

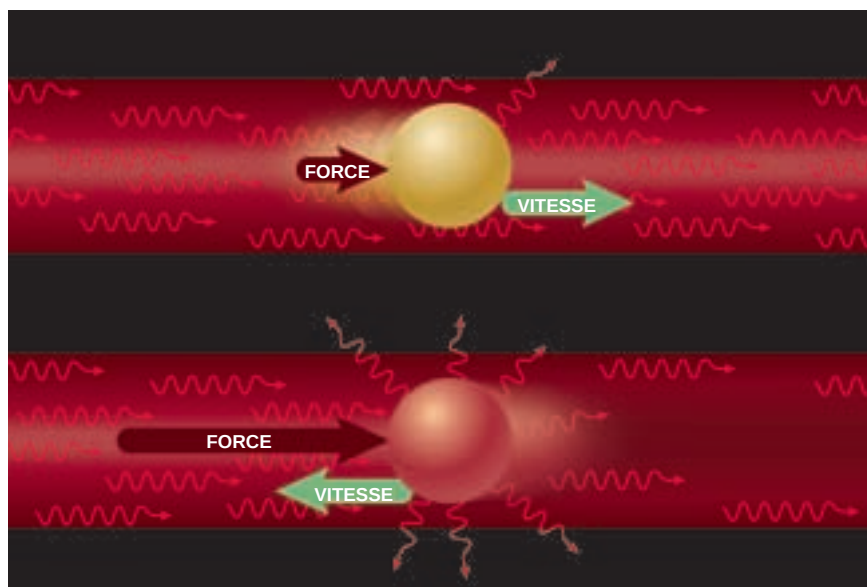
lions chaque seconde), l'atome recule légèrement dans la direction opposée à la direction d'incidence des photons. Ce recul résulte de la pression de radiation. On refroidit le gaz en forçant les atomes à absorber majoritairement des photons de direction opposée à leur vitesse. Ainsi la vitesse d'agitation est réduite, et les atomes sont refroidis. On obtient ce refroidissement en réglant la fréquence laser par rapport à la fréquence de résonance des atomes (voir la figure 3).

Dans notre dispositif expérimental, la lumière laser ne refroidit pas uniquement les atomes, elle les piège aussi en les maintenant à l'écart des parois de la cellule, qui sont à température ambiante. Ce mécanisme de piégeage, qui s'oppose à la diffusion des atomes en dehors du centre de la cellule, repose lui aussi sur la pression de radiation. À l'aide d'un faible champ magnétique, nous décalons légèrement la fréquence de résonance des atomes, afin qu'ils absorbent préférentiellement les photons qui se propagent vers le centre de la cellule, où se croisent les six faisceaux laser. Au total, la pression de radiation pousse tous les atomes vers ce point et les y maintient.

Ainsi notre piège laser se charge en une minute de dix millions d'atomes qui proviennent de la vapeur de rubidium de la cellule, qui est à la température ambiante. Ces atomes piégés sont à une température d'environ 40 milliardièmes de degrés au-dessus du zéro absolu. Cette température, qui serait considérée comme extraordinairement basse dans la plupart des situations, est encore 100 fois supérieure à la température de condensation recherchée, mais la limite du refroidissement par laser est alors atteinte : le mouvement brownien imposé aux atomes par les innombrables impacts de photons empêche l'obtention d'un gaz plus froid ou plus dense.

Refroidissement par évaporation

Pour dépasser cette limite, nous éteignons les lasers et passons à la seconde étape du refroidissement : nous utilisons les techniques de piégeage magnétique et de refroidissement par évaporation mises au point par ceux qui étudiaient la condensation de l'hydrogène. Le fonctionnement du piège magnétique est fondé sur les propriétés magnétiques des atomes : chaque



3. LE REFROIDISSEMENT D'ATOMES par laser utilise la pression de radiation créée par les impacts répétés des photons sur les atomes. En raison de l'effet Doppler (analogie au changement de son d'une ambulance quand elle s'éloigne après s'être approchée), un atome de vitesse opposée à la direction de propagation d'un faisceau laser absorbe des photons de fréquence supérieure à celle des photons absorbés par un atome qui se déplace dans le sens du faisceau. Pour refroidir des atomes, on ajuste la fréquence du laser de façon que les atomes qui se déplacent dans le sens opposé au faisceau diffusent beaucoup plus de photons que les atomes qui se déplacent dans le sens du faisceau. Cela diminue la vitesse des atomes, et donc les refroidit.

atome se comporte comme un minuscule aimant et subit donc une force en présence d'un champ magnétique hétérogène (voir la figure 4). En ajustant convenablement la forme du champ magnétique et en le rendant suffisamment intense, nous maintenons les atomes dans le champ magnétique comme des balles dans un récipient profond. Dans ce piège, seuls les atomes d'énergie élevée s'échappent : ils emportent une énergie supérieure à l'énergie moyenne, de sorte que les atomes restants refroidissent.

Ce refroidissement par évaporation est celui que l'on obtient quand on souffle sur de la soupe chaude. Les molécules d'eau les plus énergétiques qui s'échappent de l'assiette vers l'air sont éliminées par le souffle, de sorte que l'énergie moyenne du liquide restant diminue ; les molécules du liquide se redistribuent l'énergie par d'innombrables collisions, puis celles qui ont le plus d'énergie s'échappent et sont éliminées, et ainsi de suite. Cependant, notre gaz d'atomes piégés est bien moins dense qu'une assiette de soupe. La principale difficulté expérimentale, à laquelle nous fûmes confrontés pendant cinq ans, fut l'obtention d'un nombre suffisant de collisions entre les atomes pour que l'énergie soit redistribuée avant que les

atomes ne soient éjectés du piège par collision avec les atomes chauds du gaz résiduel de la cellule.

Nous avons résolu ce problème par de nombreuses améliorations successives du dispositif initial. Par exemple, nous avons compris que nous devions nettoyer chaque élément très soigneusement avant de relier la cellule à son banc de pompage, la moindre trace de doigt sur une surface interne émettant suffisamment de vapeur pour compromettre la bonne qualité du vide. Par ailleurs, nous avons réduit la quantité de vapeur de rubidium présente dans la cellule à une valeur qui suffisait tout juste à charger le piège.

Ces progrès, quoique utiles, ne suffisaient pas (et de loin) à nous conduire à la densité nécessaire pour déclencher le refroidissement par évaporation, car notre piège magnétique était insuffisamment efficace. Nos champs magnétiques étaient certes intenses, mais les aimantations des atomes sont si faibles, que nous ne parvenions pas à confiner suffisamment les atomes, même aux faibles vitesses obtenues par refroidissement laser.

En 1994, nous avons compris que nous devions absolument utiliser un piège magnétique plus profond et plus raide. Ce piège fut l'élément décisif du succès, mais nous savons au-



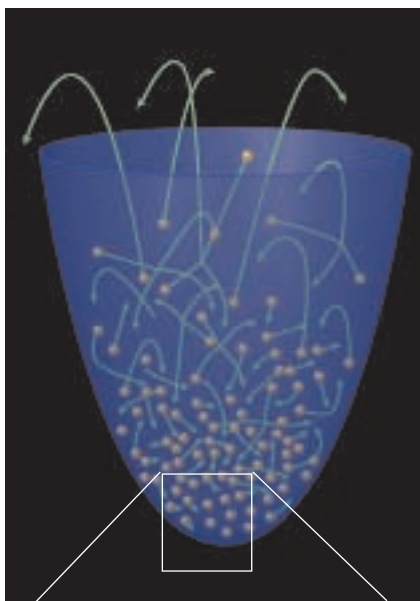
aujourd'hui que la configuration particulière que nous avons donnée à notre piège est loin d'être la seule possible. Il existe presque autant de pièges magnétiques différents que de groupes étudiant la condensation de Bose-Einstein.

Instantané d'un superatome

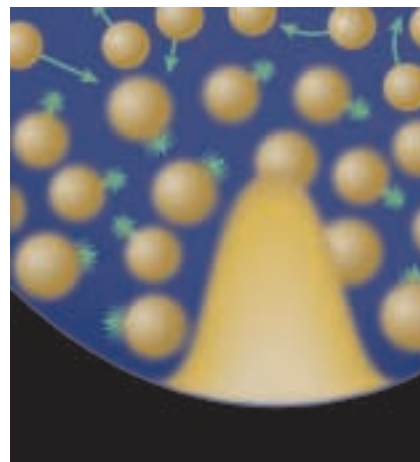
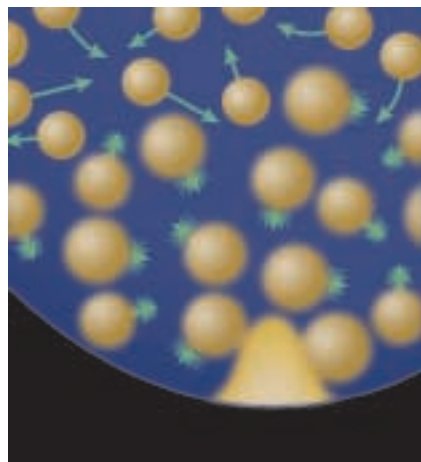
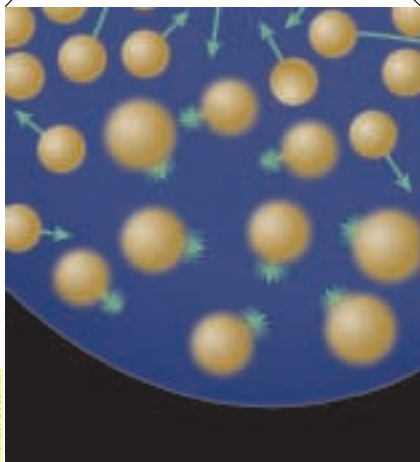
Comment vérifier que nous avons effectivement fabriqué un condensat de Bose-Einstein? Pour observer le nuage d'atomes refroidis, nous prenons une «image en absorption» à l'aide d'une impulsion laser. Comme les atomes se regroupent au fond du piège magnétique lorsqu'ils se refroidissent, le nuage froid est trop petit pour être visible. Pour augmenter sa taille, nous arrêtons les champs magnétiques de confinement et laissons les atomes se disperser dans toutes les directions. Au bout d'un dixième de seconde, nous éclairons le nuage d'atomes en expansion avec une impulsion laser : les atomes diffusent cette lumière en dehors du faisceau laser, produisant ainsi une ombre que nous observons sur une caméra vidéo. La forme de cette ombre nous indique les vitesses des atomes dans le nuage initialement piégé et, donc, la température de l'échantillon.

Pour visualiser le condensat, on représente les atomes par une surface dont l'élévation est d'autant plus importante que la densité des atomes est grande et que leur vitesse est faible. Dans cette représentation, le condensat est un pic en forme de nageoire dorsale (voir la figure 5). Les atomes condensés sont ceux dont la vitesse est la plus faible, si bien qu'ils restent groupés au centre du nuage au cours de la phase d'expansion. À elle seule, cette image du condensat démontre l'insuffisance de la mécanique classique : le condensat se forme dans l'état d'énergie minimale ; or, selon la mécanique classique, les atomes d'énergie minimale doivent se trouver immobiles au centre du piège, de sorte qu'ils devraient apparaître sous forme d'un pic infiniment haut et étroit sur notre image. Le pic obtenu n'est pas le pic ainsi prévu, en raison de la relation d'indétermination de Heisenberg (nommée aussi, à tort, principe d'incertitude : ce n'est pas un principe, et il n'est pas question d'incertitude).

Cette relation stipule que la connaissance d'un système physique ne peut être absolue : mieux on connaît la position d'un atome, par exemple, moins bien l'on connaît sa vitesse, et *vice versa*. Voilà pourquoi le pic formé par le condensat n'est pas infiniment étroit. S'il l'était, nous saurions que les atomes



4. ON OBTIENT UN REFROIDISSEMENT PAR ÉVAPORATION en utilisant un piège magnétique (représenté ici comme un récipient profond, en bleu). Les atomes d'énergies supérieures, ceux dont les trajectoires vertes sont les plus longues, peuvent s'échapper du piège (*en haut, à gauche*). Les atomes encore présents dans le piège se redistribuent l'énergie restante lors de leurs collisions (*à gauche*). Progressivement, ce mécanisme conduit à un gaz si froid et si dense que les propriétés quantiques des atomes apparaissent. Les paquets d'ondes atomiques, associés à la partie de l'espace où la probabilité de présence de chaque atome est maximale, commencent à se recouvrir. Quand une collision entre deux atomes conduit à un atome aussi immobile que le permet la relation d'indétermination d'Heisenberg, de nombreux atomes s'accumulent dans l'état d'énergie minimale (plus il y a d'atomes condensés, plus l'accumulation est rapide) ; ces atomes ainsi regroupés en un seul paquet d'ondes forment le condensat de Bose-Einstein (*en bas, au centre et à droite*).



se trouvent exactement au centre du piège avec une énergie exactement nulle ; nous ne pouvons avoir ces deux informations simultanément.

Selon la théorie d'Einstein, les atomes du condensat ont l'énergie minimale, alors que la relation d'Heisenberg leur interdit d'être exactement au centre du piège. La mécanique quantique résout cette contradiction apparente en postulant que l'énergie d'un atome dans une enceinte quelconque, y compris dans notre piège, ne prend qu'un ensemble discret de valeurs possibles et que la valeur minimale n'est pas nulle. Cette énergie minimale est nommée énergie de point zéro : c'est celle des atomes à température nulle. Les atomes ayant cette énergie se déplacent lentement au voisinage du centre du piège, et non pas exactement au centre. Habituellement, les effets de la relation d'indétermination et de la mécanique quantique ne sont visibles que pour les objets de la taille d'un atome ou encore plus petits. La condensation de Bose-Einstein est l'une des rares manifestations macroscopiques de la relation d'indétermination.

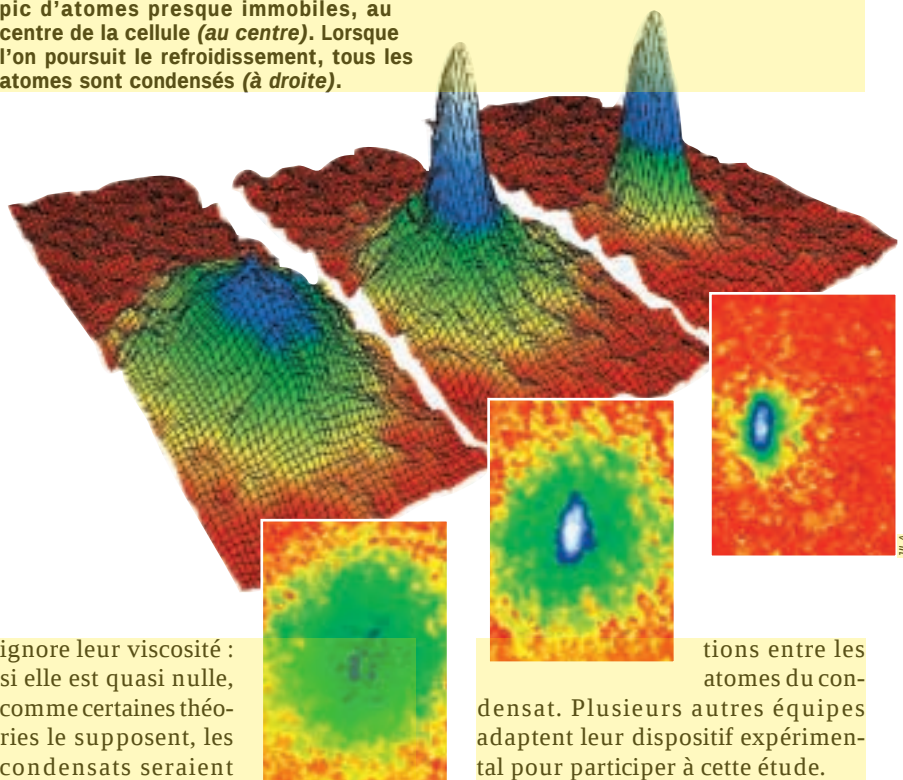
L'ultime précision

L'observation de la condensation de Bose-Einstein est encore trop récente pour que l'on envisage des applications, mais spéculons à l'aide d'une analogie physique : les atomes d'un condensat ressemblent aux photons d'un faisceau laser.

Tous les photons d'un faisceau laser se propagent exactement dans la même direction, et ils ont exactement la même fréquence et la même phase. Ils forment ainsi un faisceau facile à commander et à utiliser dans les lecteurs de disques compacts, dans les imprimantes laser, etc. De même, le condensat de Bose-Einstein est un groupe parfaitement homogène d'atomes que l'on peut réfléchir, focaliser, diffracter, moduler en fréquence et en amplitude. Ce type de manipulation conduira à une meilleure définition du temps (aujourd'hui, les horloges les plus précises utilisent déjà des atomes refroidis par laser). On pourrait aussi imaginer un faisceau d'atomes focalisé en une tache d'un micromètre de diamètre gravant un transistor directement sur un circuit intégré.

Les condensats de Bose-Einstein demeurent mal connus. Ils se comportent comme des fluides, mais on

5. L'ABSORPTION DE LA LUMIÈRE D'UN LASER par un condensat de Bose-Einstein en cours de formation a été enregistrée et traitée par ordinateur, de sorte qu'apparaissent la vitesse des atomes. Les deux rangées d'images correspondent aux mêmes données vues sous des angles différents. En haut, l'élévation de la surface est d'autant plus importante que la densité des atomes est grande et que leur vitesse est faible. Avant la formation du condensat (à gauche), le nuage est à une température d'environ 200 milliardièmes de kelvin, et les vitesses sont assez homogènes. Lorsque l'on refroidit jusqu'à 100 milliardièmes de kelvin, le condensat apparaît sous la forme d'un pic d'atomes presque immobiles, au centre de la cellule (au centre). Lorsque l'on poursuit le refroidissement, tous les atomes sont condensés (à droite).



ignore leur viscosité : si elle est quasi nulle, comme certaines théories le supposent, les condensats seraient des sortes de «super-gaz» où des remous produits par excitation ne s'amortiraient jamais.

Plusieurs groupes ont commencé à caractériser les condensats. Le groupe de W. Ketterle a déjà montré que le recouvrement spatial de deux condensats forme un réseau de franges provenant d'interférences constructives et destructives : dans le nuage d'atomes, ces franges sont des zones de densité alternativement forte et faible. En appliquant à un condensat piégé par de la lumière un faible champ magnétique, ils ont en outre modifié les interac-

tions entre les atomes du condensat. Plusieurs autres équipes adaptent leur dispositif expérimental pour participer à cette étude.

Peut-on condenser autre chose que des atomes, des molécules par exemple ? La difficulté réside dans l'impossibilité de refroidir des molécules par laser. Toutefois, certains ont imaginé un mécanisme, nommé «refroidissement sympathique», qui permettrait la formation d'un tel condensat : on mélange des molécules à des atomes «condensables», comme le rubidium. En refroidissant ces derniers, et pour peu que les collisions entre les molécules et les atomes soient suffisamment fréquentes, on refroidit l'ensemble, et on aboutirait à un condensat moléculaire.

Eric CORNELL et Carl WIEMAN travaillent à l'Institut pour l'astrophysique de laboratoire (JILA), à Boulder (Colorado).

William D. PHILLIPS et Claude COHEN-TANNOUDJI, *New Mechanisms for Laser Cooling*, in *Physics Today*, vol. 43, pp. 33-40, octobre 1990.

Bose-Einstein Condensation, sous la direction de A. Griffin, D.W. Snoke et S. Stringari, Cambridge University Press, 1995.

M.H. ANDERSON, J.R. ENSHER, M.R. MATTHEWS, C.E. WIEMAN et

E.A. CORNELL, *Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor*, in *Science*, vol. 269, pp. 198-201, 14 juillet 1995.

M.R. ANDREWS, C.G. TOWNSEND, H.-J. MIESNER, D.S. DURFEE, D.M. KURN et W. KETTERLE, *Observation of Interference between Two Bose Condensates*, in *Science*, vol. 275, pp. 637-641, 31 janvier 1997.

De nombreux liens complémentaires sont disponibles sur notre site Web : <http://www.pourlascience.com>