

INTRODUCTION

UNE
INTRODUCTION
À

LES ATOMES FROIDS

Erwan Jahier

Préface de Michèle Leduc



Collection « Une Introduction à »
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac

Les atomes froids

Erwan Jahier

Préface de Michèle Leduc



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Imprimé en France.

© 2010, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 978-2-7598-0440-5



Erwan Jahier, originaire de Concarneau, a grandi à Granville. Après deux ans de classe préparatoire à Rennes, il intègre l'École Supérieure de Physique et Chimie de Paris (ESPCI), alors dirigée par P.G. de Gennes, et se spécialise en physique quantique. Il passe ensuite cinq années en recherche à l'École Normale Supérieure au Laboratoire Kastler-Brossel. Au cours de la première année il contribue à l'étude d'effet laser dans des microsphères de silice dopées à l'erbium dans l'équipe dirigée par J.M. Raimond et S. Haroche. Il effectue ensuite sa thèse sur une expérience de violation de la parité dans l'atome de césium sous la direction de M.A. Bouchiat. Il rejoint enfin le groupe « Atomes froids » de C. Cohen-Tannoudji, pour travailler avec M. Leduc sur l'hélium métastable. Pendant toutes ces années, il suit les cours dispensés par C. Cohen-Tannoudji au Collège de France et enseigne à l'Université Pierre et Marie Curie et à l'ESPCI. Agrégé de sciences physiques, il enseigne actuellement en classe préparatoire à Rennes.

Vj ku'r ci g'kpvgpvkpcmf 'ighv'dnc pm

Préface

Einstein l'avait prévu en 1924 : un ensemble d'atomes peut se condenser tout en restant un gaz très dilué et acquérir en même temps des propriétés inédites et très extraordinaires. On ne pensait pas alors qu'on ne verrait jamais se réaliser un tel phénomène ; les condensats de Bose-Einstein sont pourtant apparus dans nos laboratoires à partir de 1999. Ils constituent de nouveaux états de la matière où tous les atomes se comportent comme s'ils étaient un seul et dont on peut extraire des « lasers à atomes ». Pourquoi a-t-il fallu attendre plus de 70 ans pour qu'une expérience de pensée devienne réalité ? Pourquoi Einstein lui-même n'y croyait-il pas, malgré des fondements théoriques très solides résultant de ses travaux avec Bose sur la thermodynamique ? La raison en est qu'il faut partir d'un gaz d'atomes extrêmement froids pour produire un condensat sur une table d'expérience.

Or nul ne pouvait envisager dans les années 20 qu'on trouverait des moyens en laboratoire pour produire des températures descendant jusqu'au milliardième de degré au-dessus du zéro absolu, c'est-à-dire que la vitesse des atomes dans un gaz pourrait être ralentie à quelques millimètres par seconde. Comment est-on parvenu au tour de force de, pour ainsi dire, geler sur place un ensemble d'atomes ? La méthode qui s'est développée depuis les années 70 est fondée sur l'interaction du gaz avec de la lumière. On sait en effet que les atomes peuvent absorber de petits quanta de lumière appelés photons, qui leur communiquent alors une impulsion : il en résulte une force qui les pousse dans la direction de la lumière incidente ; on explique ainsi l'orientation de la queue des comètes par rapport au Soleil qui les illumine. Il a fallu attendre l'apparition du laser, il y a juste cinquante ans, puis la compréhension approfondie des mécanismes de l'interaction atome-laser, pour parvenir à fabriquer ces gaz ultra-froids et en même temps les piéger sous forme de petits nuages de quelques milliards d'atomes lévitant dans le vide. Ces découvertes ont valu en 1997 le prix Nobel à Claude Cohen-Tannoudji à l'École normale supérieure, en même temps qu'à Bill Phillips et à Steven Chu aux États-Unis. Elles ont ouvert la voie aux condensats de Bose-Einstein et à bien d'autres sujets d'investigation.

Le domaine des atomes froids aujourd'hui a explosé dans le monde de la recherche et a rapidement débordé le champ de la physique atomique dont il était parti. S'ils continuent d'explorer les terres toujours mystérieuses de la mécanique quantique, les atomes froids ont aussi trouvé d'importantes applications. Ils font aujourd'hui gagner un facteur 100 sur la précision et l'exactitude des horloges atomiques. Avec le très ambitieux projet spatial PHARAO une horloge à atomes froids de césium sera expédiée en 2013 sur la plate-forme spatiale internationale ; elle permettra de synchroniser toutes les horloges de la Terre et fournira des tests de la relativité générale d'une précision sans précédent. Les premières technologies fondées sur les atomes froids commencent à se développer, de petits nuages ultra-froids peuvent être piégés par des circuits de taille micrométrique sur des « puces à atomes ». Les gyromètres, ces instruments qui servent au positionnement dans l'espace, vont devenir plus précis quand les lasers à atomes froids remplaceront les lasers usuels. Et des horloges à atomes froids pourraient bien un jour équiper les satellites qui servent au GPS. En outre, la possibilité de manipuler des atomes uniques ouvre des pistes nouvelles pour l'information quantique, c'est-à-dire la création de portes logiques avec des particules et des photons : l'ordinateur quantique du futur sera-t-il à base d'atomes froids ? Beaucoup le croient et y travaillent.

Ainsi le domaine des atomes froids se diversifie de plus en plus. Il s'étend aujourd'hui à de petites molécules qu'on commence à savoir produire à très faible vitesse dans leur état fondamental, ce qui ouvre des perspectives inattendues pour la chimie. Et non seulement on produit chaque année des condensats de Bose-Einstein avec toujours de nouveaux atomes de la classification périodique, mais aussi on refroidit maintenant des atomes d'une autre sorte, les fermions, ces particules de spin demi-entier qui obéissent à des lois différentes de la thermodynamique statistique. On sait piéger des gaz ultra-froids dans les réseaux créés par des potentiels lumineux périodiques générés par des faisceaux laser : il en résulte des structures qui offrent beaucoup d'analogie avec celle des cristaux de la matière condensée, à cette différence près que les paramètres des réseaux optiques peuvent être modifiés à volonté ; on dispose ainsi de systèmes modèles qui devraient aider à élucider les grandes questions de la physique de l'état solide, telles que la nature de la supraconductivité.

L'auteur de cet ouvrage est un très bon spécialiste du domaine des atomes froids, dans lequel il a effectué des recherches personnelles. Il a préparé une thèse de doctorat en physique atomique au laboratoire Kastler Brossel à l'École normale supérieure à Paris et a travaillé sur les condensats de Bose-Einstein de gaz rares dans l'équipe de Claude Cohen-Tannoudji. Le présent ouvrage reflète les connaissances directes qu'il a acquises dans ce laboratoire qui se situe au premier plan de la recherche internationale dans ce domaine. Erwan Jahier est actuellement professeur de physique en classe préparatoire à Rennes où il assure un enseignement au plus près des recherches actuelles. L'ouvrage est écrit dans un style didactique et plaisant.

Il comporte de nombreux schémas et illustrations et fort peu d'équations. Les concepts sont exposés simplement, en termes pédagogiques mais sans faire l'impasse sur les subtilités du domaine. Ce livre pourra servir de base aux enseignants et étudiants qui abordent les questions de mécanique quantique. Il pourra en outre intéresser tout public ayant une culture scientifique de base et curieux des développements les plus récents de la recherche.

Michèle LEDUC

Directrice de l'Institut Francilien de Recherche sur les Atomes Froids

Vj k'ŕ ci g'kpvkpcm' 'ghv'dncpm

Table des matières

Préface	3
Introduction	9
1 Dessine-moi un atome... et un photon	13
1.1 Photons	13
1.2 Atomes	17
1.3 Résumé – Dessin d'un atome et d'un photon	23
1.4 Interaction atome – photons	24
1.5 Et le refroidissement des atomes ?	29
2 Prendre la température des atomes	31
2.1 Qu'est-ce que la température ?	31
2.2 Ralentir, refroidir et piéger les atomes	37
3 Production des atomes froids : dompter les atomes avec des lasers et des aimants	43
3.1 Ralentir des atomes avec un laser	43
3.2 Refroidir des atomes avec deux lasers	57
3.3 Piéger et refroidir les atomes avec six lasers et des aimants	59
3.4 Les limites du refroidissement des atomes avec la lumière	63
3.5 Vers la condensation de Bose-Einstein	76
4 Les atomes froids dans l'arène	93
4.1 Horloges atomiques	94
4.2 Interférométrie atomique	101
4.3 Condensats de Bose-Einstein	111
4.4 Gaz ultra-froids et simulateurs analogiques quantiques	121
4.5 L'effet Hanbury Brown et Twiss	128
4.6 Le laser à atomes	134
4.7 Des capteurs à atomes froids	139

Vj k' r ci g' k p v g p v k p c m (' i g h v ' d n c p m

Introduction

Le domaine des atomes froids, né il y a environ trente ans, a connu très rapidement une activité extraordinaire. Le prix Nobel de physique 1997 a été attribué conjointement à Claude Cohen-Tannoudji, William D. Phillips et Steven Chu pour des contributions décisives au contrôle et à la manipulation des mouvements des atomes avec la lumière¹. Ces travaux couvrent aussi bien le domaine théorique, avec la compréhension fine des mécanismes mis en jeu, que le domaine expérimental, avec la mise en œuvre des techniques de refroidissement extrême des atomes.

Aujourd'hui, il est devenu relativement commun, dans les laboratoires de recherche et même pour des études non spécialement dédiées aux atomes froids eux-mêmes, de disposer d'un ensemble de quelques millions à quelques milliards d'atomes dans une cellule, atomes refroidis à une température de l'ordre du millikelvin, c'est-à-dire un millième de degré au-dessus du zéro absolu ! Par ailleurs, la mise en œuvre de la définition de la seconde, grâce aux horloges atomiques, exploite depuis déjà plusieurs années l'augmentation de précision permise par les atomes froids. Enfin, des appareils de mesure comme des gyromètres ou des gravimètres à atomes froids sont aussi en cours d'étude dans les laboratoires. Ces dispositifs constituent des capteurs avec une extraordinaire sensibilité, intéressants d'une part pour l'industrie et d'autre part pour la métrologie (projet de balance du watt visant à une redéfinition du kilogramme).

Il s'avère donc que la recherche fondamentale, saluée par le prix Nobel de physique 1997, a déjà permis des applications, qui interviennent par exemple dans notre quotidien à travers l'utilisation du GPS², dans la mesure où celui-ci exploite la précision des horloges atomiques. D'autres applications sont d'ores et déjà en développement.

Mais revenons à ce qui nous concernera davantage dans ce livre : la physique fondamentale. « Refroidir une assemblée d'atomes » signifie contrôler les positions et les mouvements aléatoires de ces atomes avec des faisceaux laser et des champs

¹ http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1997/index.html

² Global Positioning System.

magnétiques. Les premiers *condensats de Bose-Einstein* avec des gaz atomiques dilués, en 1995, ont été obtenus grâce aux méthodes de refroidissement des atomes par laser. Ces condensats sont des objets macroscopiques, constitués typiquement de quelques millions d'atomes, contenus au centre d'une cellule, dans un volume de l'ordre de quelques micromètres cubes³, qui se comportent plus comme l'onde d'un faisceau laser que comme une assemblée de petites billes de billard. On décrit l'ensemble des quelques millions d'atomes qui constituent ce condensat de Bose-Einstein par une unique *onde de matière*. Cette onde de matière joue un rôle majeur dans la réalisation des *lasers à atomes*, qui sont déjà une réalité expérimentale dans plusieurs laboratoires. Sur le plan des applications, certains pensent à exploiter des lasers à atomes pour augmenter la précision des méthodes de lithographie utilisées en nanoelectronique. Outre le lien avec le laser à atomes, une des propriétés étonnantes de ces condensats de Bose-Einstein est par exemple leur caractère superfluide. Par superfluide, on entend une viscosité du fluide strictement nulle, de façon analogue à la résistance électrique strictement nulle d'un supraconducteur.

Enfin, le contexte expérimental dans lequel sont produits ces condensats permet d'étudier très précisément leurs propriétés et de les comparer de façon très fine aux prédictions théoriques. En conséquence, le prix Nobel de physique 2001 a été attribué à Wolfgang Ketterle, Eric A. Cornell et Carl E. Wieman⁴ pour les premières réalisations et études expérimentales de condensats de Bose-Einstein de gaz atomiques dilués.

Deux prix Nobel aussi rapprochés, 1997 et 2001, pour une même communauté de physiciens, constituent un signe très fort de l'effervescence qu'a connue la physique atomique ces trente dernières années.

Nous avons aussi mentionné une analogie entre la superfluidité des condensats de Bose-Einstein de gaz dilués avec la supraconductivité d'échantillons de matière dense. Plus généralement, ces travaux sur les condensats ont aussi produit des échanges très fructueux entre différents domaines de la physique (physique de la matière condensée, optique et physique des lasers, physique atomique et moléculaire), ce qui continue d'ouvrir de nombreuses perspectives. La richesse de ces échanges est illustrée par l'attribution conjointe du prix Nobel 2003 à Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg et Antony J. Leggett, « pour des contributions pionnières sur la théorie des supraconducteurs et des superfluides ».

L'objet de ce livre est d'essayer de présenter une partie de ces travaux sur les atomes froids et les condensats de Bose-Einstein, en termes simples, au non-spécialiste curieux de sciences, dans le but de lui faire profiter de l'excitation intellectuelle qui anime les chercheurs dans ce domaine. Nous essaierons de préciser

³ 1 micromètre = 10^{-6} m = 1 millionième de mètre.

⁴ http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001/index.html

ce que sont ces atomes froids, les condensats de Bose-Einstein, d'indiquer quelle est la problématique suivie pour leur étude, quelles sont leurs principales propriétés, pourquoi ils intéressent les physiciens sur le plan fondamental, et pourquoi ils pourraient aussi intéresser l'ensemble de la population par leurs applications, certaines déjà exploitées, d'autres naissantes.

Enfin, osons dire qu'expliquer la physique des atomes froids est aussi un excellent prétexte pour évoquer de nombreux domaines de la physique, les liens entre eux, et illustrer à travers quelques exemples la façon dont a pu progresser ce domaine de la connaissance au cours du siècle passé.

Vj ku'r ci g'kpvgpvkpcmf 'lghv'dnc pm

Dessine-moi un atome... et un photon

L'attrait pour les atomes froids n'est bien sûr pas apparu spontanément, par hasard et à partir de rien. Le contrôle des mouvements des atomes grâce à la lumière puise ses sources à la fin du XIX^e siècle, aux origines de la physique atomique et de l'étude de l'interaction entre matière et rayonnement. La question de l'interaction entre les atomes et la lumière sera récurrente tout au long de ce livre et il s'avère donc indispensable de commencer par indiquer, ou rappeler, quelques notions élémentaires sur ce sujet. Au cours de ce chapitre, nous allons donc étudier quelques concepts et images physiques fondamentaux, suffisants pour comprendre les mécanismes sans avoir à écrire trop d'équations et ces images nous serviront dans toute la suite de l'ouvrage.

1 Photons

1.1 Ondes électromagnétiques

Chacun sait, depuis qu'Isaac Newton a observé une source de lumière blanche à travers un prisme, que cette lumière se décompose en un ensemble de couleurs différentes (figure 1.1). Les expériences d'interférence et de diffraction, menées par Thomas Young et Augustin Fresnel, ont mis en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. James Clerk Maxwell a ensuite montré que la lumière visible n'est qu'un cas particulier d'onde électromagnétique. À chaque couleur, on associe une longueur d'onde. La lumière visible correspond à des longueurs d'onde comprises entre 0,4 micromètre (limite de l'ultraviolet) et 0,8 micromètre (limite de l'infrarouge).

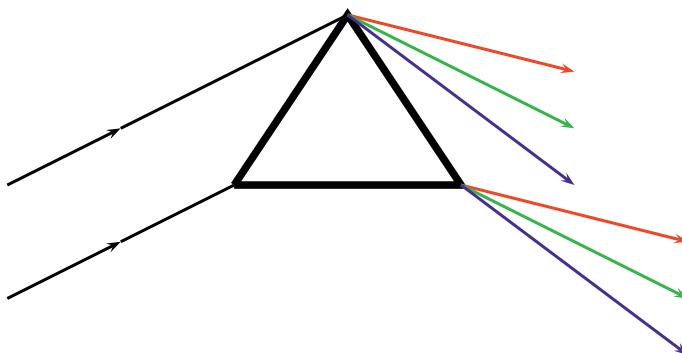


Figure 1.1. Décomposition spectrale de la lumière par un prisme.

La superposition de toutes ces composantes produit sur l'œil une sensation de blanc¹. L'œil humain ne détecte pas les autres longueurs d'onde (ou *composantes spectrales*) mais nous baignons tous néanmoins dans un ensemble d'ondes électromagnétiques, qui véhiculent les programmes de radio, de télévision, les conversations téléphoniques, qui chauffent l'eau dans le four à micro-ondes, etc.

1.2 Sources de rayonnement

Pour caractériser une source de lumière, on étudie les intensités relatives des différentes longueurs d'onde qui composent ce rayonnement. En pratique, on trace ce que l'on appelle le *spectre* du rayonnement étudié, c'est-à-dire la courbe qui représente la puissance mesurée en fonction de la longueur d'onde.

La lumière venant du soleil se décompose en un ensemble *continu* de composantes spectrales, visibles grâce à un prisme ou simplement grâce aux gouttelettes d'eau dans un arc-en-ciel. Ainsi, l'arc-en-ciel décompose naturellement la lumière du Soleil et permet de visualiser directement son spectre². Le spectre émis par une lampe à incandescence est très semblable au spectre du Soleil et est imposé essentiellement par la température de sa surface. La figure 1.2 montre les caractéristiques de ce rayonnement³.

¹ En fait, trois couleurs différentes, par exemple rouge, vert et bleu, suffisent à produire une sensation de blanc. C'est bien cette synthèse additive qui est exploitée pour les écrans de télévision et autres moniteurs.

² S'il est possible de l'observer suffisamment précisément, il apparaît en fait, dans le spectre du Soleil, un certain nombre de raies sombres. Ce spectre n'est donc pas rigoureusement continu. Cela s'interprète par l'absorption de certaines longueurs d'onde par les atomes des couches externes du Soleil.

³ Il s'agit du rayonnement dit du corps noir, c'est-à-dire celui émis par tout élément de matière dense en équilibre avec le rayonnement thermique.

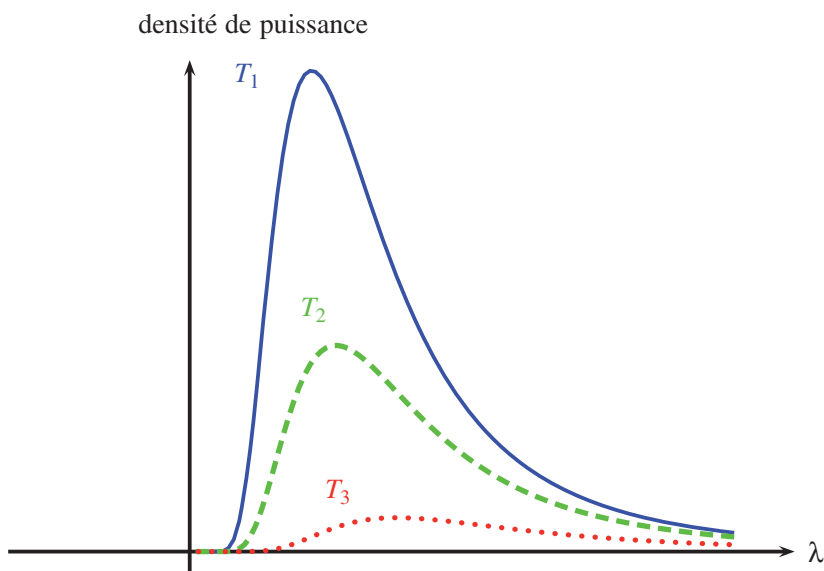


Figure 1.2. Allure de la densité spectrale de puissance émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde pour trois températures différentes ($T_1 > T_2 > T_3$). Lorsque la température augmente, la densité augmente globalement et le maximum se déplace vers les courtes longueurs d'onde.

Un autre exemple de source, important pour la suite et aux propriétés très différentes des sources précédentes, est le laser (voir l'encadré « Principes de fonctionnement d'un laser »). En première approximation, le rayonnement issu d'un laser est strictement monochromatique, c'est-à-dire qu'il ne contient qu'une unique longueur d'onde. Son spectre est composé d'un unique pic⁴, ce qui le distingue radicalement du rayonnement d'une lampe à incandescence. Une autre caractéristique fondamentale est que le rayonnement du laser est très directif, à la différence du rayonnement d'une lampe classique.

1.3 Effet photoélectrique et photons

Dans notre expérience quotidienne, le « flux lumineux » nous apparaît correspondre à un flux continu d'énergie. On peut tourner le bouton d'une lampe halogène pour augmenter ou diminuer la puissance continûment. Pourtant, à l'échelle des interactions élémentaires entre matière et rayonnement, les échanges énergétiques sont discrets, et non continus. On peut illustrer cette propriété grâce à l'effet photoélectrique. Lorsqu'on éclaire un morceau de métal, il est possible d'en extraire des électrons si

⁴ En fait, même un laser est caractérisé par une certaine largeur spectrale, mais le spectre d'un laser est extrêmement étroit par rapport à l'ensemble du spectre visible.

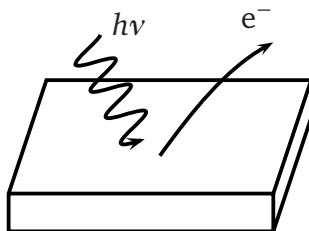


Figure 1.3. Effet photoélectrique : un photon incident peut arracher un électron au métal si son énergie $h\nu$ est supérieure à un seuil ε_0 (travail de sortie du métal).

la fréquence du rayonnement incident est suffisamment élevée (figure 1.3). Si la fréquence est trop faible (ou la longueur d'onde trop grande), on ne peut extraire efficacement d'électrons, même avec une grande puissance incidente. Albert Einstein a reçu le prix Nobel de physique en 1921 pour l'interprétation de ce phénomène à l'aide de la notion de photon, théorie qu'il publia en 1905.

Le point clé est d'envisager le flux lumineux comme un flux de particules, appelées *photons*. Pour un rayonnement de fréquence ν , l'énergie de chaque photon vaut $h\nu$, où $h \simeq 6,63 \times 10^{-34}$ J·s est la célèbre constante de Planck. La puissance incidente sur une surface est proportionnelle au nombre de photons incidents par unité de temps. Chaque électron du métal doit recevoir une énergie supérieure à une certaine valeur seuil pour pouvoir être extrait. Si le quantum d'énergie est trop petit, alors, même avec une grande puissance incidente, c'est-à-dire grand nombre de photons incidents par seconde, on ne peut extraire les électrons⁵.

Le concept de photon a ensuite été développé de façon complète et rigoureuse dans le cadre de la théorie quantique de l'électromagnétisme appelée *électrodynamique quantique*. Dans le cadre de cette théorie, sont décrits non seulement les échanges d'énergie discrets, mais aussi, et en les précisant, les phénomènes ondulatoires comme les interférences. Nous adopterons dans ce livre l'image suivante, approchée, du concept de photon.

On peut comprendre un certain nombre d'expériences d'interaction entre la lumière et les atomes en considérant que la lumière est constituée de petits « grains » qui possèdent chacun une énergie $h\nu$ pour une onde électromagnétique de fréquence ν .

⁵ Nous excluons ici des effets non linéaires qui mettraient en jeu plusieurs photons pour extraire un unique électron.

2 Atomes

Concernant les débuts de la physique atomique, deux types d'expériences ont joué un rôle particulièrement important : les expériences de spectroscopie d'une part et les expériences de collision d'autre part, comme celle d'Ernest Rutherford.

2.1 Spectroscopie atomique

L'expérience fondamentale en spectroscopie atomique consiste de nos jours à envoyer un faisceau laser sur une assemblée d'atomes contenus dans une cellule, et à étudier l'intensité du faisceau qui a traversé l'ensemble d'atomes, lorsqu'on fait varier sa longueur d'onde (figure 1.4). La technologie des lasers permet en effet, depuis plusieurs dizaines d'années, de « balayer » la fréquence de l'onde monochromatique émise. Cet outil, que n'auraient peut-être même pas osé imaginer les premiers physiciens atomistes, a d'ailleurs permis un renouveau extraordinaire, très fructueux, et toujours d'actualité⁶ dans la spectroscopie atomique. On observe alors que, pour un ensemble de valeurs particulières de la fréquence du laser, le faisceau laser est absorbé par les atomes : l'intensité à la sortie de la cellule est considérablement atténuée par rapport à sa valeur à l'entrée. En dehors de ces valeurs particulières de la fréquence, la lumière est quasiment intégralement transmise par la cellule et sa vapeur.

Il s'avère qu'un atome⁷ donné ne peut absorber ou émettre que certaines longueurs d'onde bien particulières. À chaque atome est associé un jeu spécifique de longueurs d'onde, qui constitue une sorte d'empreinte digitale pour cet atome. On appelle *spectre de l'atome* l'ensemble des longueurs d'onde qui peuvent être émises ou absorbées par cet atome. L'expérience décrite précédemment montre que le spectre d'un atome est *discret*, ou encore que l'on observe un spectre de raies. Le caractère discret du spectre observé pour des atomes suffisamment isolés, comme ceux qui composent une vapeur par exemple, le distingue radicalement du spectre de la lumière émise par de la matière dense, comme le filament d'une lampe à incandescence.

L'observation d'un spectre d'absorption discret s'interprète bien si chaque atome est lui-même caractérisé par un ensemble de niveaux d'énergie internes discrets. Un photon du faisceau incident ne peut alors être absorbé que si son énergie est égale à la différence entre deux niveaux d'énergie de l'atome.

⁶ Le prix Nobel 2005 de physique a été attribué à Theodor W. Hänsch, John L. Hall et Roy J. Glauber pour des travaux sur la spectroscopie de l'hydrogène et les « peignes de fréquence ». Voir http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/index.html

⁷ En pratique, on dispose rarement d'un unique atome. Notre propos concerne un gaz dilué d'atomes. Ce sera par exemple une vapeur contenue dans une cellule en verre.