



Formation d'un cristal coulombien

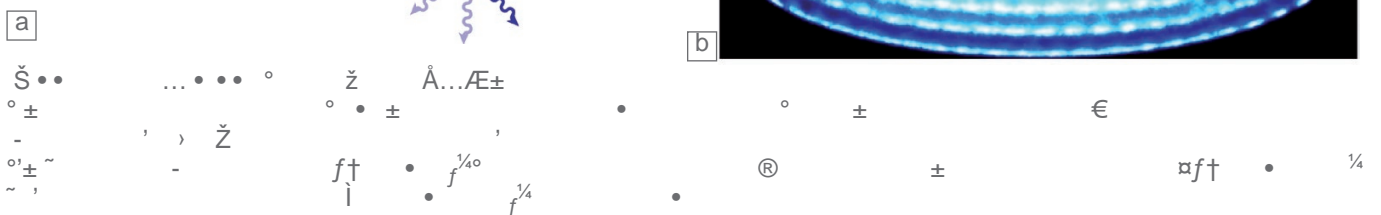
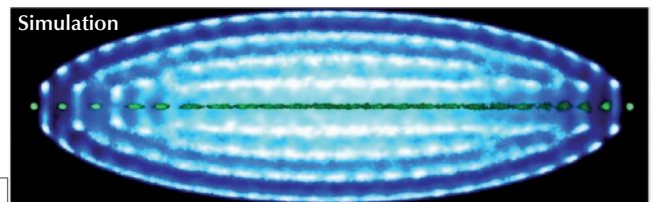
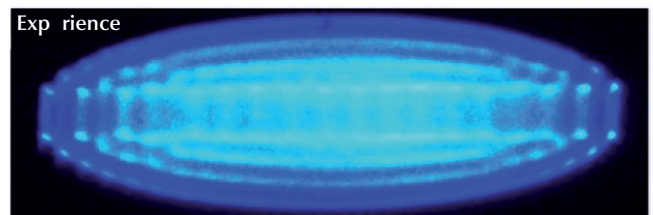
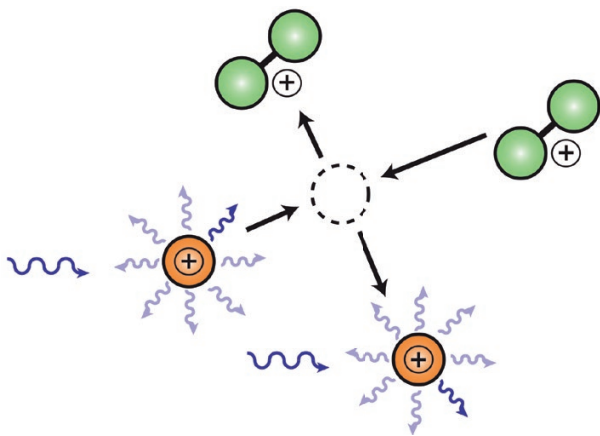
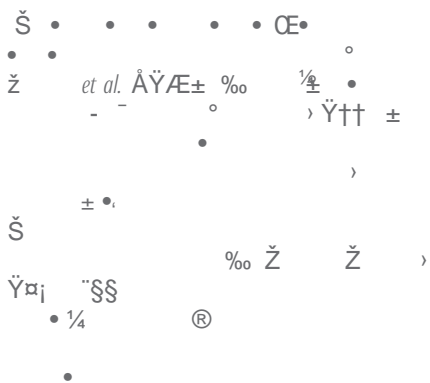
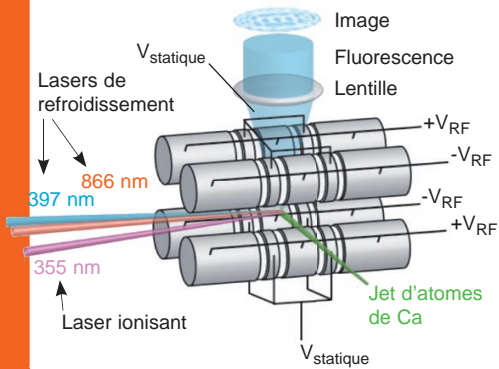
Contrairement aux cristaux ioniques bien connus de la physique du solide (comme NaCl), les cristaux coulombiens sont composés d'ions de même charge. Leur formation comprend deux étapes essentielles : le piégeage des ions et leur refroidissement. Le piégeage par une action externe est nécessaire, puisque les ions se repoussent fortement en raison de leur charge. Un dispositif typique est

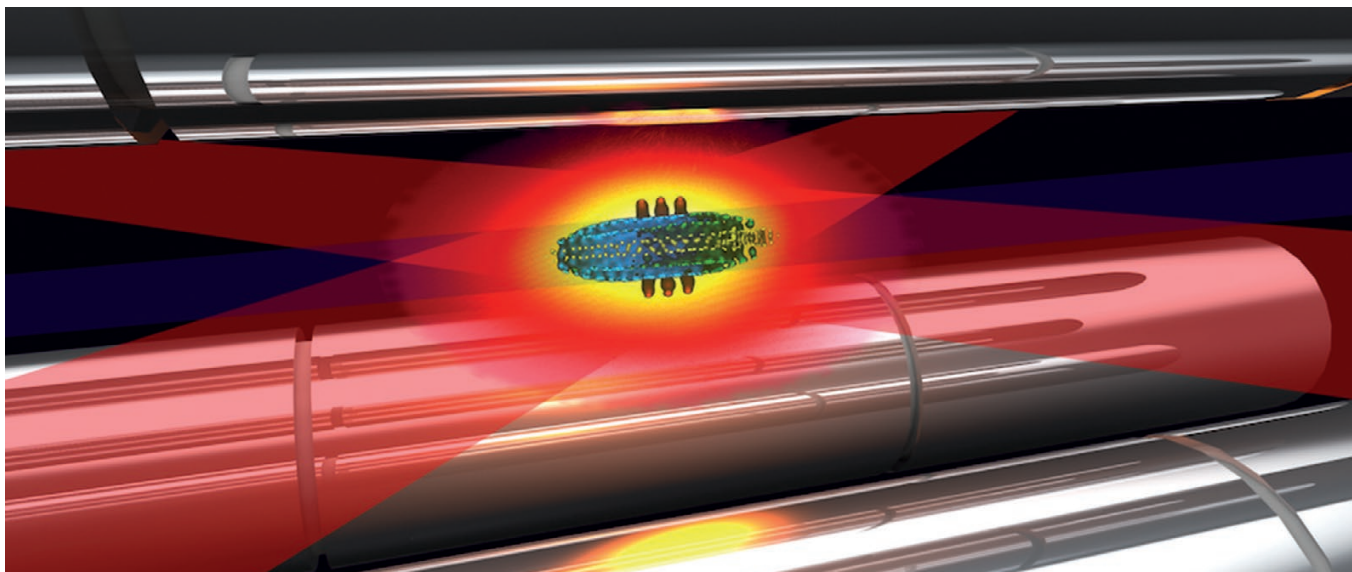
le piège radiofréquence de Paul (inventé par W. Paul), consistant en un ensemble d'électrodes linéaires recevant des tensions statiques et variables (g. 1).

Les cristaux coulombiens moléculaires

Au contraire des atomes, les molécules ne peuvent pas être refroidies par laser (à part quelques rares exceptions) en raison de la structure complexe de leur spectre de niveaux d'énergie, qui rend impossible l'absorption répétée de photons du laser. Cependant, une méthode originale a été employée pour refroidir des ions moléculaires à des températures similaires à celles des ions atomiques : le refroidissement cinétique. Cela nécessite qu'un gaz de molécules piégées échange de l'énergie avec des ions atomiques, énergie qui est finalement dissipée par le refroidissement laser. Un cristal coulombien à deux composants est ainsi créé, dans lequel seuls les ions atomiques sont fluorescents, tandis que les molécules ne sont pas directement observées. La comparaison de l'image obtenue avec une image simulée, produite par une méthode de dynamique moléculaire, permet de rendre ces ions

particulièrement visibles (g. 2b). Les cristaux coulombiens apparaissent alors sous plusieurs formes dans un piège de Paul (figure de la p. 91) : (a) un ion isolé, (b) une chaîne d'ions, ou encore (c) un gros cristal macroscopique contenant des centaines d'ions, et dont la taille peut atteindre une fraction de millimètre ! La forme sphéroïdale du gros cristal provient de la manipulation par des lasers. Ce dernier point est établi depuis longtemps pour des ions atomiques, qui ne présentent que peu de degrés de liberté interne liés aux





Š • • • Š € - ' - • ¼ ' ± - - " ' °' - ±
 - " ¾ • ¼ °' ½ ± °' ½ ± -

électrons et aux spins nucléaires. En outre, les ions moléculaires présentent des degrés de liberté supplémentaires à leurs mouvements de vibration et de rotation qui rendent ce contrôle moins immédiat. La mise au point de méthodes permettant la manipulation et le contrôle des états quantiques internes des ions moléculaires dans un cristal coulombien est depuis plusieurs années, l'objectif majeur de ce domaine, qui a vu des premières réalisations très récemment [1].

Les applications : de la logique quantique...

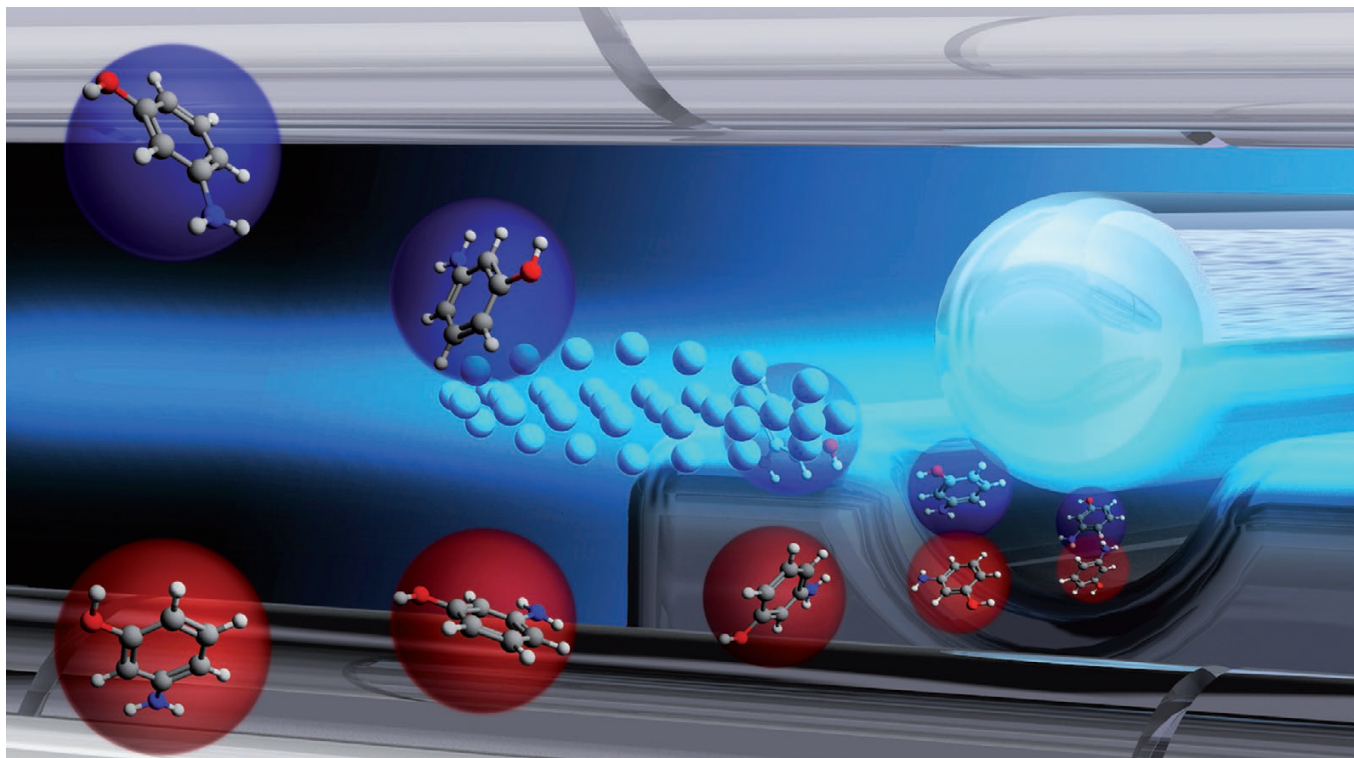
C'est avec des ions atomiques piégés que le refroidissement laser a été démontré pour la première fois dans les années 1970. Mais l'avancée décisive dans ce domaine est intervenue lorsque Ignacio Cirac et Peter Zoller ont réalisé qu'une chaîne d'ions « cristallisés » pouvait constituer l'élément de base pour un ordinateur quantique [5]. Depuis, les développements expérimentaux basés sur des cristaux coulombiens ont conduit à une réalisation actuelle des plus élaborées d'un système d'information quantique [6]. Ce qu'il convient maintenant d'appeler la simulation quantique est aussi devenue une application importante : la dynamique de l'hamiltonien d'un système complexe – par exemple issu de la matière condensée – est simulée à travers de son implémentation dans

un système comme un cristal coulombien : on montre que le système obtenu est alors mathématiquement équivalent à des fréquences de transitions atomiques [9]. En outre, la possibilité d'isoler des particules uniques dans l'environnement ultravide et contrôlé que constitue un piège à ions, et de maîtriser leur mouvement et leur état quantique interne, a permis le développement d'une nouvelle génération d'horloges atomiques qui ont été récemment développées, combinant parmi les plus précises [7]. Le principe d'une telle horloge repose sur la mesure de la fréquence d'une transition électronique d'ion piégé unique, le plus souvent situé dans le domaine visible ou ultraviolet. Cela permet d'atteindre une précision de la mesure qui surpasse celle réalisée par une horloge atomique conventionnelle, qui implique une transition dans le domaine des radiofréquences. L'utilisation d'un ion moléculaire piégé comme H^+ est même envisagée pour réaliser une horloge de grande précision [8]. En parallèle, cette précision extrême des mesures sur des ions piégés permet d'aborder des questions fondamentales habituellement dévolues à la physique des hautes énergies. Par exemple, plusieurs projets s'intéressent à la variation de grandes échelles de temps constants fondamentales comme la constante de structure fine ou le rapport

entre les masses de l'électron et du proton, ou encore à l'influence de la gravitation sur les fréquences de transitions atomiques [9]. En outre, la possibilité d'isoler des particules uniques dans l'environnement ultravide et contrôlé que constitue un piège à ions, et de maîtriser leur mouvement et leur état quantique interne, a permis le développement d'une nouvelle génération d'horloges atomiques qui ont été récemment développées, combinant parmi les plus précises [7]. Le principe d'une telle horloge repose sur la mesure de la fréquence d'une transition électronique d'ion piégé unique, le plus souvent situé dans le domaine visible ou ultraviolet. Cela permet d'atteindre une précision de la mesure qui surpasse celle réalisée par une horloge atomique conventionnelle, qui implique une transition dans le domaine des radiofréquences. L'utilisation d'un ion moléculaire piégé comme H^+ est même envisagée pour réaliser une horloge de grande précision [8]. En parallèle, cette précision extrême des mesures sur des ions piégés permet d'aborder des questions fondamentales habituellement dévolues à la physique des hautes énergies. Par exemple, plusieurs projets s'intéressent à la variation de grandes échelles de temps constants fondamentales comme la constante de structure fine ou le rapport

... à la chimie ultra-froide contrôlée

Les chimistes ont aussi commencé à s'intéresser aux cristaux coulombiens pour le refroidissement sympathique d'espèces moléculaires ioniques, permettant l'étude détaillée de réactions chimiques entre espèces neutres et ioniques, et à très basse température. Plusieurs types d'expériences ont été récemment développées, combinant des pièges à ions avec des sources d'atomes froids [10, 11] ou de molécules froides [12] (g. 3). Des processus chimiques inhabituels peuvent être étudiés en régime ultra-froid et en phase très diluée, comme par exemple la formation de molécules par émission d'un photon au cours de la collision entre un atome et l'ion atomique. Au-delà de l'environnement artificiel fourni par ces expériences, ce type de processus joue un rôle fondamental dans la compréhension de la chimie de l'espace interstellaire. La dynamique de la collision ultra-froide entre trois particules, cruciale dans un milieu dense comme un condensat de Bose-Einstein, a pu être explorée [10], même que les subtiles interactions à grande distance qui ne se manifestent pas en régime ultra-froid sans être masquées par l'agitation thermique des particules [11]. De façon générale, de telles conditions



Š € %œ • • Ž Š %œ Ž
 2 Ÿ” 3 - ¼ - ° Ć ± Ā > • • • ° Ć - >
 Ž Ć ± Ā > • • • ° Ć - > spin
 • ¾ • • • ¼ • 2’ 3 • •
 °€ £” • %œ” £ Å...ŸÆ ± - ®

œœœœ

permettent de mieux comprendre les détails des processus chimiques, grâce à leur observation dans des conditions contrôlées.

Les cristaux coulombiens sont aussi à la dynamique de molécules complexes. Par exemple, de nombreuses molécules polyatomiques dans leur état fondamental présentent plusieurs formes stables appelées conformations, qui ne diffèrent que par la rotation d'une ou plusieurs parties de la molécule autour de l'axe de la liaison chimique. L'influence de ces conformations sur une réaction chimique est une question ouverte depuis longtemps mais difficilement accessible car à des températures usuelles, l'agitation thermique entraîne des changements de conformation. La figure 4 illustre une expérience dans laquelle des molécules polyatomiques sont préparées dans une conformation donnée, et y subsistent grâce à une méthode de refroidissement adiabatique. Elles peuvent ainsi interagir avec une cible constituée par un cristal

Conclusion

Avec ces progrès récents spectaculaires, la technologie des cristaux coulombiens atomiques et moléculaires a permis l'émergence d'un domaine scientifique situé à l'interface de la physique quantique, de la physique atomique et moléculaire, et de la chimie. De nouvelles perspectives s'ouvrent en direction de l'amélioration des performances des horloges atomiques qui fera reculer les limites de la précision des mesures de fréquences, du développement d'une ingénierie quantique de molécules uniques qui étend et augmente les possibilités déjà explorées avec les atomes, et de la découverte de nouvelles méthodes pour l'étude détaillée et le contrôle de réactions chimiques. Sans exagération, la recherche sur et avec les ions ultra-froids est devenue un domaine brûlant !

• •
 ... Ž Int. Rev. Phys. Chem. °f,...f± ...jt
 f' • , et al., J. Phys. B °f,...± ...†œ,...Ÿ
 Ÿ' ž et al., Phys. Chem. Chem. Phys.
 °f,...± if,...
 œ% “ ž et al., Phys. Rev. Lett. °...±j± ...Ÿœ
 “ € , Ā Phys. Rev. Lett. °...±†œ,...
 † †x et al., Phys. Rep. °f,...± ...††
 † °œ... et al. < ...œ...j ŸœœŸœf Ā
 ” œ °f,...œ±
 et al., Phys. Rev. Lett. °f,...œ± „fŸ,...œ
 • • et al. Science °f,...± ...ŸŸ,
 „... †x “ † š %œ Contemp. Phys.
 °f,...œ± ŸŸ
ž Proc. Int. Sch. Phys. Enrico Fermi
 °f,...†± f††
 -f' ž et al., Phys. Rev. Lett. °f,...± „œŸf„Ÿ
 ...Ÿ” • et al., Science °f,...Ÿ± œ”

(a) Ce domaine a été récompensé par deux prix Nobel de physique, en 1997 et 2001.
 (b) Ces avancées spectaculaires ont également été reconnues par l'attribution du prix Nobel de physique 2012 à D. Wineland (conjointement à Serge Haroche).
 (c) Notons qu'une telle conformation peut être réalisée à température ambiante avec des particules plus lourdes, comme des grains de poussières.