

LP37: aspects ondulatoire de la matière. Notion de fonction d'onde

Louis D'ERAMO

28 avril 2015

Je vais ici mettre la version proposée par Camille Sonnevile, mon plan étant proposé en italique, les références en bleu et les questions dont je me souviens en vert.

Niveau L3

Prérequis :

- Électromagnétisme
- Optique ondulatoire
- Corps noir
- Effet photoélectrique
- Transformée de Fourier

Bibliographie :

- *La physique quantique sans aspirine* un petit livre fourmillant de détails sur la construction historique de la mécanique quantique. Je me suis inspiré de ce livre pour la construction historique
- *Mécanique quantique 1* Claude Cohen-tannoudji, je me suis servi de ce livre pour faire ma partie sur Heisenberg, mais au vu du changement de plan il peut toujours être utile sur tout un tas de calcul d'ordre de grandeur.
- *Mécanique Quantique 1* Aslangul, mon livre préféré, il lambine un peu sur le texte mais c'est passionnant. Il utilise la construction historique de la mécanique quantique.
- *Mécanique quantique* Basdevant Dalibard, je dirais le livre de référence sur la leçon, le plan s'inspire grandement de la construction de ce livre.
- *Mécanique 2* Richard Feynman, le pro des bongos nous présente son analogie des fentes d'Young à l'aide d'un fusil mitrailleur(ça vaut forcément le détour).
- *Mécanique quantique* Le Bellac, présente quelques expériences modernes qui sont appréciées par la jury.

Introduction

mon intro : à la fin du XIX^e siècle, selon Kelvin et Michelson il ne reste plus qu'à affiner les modèles existants. À l'aube du XX^e siècle quelques jeunes physiciens vont alors mettre à mal le caractère déterministe et la distinction onde/corpuscule si cher au physiciens du XIX^e siècle.

On introduit les travaux de Planck et de Einstein sur le corps noir et l'effet photoélectrique. On montre ainsi comment on passe d'une description ondulatoire à une description corpusculaire, Einstein s'étant inspiré des travaux de Planck. Toute cette histoire est formidablement racontée dans *la physique quantique sans aspirine*.

Attention il ne s'agit pas de passer trop de temps sur les découvertes de Einstein et de Planck, il y a d'autres leçons prévues à cet effet.

1 Aspects ondulatoire de la matière

1.1 De Planck à de Broglie

La physique quantique sans aspirine

J'avais mis dans cette partie la partie historique sur les travaux de Planck et Einstein que Camille propose de mettre en intro. Voici donc le seul paragraphe à laisser.

On explique les travaux de de Broglie, pourquoi, les retentissements...

Des questions sur la quantification du rayonnement de Planck

1.2 Davisson et Germer

Basdevant

On explique le but de l'expérience, la réalisation...

Des questions sur les applications, les techniques de microscopie, la différence entre électron et neutron pour la diffusion...

1.3 (*Interférences atomiques*) Phénomènes ondulatoire de la matière

Le Bellac + Richard

expérience sur les neutrons thermiques (diffraction et interférences de fentes d'Young) et de la molécule de fullerènes (voir transparents expériences de Zellinker).

+ introduire des calculs d'ordre de la longueur d'onde pour des particules matériels massives

+ introduire l'expérience de pensée de Richard.

1.4 Comment quantifier les interférences ?

on fait une analogie avec l'optique, on détaille les grandeurs intéressantes I et E.

Pour les ondes de matières on a la grandeur résultante : la probabilité, quel est la grandeur analogue de E ?

2 Notion de fonction d'onde

Basdevant + Aslangul pour quelques remarques

J'étais parti sur un plan du type Basdevant : Fonction d'onde puis Schrödinger. Mais pour plusieurs raisons, Camille conseille une démarche historique plutôt suivie par Aslangul

2.1 Équation de Schrödinger

Claude Aslangul introduit l'équation de Schrödinger de façon historique, j'ai choisi de le faire comme Basdevant, avec les ondes planes de de Broglie. D'ailleurs cela fait un lien sympa entre les deux parties. En effet si l'on ne connaît pas la signification physique de la fonction d'onde, on peut toujours supposer une description en onde planes pour coller à l'analogie optique. De plus l'introduction des ondes libres de de Broglie va à l'encontre de la normalisation que l'on traite dans ce plan après, ce qui pourrait nous être reprocher si on fait le plan à la Basdevant.

Donc pour ceux qui n'aurait pas compris, on suit le Basdevant en détaillant la construction de l'équation de Schrödinger pour une particule libre. On généralise ensuite cette équation dans le cas où la particule est soumise à un champ de forces. Ne pas oublier de dire que l'équation est linéaire, donc le principe de superposition est sauf.

Des questions sur les conditions d'obtention de l'équation (relativité+ particule libre au début), appellation de l'équation de Schrödinger relativiste, signification du terme de droite (hamiltonien), relation énergie/impulsion pour des particules relativistes.

2.2 Interprétation de la fonction d'onde

D'après Aslangul, il s'agit bien d'une interprétation et non pas de la vérité. Il se trouve que Schrödinger n'avait pas donné de sens à sa "Wellenfunktion", l'interprétation proposée repose sur le postulat de Born aidé de Jordan.

On parle alors du postulat de Born, l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde (qu'on a intuité à la partie 1.4), des diverses remarques mathématiques (phase, normalisation...), parler de valeur moyenne de la position, de l'écart type sur la position, ainsi que du principe de superposition nécessaire aux interférences.

3 Paquet d'onde

3.1 Nécessité et propriétés

Basdevant + Cohen

Il faut bien dire que les ondes libres de de Broglie (ondes planes) ne sont pas normalisables et donc ne sont pas acceptables. De même qu'en optique on va alors décomposer la fonction sur les ondes planes grâce à la théorie de Fourier.

J'ai utilisé les notations du Cohen mais je ne sais pas si ce sont les plus pertinents, il semblerait que le Basdevant ne soit pas mal là dessus.

Il faut détailler les propriétés de cette transformée de Fourier : normalisation (via le théorème de Parseval), calcul de la moyenne de l'impulsion, de l'écart type sur l'impulsion.

3.2 Principe d'incertitude d'Heisenberg

[Basdevant + Cohen+ Aslangul](#)

J'ai fait sentir le notion de localisation sur r / délocalisation sur p via les propriétés sur les TFs, puis j'ai effectué un calcul un peu abjecte issu du Cohen pour calculer la fonction d'onde quand sa TF ressemble à une gaussienne de largeur Δp . Ce n'est sûrement pas la bonne approche.

On sort les propriétés des TFs pour faire sentir le critère d'inégalité de Heisenberg. Le but est d'appliquer ce critère pour savoir dans quelles condition on est. Il y a par exemple le calcul de l'incertitude sur l'impulsion d'un grain de sable. Camille propose aussi de faire la cohésion d'un atome hydrogène en ordre de grandeur sans passer par le modèle de Bohr.

Est ce que l'équation affichée est la relation de Heisenberg (pour mémoire j'avais écrit $\Delta p \Delta x \sim \hbar$), comment la démontrer, est ce du même acabit que les incertitudes de l'expérimentateur en mécanique classique...

3.3 Étalement du paquet d'onde

[Basdevant](#)

Je n'ai pas traité cette partie mais je pense qu'elle peut rentrer dans le temps impartie si on enlève le gros calcul du Cohen de ma dernière partie et si on basarde la partie sur Planck et Einstein en intro.

Le calcul est fait dans le Basdevant.

J'ai quand même eu le droit à des questions sur la vitesse de groupe et la vitesse de phase d'une onde de de Broglie et à la définition de vitesse de groupe et vitesse de phase.