

Test de l'électrodynamique quantique et détermination des constantes fondamentales avec les ions HD^+ piégés et refroidis

Le Modèle Standard prédit et décrit correctement nombre de phénomènes dans le plupart des domaines de la physique mais il ne prend en compte qu'une petite partie de la structure actuelle de notre Univers. La comparaison des prédictions théoriques avec les résultats expérimentaux permet de tester la validité du Modèle Standard et d'en déduire les valeurs des constantes fondamentales, paramètres qui ne sont pas prédits par la théorie.

Une comparaison a été effectuée dans le cadre d'une collaboration entre les membres de l'équipe Physique Moléculaire aux Interfaces du PhLAM, de l'Institute for Experimental Physics de Heinrich-Heine-Universität (Düsseldorf, Allemagne) et de Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics du Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russie). Les travaux publiés récemment dans Nature exploitent les outils de la physique et spectroscopie moléculaires pour l'ion HD^+ , le système quantique le plus simple formé de trois particules différentes liées par les forces d'interaction électrostatiques. La fréquence de rotation la plus basse de HD^+ , située dans le domaine spectral Terahertz, a été mesurée avec une précision record atteignant onze digits significatifs, en mettant en oeuvre des approches pertinentes pour le domaine des technologies quantiques, comme le piégeage des ions et le refroidissement laser d'atomes et molécules. La rotation de HD^+ est décrite par l'électrodynamique quantique, une théorie développée à partir des années 1940. Les progrès effectués pendant les derniers vingt années en calculs ab-initio pour l'ion HD^+ ont permis d'atteindre la précision suffisante pour prédire la fréquence de rotation. Cependant, les prédictions théoriques dépendent des valeurs des constantes fondamentales, établies à partir des théories actuelles avec différents niveaux de précision par le CODATA (Committee on Data for Science and Technology).

Les résultats démontrent l'accord entre la prédiction de la théorie quantique à trois corps et les mesures expérimentales à un niveau inégalé auparavant qui est limité par les incertitudes des constantes fondamentales recommandées par le CODATA. Des combinaisons de constantes fondamentales ont été déterminées en accord mais avec une meilleure précision que les valeurs CODATA. En outre, la contrainte sur l'effet d'une cinquième force hypothétique entre le proton et le deuteron a été améliorée de 20 fois. Des phénomènes physiques au-delà du Modèle Standard, s'ils existent, restent non identifiés au laboratoire !

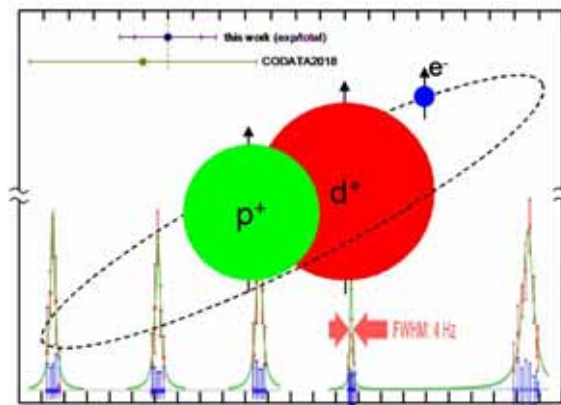


FIGURE : Les ions HD^+ , les systèmes quantiques liés les plus simples formés avec trois particules différentes (proton, deuteron, électron). Les interactions subtiles des spins de ces particules séparent la transition rotationnelle fondamentale en souscomposantes Zeeman. Les fréquences précises du spectre présenté en bas de la figure sont utilisées pour tester l'électrodynamique quantique et pour déterminer des combinaisons de constantes fondamentales.

Publication:

S. Alighanbari, GS Giri, FL Constantin, VI Korobov & S. Schiller, Precise test of quantum electrodynamics and determination of fundamental constants with HD^+ ions, NATURE (2020)

DOI: 10.1038 / s41586-020-2261-5

<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2261-5>

Contact:

Florin Lucian Constantin, chargé de recherche CNRS

FL.Constantin@univ-lille1.fr

Test of quantum electrodynamics and determination of fundamental constants with cold trapped HD⁺ ions

The Standard Model predicts and describes with correctness a number of phenomena in various branches of physics but it takes into account a small part of the actual structure of our Universe. The comparison of theoretical predictions and experimental results enables testing validity of the Standard Model and to determine the values of the fundamental constants, parameters which are not predicted by the theory.

A comparison was realized within the framework of a collaboration involving the members of the Molecular Physics at Interfaces team at the PhLAM, the Institute for Experimental Physics at the Heinrich-Heine-Universität (Düsseldorf, Germany) and the Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics at the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia). The work recently published in Nature exploits the tools of the molecular physics and spectroscopy for the HD⁺ ion, the simplest quantum system made of three different particles bound by electrostatic forces. The lowest rotational frequency of HD⁺, located in the Terahertz spectral domain, was measured with record precision reaching eleven significant decimal digits, by using approaches relevant for the quantum technologies, such as the ion trapping and laser cooling of atoms and molecules. The rotation of HD⁺ is described by the quantum electrodynamics, a theory developed starting from 1940's. Progresses made during the last twenty years in ab-initio calculations with the HD⁺ ion allowed to reach sufficient precision to predict the rotational frequency. However, the theoretical predictions depend on the values of the fundamental constants, derived from actual theories at different accuracy levels by the CODATA (Committee on Data for Science and Technology).

The results demonstrate agreement between the prediction of the three-body quantum theory and the experimental measurements at an unprecedented level which is limited by the uncertainties of the fundamental constants recommended by the CODATA. Values of the combinations of fundamental constants were determined in agreement but with better accuracy than the CODATA values. Moreover, the constraint on the effect of a hypothetical fifth force between the proton and the deuteron was improved by 20 times. Some physical phenomena beyond the Standard Model, if they exist, remain unidentified in the laboratory !

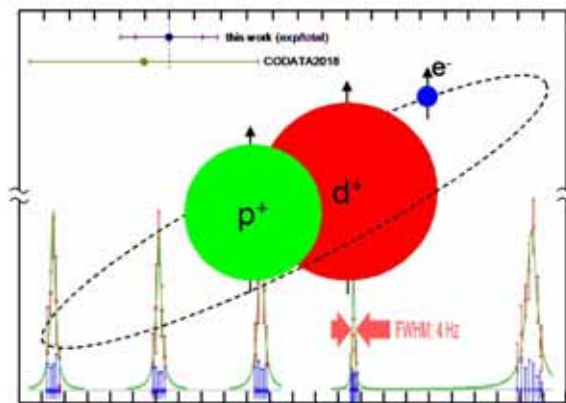


FIGURE : HD⁺ molecular ions, the simplest bound quantum system formed with three different particles (proton, deuteron and electron). Subtle interactions of the spins of these particles split the fundamental rotational transition in Zeeman subcomponents. The accurate frequencies from the spectrum shown in the lower part of the figure are used to test the quantum electrodynamics and to determine combinations of the fundamental constants.

Publication:

S. Alighanbari, GS Giri, FL Constantin, VI Korobov & S. Schiller, Precise test of quantum electrodynamics and determination of fundamental constants with HD⁺ ions, NATURE (2020)

DOI: 10.1038 / s41586-020-2261-5

<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2261-5>

Contact:

Florin Lucian Constantin, CNRS researcher

FL.Constantin@univ-lille1.fr
