



ROYAUME DU MAROC
Académie Hassan II des Sciences et Techniques

Le laser en physique fondamentale

Serge HAROCHE

Professeur au Collège de France, Prix Nobel de physique 2012
Membre Associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

*Conférence donnée le **13 mai 2024**
à Rabat*

Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Km 4, Avenue Mohammed VI (ex Route des Zaers)
Rabat, Royaume du Maroc

© Hassan II Academy Press

Réalisation : **AGRI-BYS S.A.R.L.**

Achevé d'imprimer : février 2025



**Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu Le garde,
Protecteur de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques**

Mot de présentation du Professeur Omar Fassi-Fehri, Secrétaire perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

A l'occasion de la commémoration du 18^{ème} anniversaire de l'installation solennelle de l'Académie par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI –que Dieu le Garde–, nous avons l'honneur et le plaisir d'accueillir aujourd'hui Monsieur Serge HAROCHE, Professeur au Collège de France, lauréat du Prix Nobel de Physique en 2012, Membre de l'Académie des Sciences de France et Membre Associé de notre Académie; Pr. Serge HAROCHE nous honore, pour une troisième fois, en acceptant notre invitation à donner une Conférence au sein de l'Académie, la première ayant été donnée lors de la session plénière du 20 février 2013 sur le thème «**Jongler avec des photons dans une boîte et réaliser des “chat de Schrödinger” de lumière**», la seconde le 11 avril 2016 sur le thème «**Ce que nous devons à Einstein**», et la troisième aujourd'hui sur le thème «**Le Laser en Physique Fondamentale**». Cette conférence s'inscrit dans le cadre du cycle de conférences qu'organise l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Je saisiss cette occasion pour présenter au Pr. Serge HAROCHE mes remerciements profonds pour sa contribution et sa participation avec nous à la commémoration du 18^{ème} anniversaire de l'installation de notre jeune Académie.

Comme vous l'avez si bien expliqué vous-même, cher Professeur Serge HAROCHE, dans le résumé de votre conférence d'aujourd'hui, que vous nous avez aimablement envoyé; «*Le laser, inventé en 1960, joue un rôle essentiel dans la technologie moderne. Parmi ses applications les plus courantes, citons les lecteurs de CD et de DVD, les gravures, les pointures et les télémètres laser ainsi que les faisceaux de lumière circulant dans les fibres optiques formant le réseau internet mondial. Cette source extraordinaire de lumière a aussi permis au cours des dernières années des avancées remarquables en recherche fondamentale, ouvrant des perspectives très prometteuses pour de nouvelles applications.*».

C'est de ces nouvelles applications et de cette pertinente recherche sur le laser que le Pr. Serge HAROCHE va nous entretenir; mieux il va nous éclairer et nous faire comprendre comment la recherche scientifique actuelle, conduite grâce aux propriétés extraordinaires de la lumière laser, permet de mener des réflexions sur les liens étroits existant entre la recherche fondamentale motivée par la curiosité et la recherche appliquée dont le but est l'invention de nouveaux instruments.

Avant de céder la parole à notre Conférencier, permettez-moi un court instant de revenir sur le long et fructueux chemin de vie du Pr. Serge HAROCHE, même si un tel exercice peut paraître aussi difficile que superfétatoire, tant les fonctions qu'il a occupées furent nombreuses et variées, et que ses découvertes scientifiques restent encore constructives et novatrices, empruntes de clairvoyance et de perspicacité.

Né à Casablanca en 1944, c'est à l'âge de 12 ans que le Pr. Serge HAROCHE quitte son Maroc natal avec ses parents pour s'installer en France «pour des raisons strictement familiales».

Après de brillantes études secondaires au lycée Carnot puis à Louis-Le-Grand à Paris, il prépare le concours d'entrée à plusieurs grandes écoles. En 1963, classé premier au concours d'entrée à l'École polytechnique et parmi les premiers au concours d'entrée à l'École Normale Supérieure, il choisit d'intégrer cette dernière. Il suit parallèlement les cours de la Faculté des sciences de l'Université de Paris de 1963 à 1967. Après sa Licence en sciences physiques, il passe avec succès en 1967 l'agrégation de physique et obtient la même année le doctorat de spécialité (3e cycle). En 1971, il soutient sa thèse de Doctorat d'Etat en sciences physiques à l'Université de Paris VI; ses recherches ont été effectuées sous la direction du Professeur Claude Cohen-Tannoudji (lauréat du Prix Nobel de Physique en 1997).

S'agissant de sa carrière universitaire, il entre en 1967 au Centre national de la recherche scientifique, où il occupe successivement les postes d'attaché de recherche (1967-1971), de chargé de recherche (1971-1973) et de maître de recherche (1973-1975). Il est nommé professeur à l'université Paris-VI en 1975 et membre senior de l'Institut universitaire de France en 1991.

Il exerce en même temps dans d'autres institutions, notamment comme Maître de Conférences à l'École polytechnique (1973-1984), professeur invité à l'Université Harvard (1981), professeur à mi-temps à l'université Yale (1984-1993), directeur du département de physique de l'École Normale Supérieure (1994-2000) et professeur invité au Conservatoire National des Arts et Métiers (2000). En 2001, il est élu professeur au Collège de France titulaire de la chaire de physique quantique.

En 2012, Maguy Kakon¹, politicienne marocaine de confession juive, lançait avec joie cette phrase «C'est magnifique! Le Maroc peut se glorifier d'avoir un premier marocain nobélisé», fière que le Pr. Serge HAROCHE ait reçu le Prix Nobel de Physique et qui a revendiqué dans les médias sa marocanité.

Il y a lieu de rappeler que la nationalité marocaine, pour les citoyens de souche, qu'ils soient musulmans ou juifs, ne peut en aucun cas être retirée, quelle que soit la faute commise ou en raison de l'acquisition d'une autre nationalité.

Une année plus tard, en 2013, Sa Majesté Le Roi Mohammed VI –que Dieu le Garde– nous fait l'honneur de nommer le Pr. Serge HAROCHE Membre Associé de notre jeune Académie.

Avec votre permission je m'arrête là et sans plus tarder, je termine ma présentation en redisant que c'est avec beaucoup de plaisir et un grand intérêt qu'on va écouter la Conférence du Pr. Serge HAROCHE. A vous la parole cher Professeur.

(1) **Maguy Kakon** née en 1953 à Casablanca est une femme politique marocaine. Elle est aussi connue pour ses ouvrages sur l'art culinaire judéo-berbère.

Le laser en physique fondamentale¹²³

Serge HAROCHE

Professeur au Collège de France, Prix Nobel de physique 2012
Membre Associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

Monsieur le Secrétaire perpétuel,

Merci d'abord pour votre accueil chaleureux et pour votre introduction sur ma carrière. Je voudrais dire combien je suis heureux de pouvoir parler devant vous de la recherche que j'aime, de la recherche fondamentale. Je suis toujours heureux de revenir au Maroc et d'avoir l'occasion de discuter avec des collègues, avec des étudiants et de voir l'enthousiasme que toutes ces personnes ont pour la recherche. La recherche, qui est motivée par la curiosité, comme a dit le Secrétaire perpétuel de l'Académie, mais également la recherche qui, un jour, conduira à des applications qui amélioreront les conditions de vie.



Je vais vous parler du laser en physique fondamentale. Le laser est un instrument que nous connaissons bien maintenant. C'est un outil fantastique qui est appliqué à de nombreuses technologies mais également, et c'est peut-être moins connu, qui a conduit à des percées extraordinaires en sciences fondamentales.

Pour replacer cet exposé dans son contexte et pour, en fait, rappeler ce que le Secrétaire Perpétuel a évoqué tout à l'heure, je voudrais parler des débuts de ma carrière. Je l'ai commencée dans les années 60, il y a près de 60 ans maintenant, à une époque alors que le laser venait d'être inventé. La **photo 1** a été prise un jour d'octobre 1966 lorsqu'a été annoncé le prix Nobel de physique attribué à Alfred Kastler. **Kastler et Brossel** étaient les directeurs du laboratoire dans lequel je venais

1 Conférence donnée le 13 mai 2024 dans la grande salle de l'Académie du Royaume à l'occasion de la commémoration du 18^{ème} anniversaire de l'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

2 La thématique s'inscrit dans le cadre de la déclaration de l'UNESCO qui fait de 2025 l'Année Internationale des sciences et technologies quantiques, marquant ainsi le premier centenaire des premiers développements de la physique quantique.

3 Texte retracé à partir de l'enregistrement vidéo de la conférence.

d'arriver comme jeune étudiant. Ils avaient inventé la méthode du pompage optique qui est une méthode qui permet, en éclairant des atomes -un gaz d'atomes- avec de la lumière polarisée, d'orienter les moments magnétiques de ces atomes; et c'était la première expérience de manipulation d'atomes avec la lumière. À cette époque-là, on utilisait de la lumière classique, la lumière de lampe, mais le laser venant d'apparaître sur la scène, on était bien conscient que, grâce au laser, on allait pouvoir faire des choses extraordinaires en physique atomique et en optique, mais on ne pouvait pas imaginer tout ce que le laser allait nous apporter au cours des 50 ou 60 années qui allaient suivre. Et c'est de ça dont je voudrais vous parler, non pas tellement les applications à la technologie mais vraiment de la recherche fondamentale. Et je voudrais signaler qu'en fait, après le prix Nobel d'**Alfred Kastler** en 1966, allait suivre en 1997 le prix Nobel de **Claude Cohen-Tannoudji** que vous voyez sur cette photo à la droite de Kastler. Claude Cohen-Tannoudji avait été l'étudiant de Kastler et de Brossel et il était mon jeune directeur de thèse à l'époque, et puis ensuite, évidemment après, il y a eu en 2012, comme il a été rappelé, le prix Nobel que j'ai obtenu pour la manipulation d'atomes et de photons à l'aide de laser.



Photo 1 : A. Kastler (1966), C.C.Tannoudji (1997) et S.Haroche (2012), trois Nobel sur une même photo à l'annonce du prix Nobel de Kastler en 1966, dans le laboratoire Kastler-Brossel.

Donc je voudrais vous parler de cette aventure et je rappelle ici les applications technologiques du laser qui ont vraiment modifié notre vie quotidienne. D'abord le

fait qu'on utilise des lasers de façon assez trivial pour lire les code-barres dans les supermarchés, la gravure et la lecture des CD&DVD qui est dû au laser, la technologie LiDAR, tout ce qui permet de faire de la télémétrie, de mesurer des positions, des distances en réfléchissant des faisceaux lasers sur des obstacles ou de mesurer la vitesse par dopplérimétrie laser de différents objets. Le fait également que le laser peut servir à la chirurgie, en particulier en ophtalmologie, à la chirurgie de l'œil et comme il a été rappelé tout à l'heure, une application essentielle qui est le fait que ce sont des faisceaux lasers qui circulent dans les millions de kilomètres de câbles sous-marins qui tapissent le fond des océans et qui permettent de relier toutes les villes du monde dans le réseau Internet. On peut dire que cette application-là, qui permet de propager de l'information à la vitesse de la lumière et relier tous nos ordinateurs les uns aux autres, est peut-être l'application qui a joué le plus grand rôle pour changer notre vie quotidienne pour le meilleur et pour le pire parfois.

Mais ce n'est pas de ça que je voudrais vous parler. Je voudrais vous parler de ce que le laser a apporté, non pas à la technologie, mais vraiment à notre connaissance du monde et à la recherche fondamentale. Pour cela, je vais aborder différents aspects du problème :

- je vais parler d'abord de l'invention même du laser suite à une découverte fondamentale d'Einstein. Il a été rappelé qu'il y a quelques années, j'ai donné ici même une conférence sur «tout ce que nous devons à Einstein⁴» et, en particulier, on peut dire que, au départ, l'idée du laser, l'idée de l'émission stimulée, vient des travaux d'Einstein dans les années 1915-1916;
- et puis je vous consacrerai un moment assez important à parler de la révolution que le laser a apporté à la mesure de l'espace et du temps : les horloges et la façon très précise de mesurer la distance qui sépare deux objets va jouer un rôle fondamental;
- ensuite, je vous montrerai comment les lasers permettent de refroidir la matière presque au zéroabsolu et de produire de nouvelles formes de la matière ultra-foide qui joue un rôle fondamental maintenant dans les technologies modernes;
- je vous parlerai aussi de l'utilisation des lasers pour manipuler des atomes et des photons individuels avec comme perspective l'information quantique et ça c'est le domaine de recherche auquel j'ai directement participé moi-même;
- je parlerai également de la génération d'intensité lumineuse extrême et d'impulsion de lumière ultra-courte et je préciserais quantitativement ce que ultra-courte signifie;
- je parlerai enfin de la détection des ondes de gravitation qui n'aurait pas été possible sans les interféromètres laser gigantesques, que je décrirai brièvement, et je parlerai également de beaucoup d'autres applications en perspective et de choses qui vont peut-être nous surprendre dans l'avenir.

⁴ «**Ce que nous devons à Einstein**», conférence publique organisée le 11 avril 2016 à la Bibliothèque Nationale du Royaume à l'occasion de la commémoration du 10^{ème} anniversaire de l'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. Texte reproduit à partir de la transcription de l'enregistrement audio dans le cadre des publications de l'Académie Hassan II, achevé d'imprimer en février 2017.

Donc commençons maintenant par rappeler un peu l'histoire du laser.

En 1916, Einstein découvre ce qu'on appelle l'**«émission stimulée»**. L'**«émission stimulée»**, ça signifie que si vous excitez un atome dans un état d'énergie supérieur, cet état d'énergie étant relié à un état fondamental par une transition tombant dans le domaine optique, l'atome va retomber du niveau excité vers le niveau inférieur en émettant un photon : c'est le phénomène d'**émission spontanée**. Mais en plus de ce phénomène d'**émission spontanée**, Einstein fit l'hypothèse que, si l'atome recevait un photon déjà présent, il allait émettre un deuxième photon de façon stimulée, un deuxième photon qui allait avoir exactement les mêmes propriétés de fréquence de phase et d'amplitude que le photon initial. Ce phénomène est ce qu'on appelle l'**émission stimulée**; c'est un phénomène fondamental d'**amplification de la lumière** qui indique que si on peut réaliser une inversion de population dans un milieu, le milieu va se comporter comme un amplificateur de lumière. Et c'était l'idée de départ du laser. Il a fallu 50 ans supplémentaires pour que la technologie permette de réaliser cet objectif et donc les lasers fonctionnent de la façon qui est indiquée en bas de la **figure 1** : entre deux miroirs, un milieu amplificateur et un milieu atomique est excité par une excitation atomique qui peut être une décharge électrique ou une excitation lumineuse dans un niveau supérieur de façon à ce que les atomes puissent amplifier la lumière.

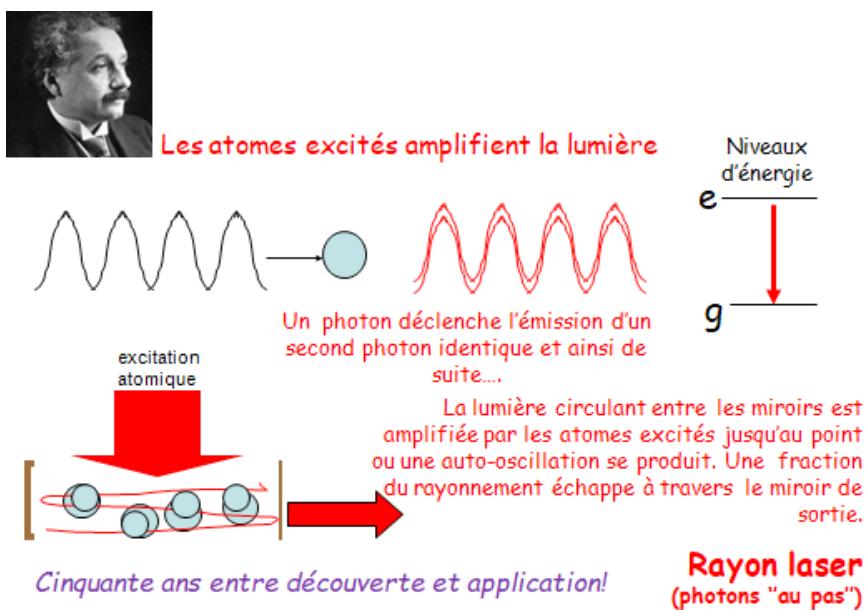


Figure 1 : L'émission stimulée : une des idées brillantes d'Einstein (1916)

Les premiers photons dans le milieu sont spontanés, mais ces photons spontanés stimulent l'émission de photons supplémentaires. Cette lumière se propage en rebondissant entre les miroirs. Un des miroirs est légèrement transparent et laisse sortir un faisceau de lumière directive qui est le fameux faisceau laser; et ce rayon laser est un rayon dans lequel les photons sont tous émis avec la même fréquence,

la même amplitude et la même phase. Et c'est ce qui donne naissance à ce fameux rayonnement dont je vais parler aujourd'hui. Je rappelle qu'il a fallu 50 ans entre la découverte du phénomène d'émission spontanée par Einstein et son application à la réalisation des lasers en 1960. Ceci indique le temps qu'il faut pour qu'une idée de physique fondamentale conduise à des applications intéressantes. Et c'est la raison pour laquelle il faut absolument que la recherche fondamentale se poursuive sur le long terme si on veut qu'elle soit fructueuse.

Alors qu'est-ce qu'on peut dire du rayonnement laser?

Alors que les lampes ordinaires ou que le soleil ou les atomes rayonnent, ces sources rayonnent de façons indépendantes une lumière qui est anarchique, qui peut aller dans toutes les directions, qui peut avoir toutes sortes de fréquences, de phase et d'amplitude, la lumière du laser, elle, est disciplinée. C'est une lumière dans laquelle tous les atomes émettent dans la même direction, émettent avec la même fréquence et la même phase. C'est ce que j'appelle de la lumière domestiquée, par opposition en quelque sorte à la lumière sauvage qui est la lumière qui emplit cette pièce, qui est créée par des lampes classiques.

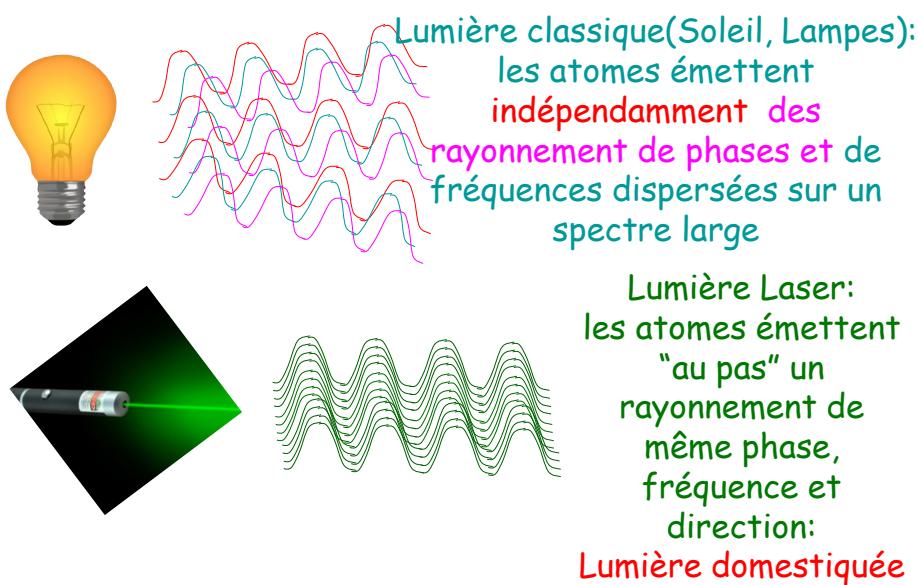


Figure 2 : Lumière classique et lumière laser

Comment est-ce que ce laser est apparu sur la scène de la physique moderne? Et bien, il y a eu dans les années 1950 la réalisation, non pas du Laser, mais du Maser. Le **Maser**, c'est une source qui fonctionne sur le même principe de l'émission stimulée mais dans le domaine des micro-ondes. Et maser est un acronyme pour **Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiation**.

L'inventeur du maser, c'est **Charlie Townes**, qui a créé la première source de lumière cohérente de micro-onde cohérente cette année-là. Il travaillait dans le laboratoire de Columbia, créé avant la guerre par **Isidor Isaac Rabi (1898-1988)**, un grand

physicien dont l'école de Columbia a produit sans doute une dizaine de prix Nobel. Rabi est le physicien qui a inventé la méthode des jets moléculaires, jets qui ont été utilisés en particulier pour le maser de Townes qui a fonctionné sur un jet moléculaire d'ammonium, et ont servi de précurseur aux horloges atomiques également. Donc, c'est vraiment Isaac Rabi qui est le père de cette physique dont je vais vous parler aujourd'hui, qui a conduit au laser. En fait, Townes était quelqu'un qui avait été formé dans ce laboratoire de Columbia.

En 1960, Townes et Challow ont élaboré la théorie qui étendait le fonctionnement du maser au domaine optique. Et le premier laser a été réalisé en fait par **Theodore Mayman** dans un autre laboratoire. Le laser a été vraiment cette source de lumière micro-onde qui est venue à la suite des travaux initiaux d'Einstein et toute la technologie qui s'en est suivie.

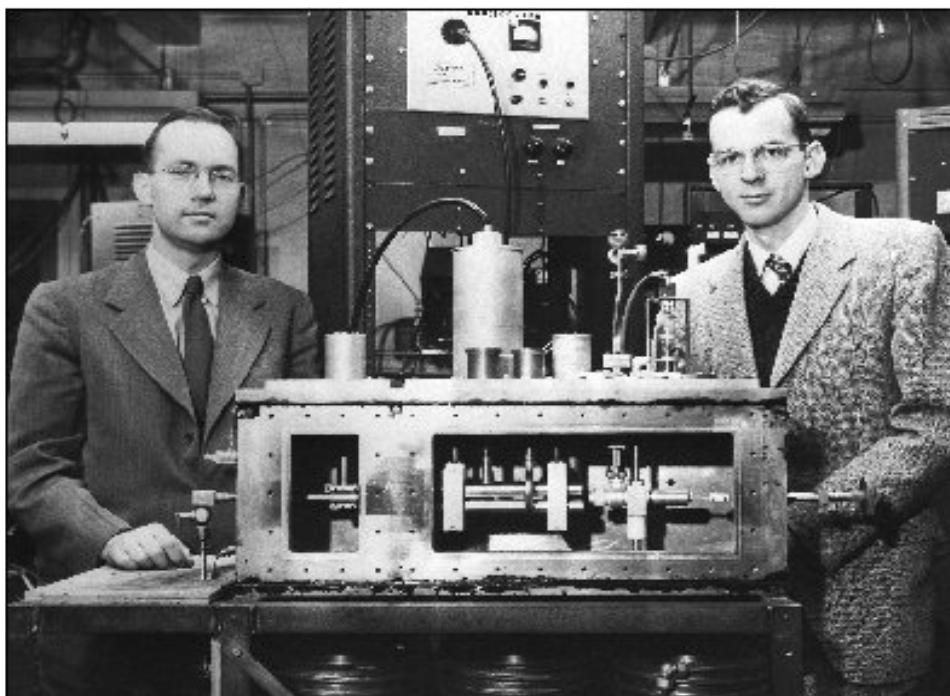


Photo 2 : L'inventeur du maser, Charlie Townes, avec son étudiant Gordon à Columbia en 1954, devant leur jet moléculaire d'ammonium qui produisit le premier maser

Alors qu'est-ce qu'on peut dire? Je vais dire quelques mots sur cette lumière, décrire ses propriétés. Elle est intense d'abord, elle est directive, elle est monochromatique – c'est à dire que la lumière a une fréquence bien définie – et elle est cohérente – c'est-à-dire qu'elle oscille de façon sans perdre un seul battement sur des millions et des millions d'oscillations successives –. Elle permet de faire des choses qui semblent très contradictoires et paradoxales :

- si on focalise le laser sur un objet, par exemple sur une surface métallique, on peut élever la température au point où on évapore le métal; on crée un plasma et on atteint des températures extrêmement élevées. En fait, on peut atteindre

des températures analogues à celles qui règnent à l'intérieur des étoiles. Des millions de degrés à l'aide de laser de puissance;

- et inversement, on peut également se servir de cette puissance, non pas pour réchauffer, mais pour refroidir la matière. Et on peut obtenir les températures les plus basses qui existent dans l'univers, des températures de l'ordre du milliardième du degré absolu. Et à ces températures extrêmement basses apparaissent de nouvelles formes de la matière, matière collective par exemple, ce qu'on appelle les **Condensations de Bose Einstein** (Figure 3). Encore une propriété de la matière qui avait été prédite par Einstein dans les années 1920 et qu'il a fallu 70 ans pour produire au laboratoire et qui a de nombreuses applications.



Figure 3 : Un outil très flexible pour la recherche fondamentale en physique, chimie et biologie et pour des applications à la métrologie, à la médecine, aux communications etc....

Un deuxième domaine de l'application du laser c'est des propriétés qui sont liées à la nature cohérente et monochromatique de cette lumière. Les faisceaux de lumière ultrastable peuvent osciller sans manquer un seul battement sur des millions de kilomètres. On peut réfléchir un faisceau laser sur la lune et le faire revenir sur terre. Et le faisceau qui part et qui revient produit des effets d'interférence que l'on peut observer, ce qui signifie qu'on peut en fait mesurer la distance de la Terre à la Lune avec une précision qui est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière. Et on peut, en faisant battre entre des oscillations de ce genre, réaliser des impulsions ultracourtes, des impulsions de lumière dont la longueur spatiale est de l'ordre de quelques nanomètres, des espèces de balles de lumière qui traversent la matière en un temps de l'ordre de l'atto-seconde⁵. Donc on atteint des temps extrêmement courts et je parlerai de ces applications. En fait, vous voyez que c'est un outil extrêmement flexible pour faire de la recherche fondamentale en physique, en chimie et en biologie, pour des applications à la métrologie, à la médecine, aux communications, etc.

5 (10^{-18} s)

Alors je voudrais commencer par la mesure de l'espace et du temps et avant ça, je voudrais rappeler tous les ordres de grandeur dans différents domaines de la physique que l'on a gagné grâce au laser (Figure 4). En fait, je voudrais vous indiquer que 10 ordres de grandeur ou même plus ont été gagnés dans différents domaines et 10 ordres de grandeur sur une période de 60 ans, ça veut dire qu'on gagne un facteur 10 en moyenne tous les 5 ou 6 ans.

Dix ordres de grandeur (ou plus) gagnés dans différents domaines (un facteur 10 tous les 5 ans!)

	1960	2020's
Precision (spectroscopie et horloges):	10^{-8}	10^{-19}
Sensibilité :	10^{10} atomes	1 atome/ 1 photon
Temperatures et énergie cinétique des atomes:	1-300K	10^{-10} K (atomes froids)
Impulsions courtes et résolution temporelle:	10^{-9} s	Attoseconde (10^{-18} s)
Sensibilité aux variation de longueur $\Delta h/h$	$10^{-8} - 10^{-9}$ <small>(Interferometrie définition du mètre)</small>	$10^{-21} - 10^{-22}$ <small>(LIGO/VIRGO)</small>

Figure 4 : Le Laser a permis des progrès extraordinaires - quantitatifs et qualitatifs - dans différents domaines de la recherche fondamentale

Sur quel type de grandeur? Je compare ici ce qu'on pouvait faire en 1960 et ce qu'on peut faire maintenant.

Le premier domaine que je voudrais évoquer, c'est le domaine de la *précision en spectroscopie et la précision des horloges*. Qu'est-ce que c'est que la spectroscopie ? On éclaire un atome avec de la lumière et on mesure la fréquence de la transition entre deux niveaux. En 1960, on pouvait faire ça au mieux par des méthodes interférométriques avec une précision de l'ordre de 10^{-8} . (10^{-8} c'est 1 centième d'un millionième). 8 chiffres significatifs pour mesurer une longueur d'onde. De la même façon à cette époque, lorsqu'on mesurait un intervalle de temps à l'aide des horloges les plus précises de l'époque, des horloges à quartz, on pouvait mesurer avec une précision de l'ordre de 10^{-8} , c'est-à-dire à peu près une seconde par an. C'était la précision des mesures spectroscopiques. Ce qu'on peut faire maintenant au lieu de 10^{-8} c'est 10^{-19} . C'est-à-dire qu'on peut mesurer des distances et on peut mesurer des intervalles de temps avec une précision qui est 11 ordres de grandeur plus grande que ce qu'on pouvait faire en 1960. Et ça a des conséquences en physique fondamentale essentielle.

Deuxième domaine : *la sensibilité des mesures*. Les expériences que nous faisions en pompage optique dans les années 60 : on illuminait une cellule qui contenait

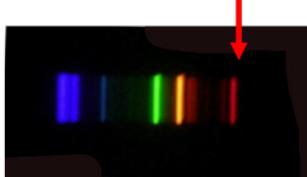
des milliards d'atomes. La lumière modifiait les propriétés et on le voyait sur les changements de l'intensité ou de la polarisation de la lumière mais sur des échantillons qui contenaient des milliards d'atomes. Maintenant, on peut faire les mêmes expériences avec un seul atome et voir ce qui se passe lorsqu'un atome interagit avec un photon. C'est encore 10 ordres de grandeur de gagnés.

Autre domaine : *les températures et l'énergie cinétique des atomes*. A la température ordinaire qui est de 300 Kelvin, on faisait un grand nombre d'expériences : le plus froid qu'on pouvait obtenir c'était de refroidir à l'aide d'hélium liquide à une température de l'ordre de 1 degré. À l'aide des lasers, on peut faire ce qu'on appelle la physique des atomes froids. On peut atteindre des températures de 10^{-10} Kelvin, 1 dixième de nano degré, ce qu'on appelle des pico-degrés Kelvin et encore 10 ordres de grandeur sur l'énergie cinétique des atomes.

Autre domaine : les *impulsions courtes*. En 1960, les impulsions les plus brèves qu'on pouvait réaliser dans une décharge électrique c'était quelques microsecondes. Et avec les premiers lasers de cette époque-là, on arrivait à faire des impulsions qui avaient, disons, quelques nano-secondes de durée. Maintenant, on atteint, comme je vous l'ai dit tout à l'heure, l'atto-seconde.

Enfin, dernier domaine : *la sensibilité aux variations de longueur*. Les interféromètres que l'on utilisait dans les années 60, qui ont défini le mètre, le faisait avec 8 chiffres significatifs. Maintenant, dans les interféromètres géants de LIGO et de VIRGO qui ont mesuré les premières ondes de gravitation, on mesure des variations de longueur entre les deux bras de l'interféromètre avec une précision de l'ordre de 10^{-21} à 10^{-22} . Donc là, je parle non pas de 10 mais de 12 ou 13 ordres de grandeur gagnés depuis cette époque grâce au laser.

Donc je voudrais maintenant revoir un petit peu cette table que je vous montre ici en évoquant les différents domaines. Commençons par la précision spectroscopie et mesure du temps (Figure 5). Je voudrais parler du progrès de la mesure des longueurs et du temps dû au laser. Je vous rappelle qu'en 1960, le mètre était défini comme un multiple de la longueur d'onde d'une lampe à Crypton, vous voyez la raie rouge du krypton que j'ai marquée par la flèche. On mesurait, grâce à un interféromètre de Michelson, la longueur d'onde de cette raie; et on a défini en 1960, de façon disons standard, le mètre comme étant égal à 1.650.763,73 cette longueur d'onde du Crypton; donc une précision de l'ordre de 10^{-8} . Et en même temps, le temps à cette époque-là était mesuré par l'astronomie – l'intervalle de temps qui sépare deux passages d'une étoile d'un jour au jour suivant – et par les horloges à quartz, qui avaient une précision d'environ une seconde par an. Et on commençait à s'apercevoir que le jour sidéral variait d'une année à l'autre et qu'il fallait de temps en temps ajouter ou enlever une seconde par rapport au temps que donnait l'horloge à quartz. Mais ça restait une précision de l'ordre de 10^{-8} .

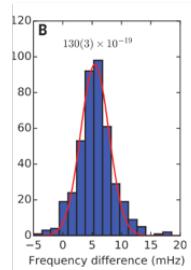
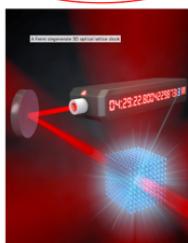


Les longueurs étaient mesurées par interférométrie (longueur d'onde de la raie rouge du Krypton)

Le temps était mesuré par l'astronomie et les horloges à quartz (précision d'environ 1s/an)

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx 10^{-8}$$

2020's



La stabilité des lasers permet aujourd'hui de mesurer la fréquence d'une transition optique (4.10^{14}Hz) au milliHerz près!

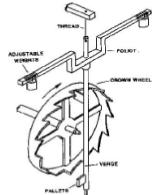
$$\frac{\Delta \nu}{\nu} \approx 10^{-19}$$

Figure 5 : Progrès de la mesure des longueurs et du temps dus au laser

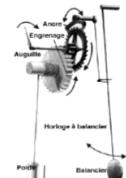
Regardons ce qu'on sait faire maintenant dans les années 2020 : on peut mesurer la fréquence d'une transition dans l'atome de strontium avec une fréquence qui est de l'ordre de $(4 \times 10^{14})\text{ Hz}$, 400.000 mille milliards d'oscillations par seconde avec une précision au millième d'Hertz près. Donc la variation relative, la sensibilité relative est de l'ordre de 10^{-19} , et lorsqu'on mesure la fréquence de cette transition, on s'aperçoit qu'une seconde correspond à 429 000 milliards 228 millions etc... période de la transition du strontium et on donne 18 ou 19 chiffres significatifs dans cette mesure. Donc voilà, simplement montrer les progrès au cours des 50 et 60 dernières années. Mais je voudrais maintenant aller plus loin et remonter l'histoire pour vous montrer quels ont été les progrès sur la mesure du temps depuis que l'on fait de la science, c'est-à-dire essentiellement depuis le 16^{ème} ou le 17^{ème} siècle.

Une brève histoire de la mesure du temps

Pendant le moyen-âge, les mesures du temps les plus précises étaient faites par les horloges des tours d'église, c'est-à-dire qu'on avait un câble et on accrochait ce câble à ce qu'on appelle un folio, c'est-à-dire un bras horizontal, et ce bras oscillait – c'était les oscillations de torsion du fil de suspension du câble – et un mécanisme d'échappement permettait de faire bouger une aiguille et de mesurer le temps. La précision était assez médiocre comme je vais vous le montrer.



14^{ème siècle}:
Horloge des tours d'église



17^{ème siècle}: Pendule (Galilée, Huyghens)



18^{ème siècle}: chronometre de marine et montre à ressort (Harrison)



1920's

Horloge à Quartz (effet piezoelectrique)

Incertitude Relative

10^{-2} 10 minutes/jour

10^{-4} 10 secondes/jour

10^{-6} 10 s/mois

10^{-8} 1s/an

Principe: un oscillateur couplé à un mécanisme d'échappement compte les périodes : l'horloge est d'autant plus précise que la fréquence est plus grande.

Figure 6 : Brève histoire de la mesure du temps

Ensuite, au 17^{ème siècle}, grâce en particulier à Galilée et à Huyghens, on a remplacé ce système qui était très encombrant et peu précis par un pendule. Les oscillations d'une période d'environ une seconde du pendule avec un mécanisme d'échappement qui produisait l'énergie nécessaire pour maintenir l'oscillation et pour repérer le passage du temps à l'aide d'engrenages et d'aiguille.

Au 18^{ème siècle}, le système était rendu encore plus compact : on a remplacé les oscillations du pendule par les oscillations d'un petit ressort. C'était les premiers chronomètres, en particulier les chronomètres de marine qui, aussi, avaient quelques centaines de Hertz.

Et puis au début du 20^{ème siècle}, l'horloge à quartz, qui transforme les vibrations d'un diapason de quartz par l'effet piezo-électrique en une oscillation électrique que l'on mesure et qui, elle, a une fréquence de l'ordre de quelques dizaines de kHz, des dizaines de milliers de Hertz. Le principe est toujours le même : un oscillateur couplé à un mécanisme d'échappement compte les périodes, et l'horloge est d'autant plus précise que la fréquence est plus grande. Et d'ailleurs, lorsqu'on va construire les horloges atomiques et les horloges optiques que je viens d'évoquer, la fréquence augmente et la précision augmente parce que la fréquence que l'on mesure augmente.

Regardons la précision :

- l'incertitude relative des premières horloges était de l'ordre de 10^{-2} . (10 minutes par jour). Il fallait recaler l'horloge tous les jours pratiquement;
- l'horloge de Galilée et de Huyghens, 10^{-4} (10 secondes par jour). C'est cette mesure du temps qui a permis la première mesure de la vitesse de la lumière parce que les astronomes, utilisant des pendules de ce genre, se sont rendus compte que la période d'un satellite de Jupiter changeait de jour en jour et que c'était dû au fait que la terre s'éloignait ou se rapprochait de Jupiter; un effet Doppler dont la mesure a donné la première mesure de la vitesse de lumière. Mais il fallait une horloge ayant cette précision;

- les horloges de chronomètre de marine, 10 secondes par mois. Pourquoi est-ce qu'il fallait quelques secondes par mois? Parce qu'en emportant ces chronomètres sur des bateaux qui mettaient un mois ou deux mois à traverser les océans, on pouvait repérer le temps et le comparer, grâce aux mesures astronomiques, au temps que l'horloge donne qui était le temps du port de départ et mesurer les longitudes. C'était l'ancêtre du GPS qui avait cette précision;
- quant aux horloges à quartz, et bien elles ont atteint une précision de 10^{-8} , c'est à dire une seconde par an.

Vous voyez qu'on a gagné quelque chose comme 6 ordres de grandeur en 3 siècles. Et moi, je vous parle de 10 ordres de grandeur supplémentaires en 50 ans. Vous avez donc moins de progrès dans les 6 siècles précédents les années 50 que durant les trois quarts de siècles suivants. Et c'est pour vous indiquer la puissance de la physique moderne, en particulier grâce au développement des lasers.

Alors, on rappelle que la première horloge atomique était une horloge micro-onde due à **Norman Ramsey**, qui était un élève de Rabi et qui a obtenu le prix Nobel dans les années 1980. Il travaillait sur un jet atomique de césum, c'est à dire une expérience qui est fondamentalement analogue au premier maser (Figure 7).

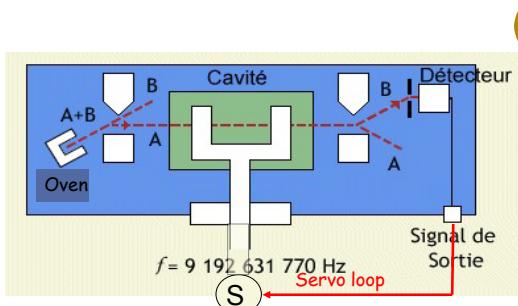


N.Ramsey
(étudiant de Rabi)

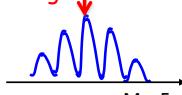
L'Horloge à Césium

L'oscillation des électrons dans un atome est beaucoup plus rapide et plus stable que celle d'un pendule, d'un ressort ou d'un quartz!

Incertitude d'environ 10^{-14}
(1 seconde sur un million d'années!)



Jet de Césium sondé par une double impulsion microonde:
franges de Ramsey



Le GPS

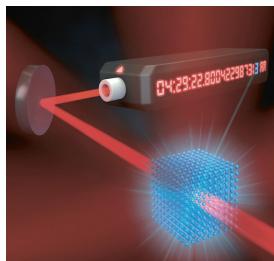
Figure 7 : L'horloge atomique microonde opère comme le maser sur un jet atomique

Donc les atomes de césum traversent une cavité dans laquelle il y a deux zones et le jet est soumis à une première impulsion dans la première zone puis à une deuxième; et une interférence se construit dans la probabilité de transition entre les deux niveaux. L'horloge à césum présente l'avantage d'abord que l'oscillation s'effectue à 9 GHz (c'est-à-dire beaucoup plus vite que les horloges à quartz par exemple)

et que c'est une oscillation qui est beaucoup plus stable que celle d'un pendule ou d'un ressort d'un quartz. Tous les atomes de cézium de l'univers fonctionnent aussi à la même fréquence. Donc ce que Ramsay et ses collègues ont fait, c'est asservir une micro-onde au pic central de la résonance de Ramsay obtenue dans ce dispositif, et il a atteint immédiatement une incertitude d'environ 10^{-14} , c'est-à-dire quelque chose qui est six ordres de grandeur plus précis que les horloges à quartz, tout simplement parce que la fréquence est six ordres de grandeur plus grande que celle de ces horloges à quartz et ça, c'est une incertitude d'environ 1 seconde sur un million d'années. Et ce sont ces horloges qui sont à la base du GPS.

Alors, je vous rappelle rapidement le fonctionnement du GPS : un ensemble d'horloges de ce genre, horloges cézium, sont embarqués sur des satellites; elles sont synchronisées entre elles tous les jours de façon à donner le même temps à la nanoseconde près, au milliard-seconde près, et elles envoient des impulsions qui sont reçus par exemple par un téléphone portable et, en mesurant le délai entre les différentes impulsions par triangulation, on obtient sa position sur Terre avec une précision de l'ordre du mètre. Ceci est rendu possible à cause de cette précision des horloges de l'ordre de 10^{-14} . Je signale qu'il faut, pour que le système marche, que l'on corrige, que l'algorithme qui nous donne notre position corrige le fait que les horloges qui sont dans les satellites, se déplaçant par rapport à nous, voient le temps évoluer à un rythme différent de celui qui est sur terre, non seulement parce qu'elles se déplacent mais aussi parce qu'elles sont à une altitude différente dans le champ de pesanteur terrestre. Ce sont les corrections de la relativité restreinte et générale d'Einstein. Si on ne faisait pas ces corrections, le GPS serait faux de plusieurs kilomètres. Il serait complètement inutilisable. Donc lorsqu'on utilise dans sa voiture un GPS, en fait, on fait des expériences qui valident non seulement la physique quantique, qui est la base de fonctionnement des horloges atomiques, mais la relativité restreinte en général. *Et c'est un exemple que je trouve fantastique de l'influence de la recherche fondamentale sur la recherche appliquée.*

Donc voilà ce que je voulais dire sur ce GPS; mais l'histoire n'est pas terminée. La fréquence d'une horloge GPS, c'est 10 GHz. Les fréquences optiques, ce sont des centaines de téra-hertz. Le problème pour mesurer ces fréquences, c'est d'être capable de ramener ces fréquences optiques, de les diviser pour arriver à un domaine dans lequel l'électronique permet de faire des mesures. Et c'est ce qui a été réalisé dans les dernières années. On a maintenant des horloges à laser qui comptent les oscillations à 420 THz (4×10^{14} Hz) d'un laser ultra stable asservi sur une transition atomique très fine de l'atome de strontium par exemple (Figure 8).



Elles comptent les oscillations à 420 THz (4,2 10^{14} Hz) d'un laser ultrastable asservi sur une transition atomique très fine.

Quatre Lasers utilisés pour:

1. Refroidir les atomes
2. Les piéger dans un réseau optique
3. Sonder la transition atomique
4. Compter la fréquence du laser sonde (laser « peigne de fréquence »)

100000 fois plus précises que les horloges du GPS

Incertitude 10^{-19} (0,1 s sur l'âge de l'Univers!)

Horloges sensibles à la différence de l'écoulement du temps en deux points séparés par une altitude de 1 millimètre dans le champ gravitationnel terrestre (effet de relativité générale)



Figure 8 : Horloges atomiques optiques

En fait, il y a quatre systèmes laser qui sont utilisés pour cela :

- il faut d'abord refroidir les atomes : donc un premier système laser qui refroidit les atomes;
- ensuite, il faut les piéger dans un réseau optique. Vous voyez, on fabrique un espèce de cube ou d'un cristal dans lequel vous avez les atomes isolés séparés les uns des autres et immobiles. Ce sont ces atomes immobiles qui permettent de repérer la fréquence avec une grande précision. Et comme ils sont immobiles à une grande distance les uns des autres, ils ne s'influencent pas, et la fréquence n'est pas perturbée par les collisions entre les atomes;
- enfin, il faut un 3^{ème} laser pour sonder la transition atomique;
- et il faut un 4^{ème} laser pour compter la fréquence du laser-sonde. C'est un laser, j'ai pas le temps de décrire la technologie, mais c'est ce qu'on appelle un laser peigne de fréquence qui permet de ramener la fréquence optique vers une fréquence micro-onde que l'on peut mesurer directement;

Et c'est grâce à cela qu'on obtient donc une mesure du temps 100.000 fois plus précise que les horloges du système GPS. Une incertitude de l'ordre de 10^{-19} . Alors 10^{-19} , c'est un dixième ou un vingtième de seconde sur l'âge de l'univers (qui est en dehors de 10^{18} secondes). C'est-à-dire que, si on avait synchronisé deux horloges comme cela au moment du Big Bang et si la physique était restée la même pendant tout ce temps, et bien elles ne différeraient pas l'une de l'autre de plus d'un vingtième de seconde. Cette précision est telle que, si on déplace l'horloge d'1 mm dans le champ de pesanteur terrestre, la courbure de l'espace-temps par effet de relativité générale

fait que les horloges ne battent pas exactement à la même fréquence. Et cet effet a été observé. On observe l'effet qu'on appelle le **red-shift**, le déplacement vers le rouge, lié à la relativité générale sur des différences d'altitudes maintenant d'1mm. Cet effet a été découvert dans les années 60 par **Pound** à Harvard. Il a utilisé un phénomène «effet Mossbauer» sur une tour qui faisait 25 m de haut. Maintenant, ce n'est plus 25 m, c'est 1 mm. Et vous voyez que ceci illustre cette fameuse peinture de **Salvador Dali** qui dit que, quand vous prenez une horloge qui fait 10 cm de hauteur, et bien le temps n'est pas le même en haut et en bas de l'horloge, et on le voit maintenant dans des expériences extrêmement fines réalisées grâce au laser.

Je voudrais passer maintenant à une autre échelle qui est **l'échelle des températures**. Vous voyez cette échelle logarithmique des températures (Figure 9) : j'ai représenté les températures les plus élevées qu'on connaît, les millions de degrés qui sont les températures à l'intérieur des étoiles, 6000°K la température à la surface du soleil, 300°K c'est la température ambiante. À cette température, les atomes ont des vitesses thermiques de l'ordre de 500 m/s.

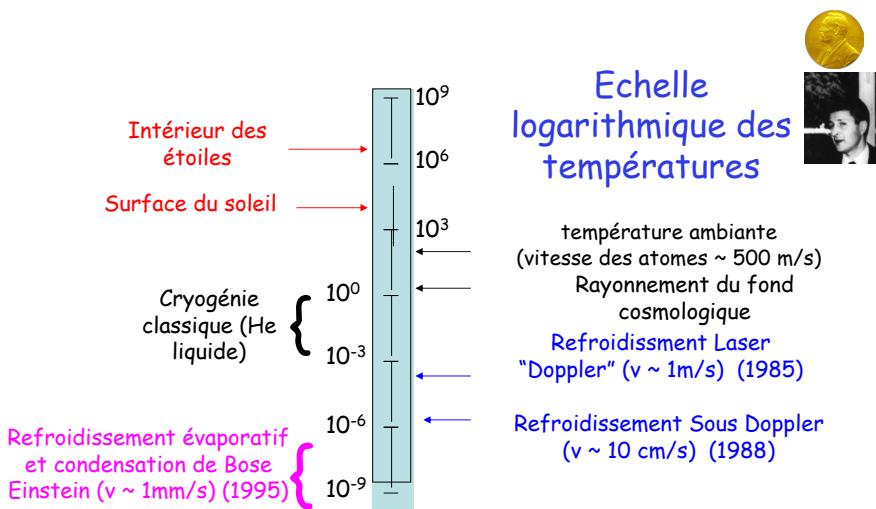


Figure 9 : Le refroidissement laser des atomes

2,7°K, c'est la température du rayonnement du fond cosmologique micro-ondes. Si on baisse encore, on arrive à des températures de l'ordre de 1 millième de degré Kelvin qui sont les températures que l'on réalise grâce au cryostat hélium, hélium naturel ou hélium pompé ou hélium 3.

Et bien, les lasers ont permis de faire un bond et descendre au microkelvin. C'est ce qu'on appelle le refroidissement laser-doppler qui a été découvert en 1985, suivi du refroidissement sous doppler, température de l'ordre du micro-kelvin, 1 millionième de degré absolu et enfin, prenant le relais, ce qu'on appelle le refroidissement

évaporatif qui conduit à la condensation de Bose-Einstein pour des températures de l'ordre du nano-kelvin ou au-dessous.

Donc, 11 ordres de grandeur gagnés vers les basses températures, 5 ordres de grandeur sur la réduction des vitesses atomiques (on passe de 500 mètres/seconde à des températures de l'ordre du millimètre ou du centimètre par seconde). Ceci a conduit au Prix Nobel de 1997 que **Claude Cohen-Tannoudji** (le jeune homme que vous avez vu sur la photo que je vous ai montré au début) a obtenu avec ses collègues **Steve Chu et Bill Phillips** pour ses mises au point de ses mécanisme de refroidissement des atomes (Figure 10).

Alors comment ça fonctionne ?

Vous prenez les atomes et vous les placez à l'intersection de six faisceaux laser secontre-propageant dans les trois directions de l'espace. Les lasers sont légèrement décalés vers le rouge de la transition; c'est-à-dire que j'ai une fréquence légèrement inférieure à la transition atomique.

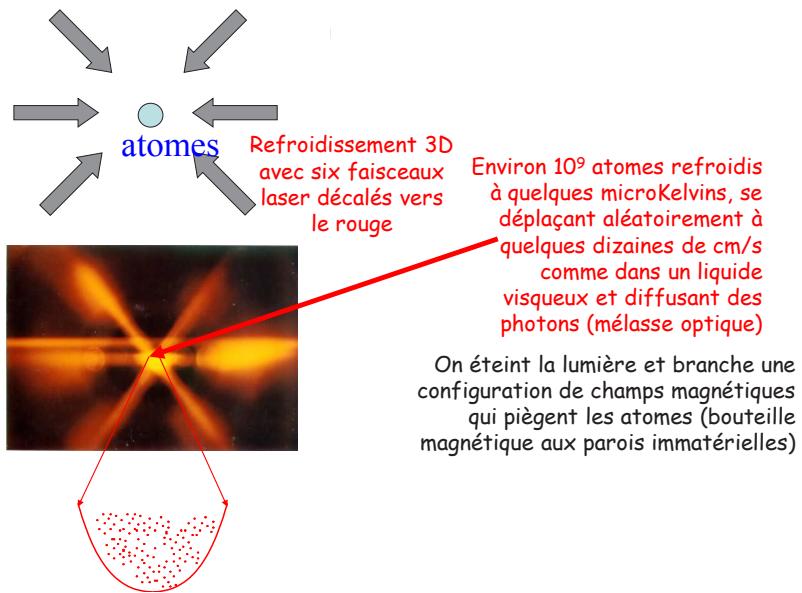


Figure 10 : Refroidissement et piégeage magnétique

Ça veut dire que lorsqu'un atome se déplace vers le laser qui vient à son encontre, il va rentrer en résonance, parce que l'effet **Doppler** augmente la fréquence vue par l'atome et donc il va se mettre à absorber des photons donc être freiné parce que les lasers viennent à sa rencontre. Par contre, les lasers qui sont dans son dos s'éloignent de résonance parce qu'ils se déplacent dans la direction positive; et eux ils ne produisent pas d'effet. Donc, il y a un effet de déséquilibre qui fait que quelque soit la direction dans laquelle l'atome se déplace, il se trouve freiné par la lumière qui vient contre lui. Et le résultat de cela, c'est qu'on peut obtenir environ 1 milliard d'atomes refroidis à

quelques micro-kelvin, qui se déplacent aléatoirement dans toutes les directions avec une force qui s'oppose à la vitesse, une force visqueuse un peu comme une bille qui tomberait dans un pot de miel; et on appelle ça une **Mélasse optique**. Cette mélasse optique permet d'obtenir des atomes très froids. Une fois que les atomes sont froids et vous voyez au centre de cette intersection de ces faisceaux laser une tache brillante qui montre la fluorescence de ce nuage de milliards d'atomes, et bien on peut couper les faisceaux laser et introduire une distribution de champ magnétique qui piège ces atomes. Chacun de ces atomes possède un moment magnétique; on peut fabriquer une espèce de bouteille virtuelle qui fait que ces atomes très froids, ayant une énergie cinétique très faible, sont maintenus en suspension dans l'espace et dans le vide bien sûr et à des températures de l'ordre du micro-kelvin.

Alors la question qui se pose, c'est: **est-ce qu'on peut refroidir encore plus?**

Le microkelvin n'est pas suffisant pour atteindre le domaine de la condensation de Bose Einstein. Alors ça, ça a été l'étape suivante : on fabrique donc ce piège magnétique et l'idée, c'est d'utiliser le phénomène très simple d'évaporation.

Qu'est-ce que c'est que l'évaporation? C'est un phénomène dans lequel les atomes les plus énergiques sont chassés et ceux qui restent, qui ont moins d'énergie, par collision se re-thermalisant entre eux à une température plus basse (Figure 11). C'est ce que vous faites quand vous soufflez sur une tasse de thé ou de café pour la refroidir. Et bien ici, ce qu'on fait, c'est qu'on abaisse les parois du piège, ce qui fait que les atomes les plus rapides sont éjectés et, petit à petit, on perd des atomes, mais on fait abaisser la température plus vite qu'on ne perd des atomes. Et finalement, on obtient des atomes ultra froids, dont la distance entre atomes est inférieure à ce qu'on appelle la **longueur d'onde de de Broglie**, qui est la manifestation quantique de la matière aux très basses températures et aux très faibles vitesses.

Comment est-ce qu'on observe ça?

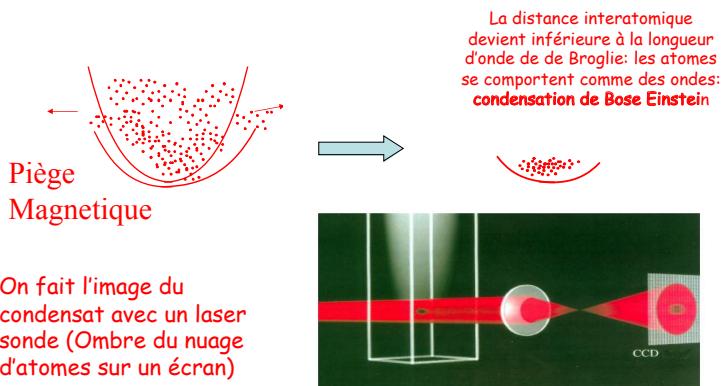


Figure 11 : Refroidissement évaporatif abaisser la barrière du piège et laisser les atomes rapides s'échapper

Et bien on éclaire avec un faisceau laser, on regarde l'ombre du nuage d'atome sur un écran et on voit le phénomène qui est un film de la condensation de Bose Einstein que vous allez voir ici (Figure 12).

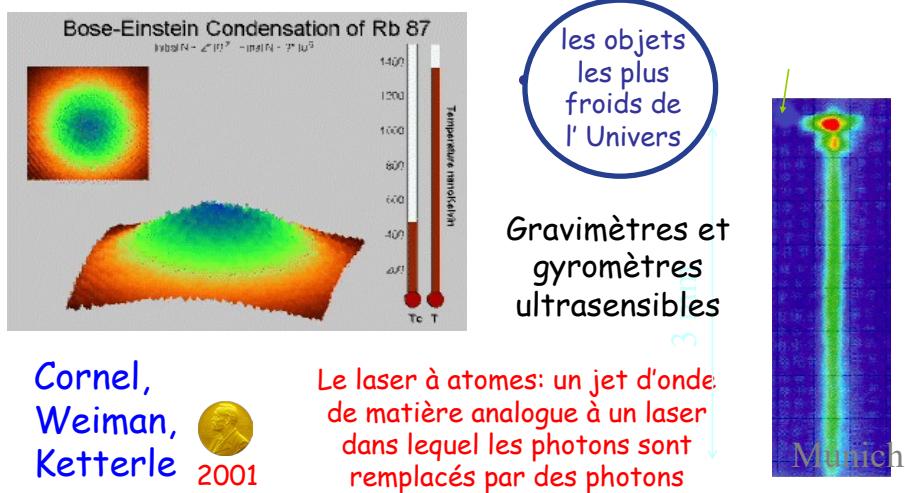


Figure 12 : Film de la condensation de Bose-Einstein

Vous voyez qu'au fur et à mesure qu'on évapore, les atomes se concentrent au milieu et à la fin, on a un changement très net où on voit tous les atomes tomber dans l'état fondamental du piège. Alors je rejoue ici et donc ça a été la première image montrée par ceux qui ont découvert cet effet dans les années 1995, et ça vraiment une nouvelle absolument extra-ordinaire dans le milieu de la physique atomique et de l'optique.

Si ensuite on fait un petit trou dans ce piège d'atomes très froids, on les laisse tomber, et bien les atomes ne vont pas tomber comme des atomes ordinaires; ils vont tomber dans un faisceau extrêmement colmaté qui est l'équivalent d'un faisceau laser dans lequel les photons sont remplacés par des atomes. C'est ce qu'on appelle un **laser à atome**. Et ces lasers à atomes ont une cohérence qui fait qu'on peut faire des interférences avec. On peut fabriquer des interféromètres de lumière. Et il y a toute une série d'applications qui sont possibles. Donc ce que je voudrais dire, c'est que ce sont les objets les plus froids de l'univers (au-dessous du nano-kelvin) et ce sont des instruments qui existent et qui sont utiles pour la navigation, pour l'exploration géologique des gravimètres et des gyromètres ultra sensibles qui sont basés sur les interférences de ces ondes d'atomes froids. Et ceci a donné un prix Nobel pour **Carl Wieman et Wolfgang Ketterle** en 2001. Donc on arrive maintenant à une époque rapprochée.

Alors maintenant, je voudrais dire quelques mots sur la **détection et la manipulation d'atomes individuels** grâce au laser. Et ça se rapproche un peu de la physique à laquelle j'ai directement contribué.

Je vous remontre ici (Figure 13) une photo d'Alfred Kastler en 1966. Il tient une cellule de résonance dans laquelle il y a 10 milliards environ ou 100 milliards d'atomes. Il travaillait avec ça.

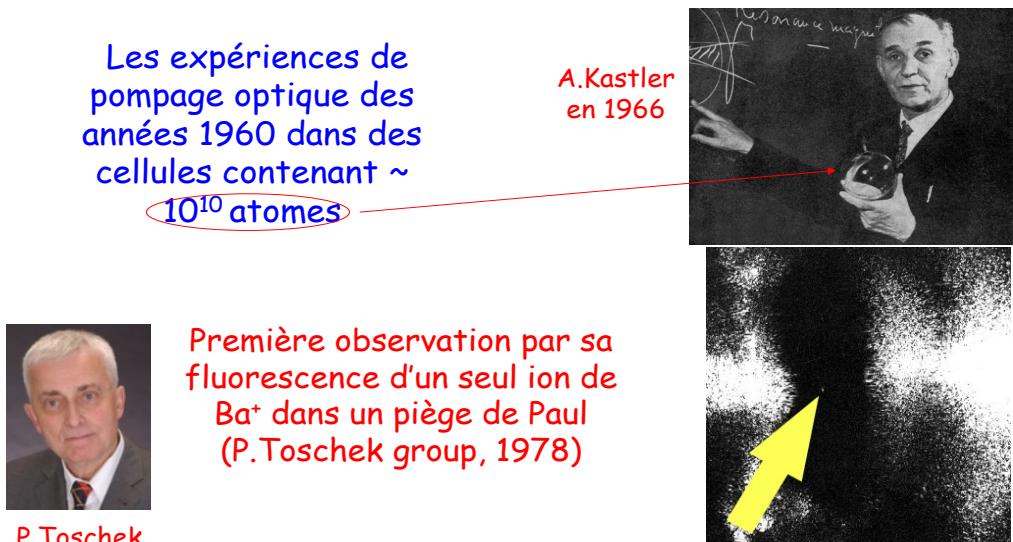
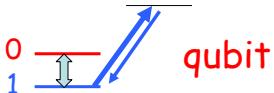


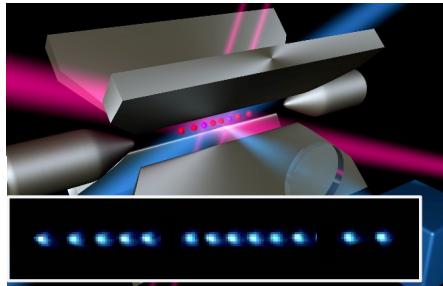
Figure 13 : La détection et la manipulation d'atomes individuels avec des lasers

En 1978, et ça a été également considéré comme une étape importante: on a observé pour la première fois un seul ion de Baryum (Ba^+) dans un piège. Je ne sais pas si vous voyez quelque chose mais au bout de la flèche, il y a un tout petit point brillant. C'était la première observation et ça a été publié dans un journal. Vous voyez qu'il y a des tas de points brillants qui sont liés à la lumière diffusée sur les électrodes qui retiennent le piège. Dans ces électrodes qui constituent le piège, il y a effectivement 10^{23} atomes qui fluorescent mais au milieu, il y a un seul atome de Baryum, comme une petite étoile à peine visible. Et donc, ce premier signal qui a donné au départ de cette physique encore 10 ordres de grandeur de gagnés.

Je vous montre ce qu'on a obtenu quelques années plus tard. Vous voyez ici un piège dans lequel vous avez quelque chose comme une quinzaine d'ions (Figure 14). Ici il s'agit d'ions de calcium. Chaque ion est bien séparé des autres. Et vous le voyez parce qu'il fluoresce : il émet de la lumière lorsqu'il est éclairé par un laser.



Réseau à 1D d'ions piégés par des électrodes, évoluant entre deux états notés 1 et 0:



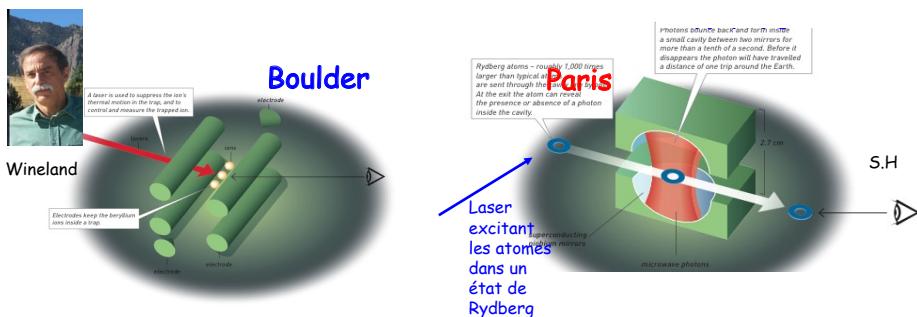
Un "boulier atomique" pour démontrer le fonctionnement de portes quantiques (superpositions d'états et intrication)

Figure 14 : Manipulation d'atomes et de photons individuels pour l'information quantique

En fait, ce qui se passe, c'est qu'on a un système dans lequel il y a trois niveaux importants : les niveaux que j'ai marqué 0 et 1 qui sont reliés entre eux par des transitions laser que je n'ai pas indiqué; et le système peut osciller, peut évoluer entre ces deux niveaux. Le niveau 0 code pour un 0 en informatique, le niveau 1 code pour 1. Mais en physique quantique, le système peut être dans une superposition linéaire arbitraire de ces deux états 0 et 1.

Comment est-ce qu'on voit le système? Et bien, on éclaire avec un laser qui conduit du niveau 1 vers un troisième niveau qui est le niveau supérieur que je n'ai pas nommé, et lorsque le laser est absorbé, l'atome monte dans ce troisième niveau et il retombe en émettant un photon de fluorescence, ces photons de fluorescence que l'on voit sur l'image. Lorsqu'on fait passer l'atome (là, vous voyez que tous les atomes sont dans le niveau 1) du niveau 1 au niveau 0, et en focalisant le laser sur un atome bien particulier, vous voyez que la fluorescence disparaît. On peut faire disparaître la fluorescence à l'endroit où on veut et on peut faire passer donc l'atome du niveau 0 ou 1 et on peut, de cette façon, étudier comment cette chaîne d'atomes se comporte, comment les atomes évoluent entre les deux niveaux en les manipulant à l'aide de lumière laser et en les détectant à l'aide de lumière laser. Et donc vous voyez que ce système constitue ce qu'on appelle un "boulier atomique" qui permet de démontrer le fonctionnement des portes quantiques, comment est-ce qu'on peut superposer les états et voir comment et pourquoi est-ce que les atomes interagissent entre eux? Parce qu'ils font partie d'une chaîne qui a des modes de vibration. Et lorsqu'on excite un atome par l'intermédiaire de la vibration, ça peut se répercuter sur l'état de l'autre et on peut fabriquer comme ça des portes quantiques, et on a testé ce qu'on appelle l'**intrication quantique**.

Donc ça, ce sont des expériences qui sont faites avec des ions piégés (Figure 15). Dans mon domaine de recherche, je fais l'inverse. Vous voyez que là, j'ai symbolisé les expériences qui ont été faites par **Dave Wineland** à Boulder. Ils trappent des atomes mais ils les interrogent avec la lumière laser. Nous à Paris, nous avons fait l'inverse. Nous avons trappé des photons, piégé des photons entre deux miroirs et nous les avons interrogés avec un jet d'atomes traversant la cavité des atomes spéciaux qui sont des atomes de Rydberg, des atomes très excités qui interagissent fortement avec les micro-ondes.



Les deux faces d'une même médaille : manipulation non destructive d'atomes piégés avec des photons ou de photons piégés avec des atomes

L'interaction lumière-matière au niveau le plus fondamental et la démonstration d'étapes élémentaires de l'information quantique

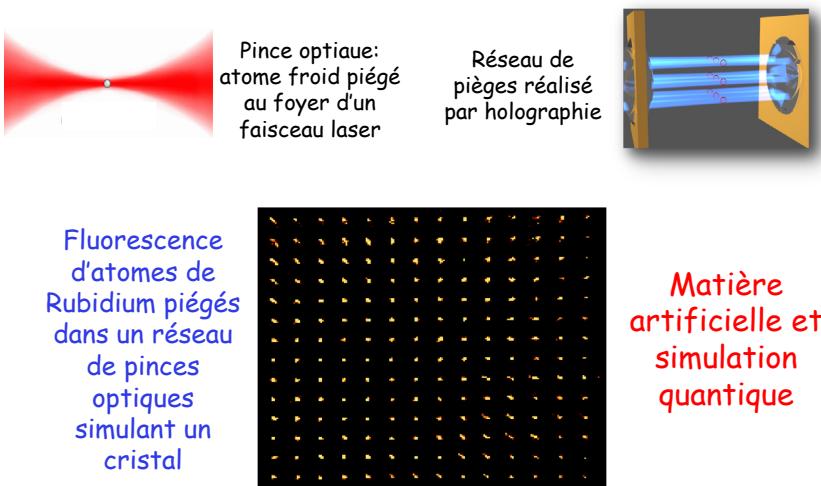
Figure 15 : Ions piégés et Electrodynamique quantique en Cavité : la physique quantique “in vivo”

Le point que je voudrais simplement souligner, c'est que ces deux expériences sont un peu miroir l'une de l'autre. Ce sont des expériences qui sont les deux faces d'une même médaille. On manipule soit des atomes piégés avec des photons – c'est l'expérience des ions piégés –, soit des photons piégés avec des atomes. Et ces deux types d'expériences en fait sont non destructibles, c'est à-dire qu'on observe des atomes mais on ne les détruit pas, on observe des photons sans les détruire, ce qui est très différent de ce qui se passe par exemple dans un accélérateur de particules où les particules que l'on détecte sont détruites. Et donc c'est l'interaction lumière-matière au niveau plus fondamental. Et ça nous a permis de démontrer des étapes élémentaires de processus d'information quantique.

Très rapidement maintenant où est-ce que cette physique conduit ?

On peut réaliser des réseaux de pinces optiques pour faire de la simulation quantique.

Alors qu'est-ce que c'est qu'une pince optique? Une pince optique, c'est quelque chose de très simple: si on focalise la lumière d'un laser en un point précis, on fabrique une région de l'espace où il y a une intensité lumineuse intense, très forte. Et des atomes sont attirés vers la lumière forte : c'est ce qu'on appelle la **force dipolaire**, le fait que le dipôle des atomes excités par la lumière pousse les atomes vers le maximum d'intensité lumineuse. On réalise ce qu'on appelle **une pince optique** qui maintient – évidemment il faut partir d'atomes froids au départ –, ces atomes froids en position. Et ce sont ces pinces optiques qui, en particulier, permettent de réaliser ce réseau d'atomes que je vous ai montré sur l'horloge optique tout à l'heure (Figure 16).



Figue 16 : Réseau de pinces optiques pour simulation quantique

Alors une fois qu'on a une pince optique, on peut réaliser un ensemble de pinces optiques par ce qu'on appelle une méthode d'holographie.

Qu'est-ce que c'est que **l'holographie**? C'est une méthode qui permet de modifier la structure d'un front d'onde, de modifier la phase de l'onde en différents points du front d'onde et la modifier de façon telle que lorsqu'on focalise après, au lieu d'obtenir un point, on obtient un réseau de points. Et ce réseau de point est la Transformée de Fourier de l'image qu'on a réalisée dans le plan focal, dans le plan d'entrée de la lentille. Et de cette façon, on peut réaliser des réseaux comme celui-là ici (Figure 16). Vous voyez la Fluorescence d'Atomes de Rubidium piégés dans un réseau de pinces optiques. On a un atome à chaque endroit. Les atomes sont séparés par plusieurs microns et très régulièrement espacés. Et ceci réalise de façon artificielle un cristal, mais à une échelle totalement différente de la physique de la matière condensée. Au lieu que les atomes soient à quelques angströms les uns des autres, ils sont à plusieurs microns les uns des autres. Ce qui veut dire qu'on peut les interroger individuellement et étudier comment ce système évolue. C'est ce qu'on

appelle de la **matière artificielle pour simulation quantique**. Et cette simulation quantique permettrait de découvrir de nouvelles phases intéressantes de la matière. C'est un domaine de physique qui est extrêmement développé en ce moment.

Je passe maintenant rapidement à un autre domaine qui est celui des **impulsions lumineuses très courtes** (Figure 17).

En fait, on peut faire du laser un milieu amplificateur, non pas sur une fréquence mais sur un très grand nombre de fréquences qui sont séparées les unes des autres par un intervalle fixe. Et si on a le moyen, par de l'optique non linéaire, de verrouiller tous ces modes entre eux, et bien on peut s'arranger pour que, à un instant donné, tous ces modes interfèrent constructivement dans une très grande lumière et très peu de temps après ou avant, l'interférence est destructrice. Donc on peut fabriquer des impulsions lumineuses ultra courtes en verrouillant des modes en phase les uns avec les autres. On obtient une impulsion lumineuse très courte qui va d'un miroir à l'autre et qui s'échappe par un des miroirs vers l'extérieur. Et on obtient des impulsions lumineuses très courtes.

La durée de ces impulsions est d'autant plus courte que le nombre de modes qui interfèrent est plus grand. Si on fait interférer entre 100.000 modes, et bien on va avoir des impulsions de l'ordre de la femto-seconde⁶.

C'est quelques périodes optiques. c'est à dire qu'en fait, on obtient une impulsion dans laquelle le champ électromagnétique oscille uniquement deux ou trois ou quatre fois.

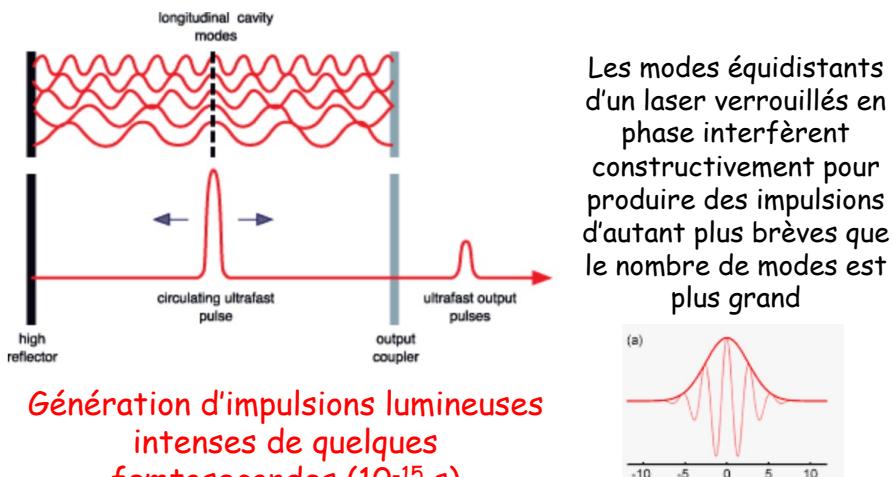


Figure 17 : Laser multimodes verrouillés en phase et impulsions lumineuses ultracourtes

⁶ (10^{-15} s)

Des impulsions très courtes. Ces impulsions concentrent toute l'énergie, c'est-à-dire que dans ce train d'impulsion, la puissance moyenne est en fait concentrée sur des temps très courts et devient donc très importante. Et si on veut amplifier davantage la lumière, le problème que l'on rencontre, c'est que les milieux amplificateurs vont être détruits par l'impulsion, une impulsion qui est très importante, qui rentre dans un milieu; elle va carrément créer un trou dans le milieu et elle va faire fondre la matière ou va détruire le milieu amplificateur.

Donc pour obtenir des impulsions plus importantes, il a fallu utiliser une technique, une astuce qu'on appelle la méthode **CPA (Chirped Pulse Amplification)** qui est très simple dans son principe (Figure 18) : on part d'un pulse court et on le fait passer dans un système de réseau optique qu'on appelle un étaleur (Pulse stretcher). Le pulse va être étalé dans le temps dans ce réseau. Il sépare les différentes composantes de lumière de couleurs différentes. L'impulsion rouge traverse moins de distance que l'impulsion bleue donc elle va plus vite et elle sort plus vite du milieu et on obtient un pulse étalé dans lequel la puissance est plus faible. On fait passer ce pulse étalé dans l'amplificateur donc on obtient une très grande énergie et ensuite on utilise un compresseur qui agit en sens inverse et qui remet toutes les couleurs ensemble au même instant. Et on obtient à la sortie une impulsion extrêmement puissante qui représente la puissance de milliers de centrales nucléaires pendant quelques femtosecondes.

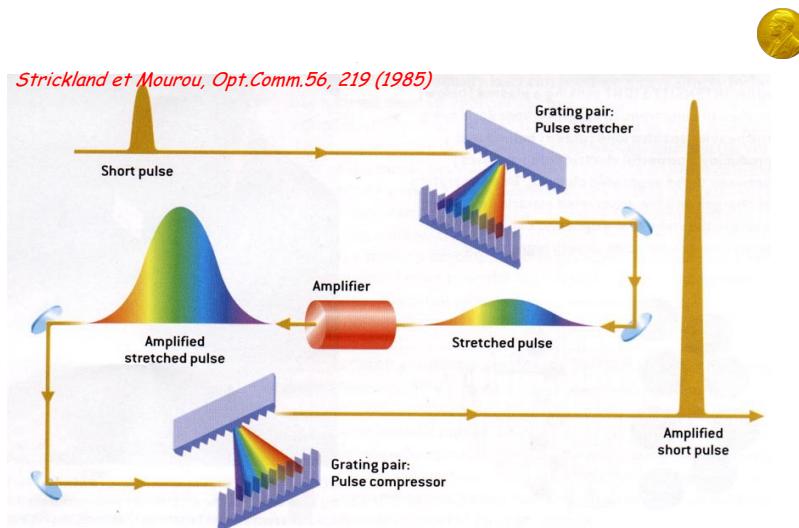
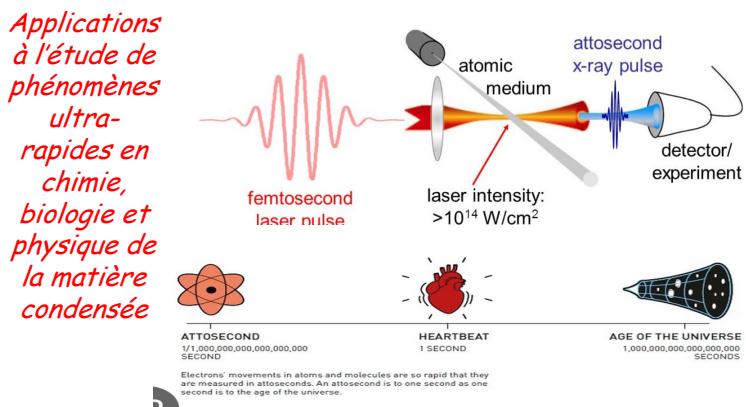


Figure 18 : La méthode CPA (chirped pulse amplification) pour augmenter la puissance lumineuse

On concentre pendant quelques secondes une puissance absolument gigantesque. Ces puissances gigantesques créent des phénomènes non-linéaires extrêmement intéressants. Si on fait passer ce pulse de l'ordre de 10^{14} Watts/cm² sur un jet d'atome

de gaz rare (argon par exemple), on fabrique des harmoniques qui tombent dans le domaine des rayons X et ces impulsions harmoniques ont une durée encore beaucoup plus courte parce qu'elles correspondent uniquement à une fraction de la fréquence optique initiale. Et on obtient ce qu'on appelle des pulses atto-secondes. Des pulses qui durent un milliardième de milliardième de seconde.

Le prix Nobel a été donné l'année dernière pour ces recherches et, dans le communiqué du prix Nobel, il y a ce dessin, ce diagramme très intéressant qui montre pourquoi est-ce qu'on prend comme unité de temps la seconde depuis les Babyloniens? (Figure 19)



La seconde (période de battement du cœur) à mi-chemin logarithmique entre l'attoseconde et l'âge de l'Univers!

Figure 19 : Génération par optique non linéaire d'impulsions de rayons X de quelques attosecondes!

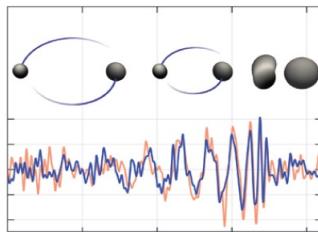
Parce que la seconde, c'est à peu près la période du battement du cœur, c'est le temps qui est un temps fondamental au niveau de l'existence humaine. Si vous divisez une seconde par 10^{18} , vous arrivez à l'attoseconde et si vous multipliez une seconde par 10^{18} vous arrivez à l'âge de l'univers. Donc la seconde, le battement du cœur, il est intermédiaire sur une échelle logarithmique entre les impulsions les plus courtes qu'on sait réaliser maintenant et la durée de l'âge de notre univers. Ces impulsions d'atto-secondes, en les envoyant dans des systèmes matériels, dans des surfaces et sur des jets moléculaires, dans des milieux biologiques, ça permet d'étudier par méthode stroboscopique l'évolution de ce système à l'échelle de l'atto-seconde qui est l'échelle d'évolution des mécanismes moléculaires ou atomiques. Et donc, on peut maintenant étudier réellement ce qui se passe en temps réel dans une réaction chimique ou dans une réaction à la surface d'un solide.

Enfin, le dernier phénomène que je voudrais évoquer c'est la **détection des ondes de gravitation** (Figure 20). Là encore, c'est quelque chose que le laser a permis. Et c'est vraiment quelque chose sur laquelle il faut vraiment réfléchir parce que les ordres de grandeur donnent vraiment le vertige.

Qu'est-ce qu'il s'est passé?

Et bien, on a construit sur la terre des interféromètres qui sont deux interféromètres -le LIGO-, l'un dans l'État de Washington et l'autre en Louisiane.

La coalescence de deux trous noirs à 1,3 milliards d'années-lumière...



...a produit une onde de gravitation détectée par des antennes interférométriques-laser

Un tour de force pour détecter un déplacement des miroirs (distants de 4km) de moins d'un milliardième d'un diamètre atomique



Figure 20 : La détection des ondes de gravitation: une nouvelle fenêtre sur l'Univers

Ce sont deux bras à angle droit l'un de l'autre, qui ont 4 km de long. Une lame séparatrice envoie la lumière dans les deux bras, lumière qui se réfléchit et revient et elle interfère au retour : un faisceau laser de plusieurs centaines de Watts, extra stable, se propage dans les deux bras et réfléchit, par des miroirs qui ne vibrent pas du tout, qui sont stabilisés mécaniquement d'une façon extraordinaire (il y a un vide, le vide le plus poussé qui règne dans ce système) et ils attendent le passage d'une onde de gravitation, qui va contracter un des deux bras et dilater l'autre à une fréquence qui correspond à la fréquence de l'onde.

Quand est-ce que se produisent ces phénomènes? Par exemple, lorsque deux trous noirs situés à des milliards d'années-lumière de la Terre coalescent (c'est à dire qu'ils tournent l'un autour de l'autre) et finalement, par la force de gravitation, ils mergent l'un dans l'autre.

Ce phénomène-là fait perdre 4 ou 5 masses solaires : vous prenez 4 ou 5 masses solaires qui, en une seconde, disparaissent. Vous voyez l'énergie, la puissance à laquelle ça correspond, comparé avec le soleil. Notre Soleil va disparaître en perdant un millième de sa masse : les réactions nucléaires correspondent à 1 millième de la masse solaire, et ce millième de la masse solaire, il est perdu en 5 milliards d'années. Là, vous concentrez 5 milliards d'années en une seconde. Le millième de la masse solaire devient 5 masses solaires. Vous avez l'énergie qui a disparu sous forme d'onde de gravitation. Cette onde de gravitation s'est propagée sur plus d'un milliard d'années-lumière et quand elle est arrivée sur la terre, elle a contracté un des bras et dilaté l'autre de quelque chose qui est un milliardième de la taille d'un atome.

Donc vous voyez ce qu'on a été capable de détecter : un phénomène qui est de l'ordre de 10^{-21} à 10^{-22} si vous comparez le déplacement à la distance des miroirs. Et ce que je voudrais également signaler –c'est ça aussi qui fait la beauté de la physique– c'est que les lasers qui sont indispensables pour cela viennent d'une idée d'Einstein en 1916: "l'émission stimulée". En 1915, Einstein avait développé la Théorie de la relativité générale qui prédisait l'existence de ces ondes. Et Einstein n'aurait jamais cru qu'on pourrait utiliser un jour un laser, dont il ne connaissait pas l'existence, pour mettre en évidence un phénomène qu'il avait prévu à ce moment-là. Donc, vous voyez le lien constant entre recherche fondamentale-application et je crois que c'est quelque chose d'assez remarquable.

Donc je vous redonne ici le principe (Figure 21) : le laser extrêmement puissant, le séparateur **Beam Splitter**, les deux bras dans lesquels la lumière se propage.

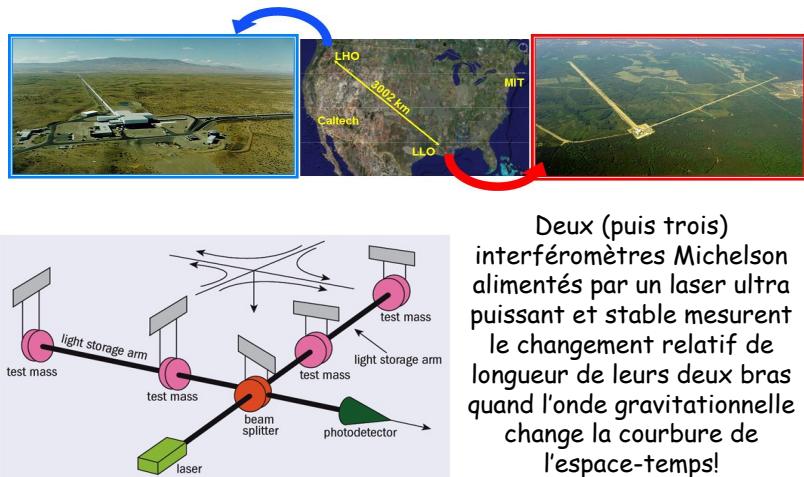


Figure 21 : L'astronomie gravitationnelle ouvre, grâce au laser, une nouvelle fenêtre sur l'Univers !

Il y a des miroirs de façon à stocker la lumière dans les bras et à les faire rebondir un grand nombre de fois, et on regarde l'interférence; et il est très important bien sûr d'avoir au moins deux stations parce que n'importe quelle vibration parasite pourrait donner ce signal. Donc, ils ont été conscients du fait qu'ils avaient détecté quelque chose lorsque les deux observatoires, situés à quelques milliers de kilomètres l'un de l'autre, ont réagi exactement de la même façon avec un décalage dans le temps correspondant à la propagation de la vitesse de l'onde entre les deux endroits. Et ce décalage dans le temps, avec un troisième observatoire qui est maintenant VIRGO en Europe, permet, par triangulation, de savoir de quelle région de l'espace proviennent ces événements. Et maintenant, je pense qu'on détecte des événements toutes les semaines, plusieurs fois pratiquement, et des événements tous les jours et on fait une toute nouvelle astronomie, qui est **l'astronomie gravitationnelle**. Si vous y réfléchissez jusqu'à maintenant, l'information essentielle qu'on recevait de l'espace se faisait par des ondes électromagnétiques; maintenant, c'est par des ondes de gravitation qu'on complète l'information.

Conclusion

Il y a un dialogue permanent entre recherche fondamentale et appliquée (Figure 22).

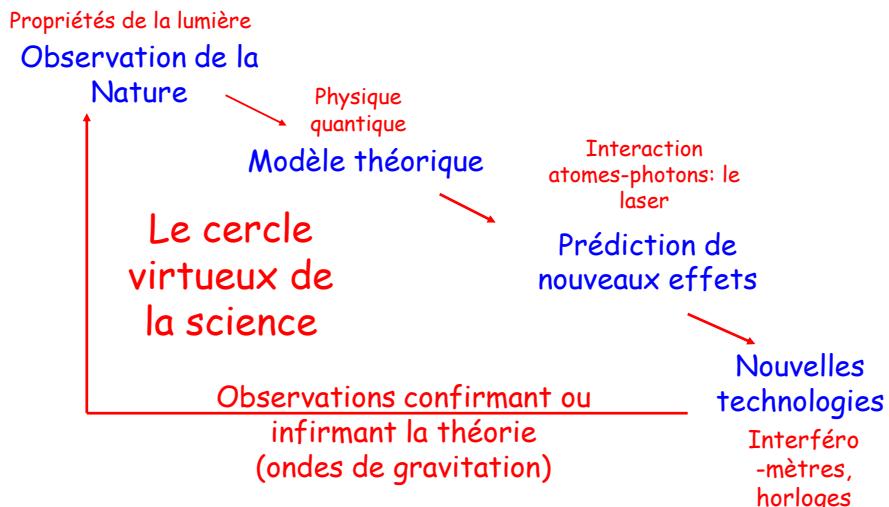


Figure 22 : Le dialogue permanent entre recherche fondamentale et applications

Au départ, la curiosité nous fait observer la nature : par exemple, les propriétés de la lumière. Ces propriétés de la lumière conduisent à l'édification de modèles théoriques : par exemple la théorie de la physique quantique, qui est née de propriétés bizarres de la lumière qui ont été observées par les physiciens au début du 20^{ème} siècle. Ces modèles théoriques prédisent de nouveaux effets : par exemple l'interaction atome-photon qui a conduit au laser. Une fois qu'on a prédit ces nouveaux effets, ça conduit à de nouvelles technologies (laser, interféromètre, horloges...) et ces nouvelles technologies nous donnent des instruments beaucoup plus précis que ceux qu'on avait auparavant; et ces instruments permettent de poser les questions et de faire des observations qui vont, soit confirmer, soit infirmer la théorie : par exemple, si on n'avait pas observé d'ondes de gravitation, on aurait pu avoir des doutes sur la validité de la théorie d'Einstein.

Donc tout ceci constitue une espèce de cercle vertueux qui est le cercle vertueux de la science; et au milieu de ce cercle, il y a les nouvelles technologies dont bénéficient tous les habitants de la terre parce que ça améliore les conditions de vie, ça donne davantage de pouvoir sur la nature.

Donc c'est de ça dont je voulais vous parler. Et pour vous montrer l'importance des lasers, j'ai rassemblé ici tous les prix Nobel de physique qui ont été donnés pour des découvertes ou des inventions faites grâce au laser, soit en physique, soit en chimie (photo 3). Et vous voyez qu'il y a -j'ai compté- jusqu'à 43 personnes qui, depuis 1964, depuis le premier prix Nobel sur les lasers, ont obtenu ce prix pour des

recherches fondamentales dans ce domaine et le dernier en date étant d'ailleurs, cette année, le Prix Nobel sur les **impulsions à seconde** et je suis très heureux qu'il ait été donné à **Anne L'huiler**, qui est une chercheuse française en Suède, qui a été mon étudiante à l'École normale supérieure pour sa thèse de 3^e cycle obtenue au début des années 80. Il y a aussi le prix Nobel de **Claude Cohen-Tannoudji** en 1997 sur le **refroidissement atomique**. Donc, c'est vraiment une recherche qui est très active et je pense qu'il y aura d'autres prix Nobel qui se profilent pour d'autres applications des lasers, par exemple l'application dont je vous ai parlée sur les **horloges optiques**; je suis sûr qu'un jour ou l'autre, il y aura un prix Nobel pour les horloges optiques.

Bon voilà, je vais m'arrêter là. J'espère que je vous ai convaincu de l'importance des lasers si c'était nécessaire.

Merci de votre attention.



Le Pr. Serge HAROCHE en compagnie de Pr. Omar FASSI-FEHRI et de Pr. Moustapha BOUSMINA.

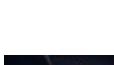
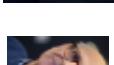
	1964: (the Laser)
	1966 (Optical pumping)
	1971 (Holography)
	1981 (Laser spectroscopy)
	1986 (Lasers in chemistry)
	1989: (atomic clocks & ion traps)
	1999: (ultra-short laser pulse chemistry)
	2000: (layered Heterostructures and laser diodes)
	2001: (Bose Einstein Condensation)
	2005: (Quantum optics and frequency combs for optical clocks)
	2014: Super-resolved fluorescence microscopy
	2017: detection of gravitational waves
	2018: Optical tweezers and ultra intense light pulses
	2022: Entanglement and quantum non-locality
	2023: attosecond pulses
	2009: (Optical fibers for laser beams)
	2012: (Control of single quantum particles)

Photo 3 : Depuis 60 ans, 43 Prix Nobel en Physique et Chimie liés aux lasers et à leurs applications

Débat

Abdelaziz Sefiani (Directeur des séances) : Merci beaucoup Professeur Serge Haroche pour cette brillante et remarquable conférence qui va certainement susciter des questions. Merci également d'avoir rendu la conférence accessible pour les non spécialistes, ce qui nous a permis d'apprécier les progrès réalisés durant toutes ces années dans le domaine de la physique et surtout les applications des technologies qui en ont découlé. Je donne la parole à la salle.

Mostafa Bousmina : Merci Professeur Haroche. On était vraiment transporté par une conférence extraordinaire, limpide, claire. Vraiment magnifique. Merci beaucoup. La relativité générale d'Einstein nous dit que si je mets deux horloges une au niveau de ma tête, une autre au niveau de mes pieds, je vais avoir des différences de la courbure de l'espace. Vous nous avez dit que maintenant, on mesure vraiment la différence de temps, même à une échelle du millimètre, ce qui est extraordinaire. Je ne le savais pas. Est-ce qu'on peut espérer dans le futur, avec le développement des lasers, pas au niveau de l'atto-seconde mais beaucoup plus loin, est-ce qu'on peut espérer baisser ce millimètre à des distances qui sont même à l'échelle atomique et, à ce moment-là, est-ce qu'on verrait la courbure à l'échelle atomique? Est-ce qu'on peut utiliser le formalisme de la relativité générale à l'échelle atomique et donc une des pistes pour relier les deux physiques ?

Serge Haroche : Vous vous posez la question essentielle du chainon manquant entre la théorie de la relativité générale et la physique quantique et on ne sait pas donc intégrer la théorie de la relativité générale dans un schéma qui l'unifierait avec les autres forces de la nature qui, elles, sont expliquées par le modèle standard à partir des idées quantiques. Normal. Il y a différentes façons d'attaquer ce problème :

- l'une des façons est la force brutale, qui est celle de construire des accélérateurs encore plus puissants pour essayer de faire collisionner des atomes entre eux ou des particules entre elles avec encore beaucoup plus d'énergie avec l'espoir de générer des particules nouvelles qui donneraient une idée sur ce qui peut se passer. On atteint une limite là; ça devient beaucoup difficile de fabriquer un accélérateur plus grand que celui du CERN, qui va coûter beaucoup d'argent et on n'est même pas sûr qu'on sera encore à un niveau dans lequel on pourra observer quelque chose de nouveau.

- l'autre voie, qui est peut-être plus prometteuse, c'est celle d'augmenter la précision des mesures, c'est-à-dire dans la direction que j'ai essayé d'indiquer dans cet exposé et de fabriquer des interféromètres ou des appareils qui mesurent avec encore plus de précision les transitions atomiques ou qui mesurent le temps avec encore plus de précision.

Et vous avez raison de dire que si au lieu du millimètre on était capable de voir la différence de fonctionnement d'une horloge sur le nanomètre, on arriverait à une physique dans laquelle la courbure de l'espace-temps interviendrait au niveau de l'atome. Bon ! On en est encore loin mais il n'est pas évident qu'on n'y arrivera pas un jour et, comme je vous l'ai dit, la règle pour gagner en précision c'est d'augmenter la fréquence. Donc il faudrait fabriquer des horloges à rayon gamma, c'est-à-dire essayer d'avoir des systèmes qui, à l'intérieur d'un noyau atomique, pourraient réaliser l'émission stimulée et fabriquer des rayonnements gamma qui seraient à 3 ou 4 ordres de grandeur de fréquence plus grandes qu'actuellement et, pourquoi pas, fabriquer des horloges sur ce modèle là. A ce moment-là, on arriverait peut-être à un moment où on pourrait confronter la physique atomique avec la relativité générale. On en est encore loin mais c'est, je pense, une direction qui est peut-être plus prometteuse que celle d'essayer d'augmenter la force brutale de collision entre particules.

Donc, c'est vraiment une des frontières de la physique du 21^e siècle; c'est d'arriver à comprendre cette unification : on a besoin d'expérience mais on a également besoin d'intuitions géniales comme celles d'Einstein et c'est la combinaison des deux qui nous dira si c'est vrai ou non. Il ne suffit pas d'avoir des théoriciens des cordes qui sont des maîtres des mathématiques, de la topologie et des théories mathématiques extrêmement complexes. Ils établissent des théories mais tant qu'on ne peut pas les comparer à l'expérience, on ne peut pas savoir si ça représente une réalité ou non.

Donc il y a un problème et l'augmentation de la précision des mesures fait partie de ce qu'il faut faire. J'ai parlé des horloges mais il y a un autre domaine qui est extrêmement intéressant, qui est celui de la mesure du moment dipolaire électrique, du moment dipolaire de l'électron. L'électron d'après les théories standard, c'est une boule d'électricité complètement symétrique qui n'a pas de dipôle. On cherche un dipôle parce qu'il y a des théories qui disent que les super symétries vont produire un tout petit dipôle lié à des processus virtuels qui entourent des particules virtuelles entourant l'électron. On est maintenant à une précision de l'ordre de 10^{-30} électrons-centimètre; c'est-à-dire que s'il y avait un effet, il devrait se produire en séparant les charges positives des charges négatives de l'électron de 10^{-30} cm. On n'a rien vu jusque là mais on espère peut-être aller plus loin à l'aide d'expériences de physique atomique, de physique moléculaire très précise. C'est encore un domaine dans lequel on peut peut-être répondre à ce genre de question qu'on se pose.

Mohamed Besri : Merci beaucoup Monsieur le Professeur pour cette excellente conférence. Je crois que vous nous avez fortement convaincu de l'existence, comme vous l'avez dit, d'un dialogue permanent entre la recherche fondamentale et ses applications. Ce dialogue existe, non pas seulement en physique mais dans de très nombreux domaines. On entend tous parler du laser dans notre

vie quotidienne mais sans comprendre vraiment de quoi il s'agit ? Monsieur le Secrétaire perpétuel, vous-même avez souligné que la technologie du laser est partout, touchant notre vie quotidienne. Vous avez parlé du lecteur code-barres, de la fibre optique, de la mesure du temps, de l'ophtalmologie; je rajouterais également l'utilisation du laser dans d'autres domaines comme par exemple la découpe et la soudure des métaux, également dans la chirurgie esthétique (actuellement, on voit dans les émissions-télé qu'on peut enlever les tatouages en utilisant le laser), le décapage des objets d'art, etc. Alors moi, ce qui m'inquiète dans l'utilisation du laser, c'est quand je vois par exemple dans de nombreux films de fiction que le laser est utilisé comme arme de destruction. Je me pose la question si ces armes sont propres à la science-fiction ou bien risque-t-on de les voir devenir de véritables armes de destruction massive? Egalement, je voudrais savoir s'il existe des normes et des législations nationales ou internationales pour réglementer l'utilisation des lasers?

Serge Haroche : effectivement, le laser peut être utilisé comme une arme mais comme arme de défense : pour détruire des fusées, pour détruire des drones. La méthode actuelle pour faire ça, c'est d'utiliser des fusées pour contre-attaquer mais ça prend plusieurs minutes à une fusée pour atteindre son objectif. Si on arrive à focaliser un laser à la vitesse de la lumière, cela se fait immédiatement. Il y a des développements de technologies qui permettent de faire ça, en focalisant un faisceau laser puissant et en corrigeant les perturbations liées à la turbulence atmosphérique, grâce à des méthodes holographiques. Beaucoup de pays travaillent sur le développement de cette technologie purement défensive et je ne vois pas comment une législation peut interdire cela.

Maintenant, développer des armes de destruction, je ne vois pas comme cela peut être plus massif que ce que l'on sait faire par ailleurs ? Les droits de la guerre, vous savez comment elles sont, très disparates selon les circonstances. Il y a des tas de découvertes extraordinaires qui ont été faites, à commencer par la fission et la bombe atomique, qui ont été utilisées dans des conditions terribles. En chimie, les gaz pendant la première guerre mondiale par exemple, sans qu'aucune législation n'ait empêché de le faire sur le moment. On a ensuite essayé de légiférer pour limiter le caractère létal de cet armement et je pense que ça pourra être fait pour le laser un jour, si les lasers sont développés dans cette direction. Mais pour l'instant, je vois ça comme quelque chose qui pourrait être utile comme mécanisme de défense.

Abdeslam Hoummada : Merci monsieur le Président des séances, merci Professeur Haroche pour votre conférence. Moi je pense que la limite des accélérateurs, le LHC, a eu comme objectif de détecter le boson de Higgs et il l'a fait. Maintenant, on prévoit les accélérateurs linéaires. C'est pour faire la spectroscopie du boson de Higgs. Mais par contre, les projets, soit autour de Genève, sous le lac Léman, ou le SCC qui a été arrêté aux États Unis autour

de 80 km de circonférence; je pense que c'est pour arriver à une physique mais qui s'approchera peut-être de la seconde. 10^{-11} secondes, c'est le LHC peut-être 10^{-12} , 10^{-13} secondes dans les meilleurs des cas mais les accélérateurs n'auront jamais la précision que vous avez données, que ce soit du point de vue énergie, ou du point de vue temps ou des distances puisque, en fin de compte, la collision, c'est réduire au maximum la distance entre les particules qui interagissent. Mais c'est autour de là - je ne dirais pas la petite physique - mais les expériences comme mesure du moment dipolaire du neutron ou de l'électron; parce que là, l'électron, s'il est comme un dipôle, ça veut dire qu'il n'a plus la forme sphérique, que la distribution des charges est déformée donc on peut aller au dipolaire, quadripolaire ainsi de suite. Et pour les neutrons froids et d'autres particules qu'on peut utiliser grâce au laser et chercher la nouvelle physique. La meilleure précision actuellement de l'accélération g, c'est avec les neutrons froids. On les voit remonter et redescendre uniquement par la gravitation. Pourquoi on n'a pas développé les types de rayonnement synchrotron puisque, en fin de compte, il peut donner encore des faisceaux lasers beaucoup plus comme le ESRF ou Soleil ou Diamant, utilisé le rayonnement synchrotron pour fabriquer des lasers à partir de ce rayonnement ? Est-ce que c'est possible ?

Serge Haroche : Oui, c'était la physique des lasers électrons libres qu'on essayait de développer dans les années 80-90. Je n'ai pas vraiment suivi cette technologie mais je pense que, effectivement, il y a peut-être des choses à faire dans cette direction. C'est quand même une physique qui est beaucoup moins à l'échelle humaine que la physique que je vous ai décrite là. Toutes les expériences dont je vous ai parlées, sauf celles sur les antennes gravitationnelles qui font plusieurs kilomètres de long, sont des expériences qui tiennent sur une table. Des expériences qu'on appelle "table top" en anglais : quelques chercheurs, quelques étudiants. C'est le type de physique que j'aime, qui est par exemple la recherche du moment dipolaire électrique. Actuellement, de l'électron, les expériences plus précises sont faites par Cornell à Boulder, qui a déjà obtenu un prix Nobel pour la condensation de Bose Einstein et lui aussi travaille dans un petit groupe, avec un appareillage qui est relativement modeste. Et j'aime cette physique qui permet d'être extrêmement subtile sans trop demander ni de personnel humain ni de crédit pour fonctionner. Le rayonnement synchrotron, c'est très utile; je sais que c'est très utile même en biologie pour faire de la spectroscopie de système biologique mais je ne sais pas comment le comparer quantitativement à ce que je vous ai décrit là.

Abdelaziz Sefiani : On était fasciné par ces chiffres et par l'extrêmement petit pour les non spécialistes. Par exemple, dans le domaine de la médecine, les chiffres que vous avez donné, peut-être ça pourrait rendre visible le fonctionnement intracellulaire en dehors de ce qu'on a aujourd'hui, c'est-à-dire figer une protéine pour la prendre en image tridimensionnelle ou regarder au microscope électronique une cellule mais qui est déjà figée; c'est extrêmement petit, on peut

aller jusqu'à étudier le fonctionnement d'une cellule à l'état physiologique; est-ce qu'il y a des études qui se font dans ce sens avec des applications de la physique dans la médecine et dans l'étude des cellules ?

Serge Haroche : Je pense qu'il y a des études, je ne suis pas spécialiste de ce domaine du tout, mais il y a un des prix Nobel que j'ai marqué : c'est des gens qui détectent des molécules uniques dans des systèmes biologiques, qui sont capables d'observer, par fluorescence ou par d'autres méthodes, une molécule unique au cours d'un processus biologique. C'est des choses qui sont faites. On peut également utiliser des sondes atomiques pour mesurer des champs magnétiques - les variations de champ magnétique - au niveau d'une membrane cellulaire. C'est également des recherches qui peuvent avoir un intérêt pour la biologie et ce sont des méthodes de physique atomique dont certaines utilisent des lasers, en particulier les méthodes de fluorescence de molécules... J'ai aussi entendu parler d'expériences dans lesquelles on stimule des neurones du cerveau - c'est ce qu'on appelle de l'optogénétique - pour étudier des processus neurologiques au niveau du cerveau à l'aide de lumière; on le fait sur des rats et je pense qu'on fait également des expérimentations humaines. Donc ça se développe dans cette direction aussi mais, évidemment, ce sont des dimensions de l'ordre du micron, on n'est pas aux dimensions de l'ordre de 10^{-20} m comme celles dont j'ai parlées dans les théories gravitationnelles.

Ali Boukhari : Merci Monsieur le directeur des séances, merci Professeur Haroche pour cette excellente présentation sur un phénomène important que nous utilisons tous les jours. Je me pose un certain nombre de questions, deux essentiellement : pourquoi le maser ne s'est pas développé comme le laser? Y-a-t-il des raisons physiques à cela? Et, deuxième chose, on parle tout le temps aux jeunes de l'aspect dualité de la matière, comme un électron, on peut le prendre comme une particule comme on peut le prendre comme une onde. Est-ce que le laser peut montrer du moment qu'on peut aller maintenant profondément au niveau de la matière montrer ce passage par expérience comment cet électron là peut passer d'un état à un autre et le visualiser. Quel est enfin votre avis sur ceux qui critiquent une recherche fondamentale par rapport à une recherche appliquée? Et vous savez qu'une recherche appliquée demande beaucoup plus de moyens, beaucoup plus de technique, beaucoup plus de subventions et merci.

Serge Haroche : La première question c'est sur le maser. Bon je n'ai pas voulu vous parler de maser mais il a été utilisé. Le maser à hydrogène en particulier a servi d'horloge atomique dans les années 60; c'est grâce au maser à hydrogène qu'on a fait les premières thèses sur la relativité générale avec des micro-ondes. Donc ça, c'est un instrument qui a servi à la recherche fondamentale; ça sert moins pour les applications parce que les caractéristiques d'un faisceau laser qui est extrêmement directif, qui est beaucoup plus focalisé, qui peut se propager dans des fibres optiques, a des applications plus importantes et plus large. Disons

que le maser a été une étape importante et il y a encore des recherches sur le maser qui se poursuivent, sur le maser à hydrogène en particulier.

La deuxième question c'était est-ce qu'on peut voir le mouvement des électrons? Oui, effectivement, par exemple, quand on génère des pulses atto-seconde, il y a un processus électronique qui s'effectue dans les atomes d'argon par exemple, qui permettent de générer ces pulses et on peut, par des expériences, voir comment l'électron, qui est accéléré, s'éloigne du noyau atomique et puis ensuite, quand le champ électrique de l'onde électromagnétique se retourne, l'électron change de signe et revient et rentre en collision à nouveau avec le noyau. Et c'est au cours de cette collision que les rayons X atto-seconde secondes sont produits et ce phénomène a été étudié expérimentalement. Donc, on peut expérimentalement étudier comment l'électron se déplace et à cette échelle-là, c'est des choses qu'on peut faire.

La troisième question que vous posez est beaucoup plus générale et je pense que c'est ce genre d'exposé qui l'illustre. Vous savez, dans les années 1930, il y a une personne qui a écrit un livre là-dessus. C'était le fondateur de l'Institut de physique théorique de Princeton «Institute for Advanced Studies». C'est **Abraham Flexner** qui a fondé cet institut dans les années 30 et c'est lui qui a attiré **Einstein, Oppenheimer, Von Neumann**, et des tas d'autres physiciens, mathématiciens, qui ont été vraiment au départ de cette physique moderne, y compris la bombe atomique d'ailleurs. Il avait écrit un livre qui s'appelle *The usefulness of useless knowledge* où il dit que la science, qui est soi-disant prétendument inutile, est en fait extrêmement utile et qu'il n'y a pas d'exemple en recherche, en tout cas en physique, et sans doute dans d'autres domaines, où une recherche appliquée n'est pas venue d'une recherche fondamentale. Là, je vous ai parlé de tout ce qui provient de la physique quantique mais si vous remontez au 19^{ème} siècle, Maxwell, c'était de la recherche fondamentale et Maxwell, ça a donné les ondes radio, ça a donné les rayons X, ça a donné tout ce qui a fait le début de la civilisation moderne, l'électronique, l'électricité, etc. Donc, c'est absolument évident qu'on ne peut pas séparer les deux; c'est également évident que la recherche appliquée conduit à des instruments qui permettent de re-questionner la recherche fondamentale; la recherche des ondes de gravitation en est un exemple. Je pense qu'il y a une autre raison pour laquelle il faut la faire même dans des pays en voie de développement : c'est que la jeunesse, les esprits brillants et curieux sont attirés par les questions que pose la recherche fondamentale. Vous allez attirer des jeunes étudiants en leur posant des questions, en leur disant qu'il y a des questions ouvertes qu'il faudra résoudre et c'est comme ça qu'ils viennent à la recherche. Une fois qu'ils sont venus à la recherche, ils iront peut-être plus tard vers la recherche appliquée; et je pense qu'il est plus utile de les faire venir mais bien entendu on ne peut pas les attirer dans un piège si on les fait venir dans la recherche. Il faut leur donner les moyens et le gros problème c'est ça : c'est qu'il n'y a pas suffisamment de moyens pour leur permettre de s'épanouir dans ce domaine.

Abdelaziz Sefiani : Merci beaucoup Professeur Haroche pour cette très belle présentation qui, j'espère, aura donné des idées et ouvert des voies de recherche pour nos jeunes chercheurs et nos jeunes étudiants ici présents. Comme il est de coutume, avant de lever la séance, je donne la parole à Monsieur le Secrétaire perpétuel pour nous lire la lettre adressée à Sa Majesté le Roi à l'occasion de cet anniversaire.

Omar Fassi-Fehri : Encore merci cher professeur pour cette brillante conférence que nous venons d'écouter et, effectivement, comme l'a rappelé Monsieur le Directeur de séance, à l'occasion de la commémoration de l'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques (18 mai 2006) nous adressions à notre Protecteur, Sa Majesté le Roi, une lettre de gratitude et de remerciement pour Sa Sollicitude et Ses encouragements. Ce message est écrit en arabe mais je vais en donner rapidement le contenu : bien sûr, on rappelle d'abord les conditions dans lesquelles nous tenons cette commémoration, ensuite nous rappelons que cette commémoration s'est faite en organisant cette conférence, donnée par un membre de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, le professeur Serge Haroche, prix Nobel de physique 2012, en rappelant les parties essentielles de sa conférence et l'intérêt d'une telle conférence pour le développement de la recherche scientifique dans notre pays, et plus précisément, l'intérêt pour l'action et le travail mené par l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques dans le domaine des sciences exactes. Enfin, nous rappelons les conclusions et les encouragements pour le développement de la recherche dans notre pays et formulons des prières pour la Santé et pour le Bonheur de Sa Majesté le Roi et de toute la Famille Royale. Voici donc le résumé de ce message, il sera transmis au Cabinet Royal.

Abdelaziz Sefiani : Merci pour votre attention, merci Monsieur le Secrétaire perpétuel. Mesdames, messieurs, en votre nom, je réitère mes remerciements et mes félicitations au Professeur Haroche pour cette fantastique conférence. Je rappelle que le professeur Haroche est membre associé de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques et chaque fois peut-être que son temps le lui permettra, on organisera des rencontres, peut-être des séminaires avec nos jeunes étudiants.

Merci encore une fois et bon retour. La séance est levée.



Vue de l'audience

**Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Km 4, Avenue Mohammed VI - Rabat.**

Tél : 0537 63 53 77 • Fax : 0537 75 81 71

E-mail : acascitech@academiesciences.ma

Site internet : <http://www.academiesciences.ma>