

La force entre deux atomes enfin mesurée

La manipulation d'atomes individuels est aujourd'hui une réalité en laboratoire. Ce contrôle a permis la mesure directe de l'énergie d'interaction entre deux atomes. Une première!

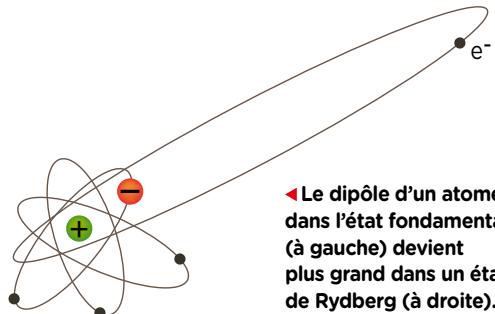
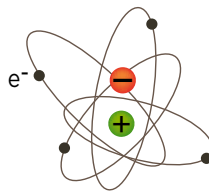
Antoine Browaeys, physicien

Lorsque j'étais au lycée, il y a environ vingt-cinq ans, on me disait que l'on ne pouvait pas voir les atomes à l'œil nu. On me parlait bien de la microscopie électronique qui permet de reconstituer l'image d'une surface et donc de voir où sont les atomes, mais on excluait plus ou moins la possibilité de prendre un seul atome et de le contrôler. Et à l'époque c'était essentiellement vrai. Pourtant en 1973, aux États-Unis, Hans Dehmelt était parvenu à piéger et à conserver pendant des mois un seul électron en utilisant une combinaison de champs électriques et magnétiques. Puis en 1980, il parvint, simultanément avec Peter Toschek en Allemagne, à isoler un seul ion (c'est-à-dire un atome auquel il manque un électron). Hans Dehmelt recevra le prix Nobel de physique en 1989 pour ces travaux. En 2015, les techniques de manipulations d'atomes ou d'ions sont tellement avancées que l'on peut réaliser au laboratoire des expériences aussi fondamentales que la mesure de la force entre exactement deux atomes séparés d'une distance bien contrôlée (1).

Quelles étaient les motivations de Hans Dehmelt? Peut-être avait-il en tête la phrase d'Erwin Schrödinger, l'un des créateurs de la physique quantique: «*Nous ne faisons jamais d'expérience avec une seule particule... Dans des expériences de pensée, nous le faisons parfois, mais cela conduit invariablement à des conséquences ridicules.*» Mais, plus sûrement, il cherchait à améliorer la

précision des mesures des propriétés de l'électron ou de l'ion, avec une idée simple: si la particule est seule, ses propriétés ne sont pas affectées par les perturbations dues à d'autres particules. On accède ainsi à ses caractéristiques intrinsèques. Par ailleurs, si la particule est piégée, on peut l'observer pendant plus longtemps et donc augmenter la précision sur la mesure.

Depuis ces travaux, de nombreux groupes se sont lancés dans l'aventure du piégeage de particules individuelles avec l'espoir d'améliorer les mesures de précision, mais également d'étudier des processus physiques élémentaires tels que l'interaction d'un seul atome avec un seul photon. David J. Wineland, au NIST à Boulder, aux États-Unis, et Serge Haroche, au laboratoire Kastler-Brossel à Paris, furent des pionniers du développement de méthodes pour la mesure et le contrôle de systèmes quantiques élémentaires et reçurent pour cela le prix Nobel de physique en 2012. Récemment, nous avons réussi à contrôler suffisamment la position et l'état de deux atomes pour mesurer l'interaction entre eux, qui assure la cohésion de la matière. ●●●



Repères

■ Grâce à des faisceaux laser, les physiciens savent aujourd'hui piéger et contrôler des atomes un à un.

■ La force de van der Waals entre deux atomes a ainsi pu être mesurée directement pour la première fois.

■ La manipulation d'atomes individuels ouvre la voie à des applications comme l'ordinateur et le simulateur quantiques.

◀ Le dipôle d'un atome dans l'état fondamental (à gauche) devient plus grand dans un état de Rydberg (à droite).

(*) **Un dipôle électrique** est constitué de deux charges électriques opposées que l'on sépare d'une petite distance. C'est l'équivalent électrique d'un aimant. De même que l'aimant crée un champ magnétique, un dipôle électrique produit un champ électrique.

(*) **La température absolue** s'exprime en kelvin et correspond à la température en Celsius augmentée de 273,15. Ainsi une température ambiante de 20 °C correspond à 293,15 K. À une température de 300 K, un atome se déplace à quelques centaines de m/s. À 1 millikelvin, il se déplace à quelques cm/s.

... Depuis le début du XX^e siècle, elle a été mesurée de manière indirecte dans un très grand nombre de situations (2). Pourtant la mesure idéale qui consiste à prendre exactement deux atomes séparés d'une distance contrôlée et à mesurer leur énergie d'interaction n'avait jamais été réalisée avant notre démonstration.

La difficulté réside dans le fait que cette interaction d'origine électromagnétique est très faible car les atomes sont neutres. Mais faible ne signifie pas négligeable... Cette force entre deux atomes s'appelle la force de van der Waals-London, du nom des deux physiciens qui l'ont décrite au début du XX^e siècle. Sa compréhension profonde nécessite la physique quantique, mais on peut se faire une image de son origine. Dans un atome, les électrons chargés négativement sont à une certaine distance du noyau chargé positivement. Cette séparation crée un dipôle électrique(*), qui rayonne un champ électrique autour de l'atome. Ce champ électrique perturbe les trajectoires des électrons d'un deuxième atome si celui-ci est situé assez près. Le dipôle électrique du deuxième atome est donc modifié. C'est l'interaction entre le champ créé par le premier atome et le dipôle du deuxième atome qui est responsable de la force de van der Waals. Il en résulte une énergie d'interaction qui diminue très rapidement quand la distance entre les atomes augmente : elle est inversement proportionnelle à la sixième puissance de la dis-

région que la particule restera confinée. Pour produire l'équivalent du bol pour un atome, on utilise un faisceau laser focalisé par une lentille.

LES ATOMES PIÉGÉS PAR LE FROID

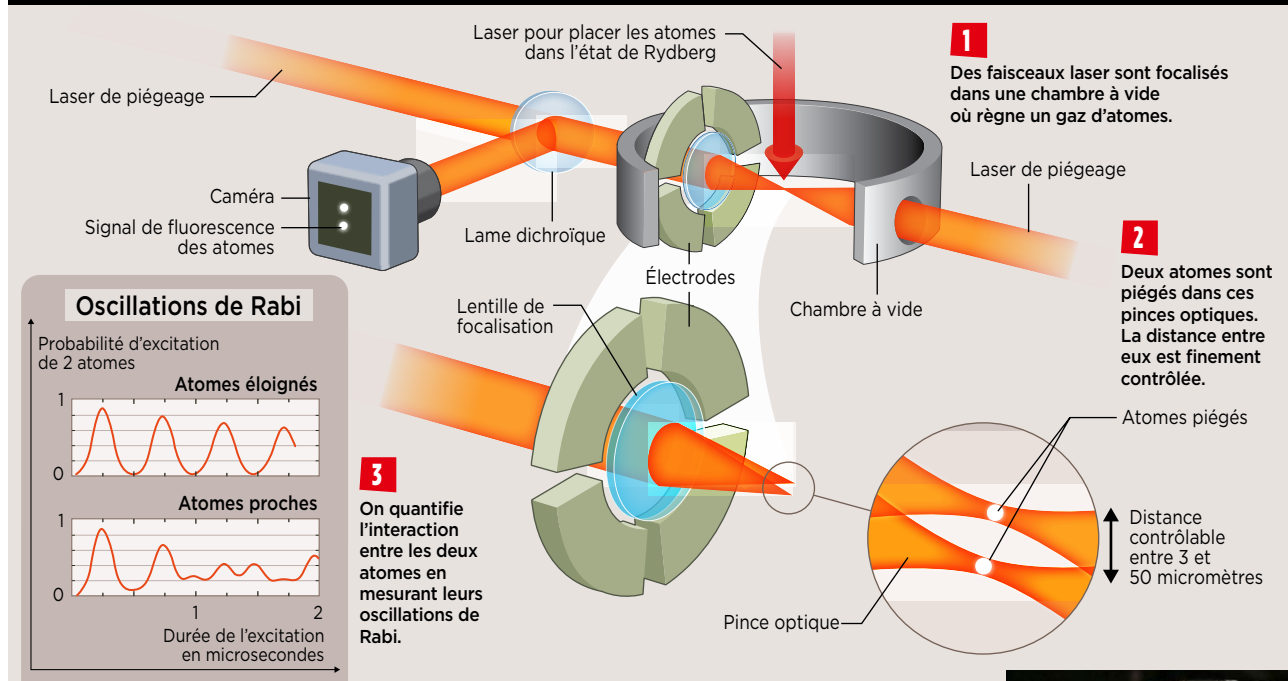
La lumière laser peut interagir avec un atome de plusieurs façons. Un atome possède des niveaux d'énergie correspondant à différentes configurations des électrons autour du noyau. Lorsque la fréquence d'un laser est accordée sur une transition atomique, c'est-à-dire quand l'énergie de la lumière est égale à l'écart entre deux niveaux atomiques, l'atome absorbe un photon qui est ensuite émis dans une direction aléatoire. On parle d'émission spontanée. L'atome subit des cycles d'absorption-émission des millions de fois par seconde : il fluoresce. Si au contraire la fréquence du laser ne correspond pas exactement à la transition atomique, l'atome ne peut pas absorber de photon et ne fluoresce donc pas. Ce n'est pas que la lumière soit strictement sans effet sur l'atome. En effet, l'onde émise par un laser correspond à un champ électrique qui oscille très rapidement. Ce champ électrique modifie la répartition de la charge électronique en déplaçant le noyau chargé positivement dans une direction et le nuage électronique dans l'autre. Cette séparation des charges crée un dipôle électrique et on dit que l'atome se polarise. Le dipôle interagit à son tour avec le champ du laser. L'énergie de l'atome dans le laser est proportionnelle à l'intensité de celui-ci. Pour fabriquer un potentiel de piégeage, l'équivalent d'un bol, il suffit donc que l'intensité du laser varie dans l'espace. C'est exactement ce qui se passe lorsqu'une lentille focalise de la lumière : l'intensité est maximale au point de focalisation, qui correspond au centre du piège.

Comme on cherche à localiser l'atome de manière précise dans l'espace, la taille du point de focalisation doit être la plus petite possible. Or les lois de l'optique indiquent que la plus petite taille sur laquelle on peut focaliser la lumière est donnée par sa longueur d'onde. En utilisant un laser de 1 micromètre de longueur d'onde (dans le domaine infrarouge), la taille du piège est donc de cet ordre de grandeur : un volume de moins de 1 micromètre cube. Une telle configuration de piégeage s'appelle une « pince optique ». Elle est utilisée également pour manipuler des grosses molécules ou des minuscules billes de verre.

La difficulté réside dans le fait que cette interaction d'origine électromagnétique est très faible car les atomes sont neutres

tance. Cela veut dire qu'en doublant la distance, l'énergie d'interaction est divisée par un facteur $2^6 = 64$. Par comparaison, l'énergie entre deux charges électriques varie comme l'inverse de leur séparation. La force de van der Waals n'agit donc qu'à très courte distance. Mesurer cette force requiert de relever plusieurs défis, à commencer par celui qui consiste à isoler les deux atomes. Il faut d'abord piéger un atome. On peut imaginer un atome piégé comme une bille placée dans un bol : sa position d'équilibre se trouve au fond du bol, où son énergie est minimale. C'est dans cette

Fig.1 Comment se mesurent les forces de van der Waals

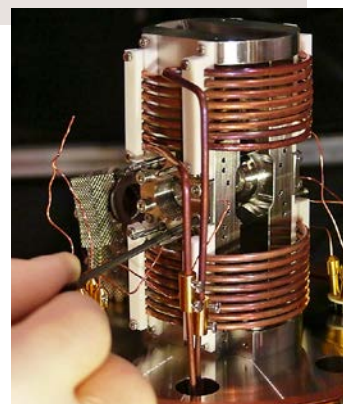


Un atome ne restera piégé dans la pince optique que si son énergie est inférieure à celle qui correspond à la profondeur de la pince. Comme cette énergie correspond à un mouvement d'agitation thermique, on donne sa valeur en température absolue qui s'exprime en kelvin (°K). Le problème avec les atomes, c'est que la profondeur du piège que l'on sait produire est très faible, de l'ordre de 1 millikelvin soit 1/1 000° de degré au-dessus du zéro absolu. Il faut donc commencer par refroidir le gaz à une température plus basse pour que les atomes restent piégés. Cela semble être un tour de force, et pourtant, il a été réalisé entre 1980 et 1990, grâce au refroidissement par laser. Cette technique utilise des lasers pratiquement accordés avec une transition atomique (les atomes fluorescent donc) : en s'arrangeant bien, les lasers exercent une force de friction sur les atomes qui se trouvent ralentis. De cette manière, le mouvement d'agitation thermique des atomes d'un gaz est réduit. Nous avons maintenant tous les ingrédients pour comprendre le piégeage d'un seul atome, démontré pour la première fois à l'Institut d'optique en 2000 par Philippe Grangier et son équipe. Nous partons d'un nuage contenant quelques millions d'atomes refroidis par laser (dans notre cas, nous utilisons du rubidium, un élément chimique de la première colonne de la table périodique). Nous focalisons alors la pince

optique dans le nuage et attendons qu'un atome entre par hasard dans le piège. La force de friction que les lasers exercent sur l'atome le confine dans la pince. Ces lasers font également fluorescer l'atome qui émet donc de la lumière. Nous la collectons, par exemple en utilisant la même lentille que celle qui focalise le laser de piégeage. La lumière de fluorescence et la lumière du piège ont des longueurs d'onde suffisamment différentes pour pouvoir les séparer grâce à un composant optique appelé lame dichroïque. Bien sûr, la quantité de lumière émise par un seul atome est très faible. Mais les détecteurs de lumière peuvent aujourd'hui compter les photons un par un. Pour décider si un atome est présent dans le piège, il nous suffit de 50 photons.

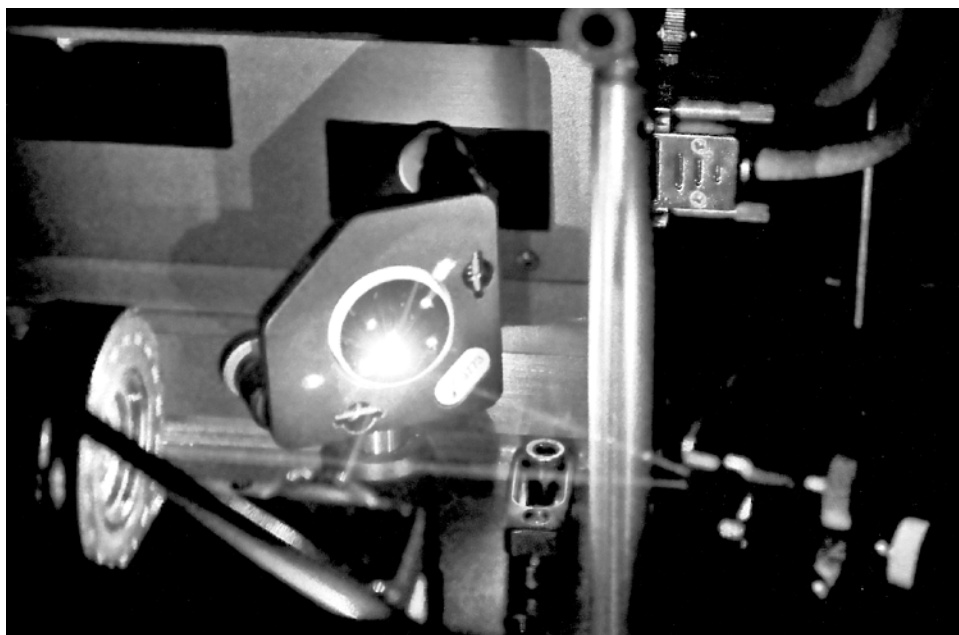
EN ÉTAT D'EXCITATION

Nous collectons ces derniers sur une caméra très sensible qui fait l'image de la zone du piège. Lorsqu'un atome est présent, nous observons qu'un pixel de la caméra s'allume : c'est directement l'image d'un atome ! Si on trace la quantité de lumière reçue par ce pixel en fonction du temps, nous observons un signal à l'allure télégraphique avec un niveau bas (le bruit de fond de l'expérience) et un niveau haut. Il annonce la présence d'un atome qui émet de la lumière par fluorescence. Deux atomes ne peuvent se trouver ●●



▲ Dispositif de piégeage des atomes en cours de montage avant son placement dans la chambre à vide. Les bobines de cuivre produisent un champ magnétique destiné à refroidir les atomes.

► *Le faisceau laser refroidit les atomes de rubidium pour les ralentir et les piéger séparément dans des pinces optiques.*



... simultanément dans le piège car il est de petite taille : si un deuxième atome pénètre dans le piège, la lumière de refroidissement induit une violente collision entre les deux atomes qui les chasse du piège. Nous attendons donc que le signal télégraphique soit sur un niveau haut, puis nous éteignons les lasers de refroidissement. L'atome reste dans la pince pendant plusieurs secondes, ce qui laisse largement le temps de le manipuler.

Pour mesurer l'interaction entre deux atomes, il suffit maintenant de produire deux pinces optiques à l'aide de deux faisceaux laser, chacune contenant un atome. En pratique, nous pouvons varier la distance entre ces pinces, et donc entre les deux atomes, de 3 à 50 micro-

mètres avec une précision de 100 nanomètres. Cette distance reste très grande à l'échelle atomique (un atome a une taille de $1/10\,000^{\text{e}}$ de micromètre) et la force de van der Waals, de très courte portée, est complètement négligeable. Il nous a donc fallu ruser...

Afin d'augmenter la valeur de cette force jusqu'à des valeurs mesurables, nous avons placé, grâce à des lasers, les atomes dans des états très excités, appelés états de Rydberg. Dans ces états, un des électrons de l'atome se déplace à grande distance du noyau : en adoptant une image classique, le rayon de sa trajectoire est 1 000 fois plus grand que dans l'état de plus basse énergie de l'atome (l'état fondamental). Comme l'électron est loin du noyau, le dipôle électrique des atomes

LE SIMULATEUR QUANTIQUE

À quel type d'application la manipulation d'atomes individuels peut-elle conduire ? À la simulation quantique de systèmes complexes par exemple. Certains phénomènes, comme la supraconductivité à haute température ou le magnétisme de certains matériaux, ne sont pas bien compris. Pour les dé-

crypter, les physiciens écrivent des équations qui fournissent un modèle simplifié du processus. Mais ces équations sont encore très compliquées à résoudre lorsque le nombre de particules dépasse quelques dizaines ! L'idée est alors de fabriquer au laboratoire un système gouverné par ces équations insolubles

et à mesurer la propriété qui nous intéresse. Ce système artificiel s'appelle un « simulateur quantique ». S'il est fiable, il doit donner la solution expérimentale des équations. La fiabilité repose sur un excellent contrôle des interactions entre les atomes du simulateur. C'est pour cela qu'un ensemble d'atomes de

Rydberg en interaction, tel que décrit ci-dessus, est un bon candidat pour construire un tel simulateur. Dans notre laboratoire, nous sommes déjà capables de manipuler plus de 30 atomes de Rydberg en interaction, ce qui nous place à la limite de ce que peuvent faire les ordinateurs les plus puissants.

est très grand et l'interaction de van der Waals est plus forte. Le facteur d'augmentation peut atteindre plus de 100 milliards par rapport au cas de deux atomes dans leur état fondamental.

CONTRÔLER LA DISTANCE

Pour mesurer l'énergie d'interaction, nous avons utilisé une technique inventée dans les années 1930 par le physicien américain Isidor Rabi et qui porte son nom : les oscillations de Rabi. Lorsque l'on envoie sur un atome un laser accordé sur une transition atomique, nous avons vu plus haut que l'atome est excité et émet de la lumière par fluorescence. Mais si l'intensité du laser est suffisamment grande, cette émission de lumière est très largement dominée par l'échange d'énergie entre l'atome et le laser : l'atome absorbe un photon du laser, ce qui le porte dans son état excité, puis « rend » préférentiellement le photon au laser avec la même direction qu'il l'avait reçu. Puis l'atome absorbe un nouveau photon, etc. Ces cycles sont plus réguliers que les cycles de fluorescence. Ainsi, si on mesure la probabilité que l'atome soit dans l'état excité au cours du temps, on observe des oscillations régulières en fonction de la durée d'exposition à la lumière laser. Ce sont les oscillations de Rabi.

Regardons maintenant ce qui se passe lorsque l'on envoie le laser sur deux atomes à la fois, ceux-ci étant séparés d'une distance bien contrôlée. Si cette distance est très grande, les deux atomes n'interagissent pas, et les deux atomes subissent des oscillations de Rabi indépendantes. En revanche, si les atomes sont suffisamment proches pour interagir, ces oscillations sont modifiées. En analysant finement la modification des oscillations, on peut extraire la valeur de l'énergie d'interaction pour la distance considérée. Nos expériences sont en très bon accord avec les prédictions théoriques ! Nous avons aussi répété la mesure pour différents états de Rydberg correspondant à des trajectoires de l'électron plus éloignées des noyaux : on constate bien qu'à une distance donnée la force de van der Waals est alors plus grande.

Nous avons donc montré la maîtrise de l'interaction entre deux atomes, placés à une distance très précise de l'ordre de quelques micromètres et dont l'état d'excitation est contrôlé grâce à des lasers. Ceci n'est qu'un exemple de technologie quantique. Ce domaine en plein développement



▲ Sur l'écran de l'ordinateur, Sylvain Déseleuc, étudiant en thèse, montre deux points lumineux : deux atomes piégés quelques secondes dans deux pinces.

◀ Ci-contre, Antoine Browaeys, au centre, discute des résultats de la démonstration avec Aline Vernier et Lucas Béguin, la post-doctorante et le thésard qui ont monté l'expérience.

visé à manipuler l'état quantique d'un ensemble de particules, ici des atomes, mais aussi des électrons, des ions, des molécules et même des atomes artificiels créés grâce aux nanotechnologies. Les applications visées sont nombreuses allant de la construction d'un ordinateur quantique qui serait plus efficace que nos ordinateurs actuels, à des interrogations très fondamentales telles que l'exploration de la transition entre le monde quantique et le monde classique. On ne sait pas forcément bien poser le problème, mais on pourrait se demander s'il y a un nombre maximal de particules au-delà duquel la physique quantique cesse d'être valable. C'est en essayant au laboratoire de contrôler un nombre de plus en plus grand d'atomes que l'on peut espérer y répondre... ■

(1) L. Béguin et al., *Phys. Rev. Lett.*, 110, 263201, 2013.

(2) Jacob N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, Academic Press, New York, 2010.

Pour en savoir plus

■ P. Arrighi et S. Perdrix, « La décohérence, une alliée pour la simulation », *La Recherche* n° 501-502, p. 66, juillet-août 2015.