquent, l'état du système est donc

$$|\psi_1\rangle \otimes |D_1\rangle \quad \text{proba } 1/2 \quad (6)$$

$$|\psi_2\rangle \otimes |D_2\rangle \quad \text{proba } 1/2 \quad (7)$$

Le système est dans un *mélange statistique* d'états, très différent de la superposition (1). La détection a brisé la superposition d'états, et l'a transformée en mélange. [ Le cadre formel approprié est celui de la matrice densité. Le détecteur de fente y réalise une trace partielle. ]

La figure observée sur l'écran s'obtient alors en sommant classiquement les différents cas, pondérés par leur probabilité d'apparaître au sein du mélange :

$$I_D(x) = \frac{1}{2} |(\langle x| \otimes \langle D_1|)(|\psi_1\rangle \otimes |D_1\rangle)|^2 + \frac{1}{2} |(\langle x| \otimes \langle D_2|)(|\psi_2\rangle \otimes |D_2\rangle)|^2 \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2} |\langle x|\psi_1\rangle \langle D_1|D_1\rangle|^2 + \frac{1}{2} |\langle x|\psi_2\rangle \langle D_2|D_2\rangle|^2 \quad (9)$$

$$= \frac{1}{2} |\psi_1(x)|^2 + \frac{1}{2} |\psi_2(x)|^2 \quad (10)$$

Ainsi la mesure de la fente par laquelle est passée la particule détruit la figure d'interférences.

Ce résultat théorique a été observé expérimentalement, par exemple dans l'expérience dite du microscope d'Heisenberg (on cherche par quelle fente est passé un atome en étudiant la diffusion de photons qu'on aurait envoyés sur une des fentes). Elle est discutée sur le mode *gedanken experiment* par Feynman, et les résultats expérimentaux sont présentés par Serge Haroche et Jean-Michel Raimond dans leur livre *Exploring the Quantum*.

## Conclusion

La leçon présentée suit le plan « canonique » pour cette leçon. Vous pouvez sans trop d'inquiétude le reprendre dans votre propre leçon.

Néanmoins, la leçon est particulièrement ouverte, le rapport 2007 donne une idée des possibilités. En fonction de votre culture quantique, n'hésitez pas à traiter des sujets plus modernes et un peu moins conventionnels. Gardez cependant à l'esprit que le niveau de la leçon ne doit pas dépasser celui de L3 (où on peut traiter des sujets avancés mais avec un formalisme raisonnable), et que les prérequis doivent rester modestes. Par ailleurs, si vous présentez une illustration originale, soyez particulièrement pédagogues afin de ne pas perdre le jury qui ne la connaîtra pas forcément. Enfin, je vous conseille d'éviter les exemples de théoricien, et au contraire de toujours vous référer à des résultats expérimentaux et des ordres de grandeur.

Pensez aussi que cette leçon est aussi l'occasion de rentabiliser le travail que vous ferez pour préparer les autres leçons de mécanique quantique : n'hésitez pas à présenter les mêmes expériences dans deux leçons différentes !