

Refroidissement sympathique des ions H_2^+/Be^+ pour la métrologie du rapport m_p/m_e

Sympathetically cooled H_2^+/Be^+ ions for m_p/m_e metrology

Porteur(s) : L. Hilico (LKB)

Partenaire(s) : S. Bize (SYRTE)

Résumé du projet en Français :

L'équipe du LKB « Métrologie de H_2^+ » a pour objectif de réaliser la première mesure optique directe du rapport de masses de l'électron m_p/m_e . Cette mesure est fondée sur la mesure par absorption saturée de la fréquence de transition à deux photons entre les niveaux ($v=0, L=2$) et ($v=1, L=2$) de H_2^+ , où v et L sont les nombres quantiques de vibration et de rotation. Comme les énergies de transition vibrationnelle (exprimées en nombre de constantes de Rydberg) s'expriment en $(m_p/m_e)^{0.5}$, une mesure précise de la fréquence de transition donne accès au rapport m_p/m_e avec une incertitude relative deux fois plus grande. La largeur naturelle de la transition devenant très petite ($< 10^{-6}$ Hz), sa fréquence peut être déterminée avec une incertitude relative inférieure à 10^{-10} (ce qui correspond à 1,6 kHz sur la fréquence du laser) avec des ions piégés ultra-froids. La résolution sera essentiellement limitée par la stabilité de l'excitation laser.

Les récents progrès sur les prédictions théoriques des fréquences de transition de H_2^+ [Korobov09, Karr11] vont permettre de réduire dans un futur proche l'incertitude relative en-dessous du niveau de 0,1 ppb. De plus, la spectroscopie haute résolution de H_2^+ peut mener à une détermination de m_p/m_e améliorée d'un facteur 4 par rapport au CODATA actuel (0,41 ppb), utilisant, en plus, une méthode complètement différente.

Nous avons conçu le système de spectroscopie laser, qui consiste en un laser ultrastable à 9,17 μm pour exciter la transition deux-photons [Bielsa07] et un laser à excimère à 248 nm pour la photodétection sélective du niveau excité [Karr 12]. Nous avons estimé le taux de transition à deux-photons (0,3 /s) et avons mesuré le taux de photodissociation (3 /s) qui, bien que faible, est suffisant dans l'objectif de conserver les ions piégés sur des temps longs. La première expérience, réalisée avec des ions H_2^+ créés par ionisation des électrons et confinés dans un piège de Paul hyperbolique, a révélé qu'il est crucial d'améliorer la méthode de production d'ions et la géométrie de piégeage.

Nous sommes actuellement en train d'implémenter une source d'ions H_2^+ dont l'état est sélectionné ; celle-ci est créée par ionisation multiphotonique à résonance augmentée (REMPI), ce qui va augmenter la population dans l'état initial par un facteur 60, Nous sommes aussi en train de concevoir un piège linéaire designé pour confiner un cristal d'ions Be^+ refroidis par laser afin de refroidir sympathiquement les ions H_2^+ . Avec ces améliorations, nous attendons une amélioration d'un facteur 25 du rapport signal-à-bruit en simple passage [Karr12]. Cela mènera à la première observation d'une transition à deux-photons d'ions H_2^+ ultrafroids avec une résolution au kHz et, par la suite, une détermination de m_p/m_e au niveau de 0,1 ppb et du test des corrections relativiste, QED et de structure hyperfine.

À long terme, les ions H_2^+ froids dont l'état est sélectionné sont de bons candidats pour la spectroscopie quantique logique sur une paire d'ions Be^+/H_2^+ , parce que tous les niveaux ro-vibrationnels de H_2^+ sont métastables et insensibles à la radiation du corps noir. Les signaux spectroscopiques en-dessous du niveau de précision de 10^{-14} peuvent être produits pour analyser les variations temporelles de m_p/m_e . Le refroidissement sympathique de H_2^+ par les ions Be^+ refroidis par laser requièrent des sources laser à 313 nm (incluant les faisceaux de repompage). Le rayonnement à 313 nm peut être obtenu par doublement de fréquence d'une diode laser à cavité étendue à 626 nm (disponible depuis peu), avec une puissance optique de 20-50 μW . Une source plus puissante (jusqu'à 750 mW à 313 nm) peut être obtenue en sommant les fréquences de deux lasers fibrés : 1051 nm (5W) + 1550 nm (5W) \rightarrow 626 nm (1.8 W), suivie par une génération de seconde harmonique, d'après le design du NIST [Wilson11]. Les principaux équipements pour ces sources laser sont financées par la dotation IFRAF RESIMA. Le contrôle des lasers de refroidissement seraient grandement facilitées par un wavemeter à fibre opérant à 626 nm, pour accorder grossièrement la fréquence avant de la stabiliser sur une raie d'absorption de l'iode. Ce montage peut également être utilisé pour le REMPI du laser pulsé à 303 nm (sondant la sortie à 606 nm de notre laser à colorant avant la génération de seconde harmonique). À l'avenir, cet équipement sera utile pour

le groupe de Paul Indelicato et LKB pour la spectroscopie des transitions de la structure hyperfine des ions multichargés (par exemple $^{40}\text{Ar}_{13}^+$) dans le domaine visible avec des diodes laser.

Abstract in English:

The “H 2^+ metrology” team at LKB aims at performing the first direct optical measurement of the proton to electron mass ratio m_p/m_e . It is based on measuring the frequency of the Doppler-free two-photon transition between the ($v=0, L=2$) and ($v=1, L=2$) levels of H 2^+ , where v and L are the vibrational and rotational quantum numbers. Since vibrational transition energies (expressed in units of the Rydberg constant) scale as $(m_p/m_e)^{-0.5}$, accurate measurement of the transition frequency gives access to m_p/m_e with a twice as large relative uncertainty. The natural width of the transition being extremely small ($< 10^{-6}$ Hz), its frequency can be determined with a relative uncertainty well below the 10^{-10} level (corresponding to 1.6 kHz on the laser frequency) with ultracold trapped ions. The resolution will be essentially limited by the stability of the excitation laser.

Recent progress in theoretical predictions of H 2^+ transition frequencies [Korobov09, Karr11] will allow reducing the relative uncertainty down to the 0.1 ppb level in a near future. Therefore, H 2^+ high resolution spectroscopy can lead to a determination of m_p/m_e improved by a factor of 4 with respect to the present CODATA (0.41 ppb), using, in addition, a completely different method.

We have set up the spectroscopy laser system, which consists in an ultrastable laser at 9.17 μm to excite the two-photon transition [Bielsa07], and an excimer laser at 248 nm for selective photodissociation of the excited state [Karr 12]. We have estimated the two-photon transition rate (0.3 /s) and measured the photodissociation rate (3 /s) which, albeit small, are sufficient in view of the long storage times in ion traps. First experimental runs with H 2^+ ions created by electron-impact ionization and confined in a hyperbolic Paul trap have revealed that it is crucial to improve the ion production method and trapping geometry.

We are currently implementing a **source of state-selected H 2^+ ions** created by resonance-enhanced multiphoton ionization (REMPI), which will increase the population of the initial state by a factor of 60. We are also setting up a linear trap designed to confine a crystal of laser-cooled Be $^+$ ions in order to sympathetically cool the H 2^+ ions. With those improvements, the expected single-pass signal-to-noise ratio is improved to about 25 [Karr12]. This will lead to the first observation of a two-photon transition in ultracold H 2^+ ions with kHz resolution, and hence to a determination of m_p/m_e at the 0.1 ppb level, and tests of relativistic, QED and hyperfine structure corrections.

In the longer term, state-selected cold H 2^+ ions are good candidates for quantum logic spectroscopy on a Be $^+$ /H 2^+ ion pair, because all ro-vibrational levels of H 2^+ are metastable and insensitive to black body radiation. Spectroscopic signals beyond the 10^{-14} accuracy level may be produced for analysis of m_p/m_e time variations. H 2^+ sympathetic cooling by laser-cooled Be $^+$ ions requires laser sources at 313 nm (including “repump” beams). The 313 nm radiation can be obtained by frequency doubling of extended cavity diode lasers at 626 nm (made available only very recently), with an optical power of 20-50 μW . A more powerful source (up to 750 mW at 313 nm) can be obtained using SFG of two fiber lasers: 1051 nm (5W)+ 1550 nm (5W) \rightarrow 626 nm (1.8 W), followed by SHG, following the NIST design [Wilson11]. The main equipments for those lasers sources are funded by the IFRAF RESIMA grant. Control of these cooling lasers would be greatly facilitated by a **fibre-coupled wavelength meter** operated at 626 nm, for rough frequency tuning before stabilization on a I 2 saturated absorption line. This device could also be used for the REMPI 303 nm pulsed laser (probing the 606 nm output of our dye laser before SHG). In the future, this equipment will also be helpful for the LKB group led by Paul Indelicato for highly charged ion (e.g. $^{40}\text{Ar}_{13}^+$) spectroscopy of fine-structure transitions in the visible domain with diode lasers.

[Bielsa07] F. Bielsa, A. Douillet, T. Valenzuela, J.-Ph. Karr, L. Hilico, Opt. Lett. 32, 1641 (2007); F. Bielsa et al., J. Molec. Spectrosc. 247, 41 (2008).

[Karr11] J.-Ph. Karr, L. Hilico, V.I. Korobov, Can. J. Phys. 89, 103 (2011).

[Karr12] J.-Ph. Karr, A. Douillet, L. Hilico, Appl. Phys. B 107, 1043 (2012).

[Korobov09] V.I. Korobov, L. Hilico, J.-Ph. Karr, Phys. Rev. A 7.

Résultats marquants :

Depuis 2013, nous avons monté l'ensemble des composants de l'expérience de spectroscopie à deux photons de H 2^+ . Cela inclut un piège linéaire pour le refroidissement sympathique de H 2^+ par des ions Be $^+$ refroidis par laser, une source d'ions H 2^+ sélectionnés en état interne, ainsi que les lasers de spectroscopie par REMPD (resonance enhanced multiphoton dissociation) comprenant un laser à cascade quantique à 9,17 μm et un laser de

photodissociation à 213 nm. Nous avons récemment observé des cristaux d'ions Be^+ et obtenu des ions H_2^+ sélectionnés en état interne. Dans le même temps, les progrès des calculs de corrections radiatives et relativistes ont atteint $7.6 \cdot 10^{-12}$ en précision relative.

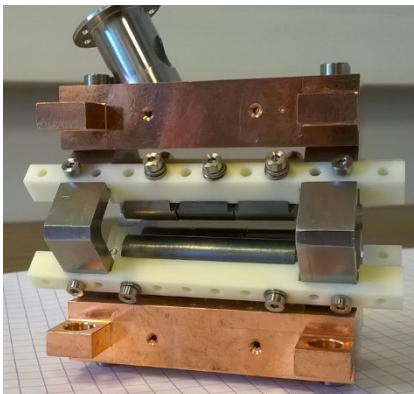
La dotation FIRST-TF a été utilisée pour acheter un mesureur de longueur d'onde, qui a grandement facilité l'utilisation du laser à 313 nm pour refroidir les ions Be^+ .

Highlights:

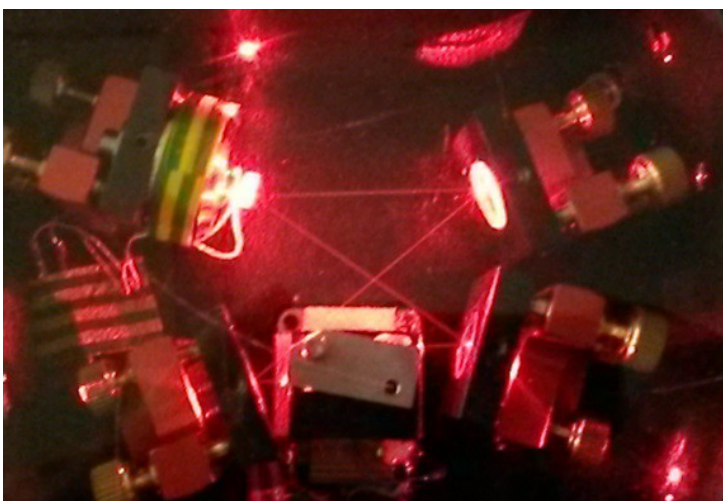
Since 2013 we have completed all the parts our H_2^+ two-photon experiment setup. It includes a linear ion trap for sympathetic cooling of H_2^+ ions by laser cooled Be^+ ions, the 313 nm Be^+ cooling laser, a state selected resonance enhanced multiphoton ionisation (REMPI) H_2^+ ion source as well as the resonance enhanced multiphoton dissociation (REMPD) spectroscopy lasers (a quantum cascade laser at $9.17 \mu\text{m}$ for Doppler free two-photon excitation of a H_2^+ vibrational transition and a 213 nm laser for photodissociation of vibrationally excited H_2^+ ions). We have recently observed Be^+ Coulomb crystals in our linear trap, obtained state selected H_2^+ ions and characterized the 213 nm dissociation process. Meanwhile, we also made significant progress on the theoretical side, pushing the relative accuracy on hydrogen molecular ions vibrational transition frequencies down to $7.6 \cdot 10^{-12}$ relative accuracy.

The FIRST-TF grant was used to buy a High-Finesse WS7 wavemeter which is essential for the 313 nm cooling laser stabilisation.

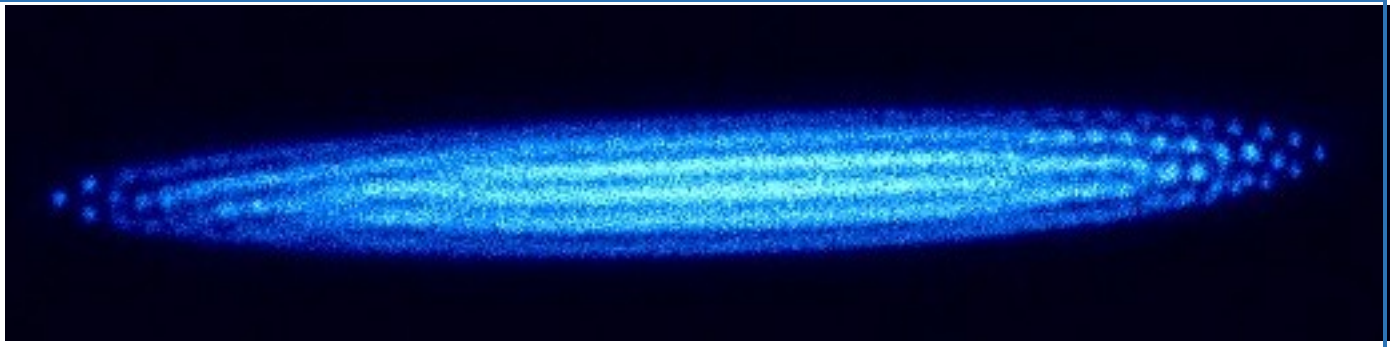
Pictures with captions (curve, photo, scheme ...):



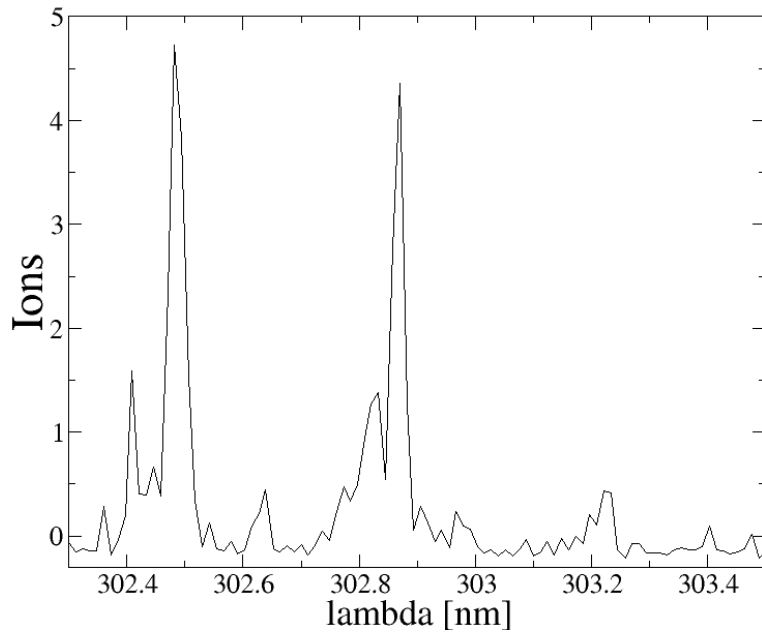
Linear Paul Trap made of molybdenum electrodes mounted on insulating alumina rods. The electrode diameter is 8 mm and the total length of the electrodes is 36 mm.



Frequency doubling cavity producing 313 nm light for Ba^+ cooling from 626 nm beam. The 626 nm laser frequency is stabilized against the WS7 wavemeter purchased thanks to First-TF.



Ion Coulomb crystal made of a few hundred Be⁺ ions (false colors) observed at 313 nm on a UV-enhanced EMCCD camera.



3+1 REMPI state selected H₂⁺ ion signal observed in our hyperbolic trap.