

# Projet de Physique P6

## Introduction à la physique quantique : Des expériences fondamentales à la manipulation d'atomes froids



BARET Claire - DEMARS Elsa  
FERNANDEZ Mathilde - NEUPERT Wiebke  
PELTIER Auriane - SCHEID Alexandre

Enseignant-responsable du projet : M. Rémy LEGAIE

STPI/P6/2019 - 48

**Date de remise du rapport :** 14 Juin 2019

**Référence du projet :** STPI2/P6/2019 - 48

**Intitulé du projet :** Introduction à la physique quantique :  
Des expériences fondamentales à la manipulation d'atomes

**Type de projet :** Bibliographie/Théorie/Expériences

**Objectifs du projet :**

- Se renseigner sur les évolutions historiques de la physique moderne
- Comprendre les fondements de la physique quantique
- Être capable de vulgariser les notions apprises en cours

**Mots-clefs du projet :**

- Introduction Physique Quantique
- Physique moderne
- Applications physiques
- Évolution de la physique

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE ROUEN  
DEPARTEMENT SCIENCES ET TECHNIQUES POUR L'INGENIEUR  
685 AVENUE DE L'UNIVERSITÉ BP 08- 76801  
SAINT-ETIENNE-DU-ROUVRAY  
TÉL : 33 2 32 95 66 21 - FAX : 33 2 32 95 66 31

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Approche historique de la physique quantique</b>	<b>7</b>
1.1	Un peu d'histoire . . . . .	7
1.2	Les débuts de la quantique . . . . .	8
1.3	Les congrès Solvay . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Théorie de la dualité</b>	
	<b>Onde-Corpuscule</b>	<b>10</b>
2.1	Expérience des fentes d'Young . . . . .	10
2.2	Catastrophe ultraviolette . . . . .	13
2.3	Effet photoélectrique . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Modèle de Bohr et Principe d'indétermination d'Heisenberg</b>	<b>15</b>
3.1	Modèles historiques de l'atome . . . . .	15
3.1.1	Modèle antique . . . . .	15
3.1.2	Modèle de Dalton . . . . .	15
3.1.3	Modèle de Thomson . . . . .	15
3.1.4	Modèle de Rutherford . . . . .	16
3.2	Modèle révolutionnaire de Bohr . . . . .	16
3.3	Limite du modèle de Bohr et principe d'indétermination d'Heisenberg	18
<b>4</b>	<b>La superposition quantique et équation de Schrödinger</b>	<b>20</b>
4.1	Principes de superposition et d'indéterminisme . . . . .	20
4.2	Expérience de pensée : Le chat de Schrödinger . . . . .	21
4.3	Équation de Schrödinger . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Formalisme de Dirac</b>	<b>23</b>
5.1	Nécessité d'élaborer un formalisme . . . . .	23
5.2	Travaux de Paul Dirac sur l'introduction d'un formalisme mathématique . . . . .	23
5.3	Description et application de ce formalisme . . . . .	24
5.3.1	Notion de « Bra » et de « Ket » . . . . .	25
5.3.1.1	Ket . . . . .	25
5.3.1.2	Bra . . . . .	26
5.3.2	Opérations sur les vecteurs . . . . .	26
5.3.2.1	Sommes et Produits . . . . .	26
5.3.2.2	Produit Scalaire . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Laser et effet tunnel</b>	<b>28</b>
6.1	Effet tunnel . . . . .	28
6.2	Laser . . . . .	28

<b>7 Applications modernes de la physique quantique</b>	<b>30</b>
7.1 Laser et atomes froids . . . . .	30
7.2 Supraconductivité et trains quantiques . . . . .	30
7.3 Ordinateurs quantiques . . . . .	31
<b>Annexes</b>	<b>I</b>
A.1 Démonstration modèle de Bohr . . . . .	I
A.2 Représentations historiques des modèles atomiques . . . . .	IV

# Introduction

Au cours de la deuxième année du cycle préparatoire à l'INSA de Rouen, nous devons réaliser un projet lié à la physique.

Ce projet avait pour but de nous faire découvrir de nouvelles notions physiques d'une façon moins scolaire. Durant les séances, nous avons évolué en groupe en apprenant à nous répartir le travail et à nous organiser en autonomie, ce qui sera très utile dans notre futur métier d'ingénieur.

Nous avons choisi le sujet " Introduction à la physique quantique : Des expériences fondamentales à la manipulation d'atomes froids ", car nous étions curieux d'en apprendre davantage sur cette notion de physique très célèbre sur laquelle nous avions peu de connaissance. De plus, nous étions particulièrement attirés par l'aspect de recherches historiques autour de ce projet.

En effet, ce sujet nous a permis d'en apprendre beaucoup sur les grands scientifiques et les découvertes majeures de la physique du XXe siècle. En complément de ce rapport, nous devons également réaliser un poster et effectuer une soutenance devant un jury.

Outre l'aspect pratique, l'objectif était de comprendre quelques notions essentielles et fondements de la physique quantique. A l'issue de ce projet, nous devrions être capables de vulgariser certaines de ces notions souvent méconnues et de pouvoir partager ces connaissances avec un public varié.

La physique quantique regroupe un ensemble de théories nées au XXe siècle qui diffèrent de la physique dite "classique". Lorsque l'on évoque la physique quantique, on s'aperçoit que de nombreuses personnes connaissent cette appellation sans nécessairement en comprendre ses fondements. C'est pourquoi elle présente un aspect mystérieux qui intrigue fortement.

Ainsi, dans ce rapport nous allons tenter d'expliquer les principales théories quantiques de façon accessible pour un large public. Pour cela, nous allons suivre un plan chronologique et aborder une à une chaque grande découverte qui a forgé l'histoire de la physique quantique à travers les époques.

# Méthodologie et organisation du travail

L'un des enjeux majeurs de ce projet P6 réside dans notre capacité d'adaptation de travail avec une équipe de 6 membres sur un même projet.

Pour parvenir à optimiser notre temps de travail, nous avons décidé de scinder notre équipe en petits groupes de deux personnes. Le fait de travailler en petits groupes nous a permis de développer efficacement chaque thème abordé mais aussi de pouvoir partager rapidement avec son binôme, tout en communiquant à l'ensemble du groupe les avancées de nos recherches.

Grâce à cette organisation, chaque sous-groupe travaillait sur l'un des grands axes initialement suggérés par notre professeur référent M. Legaie. Nous nous sommes penchés au commencement sur une partie historique, la théorie onde-corpuscule et également sur la superposition quantique.

Au fur et à mesure des séances et de nos discussions, nous avons affiné notre plan notamment grâce aux interventions de notre professeur, qui nous en apprenait plus sur les grandes avancées en physique quantique et nous éclairait sur des points mathématiques.

Nous sommes arrivés à la conclusion que nous souhaitons développer notre projet selon un fil directeur qui suive le déroulement historique des découvertes quantiques. Nous avons donc changé l'ordre de nos parties plusieurs fois afin de respecter au mieux cette volonté.

Cette trame nous permettrait une certaine fluidité dans la lecture et la mise en avant de certaines notions, et représentait également l'évolution de nos recherches jusqu'à arriver à une approche plus actuelle de la physique quantique.

Nous avons donc choisi de structurer notre plan et d'organiser nos recherches comme reporté dans le tableau ci-contre.

Parties abordées dans le Projet	
Introduction et organisation du travail	Auriane, Mathilde
Approche historique	Alexandre, Claire
Théorie onde-corpuscule	Elsa, Wiebke
Modèle de Bohr et principe d'indétermination d'Heisenberg	Alexandre, Claire
Démonstration du modèle de Bohr	Auriane, Mathilde
Superposition quantique et équation de Schrödinger	Auriane, Mathilde
Formalisme de Dirac	Alexandre
Laser et effet tunnel	Elsa, Wiebke
Application : Atomes froids	Elsa, Wiebke
Application : Supraconductivité et ordinateurs quantiques	Claire
Conclusion	Elsa, Wiebke
Mise en page	Alexandre

FIGURE 1 – Organisation et répartition du travail

## Chapitre 1

# Approche historique de la physique quantique

La physique quantique, physique relativement récente et novatrice, vise à décrire le comportement des atomes et des particules à l'échelle de l'infiniment petit. Cependant, lorsque l'on étudie l'ensemble des notions qui la compose, il est intéressant de se pencher sur les causes qui lui ont donné naissance dans l'histoire des sciences.

## 1.1 Un peu d'histoire

Dans l'histoire, on associe l'émergence fondamentale des démarches scientifiques en Europe à la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle.

En effet, à partir des années 1600, de grandes découvertes scientifiques éminentes bouleversent le monde des sciences. De nombreuses lois font leur apparition dans ce qu'on appelle aujourd'hui la physique classique. On doit notamment de nombreuses découvertes sur l'astrologie à Galilée, la normalisation de la chimie moderne grâce aux études du français Antoine Lavoisier ou encore la mise en évidence de l'optique géométrique corpusculaire d'après les travaux majeurs de Snell et Descartes.

En raison des nombreuses révolutions de la physique qui ont vu le jour depuis la Renaissance (comme l'ensemble des travaux sur la mécanique apportés par Newton, la codification de la thermodynamique, l'unification de l'électromagnétisme par Maxwell,...), on voit aussi apparaître de grandes révolutions industrielles (motorisation des usines, apparition des appareils à vapeur ou des machines utilisant le concept d'induction,...).

De part l'effervescence des travaux scientifiques apportés jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, on considère, à cette époque, que la nature n'a plus aucun secret pour l'homme et qu'ainsi, le monde de la physique n'a plus rien à cacher. A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, on considère que tout phénomène physique semble trouver une explication et peut être prédit quantitativement par les lois fondamentales qui composent la physique classique. De ce fait, on considère à ce moment que les diverses branches de la physique sont extraordinairement et définitivement unifiées.

Bien que toutes les règles de la physique semblent codifiées et que plus rien ne semble pouvoir être découvert, on observe néanmoins des discordes qui viennent semer le trouble dans la perception que l'on se fait de la physique à la fin du XIX<sup>ème</sup>.

En effet, d'une part, les lois de l'électromagnétisme semblent contenir des contradictions et d'autre part, certaines expériences présentent des résultats auxquels les scientifiques ne trouvent pas d'interprétations concrètes. [?, ?]



## 1.2 Les débuts de la quantique

C'est à l'aube du XXème siècle, en acceptant l'idée que le temps ne s'écoule pas de la même manière pour tous, qu'Albert Einstein met sur pied une théorie qui s'avère résoudre les derniers problèmes que la physique peine à expliquer : la relativité restreinte, qu'il publie en 1905 et qui lui vaut la reconnaissance de ses contemporains. Il parvient à expliquer l'effet photoélectrique, jusqu'alors inexpliqué, et également à approfondir la théorie des quanta, « petits paquets d'énergie », précédemment introduite par Planck. Cette approche lui valut en 1921 le Prix Nobel de physique.

Son travail sur la relativité restreinte, puis plus tard la relativité générale, imaginé par une multitude d'expérience de pensée (comme le paradoxe du train,...) est véritablement à l'origine du bouleversement de la physique.

Grâce à ces découvertes, les écueils théoriques de la physique classique sont enfin résolus, les bouleversements du XIXème siècle semblent être achevés et la physique forme enfin un tout cohérent qui se résume à l'expression de deux forces fondamentales : la gravitation et l'électromagnétisme. [?, ?, ?, ?]

Mais à l'époque même où les physiciens peuvent être satisfaits de leur œuvre, celle-ci leur tourne le dos. De plus, du fait que certains phénomènes physiques restent inexpliqués, comme le rayonnement des corps noirs et l'effet photo-électrique, de nombreux constats expérimentaux viennent entacher des postulats fondamentaux en soulevant des problèmes majeurs.

Dès 1900, des expériences sur la lumière semblent montrer des comportements bizarres et paradoxaux, adoptant parfois des caractéristiques corpusculaires grâce aux photons mais aussi des caractères ondulatoires que l'on peut notamment mettre en évidence avec le modèle des fentes d'Young. Le plus paradoxal à l'époque est que la matière s'avère aussi présenter ces mêmes caractéristiques duales que le physicien français Louis De Broglie qualifiera par la suite de dualité Onde-Corpuscule.

En voulant répondre à ces incompréhensions, le physicien Max Planck, persuadé que ces réponses se trouvent essentiellement dans le comportement des atomes, posera les bases d'une toute nouvelle physique destinée à résoudre ces paradoxes : La physique quantique. [?, ?, ?]

Cette nouvelle branche, qui vise à comprendre des phénomènes jusqu'alors inexpliqués, bien souvent complètement contre-intuitifs et dont les réponses se trouvent à des échelles difficilement observables pour l'époque, se voit susciter l'intérêt de nombreux scientifiques éminents, souhaitant trouver des réponses à ces problèmes. [?, ?]

## 1.3 Les congrès Solvay

Au début du XXème siècle, d'éminents scientifiques se penchent sur la physique quantique et de nombreuses théories voient le jour. Le rythme effréné de ces découvertes scientifiques impose un besoin de partager ces nouvelles connaissances afin de faire avancer la physique quantique.

Les congrès Solvay sont des conférences rassemblant tous les plus grands physiciens et chimistes du monde entier. Ernest Solvay, un industriel belge et inventeur

de la dynamite, fonde et finance les congrès ; en effet, le besoin d'un rassemblement des esprits les plus brillants semble nécessaire afin de mieux comprendre le monde, notamment après la la théorie de quanta de Planck en 1900 et relativité restreinte d'Einstein en 1905.

Le premier congrès se tient à Bruxelles en 1911 et a justement pour thème la théorie des quanta, déjà largement diffusée à travers la communauté scientifique. Sont présents, entre autre : Marie Curie, Poincaré, Planck, Rutherford, Langevin, Einstein et Lorentz, qui préside les congrès jusqu'en 1927. C'est d'ailleurs cette année là que se tient le cinquième congrès, après la mort de Solvay en 1924.

Ce cinquième congrès est sans doute le plus mémorable, car il est le berceau d'un débat d'un enjeu fondamental entre les physiciens partisans du déterminisme et de l'ordre et ceux dits de L'école de Copenhague, partisans de l'indéterminisme. S'opposent notamment Einstein et Schrödinger à Bohr et Heisenberg. L'enjeu de ce débat est essentiel, puisqu'il interroge l'essence même de la nature.

Il faut alors comprendre la source du débat : Bohr et Heisenberg affirment que la matière est particulaire, et qu'il n'est pas raisonnable de vouloir considérer simultanément la position et la vitesse de la particule (principe d'indétermination d'Heisenberg). Schrödinger, au contraire, pense que la matière est ondulatoire, tandis qu'Einstein pense que " Dieu ne joue pas aux dés " et ne peut accepter que le hasard prenne une place aussi considérable dans la description des phénomènes réels.

Lors du congrès s'instaure alors un duel entre Einstein et Bohr : les deux physiciens passent leur temps à réfuter les arguments de l'autre. Einstein, par ses expériences de pensée, propose sans cesse de nouvelles oppositions à la théorie de Bohr. Ce dernier parvient pourtant chaque fois a réfuter les propos avancés par Einstein.

Au final, Bohr, parvenant à contrer chaque argument, sort " vainqueur " du débat et verra sa théorie acceptée par ses pairs. Les congrès Solvay se tiennent tous les trois ans depuis la seconde guerre mondiale et sont, comme l'a montré l'histoire, essentiels à la compréhension du monde. [?, ?]

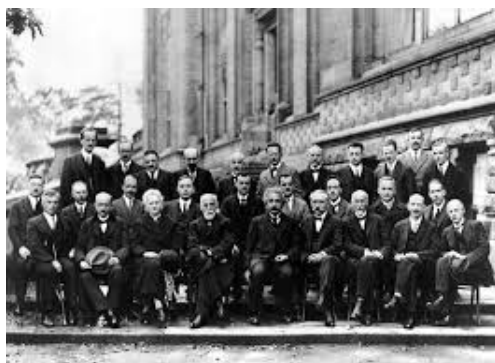


FIGURE 1.1 – Congrès Solvay de 1927. On y remarque la présence notamment d'Einstein, Borh, Plank,... [?]

## Chapitre 2

# Théorie de la dualité Onde-Corpuscule

Comme évoqué précédemment, au début du XXème siècle, il subsiste certains problèmes ou expériences que les lois de la physique classique ne parviennent pas à interpréter.

On distingue notamment les résultats relativement intrigants de l'expérience menée par Thomas Young sur la lumière, mais aussi l'incompréhension liée à l'effet photoélectrique mis en évidence par les travaux d'Antoine Becquerel ou encore le problème dû au rayonnement des corps noirs. Ce que l'histoire va nous montrer c'est que l'ensemble de ces phénomènes scientifiques semblent présenter des réponses faisant intervenir la physique quantique.

## 2.1 Expérience des fentes d'Young

Pour la toute première fois, en 1801, une expérience d'optique géométrique, menée par le physicien britannique Thomas Young, semble montrer des résultats intéressants.

Initialement, Young propose une expérience dont le dispositif nécessaire pour la réaliser est plutôt basique : une source de lumière qui peut envoyer son faisceau sur un panneau pourvu de deux fentes, ainsi qu'un écran où la lumière finit son trajet et sur lequel on pourra observer les figures obtenues.

À cette époque, la physique fait la différence entre les comportements liés aux particules corpusculaires ou ondulatoires comme le phénomène de diffraction généré par le déplacement des vagues à la surface de l'eau. On considérait à cette période que la lumière possédait un comportement Ondulatoire.

En effet, ce caractère purement ondulatoire de la lumière est confirmé par les figures d'interférences obtenue sur l'écran du dispositif

Néanmoins, l'expérience menée par Young ne permit pas tout de suite de mettre en évidence les deux comportements – alors considérés contradictoires – de la lumière.

Mais alors comment mettre en avant cette notion de dualité onde-corpuscule concernant la lumière ?

On peut remarquer l'observation suivante : si l'on projette plusieurs boules de peinture sur un mur dont la trajectoire est séparée par une planche munie de deux fentes suffisamment grandes pour laisser passer les boules en question, alors les traces de peinture obtenues sur la surface de la planche devraient former deux bandes, relativement similaires à celles des fentes initialement traversées.

Ainsi – en supposant plus tardivement que la lumière se compose de grains

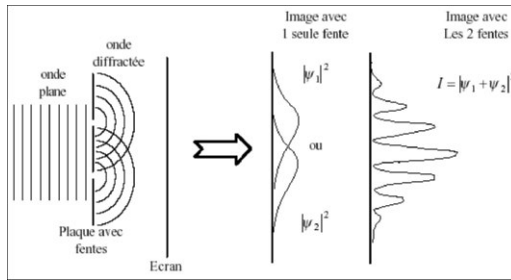


FIGURE 2.1 – Dispositif et résultats de l’expérience de Young [?]

de matière (ou photons) – lorsqu’on projette des particules une à une sur une surface munie de deux fines fentes, la figure de dispersion obtenue sur un écran situé en aval de ce dispositif devrait être équivalente à celle des fentes, comme émis précédemment. Le principe de cette expérience et les pensées qui en découlent sont très justement représenté dans la figure 2.2.

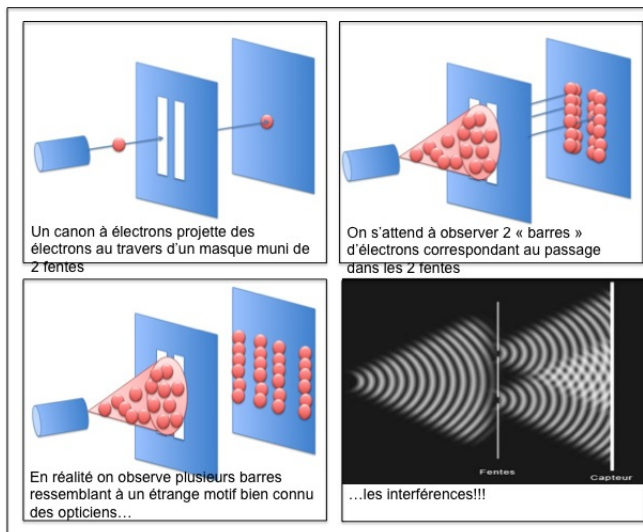


FIGURE 2.2 – Schématisation de l’expérience des fentes d’Young pour des électrons considérés comme des corpuscules [?]

L’expérience d’Young a été affinée par la suite. Certaines avancées scientifiques ont rendu possible le fait de pouvoir projeter une particule (ou quantum) à la fois : par exemple un électron.

Cependant, lors de la réalisation de cette nouvelle expérience, les résultats obtenus sont quelque peu déroutants.

En effet, on observe sur l’écran toujours des franges d’interférences. Ce résul-

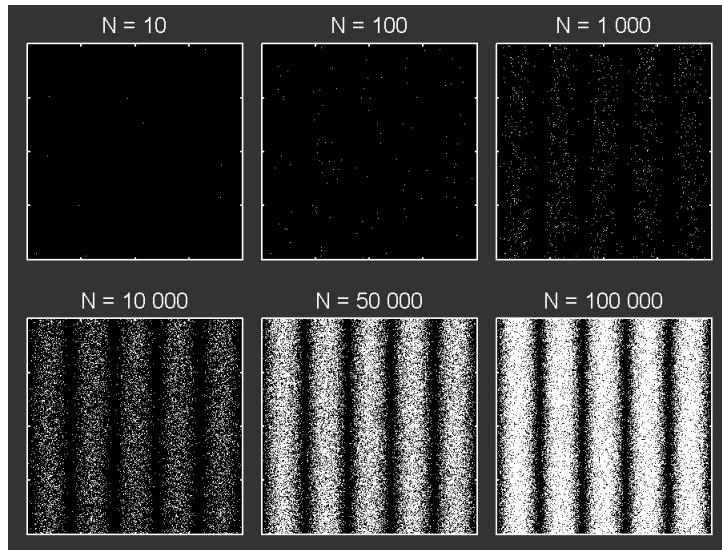


FIGURE 2.3 – Expérience des fentes d’Young menée avec un canon à particules ( $N$  = nombre de particules lancées) [?]

tat, quelque peu inattendu met finalement en évidence le fait qu’une particule quantique adopte un comportement ondulatoire.

L’expérience des fentes d’Young met alors en avant l’impuissance de deux concepts fondamentaux de la physique – celui d’onde et de particule – à rendre compte de la réalité.

Il est donc nécessaire d’abandonner l’idée que chaque objet physique est soit une onde, soit une particule, et admettre que nous avons à faire à d’autres objets proprement quantique, pouvant posséder deux états simultanément.

Si dans certaines expériences, des particules se mettent à manifester des propriétés ondulatoires ou si des ondes lumineuses manifestent des propriétés de corpuscules, c’est en fait que ces deux particules font partie de la même espèce : les quantons.

Le comportement des objets quantiques semblent rassembler simultanément des caractéristiques qui, en termes classiques, sont propres à la fois aux particules et aux ondes. Les nouveaux concepts quantiques que les scientifiques cherchent à construire doivent donc être reliés à ces deux concepts classiques : corpusculaire et ondulatoire. C’est à partir de ce constat que Louis De Broglie utilisera le terme de "dualité onde-corpuscule" pour caractériser le comportement des particules quantiques.

Cependant, expérimentalement, on remarquera plus tard que si l’on place un observateur au niveau des deux fentes, cela oblige la particule à passer par une seule fente et on retombe sur le schéma à deux bandes distinctes. En ajoutant un observateur, on a cassé la dualité qui semblait exister par principe de décohérence <sup>1</sup>.

1. Perte de l’information sur l’état quantique d’un élément.

Ce constat représente d'ailleurs toujours un des plus grand mystère de la physique quantique. Certains physiciens s'émerveillent devant la multitude d'applications que la décohérence semble offrir.

Certaines expériences récentes ont même l'air de montrer que les particules quantiques seraient capables de "voir l'avenir" en anticipant le fait qu'elles risquent d'être observées avant même que l'homme ait effectué un quelconque choix. [?, ?, ?, ?]

## 2.2 Catastrophe ultraviolette

À la fin du XIXème siècle, la physique ne semble plus avoir de secret pour les scientifiques. Mais est-ce vraiment le cas ? Certains phénomènes restent mystérieusement non expliqués par la physique classique, et parmi eux : le rayonnement du corps noir. Un corps noir absorbe ou émet de la lumière, mais il ne la réfléchit pas. Il réémet alors toutes les radiations électromagnétiques qu'il absorbe sous forme de rayonnements thermiques, c'est ce qu'on appelle le rayonnement du corps noir. C'est un ensemble d'expériences menées sur ces corps noirs qui a permis de montrer les limites des fondements de la physique classique.

En effet, selon les théories classiques (notamment la loi du rayonnement de Wien), un corps noir devrait émettre un rayonnement d'une intensité qui tend vers l'infini lorsque la longueur d'onde émise tend vers zéro, c'est à dire dans " l'ultra-violet ". Cependant, les contradictions apportées par les expériences ont amené le physicien Paul Ehrenfest à surnommer ce phénomène de " catastrophe ultraviolette ".

En 1901, en réponse à ce phénomène inexpliqué, Planck introduit une hypothèse révolutionnaire : celle qu'à une fréquence  $\nu$  correspond un quanta d'énergie  $E$ . On peut formuler cette théorie d'après l'équation suivante :

$$E = h\nu$$

avec  $h$  la constante de Planck. On peut illustrer la théorie avec l'exemple du Soleil. On mesure une température d'environ 5700 Kelvin à sa surface mais il reste visible à nos yeux, ce qui veut dire que son intensité n'est pas infinie. Sa théorie permettra de relier celles contradictoires de Wien et de Rayleigh-Jeans. [?, ?, ?, ?, ?]

## 2.3 Effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est également un des phénomènes physique qui, tel la catastrophe ultraviolette, ne parvient pas être expliqué par les théories classiques : une surface métallique émet des électrons lorsqu'elle est frappée par un rayonnement électromagnétique de fréquence assez grande.

Pour chaque métal, il existe un seuil de fréquence minimum en-dessous duquel aucun électron n'est émis et cela quelle que soit l'intensité de l'onde lumineuse incidente. C'est cette observation qui ne peut pas être expliqué par la théorie classique.

En effet, on aurait tendance à penser qu'il suffirait d'utiliser une intensité lumineuse suffisamment élevée pour produire l'effet photoélectrique.

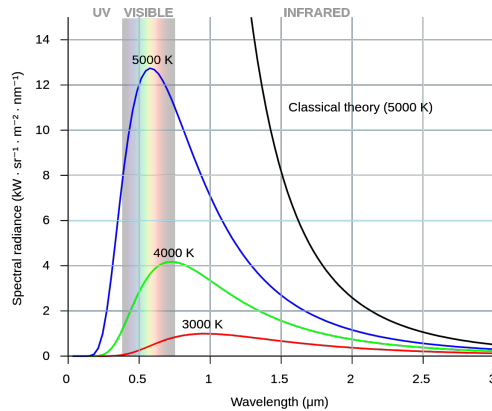


FIGURE 2.4 – Graphique théorique de la longueur d'onde émise par un corps en fonction de sa température [?]

C'est Einstein qui, en 1905, a trouvé une solution permettant de prendre en compte ce problème. Il a supposé que chaque onde électromagnétique de fréquence  $\nu$  est composée de corpuscules : les photons. Ceux-ci transportent des quanta d'énergies  $h\nu$ .

Avec ce concept, le phénomène devient plus simple à comprendre. Les électrons d'un métal sont piégés dans un puits de potentiel, et il faut fournir une énergie  $W$  pour les-en extraire.

Lorsqu'un photon est absorbé par la surface métallique, son énergie  $h\nu$  sert à extraire un électron de ce puits et à lui communiquer une énergie cinétique  $E$ .

On obtient l'équation suivante :

$$h\nu = E + W$$

On peut donc remarquer un retour de cet aspect de dualité avec l'importance de la fréquence de la longueur d'onde (aspect ondulatoire) et l'énergie spécifique apporté par les photons (aspect corpusculaire). On sait également que les électrons sont des quantons. [?]

## Chapitre 3

# Modèle de Bohr et Principe d'indétermination d'Heisenberg

## 3.1 Modèles historiques de l'atome

Au cours de l'histoire, l'atome a fasciné de nombreux intellectuels et scientifiques du monde entier.

Suscitant de nombreuses curiosités, l'atome représentait la source de toute matière et de vie dans l'univers. De ce fait, il est considéré à la fois comme l'une des choses les plus fascinantes mais aussi des plus complexes qui le compose. C'est pourquoi, plusieurs scientifiques se sont penchés sur sa représentation et ont essayé d'en proposer des modèles. Dans cette partie, nous pourrions évoquer quelques modèles, qui ont révolutionné la vision que l'on donnait de l'atome.<sup>1</sup>

### 3.1.1 Modèle antique

Dès le Vème siècle av. JC, le concept de particules constituant la matière est connu. C'est Démocrite qui introduit le terme atome (du grec *atomos* qui signifie insécable) et le définit comme une particule que l'on ne peut couper, invisible à l'œil nu et entourée de vide.[?, ?]

### 3.1.2 Modèle de Dalton

En 1803, John Dalton reprend l'idée de Démocrite et imagine les atomes comme des sphères pleines et que chaque élément de matière est représenté par un atome différent. Ce même physicien est à l'origine du tableau périodique des éléments moderne. [?, ?]

### 3.1.3 Modèle de Thomson

En 1897, le physicien anglais J.J.Thomson découvre, à l'issu d'une expérience, que les atomes possèdent des charges négatives. De ces expériences, il en découle la découverte des électrons, qu'il dénomme "corpuscules". Il en déduit que l'atome doit être constitué d'une autre source de charges positives afin de conserver sa stabilité. Il en conclut donc que les atomes correspondent à des sphères remplies d'une substance électriquement positive et injecté d'électrons négatifs, tel des "raisins dans un cake". [?, ?]

---

1. Voir annexe A.2



### 3.1.4 Modèle de Rutherford

Le physicien et chimiste Néo-zélandais Ernest Rutherford apporte en 1912 deux principaux compléments au modèle déjà existant. Il avance que l'atome est principalement constitué de vide et possède un noyau de charge positive.

Afin de montrer ces résultats très importants, il réalise une expérience aujourd'hui connue sous le nom de " l'expérience de la feuille d'or de Rutherford ". Il fait projeter des particules alpha à travers une feuille d'or et observe l'impact de ces particules sur un détecteur placé tout autour de la feuille. Il observe que la majeure partie des particules n'a pas été déviée de sa trajectoire initiale et n'a rencontré aucun obstacle, ce qui lui permet de conjecturer que l'atome est principalement constitué de vide. Après projection, Rutherford observe toutefois quelques impacts fortement déviés par cette feuille d'or : il en déduit donc que le noyau, chargé positivement, est à l'origine de ces déviations.

Par la suite, il montrera que les électrons gravitent autour du noyau sous l'effet d'une force électrique en décrivant des orbites képlériennes, résultant en un modèle de l'atome encore bien connu aujourd'hui. [?, ?]

## 3.2 Modèle révolutionnaire de Bohr

Le physicien danois Niels Bohr étudie aux côtés de Thomson à Cambridge, où il se penche très tôt sur le modèle de l'atome et cherche à améliorer celui de son confrère qui, à ses yeux, n'est pas complètement satisfaisant.

Dès 1913, Bohr propose une théorie nouvelle du modèle atomique, version améliorée de celle de Rutherford, proposée en 1912, qui présente des limites évidentes.

Pour rappel, le modèle de Rutherford propose que les électrons tournent autour d'un noyau chargé positivement grâce à une force électrique.

Bohr s'inspire grandement de ce modèle. Cependant, d'après les expériences de l'époque, on sait que les électrons perdent de l'énergie en rayonnant, ce qui implique une réduction de leur vitesse.

D'après le modèle képlérien, les électrons devraient se rapprocher du noyau jusqu'à atteindre l'effondrement. Or c'est impossible car cela signifierait que l'atome n'est pas stable. Ainsi Bohr propose dans ses postulats quantiques de combiner la théorie des quanta de Planck au modèle de Rutherford.

Les postulats sont les suivants : les électrons chargés négativement gravitent autour du noyau chargé positivement sur des couches stationnaires circulaires. Ils peuvent également passer d'une couche à l'autre en émettant, ou absorbant, un photon d'énergie lumineuse, ce qui est appelé " saut d'énergie ".

De plus, quand les électrons sont sur une orbite, ils ne peuvent pas émettre de rayonnement. Ce modèle est en contradiction avec les lois de la physique connue, cependant il fonctionne parfaitement pour décrire le comportement d'un atome à un unique électron, c'est à dire des atomes hydrogène ou hydrogénoïdes ( $Z$  protons et un électron).

C'est d'ailleurs là tout l'intérêt du modèle de Bohr : en effet, bien qu'il ne corresponde pas fidèlement à la réalité d'un point de vue classique, il permet d'expliquer des phénomènes observés expérimentalement, comme l'énergie d'ionisation

de l'hydrogène et l'allure de ses spectres d'émission et d'absorption. À partir de son modèle, Bohr parvient à montrer que les rayons des orbites sur lesquelles gravitent les électrons sont quantifiés. C'est également le cas pour les niveaux d'énergies associés.

En introduisant un troisième postulat qui stipule que la norme du moment cinétique est quantifiée, Bohr parvient à montrer que le rayon s'exprime selon la formule suivante

$$r_n = n^2 \times a_0$$

avec  $n$  un nombre entier positif et  $a_0 = \frac{h^2 \epsilon_0}{Ze^2 \pi m} \simeq 53 \text{ pm}^2$  appelé rayon de Bohr

De ces recherches, Bohr met en évidence la notion de niveau d'énergie, qu'il formule de la manière suivante

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

avec  $E_1 = -13,6 \text{ eV}$  définissant le niveau d'énergie fondamentale décrit par Bohr.

De ce modèle révolutionnaire, on en déduit que les valeurs des rayons des orbites et des niveaux d'énergie associés sont ainsi quantifiées.

C'est ici qu'intervient la théorie des quanta avancée par Max Planck. De l'ensemble de ces résultats, on en conclut que les électrons gravitent seulement sur des orbites de rayon bien défini autour de leur noyau.

Lorsque  $n = 1$ , l'orbite atomique correspond à la plus petite possible, c'est l'état fondamental.

Il est important de rappeler que cela est uniquement valable dans le modèle de Bohr pour les atomes hydrogénoïdes.

Grâce à cette quantification des niveaux d'énergie, on peut déduire un diagramme d'énergie, très utile pour calculer l'apport d'énergie nécessaire pour que l'électron passe d'un niveau (ou une orbite) à un autre. Par exemple, on trouve que l'énergie d'ionisation de l'hydrogène est égale à  $13,6 \text{ eV}$  en évaluant la différence entre un niveau d'énergie infini  $n = \infty$  (où on aurait  $E_\infty = 0 \text{ eV}$ ) avec l'état fondamental  $n = 1$ . De plus, l'ensemble de ces résultats coïncident avec les résultats expérimentaux historiques.

Le modèle de Bohr parvient également à expliquer les spectres (émission et absorption) de l'hydrogène, qui sont composés de 4 raies.

Pour que l'atome reste stable, les électrons excités doivent revenir à leur état fondamental. Il y a donc émission d'un photon pour passer d'une orbite à une autre, de niveau d'énergie à niveau d'énergie. L'énergie de ce photon peut être calculée, et permet de déterminer sa longueur d'onde.

On sait d'après les modèles de Planck et de Bohr, qu'on peut définir l'énergie portée par un photon selon les équations suivantes

$$\begin{cases} E_{\text{photon}} = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \\ E_{\text{photon}} = E_j - E_i \end{cases}$$

avec  $E_i$  et  $E_j$  respectivement les niveaux d'énergie inférieur et supérieur.

---

2. Voir Annexe A.1

On obtient finalement une nouvelle expression

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{j^2} \right)$$

avec  $R = \frac{-E1}{hc} = 1,097107 \text{ m}^{-1}$  appelée constante de Rydberg.

Grâce à cette formule, on peut calculer les longueurs d'onde associées aux photons émis.

Par exemple, pour  $j = 3$  et  $i = 2$ , on trouve  $\lambda = 656 \text{ nm}$  ce qui correspond à la raie rouge du spectre de l'hydrogène.

Pourtant, seules 4 raies sont dans le domaine visible ; pour les trouver, on utilise la série de Balmer.

En utilisant d'autres séries comme celle de Lyman, les longueurs d'onde des photons associés aux sauts d'énergie se situeraient dans les ultraviolets. Ainsi, le modèle de Bohr, bien qu'il ne soit valable que pour les atomes à un électron, permet d'expliquer plusieurs phénomènes observés de façon expérimentale. Pourtant, ce modèle implique qu'il est possible de connaître la position et la vitesse de l'électron à un même instant ; or le principe d'Heisenberg va montrer qu'il est absurde de vouloir les connaître, mettant en avant les limites du modèle de Bohr. [?, ?, ?, ?, ?, ?]

### 3.3 Limite du modèle de Bohr et principe d'indétermination d'Heisenberg

En 1925, âgé de 23 ans, le physicien et mathématicien Allemand, Werner Heisenberg publie sa théorie de la mécanique quantique pour laquelle il reçut un prix Nobel de physique 7 ans plus tard, en 1932. [?, ?, ?, ?, ?]

Cette théorie, basée uniquement sur des observations, lui permet d'affirmer que le modèle de Bohr de l'atome, composé d'électrons gravitant sur des orbites autour du noyau, n'est pas forcément pertinent.

En effet, sachant qu'en mécanique quantique, il est impossible de déterminer expérimentalement à la fois la position, la trajectoire ou la vitesse dans l'espace à un instant donné d'une particule, ces observations vont à l'encontre du modèle "classique" de Bohr.

Ces réflexions le pousseront en 1927 à établir un principe, initialement et maladroitement appelé "principe d'incertitude" puis corrigé, afin de devenir "Principe d'indétermination de Heisenberg".

Les travaux d'Heisenberg sur ce principe d'indétermination, le mènent à affirmer que la position et la quantité de mouvement d'une particule contiennent nécessairement des imprécisions, dont le produit est supérieur à la constante de Planck. Il résume d'ailleurs ce principe d'après l'équation suivante :

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Grâce à cette équation, Heisenberg souhaitait montrer les limites de l'application des modèles de la mécanique classique visant à décrire une position et une vitesse exacte à tout corps en mouvement.

Souvent mal interprété, on considère que ce principe d'incertitude nous dit que "la physique quantique ne nous permet pas de mesurer avec une précision arbitraire la vitesse et la position d'une particule". De cette phrase, on en déduit que la particule en question possède une vitesse ainsi qu'une position bien précise mais que la physique quantique ne nous permet pas de les connaître avec exactitude.

Ce contre sens impliquerait que la physique quantique serait une limite à notre connaissance de la réalité des choses. Seulement, la réalité en est tout autrement. Le principe d'indétermination, énoncé initialement par Heisenberg, reflète simplement les limites de l'application des modèles classiques à l'échelle de l'atome.

Pour résumer, la mécanique classique envisageait deux types d'éléments : les corpuscules, sorte de grains de matière, et les ondes, objets non-localisés dans l'espace qui se propagent. D'après les précédents travaux sur la dualité onde-corpuscule, la mécanique quantique nous montre qu'une particule quantique ne peut pas être considérée uniquement comme un corpuscule, ni comme une onde mais comme une association de ces deux états.

De ce fait, si on souhaite étudier des particules quantiques, comme des électrons autour d'un noyau, il est primordial de considérer les hypothèses de chaque modèle. On ne peut donc considérer que les particules quantiques sont des objets possédant une vitesse et une position bien déterminée.

Pour conclure, le principe d'indétermination d'Heisenberg justifie donc que si nous ne pouvons pas mesurer une particule avec certitude, ce n'est pas par limite des outils de mesure ou par principe de la physique quantique, mais bien parce que les propriétés qu'on lui pose ne sont pas vérifiées.

Des travaux de Heisenberg, on en déduit que le modèle, relativement classique, que l'on donnait à l'atome en le décrivant comme des particules corpusculaires gravitant autour d'un noyau, telles les planètes autour de leur étoile, n'est pas vérifié. Ce constat montre les limites du modèle de Bohr.

Grâce aux travaux d'Heisenberg sur le modèle atomique, on estime aujourd'hui que l'atome se compose d'un noyau central, entouré d'électrons en mouvement. On en conclut donc que ces électrons ne possèdent pas de trajectoire bien définie mais on peut estimer leur probabilité de présence dans une certaine région de l'espace.  
[?, ?, ?, ?, ?]

## Chapitre 4

# La superposition quantique et équation de Schrödinger

### 4.1 Principes de superposition et d'indéterminisme

En physique quantique, un état peut posséder plusieurs valeurs pour un même paramètre observé (la position, le spin, la quantité de mouvement, etc). On appelle cela le principe de la superposition des états. Pour expliquer ce phénomène simplement, nous pouvons considérer un état constitué des positions A et B. Selon ce principe, la particule n'est ni à un des deux endroits, ni aux deux en même temps. Elle n'a juste pas de position, car le principe de position n'a pas vraiment de sens en physique quantique. C'est lorsque l'on va observer la particule qu'elle va prendre l'une des deux positions. Mais dans la réalité, un état peut être fait de plusieurs milliers de valeurs. On peut expliquer cela par le fait qu'un système quantique, tel qu'une particule, est un vecteur d'un espace vectoriel de Hilbert.

Ces espaces vectoriels, tirant leur nom du mathématicien allemand David Hilbert (1862 - 1943), sont des espaces vectoriels complexes de dimension infinie, munis du produit scalaire hermitien. Ils permettent de manipuler des vecteurs de dimension infinie à valeur complexe, notamment les vecteurs d'état. [?, ?]

Ce vecteur représentant une particule se décompose en plusieurs combinaisons linéaires de vecteurs. Ainsi, l'état de la particule est la somme d'un nombre de vecteurs qui correspondent chacun à une valeur de l'espace. Cependant, on ne peut pas observer tous les états possibles de superposition du système quantique. En effet, au moment d'observer la particule ou de mesurer un de ses paramètres, celle-ci prend un état quantique. On peut dire que l'observateur interfère avec la particule et la pousse à prendre un état quantique. Ceci soulève deux aspects de la physique quantique :

Tout d'abord, le principe de superposition.

Ce principe explique qu'on ne peut pas savoir dans quel état quantique va être la particule lors d'une mesure, on parle ainsi de probabilité de présence. Elle représente la probabilité qu'une particule se situe à un certain endroit dans un certain état quantique. Certains états ont une probabilité plus élevée que d'autres d'exister. Mathématiquement, cela revient à associer un coefficient à chaque état. Nous pouvons ainsi définir une fonction décrivant la probabilité de trouver une particule dans un certain état. Ainsi, la particule n'est plus un corpuscule localisé mais un champ de probabilité qui est dépendant du temps. On peut donc décrire la particule comme une onde et non un objet ponctuel. [?, ?]

Deuxièmement, il y a le principe d'indéterminisme, dont nous avons déjà parlé dans la troisième partie. En effet, l'état que va choisir la particule dépend des

moments et des proportions des états.

En faisant une première mesure, on force la particule à choisir un état quantique, on peut dire que le fait de mesurer un paramètre change l'état quantique. Cet état est appelé état projeté ou réduit. Une première mesure lève l'indéterminisme, donc si on mesure une deuxième fois le même paramètre, il n'y a plus d'indéterminisme. [?, ?]

## 4.2 Expérience de pensée : Le chat de Schrödinger

Après ces recherches, nous comprenons qu'il est dur de concilier la physique quantique et la physique classique. C'est ce qu'à voulu montrer le physicien autrichien Erwin Schrödinger à travers ses expériences de pensée, dont celle, bien connue, du chat de Schrödinger.

Durant ses années d'enseignement à l'université de Zürich, en Suisse, il porte ses recherches sur les théories de l'atomistique. En s'appuyant sur les travaux de Planck, Bohr ou encore Einstein, il publie ses premiers travaux sur la physique de l'atome au début des années 1920. [?]

Les travaux initiaux de Schrödinger visaient à faire l'analogie entre les relations fondamentales de la dynamique de la physique classique (dynamique de Newton), et les applications à la physique quantique.

Comme évoqué précédemment, Erwin Schrödinger proposa au cours de sa carrière de nombreuses expériences de pensée visant principalement à vulgariser la physique quantique, une science principalement contre-intuitive et dont la plupart des résultats restent peu imaginables. L'une de ses plus importantes expériences de pensée fut celle du "Chat de Schrödinger" qu'il a proposé en 1935. [?, ?]

Voici le principe de cette expérience : on introduit un chat dans une boîte contenant un dispositif visant à le tuer lorsque le dispositif observe la désintégration d'un atome d'un corps radioactif. Pour simuler cette expérience, Schrödinger imagine un dispositif de détection composé par exemple d'un détecteur de radioactivité (de type Geiger<sup>1</sup>) relié à un interrupteur, qui une fois activé lâche une masse venant éclater une fiole de poison volatil mortel.

Le principe fondamental de son expérience réside dans le fait qu'en physique classique, les probabilités indiquent qu'une désintégration a une chance sur deux d'avoir lieu au bout d'une minute, ce qui voudrait dire qu'au bout d'une minute, le chat a potentiellement une chance sur deux de mourir.

Cependant, d'un point de vue de la mécanique quantique, tant que l'observation n'est pas faite directement, on ne peut pas prédire l'état de l'atome (désintégré ou intact). Ceci nous amène à penser que ne sachant pas précisément si le chat est mort ou vivant, d'un point de vue quantique, il serait dans les deux états simultanément.

De la même manière qu'en physique quantique, la dualité d'état du chat, comme de la particule, est détruite dès lors que l'on parvient à observer le comportement des corps à l'intérieur de la boîte.

De par cette expérience de pensée (l'expérience ne fut jamais réalisée en réalité), Schrödinger souhaitait montrer la complexité et la non-rationalité des raison-

---

1. outil servant à mesurer des rayonnement de ionisation.

nements à l'échelle des atomes.

En effet, bien que cette situation souligne judicieusement l'étrangeté de la mécanique quantique, sans pour autant la réfuter, le but est surtout de marquer les esprits : si la théorie quantique autorise un chat à être à la fois mort et vivant, un choix se pose à nous : Soit on considère que les modèles quantiques sont erronés, soit il est primordial de reconsidérer Au cours de la réalisation de ce projet, nous avons pu apprendre de nombreuses choses, que ce soit d'un point de vue statistique grâce à l'ensemble des modèles utilisés et appliqué lors de sa réalisation ou d'un point de vue purement culturelle de par l'ensemble des recherches et des constats réalisé dans ce projet.

Tout au long de se rapport

Nous avons pu découvrir certains modèles classiques. [?, ?, ?]

### 4.3 Équation de Schrödinger

Comme on l'a vu dans la partie "dualité onde-corpuscule", la mécanique quantique peut parfois prendre un aspect corpusculaire, et d'autres fois un aspect ondulatoire. Finalement, une particule n'est ni une onde, ni un corpuscule; selon les conditions dans lesquelles elle se trouve, elle prend l'un ou l'autre de ces deux comportements.

En 1747, le physicien français Jean le Rond d'Alembert énonçait dans le domaine de l'électromagnétisme la première équation d'onde connue sous le nom d'équation de d'Alembert, qui permet de décrire le comportement d'une onde plane :

$$\Delta\psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}$$

Des dizaines d'années après, en 1926, Schrödinger a établi pour la mécanique quantique une équation analogue à celle d'Alembert, en faisant notamment le parallèle entre l'équation dite de l'eikonale<sup>2</sup> en optique ondulatoire et les équations de Hamilton-Jacobi<sup>3</sup> en mécanique classique.

Cette équation existe sous plusieurs formes, mais on peut exprimer comme suit " l'équation de Schrödinger dépendante du temps " :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\psi$$

Cette équation, très importante en mécanique quantique, permet de décrire l'évolution d'une particule dans le temps. Pour résumer, elle correspond à l'analogue quantique du principe fondamental de la dynamique newtonienne en mécanique classique. [?, ?, ?, ?]

---

2. Équation fondamentale qui régit le trajet de la lumière dans un milieu physique

3. Équations permettant de simplifier la résolution d'équations de mouvement

## Chapitre 5

# Formalisme de Dirac

### 5.1 Nécessité d'élaborer un formalisme

Dans les années 1930, l'essor des découvertes quantiques ont plus que révolutionné le monde de la physique. Ces découvertes impliquent la mise en place de nouveaux modèles et de nouvelles théories qui engendrent donc l'apparition de théorèmes mathématiques et physiques.

Grâce à la multitude de travaux qui émergent à cette époque, on doit notamment la mise en équation des phénomènes ondulatoires d'après l'équation d'onde de Schrödinger. Les fonctions d'ondes, associées à l'équation de Schrödinger évoquée précédemment, possèdent des propriétés et des notations bien particulières. Avec l'ensemble des notations et des équations de la physique quantique qui voient le jour, il devient nécessaire de mettre en place un formalisme mathématique, qui viserait à codifier la totalité des modèles mathématiques utilisés par les physiciens et théoriciens quantiques.

On doit d'ailleurs le formalisme actuel aux travaux du grand physicien et mathématicien Paul Dirac, avec la participation conjointe de Erwin Schrödinger. [?, ?]

### 5.2 Travaux de Paul Dirac sur l'introduction d'un formalisme mathématique

Physicien et mathématicien britannique de renom du XXème siècle, Paul Dirac est l'un des père fondateur de la physique quantique telle qu'on l'a connaît aujourd'hui. En effet, selon Dirac, "Toute loi physique doit être empreinte de beauté mathématique". Cette citation, pouvant paraître anodine pour n'importe quel physicien, représente pourtant la majorité du travail scientifique de Dirac.

Tout au long de sa carrière, Dirac a cherché à mettre en équation différents problèmes physiques comme notamment le comportement des ondes et des particules. Cela lui valut d'ailleurs un prix Nobel conjointement avec Erwin Schrödinger en 1933 pour leur "découverte de formes nouvelles et utiles de la théorie atomique".

Dans ces travaux, Dirac a proposé une équation visant à décrire le comportement des particules élémentaires de "spins demi-entiers", comme les électrons par exemple. Cette équation visait notamment à rendre applicable l'équation de Schrödinger aux principes de la relativité restreinte. On peut exprimer cette équation de Dirac de la manière suivante

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t) = \left( mc^2 \alpha_0 - i\hbar c \sum_{j=1}^3 \alpha_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) \psi(x, t)$$



avec ici  $i$  : nombre complexe  
 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  : constante de Planck réduite  
 $m$  : masse de la particule  
 $c$  : vitesse de la lumière dans le vide  
 $(x, t)$  : coordonnées spatio-temporelles  
 $\psi(x, t)$  : fonction d'onde à 4 composantes (en adéquation avec la théorie de la relativité restreinte)  
 $\alpha_j$ , pour  $j \in \{0, 3\}$  : matrices de Dirac (matrice de dimension  $4 \times 4$  agissant sur le spin des particules)

Les travaux de Dirac sur cette équation, ont par ailleurs permis de prouver l'existence de l'antiparticule, c'est à dire de particules de charges et nombres quantiques opposés à celle de l'électron.

Cette particule théorisée par Dirac fut d'ailleurs vérifiée expérimentalement en 1932 par le physicien Carl David Anderson qui fit la découverte du positron, antiparticule de l'électron, dans une chambre à brouillard en étudiant l'interaction des photons.

Grâce à la motivation de Dirac à trouver un moyen de mettre en équation les problèmes physiques, il propose un modèle dans l'objectif de formaliser la physique quantique, en pleine effervescence à cette époque. Afin de clarifier et faciliter l'expression des modèles quantiques, Dirac propose en 1939, différentes notations et introduit notamment la notion de "Bra" et de "Ket". [?, ?, ?, ?]

### 5.3 Description et application de ce formalisme

En mécanique quantique, les différents états quantiques d'un système peuvent être représentés par des vecteurs dans un espace complexe de Hilbert.

De ce fait, Dirac a voulu trouver un modèle pour faciliter la représentation des objets quantiques tout en adéquation avec les propriétés d'algèbre linéaire que ces objets doivent vérifier.

Afin de comprendre l'importance du formalisme de Dirac, rappelons que selon les postulats de la mécanique quantique, les fonctions d'onde  $\psi$  dépendent de coordonnées spatio-temporelles  $(x, t)$  et possiblement d'autres paramètres quantiques  $\sigma$  (spins, moments magnétiques, ...).[?]

Nous savons également que ces fonctions d'ondes  $\psi(t, x, \sigma)$  sont également solutions de l'équation de Schrödinger et qu'elles sont normalisées de sorte que

$$\int \psi^*(t, x, \sigma)\psi(t, x, \sigma)dx = 1$$

avec  $*$  : l'opérateur adjoint d'une matrice (ou d'un vecteur), c'est à dire la transposé de son conjugué complexe

De manière générale, on peut déterminer la valeur d'une grandeur physique  $A$  d'après la forme suivante :

$$\int \psi^*(t, x, \sigma)A(x, \partial_x, \sigma)\psi(t, x, \sigma)dx$$

Dans un souci de simplification de l'ensemble des calculs utilisés par la physique quantique, Dirac se propose de développer un formalisme mathématique complet, basé sur les notions de « Bra » et de « Ket ». [?, ?]

### 5.3.1 Notion de « Bra » et de « Ket »

Dans cette partie, nous considérerons  $E_n$  un espace vectoriel de dimension  $n$ , finie ou non, associé à un espace complexe de Hilbert. [?, ?, ?, ?]

#### 5.3.1.1 Ket

Selon le modèle de Dirac, on peut définir un vecteur  $x \in E_n$  à  $n$  composantes. On peut d'ailleurs exprimer ces coordonnées  $x_i$  avec  $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$  que l'on peut représenter sous forme de matrice colonne

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Ce vecteur droit que l'on appelle « ket », noté  $|x\rangle$ , permettent de représenter en physique quantique les divers états quantiques d'un système. On peut par exemple aisément représenter les différents états dans lesquels se trouvent un électron  $\alpha$  d'un atome d'hydrogène à un moment donné à l'aide de vecteurs d'états « ket », que l'on pourrait noter  $|\alpha_i\rangle$  (avec  $\alpha_i$  l'ensemble des états possibles que peut prendre l'électron).

De plus, si un état quantique  $|\psi\rangle$  est représenté selon différents nombres quantiques  $n_1, \dots, n_k$ , on peut alors représenter cet état sous la forme d'un « ket » exprimé par :

$$|\psi\rangle = |n_1, \dots, n_k\rangle$$

Cette notion de « ket » prend tout son sens lorsque l'on applique ce formalisme à la superposition quantique.

En effet, une superposition d'états quantiques peut être, par définition, représenté par une combinaison linéaire d'états propres.

Pour reprendre l'exemple de l'électron d'un atome d'hydrogène, nous pourrions représenter son état  $|\psi\rangle$ , défini par la superposition quantique des états  $|\psi_1\rangle$  et  $|\psi_2\rangle$  respectivement liés aux probabilités  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ , comme une combinaison linéaire de ces deux états tels que

$$|\psi\rangle = \alpha_1 |\psi_1\rangle + \alpha_2 |\psi_2\rangle$$

De plus, par propriété, si  $|\psi_1\rangle$  et  $|\psi_2\rangle$  représentent des « ket » et  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  des valeurs complexes, alors par linéarité des vecteurs,  $|\psi\rangle$  définit bien un « ket ». [?, ?, ?, ?]

### 5.3.1.2 Bra

De manière conjointe, on peut définir également sa matrice ligne adjointe :

$$[x_1^* \quad x_2^* \quad \dots \quad x_n^*]$$

où les  $x_i^*$  représentent les complexes conjugués des  $x_i$ . On appellera ce vecteur gauche « Bra », noté  $\langle x |$ . [?, ?, ?, ?]

## 5.3.2 Opérations sur les vecteurs

Afin de manipuler l'ensemble de ces vecteurs d'états, le formalisme de Dirac s'accompagne de certains opérateurs mathématiques essentiels, visant à simplifier l'écriture de nombreuses équations complexes.

### 5.3.2.1 Sommes et Produits

Soit  $\lambda \in \mathbb{C}$  et  $x$  et  $y$  des vecteurs quantiques.

Il est possible de sommer des états quantiques afin de définir d'autres états.

De plus, par propriétés, si  $|\psi_1\rangle$  et  $|\psi_2\rangle$  représentent des « ket » et  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  des valeurs complexes, alors par linéarité des vecteurs, l'état  $|\psi\rangle$  défini tel que

$$|\psi\rangle = \alpha_1 |\psi_1\rangle + \alpha_2 |\psi_2\rangle$$

représente bien un « ket ».

De plus, par propriété des « bra », si  $|y\rangle = \lambda|x\rangle$  alors par conjugué, on a  $\langle y| = \lambda^* \langle x|$ . [?, ?, ?, ?]

### 5.3.2.2 Produit Scalaire

La plupart des calculs quantiques nécessite également de déterminer le produit scalaire complexe, ou hermitien, de fonctions d'ondes.

Grâce au formalisme de Dirac, on peut exprimer ce produit scalaire de la manière suivante :

$$\langle x|y\rangle = [x_1^* \quad x_2^* \quad \dots \quad x_n^*] \bullet \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \sum_i x_i^* y_i$$

Par définition des propriétés des espaces de Hilbert, on sait que ce produit scalaire complexe est sesquilinéaire (ou semi-linéaire à gauche et linéaire à droite), c'est à dire que

$$\begin{cases} \langle \psi | \alpha_1 \cdot \psi_1 + \alpha_2 \cdot \psi_2 \rangle = \alpha_1 \langle \psi | \psi_1 \rangle + \alpha_2 \langle \psi | \psi_2 \rangle & \text{(produit scalaire linéaire à droite)} \\ \langle \alpha_1 \cdot \psi_1 + \alpha_2 \cdot \psi_2 | \psi \rangle = \alpha_1^* \langle \psi_1 | \psi \rangle + \alpha_2^* \langle \psi_2 | \psi \rangle & \text{(produit scalaire semi-linéaire à gauche)} \end{cases}$$

On peut également noter que ce produit scalaire complexe vérifie la symétrie hermitienne tel que

$$\langle y|x \rangle^* = \langle x|y \rangle$$

Par définition du produit scalaire, on peut également définir la norme d'un vecteur d'état suivant l'équation :

$$||\psi\rangle|^2 = \langle \psi|\psi \rangle$$

L'ensemble de ces notations et opérateurs mathématiques posés par Dirac dans sa proposition de formalisme permettent d'exprimer et de résoudre de manière efficace l'ensemble des équations de la physique quantique.

Suffisamment complet et vérifiant l'ensemble des propriétés mathématiques que ces variables doivent vérifier, ce formalisme a permis d'unifier et de standardiser l'écriture des modèles quantiques afin de faciliter les calculs. On notera par ailleurs que ce formalisme correspond toujours au formalisme utilisé actuellement par la physique quantique. [?, ?, ?, ?]

## Chapitre 6

# Laser et effet tunnel

### 6.1 Effet tunnel

L'effet tunnel décrit un phénomène quantique très particulier : le passage d'une particule au travers d'une barrière de potentiel ( $V_0$  étant l'énergie minimale requise pour franchir la barrière).

En effet, selon la physique classique, le mouvement d'un corpuscule dans ce potentiel est simple. Si son énergie  $E$  est supérieure à la hauteur  $V_0$  de la barrière, il la franchit - la vitesse du mouvement est juste plus lente pendant la traversée (puisque son énergie cinétique est diminuée de  $V_0$ ). Si, par contre, l'énergie est plus basse que  $V_0$ , la particule ne peut franchir la barrière et se retrouve réfléchi.

Or, en physique quantique, on a pu observer que même si une particule (qui possède des caractéristiques ondulatoires et corpusculaires) possède une énergie inférieure à  $V_0$ , celle-ci va pénétrer sous la marche de potentiel, une zone qui serait strictement interdite à un corpuscule classique, et ressortir de l'autre côté si la largeur de la barrière n'est pas trop grande. C'est l'effet tunnel. De plus, nous savons que la probabilité de présence de la particule va s'atténuer rapidement dans cette zone.

Ce point de vue nous montre qu'il est physiquement possible qu'une particule passe au travers d'une barrière de potentiel même si son énergie est inférieure à la hauteur de la barrière de potentiel. [?]

### 6.2 Laser

En cherchant une application de la physique quantique dans la vie de tous les jours, on peut facilement penser au laser. On trouve cette invention partout : des films de science-fiction à l'industrie pour la découpe ou encore en médecine, en passant par le lecteur de CD, le laser est aujourd'hui bien connu du grand public, sans que son côté quantique ne le soit vraiment.

Alors qu'est-ce qu'un laser ?

On estime la conception du premier laser en 1960 par Théodore Maiman en Californie, qui concrétise ainsi l'idée des physiciens théoriques Arthur Schawlow et de Charles Townes. [?]

Il existe de nos jours plusieurs types de lasers, mais le point de vue quantique qu'il faut adopter pour en comprendre le fonctionnement est le même : celui selon lequel à une fréquence  $\nu$  correspond un quanta d'énergie  $h\nu$ . Au sein d'un laser se trouve un milieu dit "amplificateur", où se situe un nuage d'atomes pour la plupart dans un état excité.

Naturellement, ces atomes vont chercher à retrouver leur état stable en émettant

une particule porteuse de l'énergie "perdue" de l'atome : un photon. Ce phénomène peut être spontané (appelé alors émission spontanée), mais le photon émis partira dans ce cas dans une direction aléatoire. Dans le cas des lasers, on souhaite obtenir une lumière dirigée dans une direction précise (faisceau) : on va donc plutôt compter sur l'émission dite stimulée.

Lorsqu'un atome excité est percuté par un photon d'énergie  $h\nu$ , la collision va provoquer le retour à l'état stable de celui-ci. Dans ce cas, on obtient deux photons suite à la collision : celui source de l'impact, et celui émis par l'atome retournant dans son état stable. Pour un photon entrant en collision avec un atome excité, on obtient deux photons de même énergie et lancés dans la même direction. Afin d'amplifier encore ce phénomène, on place parallèlement au sein du laser deux miroirs.

En choisissant pour l'un des miroirs un miroir non totalement réfléchissant, une partie de la lumière entrant en contact avec celui-ci va sortir du laser : c'est le faisceau laser. La grande variété de lasers disponibles aujourd'hui vient des différents milieux amplificateurs utilisés au sein des lasers, ainsi que des techniques utilisées pour exciter les atomes (décharges électriques, lampe, etc.). [?, ?]

## Chapitre 7

# Applications modernes de la physique quantique

La physique quantique ne s'arrête pas qu'à des modèles purement théoriques, mais permet notamment de faire avancer la science de demain.

## 7.1 Laser et atomes froids

Grâce aux avancées technologiques des lasers, l'une des applications majeures à la physique quantique consiste au refroidissement des atomes.

On sait que plus un atome est agité, plus sa température est élevée. Afin de le désexciter, il doit donc réduire au maximum sa vitesse.

Il faut donc exercer sur les atomes une force contraire à leur vitesse.

Les photons du laser sont tous dotés d'une quantité de mouvement et lorsqu'un des photons entre en collision avec un atome, celui-ci recule dans le sens de propagation de l'onde incidente du laser tout en conservant sa quantité de matière. L'atome se désexcite ensuite par émission spontanée et recule à nouveau mais cette fois dans une direction aléatoire.

Afin de mesurer l'importance de ce phénomène, on introduit une vitesse caractéristique, dite vitesse de recul. Elle représente la vitesse qu'acquiert un atome initialement au repos par absorption ou émission d'un photon. La vitesse de recul peut représenter la force contraire à la vitesse.

Le refroidissement des atomes a permis de mettre en œuvre de nouvelles expériences auparavant non réalisables tels que l'interférence des ondes de matière. On peut également évoquer l'exemple très actuel des horloges atomiques, connus pour leur extrême précision, dont le fonctionnement utilise la lenteur des atomes froids. [?]

## 7.2 Supraconductivité et trains quantiques

Découverte en 1911, la supraconductivité est un phénomène quantique aux propriétés très intéressantes pour le développement des nouvelles technologies.

Dans un matériau conducteur, les électrons produisant le courant subissent des chocs entre eux, ce qui conduit à un rejet d'énergie thermique (effet Joule) : c'est la résistance électrique.

Au contraire, un matériau supraconducteur (comme le plomb ou le mercure), quand il est porté à la température dite critique (proche de 0 Kelvin, soit  $-273^{\circ}\text{C}$ ), ne subit plus aucune résistance électrique.

Les électrons s'associent par paires appelées paires de Cooper et forment alors une unique onde quantique appelée condensat. Toutes les paires adoptent la même

phase et la même énergie. C'est alors que la résistance électrique disparaît.

Cette théorie a été proposée par Bardeen, Cooper et Schrieffer en 1957, pour laquelle ils obtiendront le prix nobel de physique en 1972.

Le supraconducteur acquiert alors des propriétés incroyables, comme la capacité de faire léviter des aimants. À basse température, le condensat n'est pas perturbable et n'a pas d'autre moyen que de repousser tout champ magnétique extérieur, comme celui d'un aimant, ce qui mène à la lévitation de ce dernier.

Le champ magnétique total au sein du supraconducteur est nul grâce à l'apparition spontanée de courants induits à sa surface. Ces courants sont d'ailleurs à l'origine de l'expulsion du champ magnétique de l'aimant. Ce phénomène est appelé effet Meissner.

L'une des application majeures de ce principe réside dans la conception de trains à sustentation magnétique.

On peut prendre l'exemple du train JR-MagLev qui détient actuellement le record du monde de vitesse avec une vitesse de pointe à plus de 580 km/h.

Ce train est propulsé grâce à des électroaimants. Le champ magnétique généré par ces aimants repousse les bobines supraconductrices à bord du train, par effet dit de Meissner.

Comme ce train est en lévitation, il n'est pas en contact avec les rails. On peut alors négliger les frottements solides liées aux roues, ce qui explique les vitesses importantes que ce train peut atteindre. [?, ?, ?, ?, ?, ?, ?, ?]

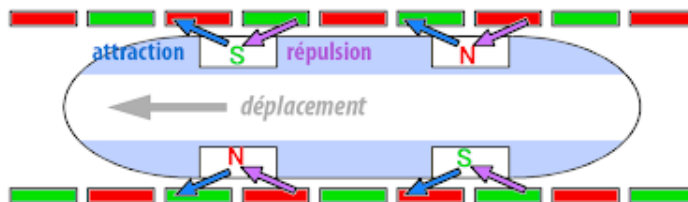


FIGURE 7.1 – schéma simplifié du fonctionnement du train MagLev [?]

### 7.3 Ordinateurs quantiques

Développés dans les années 90, les ordinateurs quantiques représentent un enjeu majeur et suscitent un intérêt grandissant.

Ils reposent sur les phénomènes quantiques suivants : superposition d'états et intrication quantique. Ceci explique leur potentiel de puissance phénoménal.

En effet, un ordinateur quantique utilise des qubits (quantum bit) contrairement aux bits des ordinateurs classiques. Un qubit représente une superposition d'un 1 et d'un 0 à la fois. La conséquence de ce phénomène est que pour chaque qubit supplémentaire, on a une combinaison linéaire des états superposables. La puissance de l'ordinateur double. Pour  $n$  qubit, on a  $2^n$  états superposables.

A ce jour, le processeur quantique le plus puissant comporte 72 qubits; il est nommé Bristlecone et est dévoilé en mars 2018 par Google.



Il est en effet très difficile de concevoir des qubits, car ceux-ci nécessitent des conditions inédites : l'ordinateur doit être absolument isolé de tout milieu extérieur et ne doit pas être observé durant la phase de calcul. Autrement, des interférences empêcheraient le fonctionnement de l'ordinateur : c'est le phénomène de décohérence, frein majeur au développement des ordinateurs quantiques.

Les ordinateurs quantiques sont d'un intérêt majeur dans le domaine de la cryptographie : en effet, le gain en complexité algorithmique des ordinateurs engendre une vitesse de calcul phénoménale. Ils pourraient très facilement remplacer le système d'encodage RSA, et suscitent ainsi un grand intérêt au sein des organisations et États. [?, ?, ?]

# Conclusion et perspectives

Après plusieurs semaines de recherches et de découvertes concernant la physique quantique, nous pouvons affirmer que celle-ci a traversé plusieurs années de découvertes, de recherches et d'expérimentations avant de ressembler à celle qu'on connaît aujourd'hui.

Effectivement, les différentes notions de la physique quantique - en commençant par la dualité onde-corpuscule, en passant par la superposition d'état et l'équation de Schrödinger, sans oublier le formalisme de Dirac - ont demandé beaucoup d'efforts à être démontrées - par l'intermédiaire d'expériences et de nombreux calculs - et ce toujours sous la dubitation des plus grands physiciens de l'histoire tels que Planck ou Einstein. De nos jours, ces notions qui peuvent parfois paraître abstraites et difficiles à comprendre se montrent très pratiques dans notre quotidien. Car sans que nous nous en rendions compte, nous sommes entourés de dispositifs et appareils qui utilisent la physique quantique : nos portables ou ordinateurs, par exemple.

Ce projet nous a permis d'en apprendre plus sur la physique quantique et d'étudier son évolution à travers l'histoire. Il nous a permis de découvrir un autre aspect de la physique, une science s'appliquant à l'infiniment petit et qui n'est pas explicable par la physique classique, que nous avons plus l'habitude d'aborder en cours. Ces nouvelles notions acquises ont apporté un enrichissement personnel qui pourra toujours nous être utile. De plus, ce projet, sous forme d'un travail de groupe, nous a également permis de nous améliorer dans la communication, l'engagement et la ponctualité dans la remise des travaux de chacun tout en respectant les méthodes de tous.

# Annexes

## A.1 Démonstration modèle de Bohr

On considère un électron gravitant autour d'un noyau dont on exprimera les coordonnées dans une base polaire.

Par représentation graphique, on peut exprimer le vecteur position tel que :

$$O\vec{M} = r\vec{u}_r$$

On peut exprimer les vecteurs de la bases polaire, dans la base cartésienne, de la manière suivante :

$$\begin{cases} \vec{u}_r &= \cos(\theta) \vec{u}_x + \sin(\theta) \vec{u}_y \\ \vec{u}_\theta &= -\sin(\theta) \vec{u}_x + \cos(\theta) \vec{u}_y \end{cases}$$

avec  $\theta \in [0; 2\pi]$ , l'angle formé entre les vecteurs  $\vec{u}_x$  et  $\vec{u}_r$

On considère ici que la particule suit un mouvement circulaire (uniforme) avec une vitesse angulaire (constante) que l'on notera  $\omega = \dot{\theta} = \frac{v}{r}$

Par définition du vecteur vitesse, on peut l'exprimer tel que

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \frac{dO\vec{M}}{dt} \\ &= \frac{d(r\vec{u}_r)}{dt} \\ &= \frac{dr}{dt} \vec{u}_r + r \frac{d(\vec{u}_r)}{dt} \end{aligned}$$

Or, par relation on a  $\frac{dr}{dt} = \dot{r}$  et on cherche à déterminer  $\frac{d(\vec{u}_r)}{dt}$ . On peut déterminer cette valeur de la manière suivante

$$\begin{aligned} \frac{d(\vec{u}_r)}{dt} &= \frac{d(\vec{u}_r)}{d\theta} * \frac{d\theta}{dt} \\ &= \frac{d(\cos(\theta) \vec{u}_x + \sin(\theta) \vec{u}_y)}{d\theta} \times \dot{\theta} \\ &= (-\sin(\theta) \vec{u}_x + \cos(\theta) \vec{u}_y) \dot{\theta} \\ &= \dot{\theta} \vec{u}_\theta \end{aligned}$$

Ce qui nous donne finalement pour le vecteur vitesse :

$$\vec{v} = \dot{r}\vec{u}_r + r\dot{\theta}\vec{u}_\theta$$

De même, on peut déterminer le vecteur accélération de la particule, qui est défini par

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(\dot{r}\vec{u}_r + r\dot{\theta}\vec{u}_\theta)}{dt} = \frac{d(\dot{r}\vec{u}_r)}{dt} + \frac{d(r\dot{\theta}\vec{u}_\theta)}{dt}$$

De la même manière que pour le vecteur vitesse, on peut exprimer  $\vec{a}$  tel que

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \left( \frac{d\dot{r}}{dt} \vec{u}_r + \dot{r} \frac{d(\vec{u}_r)}{dt} \right) + \left( \frac{d(r\dot{\theta})}{dt} \vec{u}_\theta + r\dot{\theta} \frac{d\vec{u}_\theta}{dt} \right) \\ &= \left( \ddot{r}\vec{u}_r + \dot{r} \underbrace{\frac{d\vec{u}_r}{dt}}_{cf dp} \right) + \left( \left[ \frac{d(r\dot{\theta})}{dt} \vec{u}_\theta + r \frac{d(\dot{\theta})}{dt} \vec{u}_\theta \right] + \left[ r\dot{\theta} \frac{d\vec{u}_\theta}{dt} \right] \right) \end{aligned}$$

Or, comme précédemment, on détermine  $\frac{d\vec{u}_\theta}{dt}$  tel que

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{u}_\theta}{dt} &= \frac{d\vec{u}_\theta}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \\ &= \frac{d(-\sin(\theta)\vec{u}_x + \cos(\theta)\vec{u}_y)}{d\theta} \times \dot{\theta} \\ &= (-\cos(\theta)\vec{u}_x - \sin(\theta)\vec{u}_y) \dot{\theta} \\ &= -\dot{\theta}\vec{u}_r \end{aligned}$$

On obtient donc dans le cas général

$$\vec{a} = (\ddot{r}\vec{u}_r + \dot{r}\dot{\theta}\vec{u}_\theta) + (\dot{r}\dot{\theta}\vec{u}_\theta + r\ddot{\theta}\vec{u}_\theta) + (-r\dot{\theta}^2\vec{u}_r)$$

Pour notre démonstration, on considère ici que l'électron suit une trajectoire circulaire uniforme, ce qui nous permet d'écrire  $\dot{r} = 0$  (ce qui donne donc  $\ddot{r} = 0$ ) et également  $\dot{\theta} = const \Rightarrow \ddot{\theta} = 0$

On peut donc simplifier les expressions définies précédemment tel que :

$$\begin{aligned} O\vec{M} &= r\vec{u}_r \\ \vec{v} &= r\dot{\theta}\vec{u}_\theta \\ \vec{a} &= -r\dot{\theta}^2\vec{u}_r + r\ddot{\theta}\vec{u}_\theta \end{aligned}$$

Par simplification et expression du vecteur accélération dans la base de Frenet, on a  $\vec{n} = -\vec{u}_r$  et  $\vec{t} = \vec{u}_\theta$

$$\begin{aligned}\vec{a} &= r \left(\frac{v}{r}\right)^2 \vec{n} + \frac{dr\dot{\theta}}{dt} \vec{t} \\ &= \frac{v^2}{r} \vec{n} + \frac{dv}{dt} \vec{t}\end{aligned}$$

D'après la seconde loi de Newton, on sait que  $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$ , or, ici, on considère l'électron ne subit que la force de Coulomb qu'exerce le noyau que l'on exprime de manière générale  $\vec{F}_{e_1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r$  avec ici  $e$  la charge du proton,  $Z$  le nombre de proton dans le noyau, ce qui nous donne  $q_1 = -e$  pour la charge de l'électron et  $q_2 = Ze$  pour le noyau

On a donc

$$\begin{aligned}F_{e_1 \rightarrow 2} &= m\vec{a} \\ \frac{Ze(-e)}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r &= m \left( \frac{v^2}{r} \vec{n} + \frac{dv}{dt} \vec{t} \right) \\ \frac{-Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r &= m \left( \frac{v^2}{r} (-\vec{u}_r) + \underbrace{\frac{dv}{dt} \vec{t}}_{=0 \text{ car } v=\text{const}} \right) \\ \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r &= m \frac{v^2}{r} \vec{u}_r \\ \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} &= mv^2 r \\ \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} &= m\omega^2 r^3\end{aligned}$$

Ce qui nous permet de trouver l'équation

$$\omega^2 r^3 = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m} \quad (1)$$

D'après les travaux de Bohr sur les conditions de quantification de l'onde à la suite des travaux de De Broglie sur les ondes, des égalités d'Einstein et Plank qui sont  $E = mc^2$  et  $E = h\nu$  satisfaites par les photons, on obtient

$$m\omega r^2 = n\hbar = n \frac{h}{2\pi}$$

qui une fois élevée au carré, nous donne

$$\omega^2 r^4 = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 m^2} \quad (2)$$


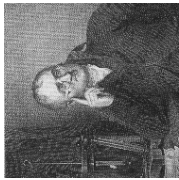



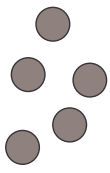
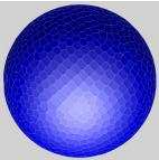
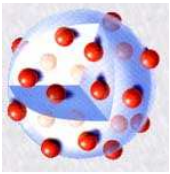
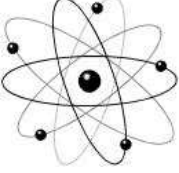
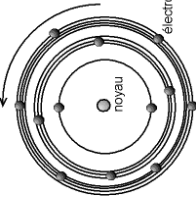
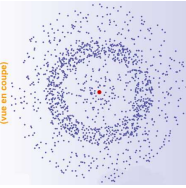
En divisant (2) par (1), on obtient

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{Z e^2 \pi m}$$

Ce résultat démontré par Bohr, nous permet de conclure que les rayons sur lesquels les électrons gravitent sont quantifiés et non continus.

## **A.2 Représentations historiques des modèles atomiques**

## Les différents modèles de l'atome dans l'Histoire...

Scientifiques	Démocrite et Leucipe	Dalton	Thomson	Rutherford	Bohr	Physique moderne
« portrait »						
Date de découverte	<b>400 avant JC</b>	<b>1810</b>	<b>1897</b>	<b>1911</b>	<b>1922</b>	
Modèle utilisé	Particules indivisibles « atomos » qui signifie indivisible en grec. (grain de matière, grain de poussière...)	Les atomes sont représentés par des sphères.	Il imagine l'atome comme une sphère remplie d'une substance électriquement positive et fourrée d'électrons négatifs "comme des raisins dans un cake".	L'atome est surtout constitué de vide. Au centre de l'atome doit se trouver une masse importante positive (que Rutherford appela noyau). Ce noyau doit être extrêmement petit et dense. L'atome est neutre, il y a autant de charges positives que de charges négatives.	Son travail s'inspira du modèle nucléaire de l'atome de Rutherford, dans lequel l'atome est considéré comme un noyau compact entouré d'un nuage d'électrons. Les charges négatives gravitent autour du noyau comme les planètes autour du soleil.	Un noyau central entouré d'électrons en mouvement. Les électrons n'ont pas un trajet bien défini mais une certaine probabilité de présence.
Schéma du modèle						

V

FIGURE 2 – Représentations historiques des modèles atomiques [?]

# Bibliographie

## Approche historique physique quantique

- [1] L'histoire de la physique jusqu'en 1940. Cosmovisions, <http://www.cosmovisions.com/physiqueChrono.htm>
- [2] « Physique Quantique ». Encyclopædia Universalis , <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/physique-quantique/>
- [3] Etienne Klein. Petit voyage dans le monde des quanta. Champs Sciences, 2009
- [4] Comment la théorie de la relativité d'Einstein a changé nos vies. 27 novembre 2015. Le Monde, [https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2015/11/27/comment-la-theorie-de-la-relativite-deinstein-a-change-nos-vies\\_4819236\\_4355770.html](https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2015/11/27/comment-la-theorie-de-la-relativite-deinstein-a-change-nos-vies_4819236_4355770.html).
- [5] « Max Planck ». Wikipédia, 6 avril 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Max\\_Planck&oldid=158194477](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Max_Planck&oldid=158194477).
- [6] Max Planck et la physique quantique. Réalisé par Neo.Entreprise. YouTube, [https://www.youtube.com/watch?v=Quw9B\\_tgX4Y](https://www.youtube.com/watch?v=Quw9B_tgX4Y).
- [7] Théorie des quanta de Max Planck à Erwin Schrodinger. Réalisé par Jean-Claude Audet. YouTube, [https://www.youtube.com/watch?v=\\_HdwRePHsGA](https://www.youtube.com/watch?v=_HdwRePHsGA)
- [8] « Albert Einstein ». Futura Sciences, <https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-albert-einstein-205/>.
- [9] « La relativité d'Einstein expliquée dans cette courte animation ». Sciencepost, 19 mars 2017, <https://sciencepost.fr/2017/03/belle-animation-expliquer-relativite-deinstein/>.
- [10] Relativité | Science étonnante. <https://sciencetonnante.wordpress.com/tag/relativite/>.
- [11] Maxwell the Demon - 02 « Relativity in 500 words ». Réalisé par Corrado Carlevaro. YouTube, [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=229&v=c1gxyKMw80o](https://www.youtube.com/watch?time_continue=229&v=c1gxyKMw80o).
- [12] « The Nobel Prize in Physics 1929 ». NobelPrize.Org, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1929/broglie/biographical/>.



- [13] « Congrès Solvay ». Wikipédia, 27 janvier 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Congr%C3%A8s\\_Solvay&oldid=156204055](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Congr%C3%A8s_Solvay&oldid=156204055).
- [14] Bernard Diu. "Le congrès Solvay de 1927 : petite chronique d'un grand événement". Bibnum. Textes fondateurs de la science, avril 2009. journals.openedition.org, <http://journals.openedition.org/bibnum/846>.

## Dualité onde-corpuscule

- [15] Françoise Balibard et Jean-Marc Lévy-Leblond. Quantique . InterEditions, 1984.
- [16] Fentes de Young. Wikipédia, 1 mai 2019, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fentes\\_de\\_Young](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fentes_de_Young)
- [17] La dualité Onde-Corpuscule | ScienceClic. Réalisé par ScienceClic. YouTube, [https://www.youtube.com/watch?v=\\_vt9P0nKCWo](https://www.youtube.com/watch?v=_vt9P0nKCWo).
- [18] La fonction d'onde et l'équation de Schrödinger . [https://crppwww.epfl.ch/physgen4/repository/Notes\\_02.03.2009.pdf](https://crppwww.epfl.ch/physgen4/repository/Notes_02.03.2009.pdf).
- [19] «Catastrophe ultraviolette : définition et explications ». Techno-Science.net, <https://www.techno-science.net/definition/1309.html>.
- [20] « Catastrophe ultraviolette ». Wikipédia, 27 décembre 2018. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Catastrophe\\_ultraviolette&oldid=155148928](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Catastrophe_ultraviolette&oldid=155148928)
- [21] « Corps noir ». Wikipédia, 2 avril 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Corps\\_noir&oldid=158087618](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Corps_noir&oldid=158087618).
- [22] Rayonnement du corps noir. Réalisé par Eric Foucard. YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=H0rPuhuGgjc>.
- [23] « Rayonnement du corps noir ». Wikipédia, 28 janvier 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Rayonnement\\_du\\_corps\\_noir&oldid=156258462](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Rayonnement_du_corps_noir&oldid=156258462).
- [24] « Effet photoélectrique». Wikipédia, 4 mai 2019. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet\\_photo%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_photo%C3%A9lectrique)

## Modèles atomiques

- [25] « Les modèles de l'atome et leurs évolutions ». <https://modeleatome.wordpress.com/>.
- [26] Histoire de l'atome. <http://sciencesphysiques.e-monsite.com/pages/divers/histoire-de-l-atome.html>.
- [27] « Modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène ». Khan Academy, <https://fr.khanacademy.org/science/physics/quantum-physics/atoms-and-electrons/a/bohrs-model-of-hydrogen>.
- [28] Rosenfeld, Léon. « Niels Bohr ». Encyclopædia Universalis , <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/niels-bohr/>.

- [29] Structure électronique des atomes. Réalisé par KhanAcademyFrancophone. YouTube, <https://www.youtube.com/playlist?list=PLyyMJP08Q1kkbd1ZKWs7y0JcgRNsNj10R>.
- [30] « Atome de Bohr ». Futura Sciences, <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-atome-bohr-4837/>.
- [31] I. Modèle atomique de Bohr-Sommerfeld - Claude Gimènès. <http://claude-gimenes.fr/physique/physiques-atomique-moleculaire-et-nucleaire/physique-atomique/-i-modele-atomique-de-bohr-sommerfeld>.
- [32] Cours de physique quantique : modèle de Bohr. <http://physique.coursgratuits.net/physique-quantique-corpusculaire/modele-de-bohr.php>.

## Principe d'indétermination de Heisenberg

- [33] Werner Heisenberg (1901 – 1976) | Etienne Klein. <http://etienneklein.fr/werner-heisenberg/>
- [34] « Inégalités de Heisenberg ». Futura Sciences, <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-inegalites-heisenberg-4753/>.
- [35] « Werner Heisenberg ». Futura Sciences, <https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-werner-heisenberg-242/>.
- [36] « L'indétermination de Heisenberg : en quoi ça consiste ? » Institut Pandore, 2 mars 2015, <https://www.institut-pandore.com/physique-quantique/lindetermination-de-heisenberg/>.
- [37] « Werner Heisenberg ». Wikipédia, 27 mai 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Werner\\_Heisenberg&oldid=159618392](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Werner_Heisenberg&oldid=159618392).
- [38] Werner Heisenberg (1901 – 1976) | Etienne Klein. <http://etienneklein.fr/werner-heisenberg/>.
- [39] « Le Principe d'Incertainité d'Heisenberg pour les nuls ». La science facile!, <http://science-facile.fr/article-le-principe-d-incertainite-d-heisenberg-pour-les-nuls-109645898.html>.
- [40] « Werner Karl Heisenberg ». Encyclopædia Universalis , <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/werner-karl-heisenberg/>.

## Superposition quantique et équation de Schrödinger

- [41] « Principe de superposition quantique ». Wikipédia, 20 janvier 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Principe\\_de\\_superposition\\_quantique&oldid=155987477](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Principe_de_superposition_quantique&oldid=155987477).

- [42] La Superposition quantique | ScienceClic. Réalisé par ScienceClic. YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=Va-WLe0bSSo>.
- [43] « Expérience de pensée (GP) ». L'Encyclopédie Philosophique, <http://encyclo-philo.fr/experiences-de-pensee-gp/>.
- [44] « Erwin Schrödinger ». Encyclopædia Universalis , <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/erwin-schrodinger/>.
- [45] [Comment ça marche?] Le chat de Schrödinger. Réalisé par CEA Recherche. YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=44ya-DSF6fw>.
- [46] « Chat de Schrödinger ». Wikipédia, 20 mai 2019. , [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Chat\\_de\\_Schr%C3%B6dinger&oldid=159432145](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Chat_de_Schr%C3%B6dinger&oldid=159432145).
- [47] Cours de physique quantique ondulatoire. <http://physique.coursgratuits.net/physique-quantique-ondulatoire/>.
- [48] « Équation de d'Alembert ». Wikipédia, 28 décembre 2018. Wikipedia, [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quation\\_de\\_d%27Alembert&oldid=155243090](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quation_de_d%27Alembert&oldid=155243090).
- [49] « Équation de Schrödinger ». Wikipédia, 4 avril 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quation\\_de\\_Schr%C3%B6dinger&oldid=158130291](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quation_de_Schr%C3%B6dinger&oldid=158130291).
- [50] L'équation de Schrödinger. <http://www.tangentex.com/Schrodinger.htm>.

## Formalisme de Dirac

- [51] Christian et Hélène Ngô. Physique quantique : introduction : cours et exercices corrigés. Dunod, 2005
- [52] Paul Dirac | Etienne Klein. <http://etienneklein.fr/paul-dirac/>.
- [53] « Paul Dirac ». Wikipédia, 4 avril 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Paul\\_Dirac&oldid=158133191](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Paul_Dirac&oldid=158133191).
- [54] « Notation bra-ket ». Wikipédia, 27 novembre 2018. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Notation\\_bra-ket&oldid=154312790](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Notation_bra-ket&oldid=154312790).
- [55] « Espace de Hilbert ». Wikipédia, 8 juin 2018. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Espace\\_de\\_Hilbert&oldid=149337825](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Espace_de_Hilbert&oldid=149337825).
- [56] Espaces de Hilbert . math.univ-lyon, <http://math.univ-lyon1.fr/~chalenda/chap4-ar.pdf>.
- [57] « Spin ». Encyclopædia Universalis , <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/spin/>.

## Laser et effet Tunnel

- [58] « How Lasers Work ». HowStuffWorks, 1 avril 2000, <https://science.howstuffworks.com/laser.htm>.

- [59] « Le principe du laser ». Futura Sciences, <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-lasers-puissance-impulsions-ultracourtes-764/page/2/>.
- [60] « An Introduction to Quantum Tunneling ». AZoQuantum, 14 mai 2012, <https://www.azoquantum.com/Article.aspx?ArticleID=12>.

## Applications modernes de la physique quantique

- [61] « Refroidissement d'atomes par laser ». Wikipédia, 6 avril 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Refroidissement\\_d%27atomes\\_par\\_laser&oldid=158219320](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Refroidissement_d%27atomes_par_laser&oldid=158219320).
- [62] « Ordinateur quantique : définition et explications ». Techno-Science.net, <https://www.techno-science.net/definition/8007.html>.
- [63] « Bristlecone : le processeur quantique record de Google à 72 qubits ». Tom's Hardware, 6 mars 2018, <https://www.tomshardware.fr/bristlecone-le-processeur-quantique-record-de-google-a-72-qubits/>.
- [64] « Calculateur quantique ». Wikipédia, 21 mai 2019. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Calculateur\\_quantique&oldid=159453300](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Calculateur_quantique&oldid=159453300).
- [65] « Kézako : comment fonctionnent les trains à lévitation magnétique ? » Futura Sciences, <https://www.futura-sciences.com/sciences/videos/kezako-fonctionnent-trains-levitation-magnetique-3267/>.
- [66] « Supraconductivité ». Futura Sciences, <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-supraconductivite-2107/>.
- [67] La supraconductivité dans tous ses états. <http://www.supraconductivite.fr/fr/index.php#supra-intro>.
- [68] Superconductivity and The Meissner Effect Explained. Réalisé par Rabbit on Da Moon. YouTube, [https://www.youtube.com/watch?v=\\_j-SuTARXnE](https://www.youtube.com/watch?v=_j-SuTARXnE).
- [69] Les supraconducteurs et leurs fascinantes propriétés. Julien Bobroff. YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=Sj5eue4jm9c>
- [70] Expériences de supraconductivité, Julien Bobroff. YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=QoPElDvLZjA>
- [71] Y a-t-il de la quantique dans nos poches?, Julien Bobroff. Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=Ux3oYEBFXtw>
- [72] Ce sera quoi le futur ?, Julien Bobroff. Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=8Q9eY3wOxds>
- [73] "Les 7 merveilles de la mécanique quantique" Sciencetonnante <https://sciencetonnante.wordpress.com/2013/09/30/les-7-merveilles-de-la-mecanique-quantique/>
- [74] "Dualité Onde-Corpuscule en physique quantique" Youtube [https://youtu.be/J1sPC2BW\\_UI](https://youtu.be/J1sPC2BW_UI)
- [75] "Le Laser, histoire d'une découverte lumineuse" Le journal du CNRS <https://lejournald.cnrs.fr/articles/le-laser-histoire-dune-decouverte-lumineuse>.

## Illustrations

- [76] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le:Congr%C3%A8s\\_Solvay\\_\(1927\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le:Congr%C3%A8s_Solvay_(1927))
- [77] [https://www.google.fr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEWjKxZf2l53iAhVDyxoKHcdABgAqjB16BAGBEAQ&url=http%3A%2F%2Frpn.univ-lorraine.fr%2FUNIT%2Fphysique-quantique-volet1%2Fco%2Fchap2\\_1.html&psig=A0vVaw2qIgrLirhl\\_ufkQUWVGeVo&ust=1557997697060288](https://www.google.fr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEWjKxZf2l53iAhVDyxoKHcdABgAqjB16BAGBEAQ&url=http%3A%2F%2Frpn.univ-lorraine.fr%2FUNIT%2Fphysique-quantique-volet1%2Fco%2Fchap2_1.html&psig=A0vVaw2qIgrLirhl_ufkQUWVGeVo&ust=1557997697060288)
- [78] <https://culturephysique.files.wordpress.com/2012/04/fentes-young2.jpg>
- [79] [https://www.google.fr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwixVICZmJ3iAhVLzRoKHektCdsQjB16BAGBEAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.maxicours.com%2Fse%2Ffiche%2F8%2F2%2F410482.html&psig=A0vVaw2qIgrLirhl\\_ufkQUWVGeVo&ust=1557997697060288](https://www.google.fr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwixVICZmJ3iAhVLzRoKHektCdsQjB16BAGBEAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.maxicours.com%2Fse%2Ffiche%2F8%2F2%2F410482.html&psig=A0vVaw2qIgrLirhl_ufkQUWVGeVo&ust=1557997697060288)
- [80] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/19/Black\\_body.svg/1200px-Black\\_body.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/19/Black_body.svg/1200px-Black_body.svg.png)
- [81] <https://sites.google.com/site/tpe2015maglevtransrapid/principes-et-fonctionnement/la-propulsion>
- [82] [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwie-N3L0ejiAhUNuRoKHWPkCc8QFjACegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fphysique.buil.pagesperso-orange.fr%2Factiv\\_3e%2Fchimie-3e%2Fhistor\\_atome-3e.pdf&usg=A0vVaw2tU\\_W\\_nwR95ZVo1jQV9Dce](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwie-N3L0ejiAhUNuRoKHWPkCc8QFjACegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fphysique.buil.pagesperso-orange.fr%2Factiv_3e%2Fchimie-3e%2Fhistor_atome-3e.pdf&usg=A0vVaw2tU_W_nwR95ZVo1jQV9Dce)

# Table des figures

1	Organisation et répartition du travail . . . . .	6
1.1	Congrès Solvay de 1927. On y remarque la présence notamment d'Einstein, Borh, Plank, . . . [?] . . . . .	9
2.1	Dispositif et résultats de l'expérience de Young [?] . . . . .	11
2.2	Schématisation de l'expérience des fentes d'Young pour des électrons considérés comme des corpuscules [?] . . . . .	11
2.3	Expérience des fentes d'Young menée avec un canon à particules (N = nombre de particules lancées) [?] . . . . .	12
2.4	Graphique théorique de la longueur d'onde émise par un corps en fonction de sa température [?] . . . . .	14
7.1	schéma simplifié du fonctionnement du train MagLev [?] . . . . .	31
2	Représentations historiques des modèles atomiques [?] . . . . .	V