



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Réception des Associés étrangers élus en 2005 / 12 décembre 2006

LA SPECTROSCOPIE LASER D'EXTRÊME PRÉCISION

Theodor W. HÄNSCH

Département de Physique de l'Université Ludwig-Maximilians et
Institut Max Planck d'Optique quantique à Garching (Allemagne)

L'élection à l'Académie des sciences est pour moi un grand honneur et je me réjouis à l'avance des contacts étroits qu'elle me permettra d'établir avec certains des esprits scientifiques les plus éminents au monde.

J'ai toujours été fasciné par la puissance et la beauté de la spectroscopie de précision, depuis les expériences pionnières d'Alfred Kastler et Jean Brossel, ici à Paris, sur le pompage optique et la spectroscopie de double résonance optique-radiofréquence. Après l'invention des lasers, je me suis pris à rêver à une spectroscopie cohérente de précision aux fréquences optiques. Dans mes expériences de thèse, à l'Université de Heidelberg, dans les années 60, avec Peter Toschek, nous utilisions des lasers Hélium-Néon pour étudier des systèmes à trois niveaux par spectroscopie de saturation sans effet Doppler. Avec un modèle théorique semi-classique, nous avons identifié les effets d'interférences quantiques qui peuvent conduire au laser sans inversion ou à la propagation lente de la lumière.

En 1970, j'ai rejoint le Professeur Arthur L. Schawlow, à l'Université de Stanford, pour un séjour post-doctoral. Là, j'ai trouvé un moyen pour rendre très monochromatiques les lasers à colorant, par ailleurs largement accordables. Nous pouvions ainsi appliquer les techniques spectroscopiques sans effet Doppler, par saturation ou transitions à deux photons, à des raies de résonance arbitraires d'atomes ou de molécules. Je rejoignis ensuite la faculté de physique de Stanford, comme professeur et restai en Californie jusqu'au retour dans mon Allemagne natale, en 1986, où je devins professeur à l'Université Ludwig Maximilians de Munich et directeur à l'Institut Max Planck pour l'Optique Quantique, à Garching.

Un projet qui m'a fasciné pendant plus de trente ans est la spectroscopie laser de précision appliquée à l'atome d'hydrogène. Le plus simple des atomes stables permet une confrontation sans équivalent entre la spectroscopie expérimentale et la théorie de l'électrodynamique quantique. La quête pour une résolution et une précision toujours meilleures a stimulé de nombreuses avancées pour les techniques spectroscopiques avec, en particulier, la proposition de refroidissement par laser des vapeurs atomiques que nous fîmes avec Art Schawlow en 1974. D'autres laboratoires nous ont rapidement rejoints dans cette poursuite d'une spectroscopie de précision de l'hydrogène et, en particulier, celui de François Biraben et Lucile Julien, ici à Paris. Ensemble, nous avons pu déterminer des valeurs toujours plus précises de la constante de Rydberg ; nous avons déterminé le déplacement de Lamb de l'état fondamental ou le rayon de charge du proton et le rayon de structure du

deutéron, avec une précision meilleure que celle des expériences de diffusion d'électrons utilisant de grands accélérateurs.

Pendant les dix dernières années, à Garching, avec Thomas Udem et Ronald Holzwarth, nous avons appris à mesurer la fréquence de la lumière avec une précision extrême, en utilisant un outil spectroscopique révolutionnaire, le peigne de fréquences optiques, qui fut distingué par la citation du comité Nobel l'an dernier. Ces instruments lient fréquences optiques et micro-ondes en une seule étape. Ils constituent le mécanisme, longtemps manquant, d'une horloge atomique optique. Aujourd'hui, la fréquence absolue de la transition très étroite entre les niveaux 1S et 2S de l'hydrogène a été mesurée avec 14 chiffres significatifs. Des comparaisons précises des fréquences atomiques permettent maintenant des tests sensibles d'une éventuelle dérive des constantes fondamentales. La précision des horloges atomiques optiques dépasse déjà celle des meilleures horloges micro-ondes à fontaine atomique.

La génération d'harmoniques élevées permet d'étendre la technique du peigne de fréquence jusque dans l'extrême ultra-violet et ouvre un vaste nouveau domaine pour la spectroscopie laser de précision. Les peignes de fréquences sont aussi une clé pour la science à l'échelle des attosecondes, en permettant de contrôler précisément le champ électrique d'impulsions qui ne durent que quelques périodes optiques.



Réception des Associés étrangers élus en 2005 / 12 décembre 2006

LASER SPECTROSCOPY WITH EXTREME PRECISION

Theodor W. HÄNSCH

Département de Physique de l'Université Ludwig-Maximilians et
Institut Max Planck d'Optique quantique à Garching (Allemagne)

The election to the French Académie des Sciences is an exceptional honor for me, and I am looking forward to closer future interactions with some of the most eminent scientific minds in the world.

Ever since the pioneering experiments by Alfred Kastler and Jean Brossel on optical pumping and optical-radio frequency double resonance spectroscopy here in Paris, I have been fascinated by the power and beauty of electromagnetic precision spectroscopy. After lasers had been invented, I began to dream about coherent precision spectroscopy at optical frequencies. In my thesis experiments at the University of Heidelberg with Peter Toschek in the 1960s, we used helium neon gas lasers to study coupled three level systems by Doppler-free saturation spectroscopy. With a semiclassical theoretical model we identified quantum interference effects that can lead to lasing without inversion and to slow light.

In 1970, I joined Professor Arthur L. Schawlow at Stanford University as a postdoc. There, I found a way to make widely tunable pulsed dye lasers highly monochromatic, so that we could apply Doppler-free saturation spectroscopy and two-photon spectroscopy to arbitrary resonance lines of atoms and molecules. After joining the Stanford physics faculty as a Professor, I remained in California until I returned to my native Germany in 1986 to become a Professor at the Ludwig Maximilians University of Munich, and a director at the Max-Planck-Institute of Quantum Optics in Garching.

One project that has fascinated me through all this time for more than three decades has been precision laser spectroscopy of atomic hydrogen. This simplest of the stable atoms permits unique confrontations between spectroscopic experiment and quantum electrodynamic theory. The quest for ever higher spectroscopic resolution and measurement precision has stimulated many advances in spectroscopic techniques, including the 1974 proposal by Art Schawlow and myself of laser cooling of atomic gases.

Other laboratories soon joined us in the pursuit of precision laser spectroscopy of hydrogen, notably Francois Biraben and Lucile Julien here in Paris. Together we could determine ever more precise values of the Rydberg constant, we could measure the Lamb shift of the hydrogen ground state, and we could determine the charge radius of the proton and the structure radius of the deuteron with higher precision than has been possible in electron scattering experiments at large accelerators.

During the past decade at Garching, with Thomas Udem and Ronald Holzwarth, we have learned how to measure the frequency of light to extreme precision with a revolutionary spectroscopic tool, the laser frequency comb that has been highlighted in the citation of the Nobel Committee last year. These instruments can link optical and microwave frequencies in a single step, and they provide the long-missing clock work for optical atomic clocks. Today, the absolute optical frequency of the sharp hydrogen 1S-2S two-photon resonance has been measured to 14 decimal digits. Precise comparisons of atomic resonance frequencies are beginning to establish sensitive limits for possible slow variations of fundamental constants, and optical atomic clocks are already surpassing the accuracy of the best microwave cesium fountain clocks.

Optical high harmonic generation can extend frequency comb techniques into the extreme ultraviolet, opening a vast new spectral territory to precision laser spectroscopy. Frequency comb techniques are also providing a key to attosecond science by offering precise control of the electric field of light pulses lasting only a few optical cycles.

Je vous remercie d'avoir été élu Membre de l'Académie des Sciences de l'Institut de France, et j'espère avoir la possibilité de collaborer désormais étroitement avec ses Membres.