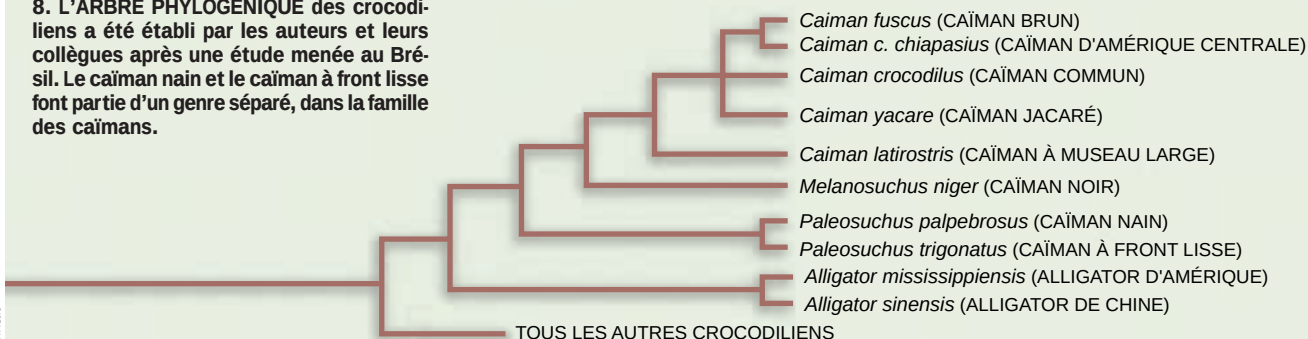


8. L'ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE des crocodiliens a été établi par les auteurs et leurs collègues après une étude menée au Brésil. Le caïman nain et le caïman à front lisse font partie d'un genre séparé, dans la famille des caïmans.

Bryan Christie



généralement commercialisés avant d'avoir atteint 1,5 mètre.

Le commerce des crocodiliens d'élevage devrait être une source de revenus qui seraient en partie réutilisés pour la préservation de la nature, mais les pays qui, jusqu'à présent, se préoccupaient peu de la biodiversité changeront-ils leurs habitudes du jour au lendemain ? Les investisseurs doivent nourrir, soigner et élever une couvée pendant trois ans environ, jusqu'à ce que les animaux aient une taille suffisante pour le marché ; ils sont alors bénéficiaires en les vendant 300 francs. Toutefois, les écologistes doutent que les revenus de la vente des peaux servent à la préservation de l'habitat et des populations sauvages.

Lorsqu'une espèce interdite à la vente est commercialisée, le marché se développe. En l'absence de législation claire et de contrôles internationaux efficaces, on cherche surtout à endiguer la fraude. Le caïman noir, particulièrement menacé et élevé dans des fermes en Équateur, sera vraisemblablement bientôt admis dans le circuit commercial international, et l'on sera alors incapable de maîtriser le trafic des peaux de caïmans noirs de contrebande provenant d'animaux sauvages bon marché. Ces animaux se reproduisent lentement, ils sont faciles à tuer et ne vivent que dans des habitats très spécifiques ; une fois qu'ils en ont été retirés, ils y retournent rarement. Lorsque ce commerce commença, les populations sauvages de cette espèce devront être étroitement protégées, mais aucun programme de surveillance n'a encore commencé.

Quand un pays autorise l'élevage d'animaux sauvages, tous les fonds disponibles sont consacrés à l'activité de fermage, mais l'habitat n'est pas toujours préservé. Seuls sont protégés les animaux qui ont une valeur

commerciale, mais on oublie les autres composantes de l'écosystème dont ils font partie. En Chine, par exemple, l'élevage de l'alligator de Chine a commencé en 1979, mais si cet élevage est aujourd'hui florissant, l'alligator sauvage disparaît progressivement (il reste moins de 1 000 animaux sauvages). De surcroît, la population sauvage ne pourra être régénérée par la population d'élevage, car l'habitat naturel a été totalement détruit.

En théorie, une espèce particulièrement menacée pourrait être élevée dans des fermes et, ensuite, remise en liberté. Cela s'est produit en Inde, où les populations de crocodiles marins, de crocodiles des marais et de gavials ont été ainsi reconstituées. Toutefois, en Inde, les lois qui protègent les animaux sauvages et les réserves naturelles et interdisent le commerce des crocodiliens sont souvent mieux respectées que dans d'autres pays.

Question de science

La recherche sur la biologie des crocodiles est encouragée par les propriétaires d'élevages et, surtout, par les industriels du cuir. La recherche fondamentale dépend presque exclusivement des subventions de l'industrie, et l'on s'interroge : les chercheurs auront-ils suffisamment d'indépendance pour que les espèces menacées soient préservées efficacement ?

Selon les industriels, l'exploitation accrue d'une espèce favorisera leur protection. Ainsi, un quota annuel d'exportation de 600 000 peaux de caïmans a été accordé à la Colombie, qui en produit aujourd'hui environ 450 000 (surtout *Caiman fuscus*) : la Colombie pourra augmenter ses exportations de caïmans grâce à la production des élevages.

Depuis le milieu des années 1980, les industriels du cuir de crocodiliens

ont multiplié leurs efforts pour que le caïman Jacaré soit supprimé de la liste des espèces menacées (il y a été placé en 1973, et son commerce a été interdit aux États-Unis). Leurs premières tentatives ont échoué, mais ils poursuivent leurs efforts en utilisant des arguments plus ou moins fallacieux, alors même que nous avons démontré que les populations sauvages de Jacaré (et des autres espèces de caïmans) continuent à diminuer.

Tandis que les professionnels veulent que toutes les espèces de crocodiliens soient commercialisables, on ne sait toujours pas reconnaître la peau d'un animal élevé en toute légalité et la peau d'une bête sauvage «protégée» qui a été assommée pendant qu'elle dormait au soleil près d'une mare. Les caïmans sauvages d'Amérique du Sud et d'Amérique centrale risquent de devenir bientôt des reliques présentées dans les musées sous forme de porte-monnaie.

Peter BRAIZATIS est un herpétologue de la Société pour la conservation de la nature, à New York, depuis 43 ans. Myrna WATANABE, sa femme, étudie le comportement des animaux. George AMATO dirige le département de génétique de la Société pour la conservation de la nature.

Peter BRAZAITIS, *Reptile Leather Trade : The Forensic Science Examiner's Role in Litigation and Wildlife Law Enforcement*, in *Journal of Forensic Science*, vol. 31, pp. 621-629, 1986.

Crocodiles and Alligators, sous la direction de Charles A. Ross, Facts on File, 1989.

George H. REBÊLO, Carlos YAMASHITA, Elizabeth A. ODIERNA et Myrna E. WATANABE, *Threats to Brazilian Crocodilian Populations*, in *Oryx*, vol. 30, n° 4, pp. 275-284, 1996.

La condensation de Bose-Einstein

ERIC CORNELL • CARL WIEMAN

La concrétisation d'un vieux rêve de physiciens rapprochera le monde quantique de notre vie quotidienne.

En juin 1995, nous avons réussi à créer une minuscule gouttelette aux propriétés remarquables. En refroidissant 2 000 atomes de rubidium à une température inférieure à 100 milliardièmes de degré au-dessus du zéro absolu (100 milliardièmes de kelvin), nous avons fait perdre aux atomes leur individualité : ayant toutes leurs propriétés identiques, mouvement compris, ils se sont alors comportés comme un unique «superatome». Ce condensat de Bose-Einstein, où les atomes se meuvent à l'unisson, ressemble à un faisceau laser, où les photons forment un paquet homogène.

Notre condensat, dont la durée de vie n'excéda pas dix secondes, était la confirmation expérimentale d'une prévision théorique faite il y a 70 ans par Albert Einstein et par Satyendranath Bose. À température ordinaire, les atomes d'un gaz dans un récipient bougent constamment ; certains ont une énergie élevée et une grande vitesse, tandis que d'autres ont une énergie faible. En poursuivant le travail de Bose, Einstein a montré que, dans un échantillon d'atomes suffisamment refroidis, une grande partie d'entre eux s'accumule dans l'état d'énergie minimale. Ils sont alors tous décrits par la même fonction d'onde atomique, c'est-à-dire qu'ils ont tous les mêmes propriétés physiques (position, vitesse, etc.).

L'obtention du premier condensat de Bose-Einstein passionna les physiciens. Si les esprits furent d'abord marqués par l'achèvement d'une longue quête et par la confirmation expérimentale de la prévision d'Einstein, la condensation de Bose-Einstein fascine aujourd'hui parce qu'elle est une fenêtre macroscopique sur le monde

étrange de la mécanique quantique. Cette théorie stipule que les particules élémentaires, tels les électrons, se comportent, selon les cas, comme des particules ou comme des ondes ; elle décrit des comportements qui échappent à l'intuition.

Les effets quantiques sont rarement observables dans les systèmes macroscopiques, parce que les aspects ondulatoires sont masqués par les contributions mutuellement incohérentes des innombrables particules qui constituent la matière. En revanche, dans un condensat de Bose-Einstein, les contributions ondulatoires de tous les atomes sont exactement en phase. Les ondes quantiques s'étendent alors dans tout l'échantillon et deviennent visibles à l'œil nu. Le microscopique est ainsi rendu macroscopique.

Nouvel éclairage sur de vieux paradoxes

L'obtention de condensats de Bose-Einstein éclaire d'un jour nouveau de vieux paradoxes de la mécanique quantique. Par exemple, lorsque deux atomes sont dans un même état quantique, comme c'est le cas dans un condensat, aucune mesure ne permet de les discerner. Les deux atomes occupent le même volume de l'espace, se déplacent à la même vitesse, diffusent la lumière de la même façon, etc.

Notre expérience quotidienne, qui nous met en contact seulement avec la matière à température ordinaire, ne nous permet pas de comprendre cette situation quantique paradoxale : aux températures et aux échelles de longueur de notre vie quotidienne, on peut décrire l'état d'un système par

1. CE PIÈGE ATOMIQUE refroidit et piège les atomes par deux mécanismes mis en œuvre successivement. D'abord, six faisceaux laser (en rouge) refroidissent les atomes, qui sont initialement à température ambiante, en les regroupant au centre de la cellule de verre où l'on a fait le vide. Ensuite, on éteint les faisceaux laser et l'on met sous tension les bobines magnétiques (de couleur cuivre). Le courant circulant dans les bobines crée un champ magnétique qui augmente le confinement de la plupart des atomes, les autres atomes (les plus énergiques) s'échappant du piège. Puis, à mesure des chocs dans le piège, l'énergie des atomes piégés se redistribue. Comme l'énergie moyenne a diminué, les atomes se sont refroidis. Ce mécanisme conduit progressivement à l'accumulation d'un grand nombre d'atomes dans l'état d'énergie minimale autorisée par les lois de la mécanique quantique. Ces atomes forment alors une seule entité : le condensat de Bose-Einstein.

Michael Goodman

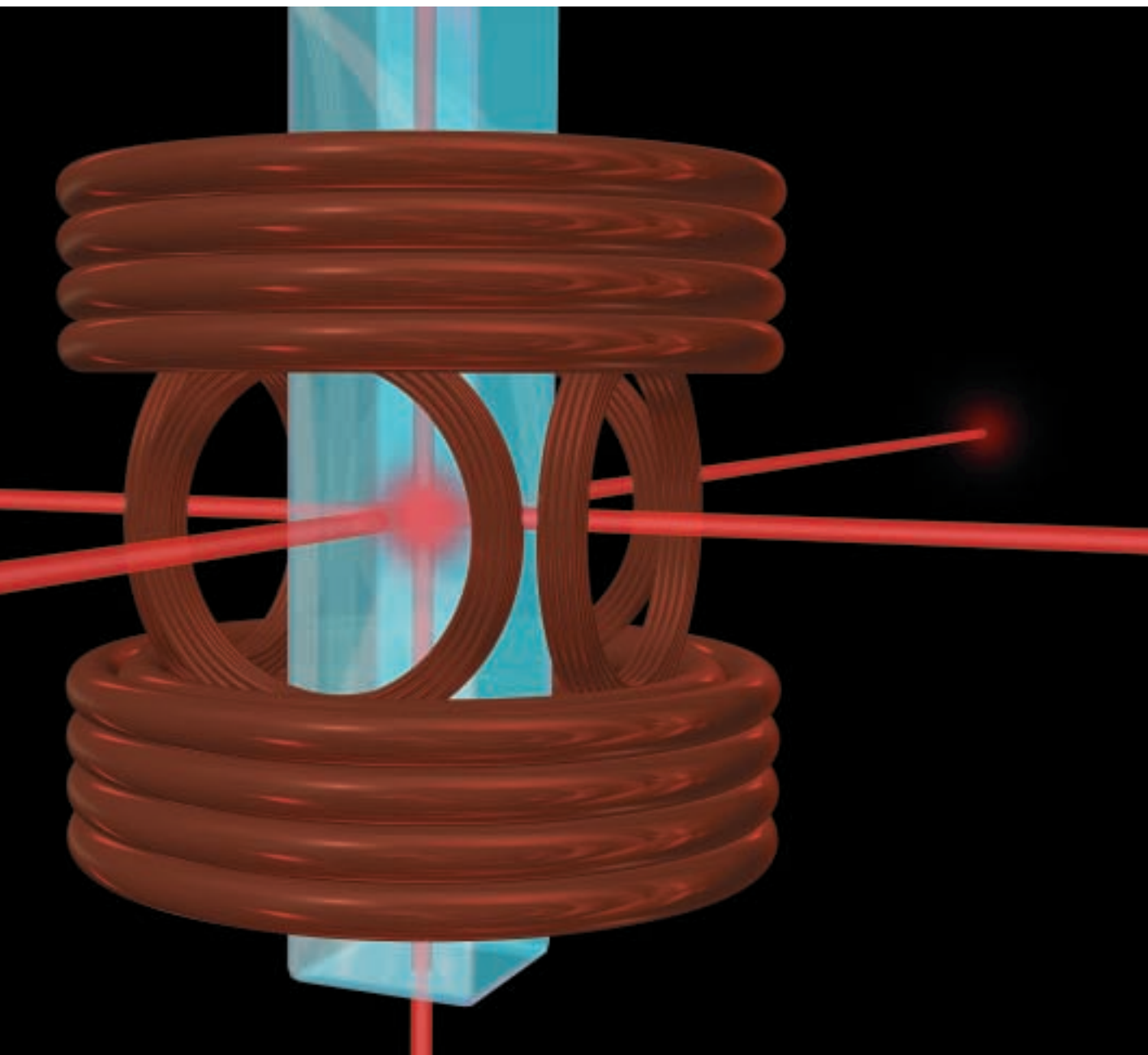
la position et la vitesse de chacun de ses éléments. Par exemple, le tirage du loto n'est possible que parce que l'on peut discerner les balles numérotées qui rebondissent dans un tambour en rotation et sortent les unes après les autres dans une rigole.

Toutefois, aux très basses températures ou aux petites échelles de longueur, la mécanique classique ne décrit plus correctement le phénomène. Les atomes ne se comportent pas comme des boules de loto. On ne peut pas connaître la position exacte de chaque atome, qu'il vaut mieux se représenter comme une tache aux contours flous. Cette tache – que l'on nomme un

paquet d'ondes – est la région de l'espace où la probabilité de trouver l'atome est maximale. Lorsque l'on refroidit des atomes, la taille de leur paquet d'ondes augmente. Tant que les paquets d'ondes restent séparés, on peut, du moins en principe, distinguer les positions des atomes, mais, lorsque la température est suffisamment basse, les paquets d'ondes des atomes se recouvrent ; les atomes se «condensent» dans l'état d'énergie minimale, et les différents paquets d'ondes fusionnent en un seul paquet macroscopique. Les atomes subissent ainsi une crise d'identité quantique : ils deviennent mutuellement indiscernables.

Quelle différence entre l'engouement actuel pour ces condensats et le scepticisme qui avait suivi la prédiction d'Einstein en 1925! C'est probablement parce qu'on ne savait pas atteindre les très basses températures nécessaires que la condensation prédite avait semblé une curiosité douteuse ou, au mieux, sans intérêt physique : les régions les plus froides de l'espace intergalactique n'étaient-elles pas des millions de fois trop chaudes pour y observer la condensation de Bose-Einstein?

Toutefois, dans les décennies qui ont suivi la prévision théorique, la condensation de Bose-Einstein est



devenue d'actualité, parce que des physiciens ont compris qu'elle expliquait la superfluidité de l'hélium liquide, qui se produit à des températures bien supérieures à celles de la condensation dans les gaz : au-dessous de 2,2 kelvins, la viscosité de l'hélium liquide s'annule.

C'est seulement à la fin des années 1970 que les progrès en physique du froid rendirent envisageable le test expérimental de l'idée originelle d'Einstein. Cependant, les physiciens étaient confrontés à une difficulté fondamentale : pour obtenir un condensat gazeux, ils devaient refroidir le gaz à une température bien inférieure à sa température de solidification. Ils espéraient qu'une telle sursaturation d'un gaz serait possible avec de l'hydrogène, car les atomes de cet élément s'appariaient peu quand on les refroidit.

Bien que diverses équipes, à Boston, Amsterdam ou Paris, n'aient pas encore obtenu la condensation de Bose-Einstein avec l'hydrogène, les physiciens ont compris les difficultés et ont inventé des procédés astucieux pour les contourner. En 1989, éclairés par ces études et encouragés par nos propres travaux sur le refroidissement et le piégeage d'atomes d'éléments alcalins (la famille du lithium : sodium, césium, rubidium, etc.) par laser, nous avons soupçonné que les atomes de ces éléments seraient de bien meilleurs candidats que l'hydrogène : ils s'associent

aussi peu que les atomes d'hydrogène, et ils devaient se condenser bien plus rapidement. En effet, ces atomes plus gros se heurtent plus fréquemment que des atomes légers, ce qui leur permet d'échanger de l'énergie, et donc de se refroidir, plus vite. Ainsi, la condensation pouvait avoir lieu avant que des paires ne se forment et que le gaz ne se solidifie.

L'obtention de températures très basses semblait alors relativement simple et peu onéreuse : il suffisait de combiner les techniques de refroidissement et de piégeage par laser mises au point sur les alcalins, et les techniques de piégeage magnétique et de refroidissement par évaporation mises au point sur l'hydrogène.

Finalement, nous arrivâmes au but en utilisant des atomes de rubidium et, quelques mois plus tard, Wolfgang Ketterle et ses collègues de l'Institut de technologie du Massachusetts obtinrent un condensat d'atomes de sodium ; depuis, le groupe de W. Ketterle a réussi à condenser dix millions d'atomes. Au moment où nous écrivons ces lignes, huit équipes au moins ont obtenu un condensat, cinq avec du rubidium, deux avec du sodium et une avec du lithium. Notamment, à l'École normale supérieure de Paris, l'équipe de Jean Dalibard vient d'obtenir un condensat de rubidium après avoir essayé, sans succès, de condenser du césium. Si le césium ne se condense

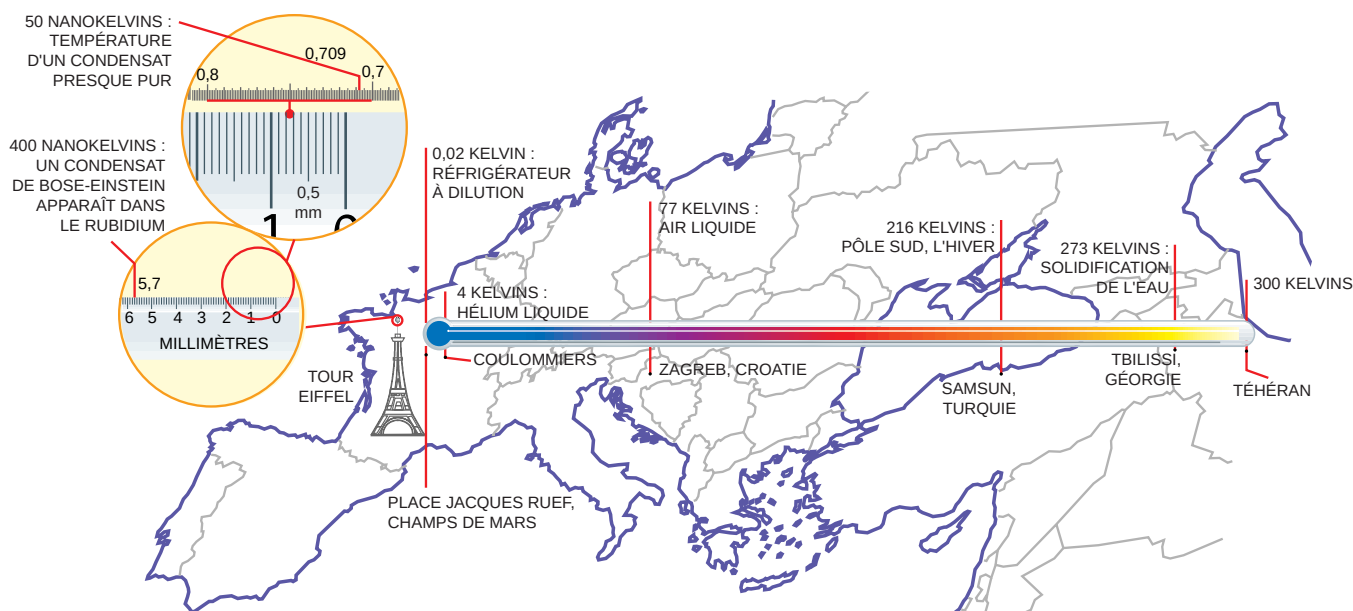
pas, c'est en raison de collisions particulières qui chauffent le gaz plus vite qu'il ne le refroidit.

Toutes ces équipes utilisent le même principe expérimental : on extrait de la chaleur de l'échantillon tout en isolant de l'extérieur. Ces deux conditions sont satisfaites dans chacune des deux étapes utilisées : lors du refroidissement par laser, la force exercée par le rayonnement laser sur les atomes les refroidit et les isole ; puis nous piégeons les atomes par des champs magnétiques, et les refroidissons par évaporation.

Refroidissement et piégeage par laser

Le cœur de notre montage expérimental est une petite boîte de verre entourée de bobines de fil électrique (voir la figure 1). Cette cellule, où nous faisons un vide poussé, est comme une bouteille Thermos très efficace. Nous y introduisons une minuscule quantité de rubidium gazeux, que nous éclairons par six faisceaux laser, qui se croisent au centre de la cellule. Comme nous n'avons pas besoin d'une forte intensité lumineuse, nous utilisons des diodes laser similaires à celles des lecteurs de disques compacts.

Nous réglons la fréquence du laser de sorte que les atomes absorbent son rayonnement et réémettent des photons. Lors de chaque absorption d'un photon (il peut y en avoir des mil-



2. CE THERMOMÈTRE GÉANT montre les températures extrêmement basses que l'on doit atteindre pour observer la condensation. Imaginons qu'il mesure 4 200 kilomètres de long. Si nous plaçons la graduation du zéro absolu (zéro kelvin, soit $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$)

au sommet de la Tour Eiffel et la graduation des 300 kelvins ($27\text{ }^{\circ}\text{C}$) à Téhéran. La graduation de la température de la solidification de l'eau est à Tbilissi, en Géorgie. Celle d'un condensat presque pur est alors à seulement 0,709 millimètre du point zéro.

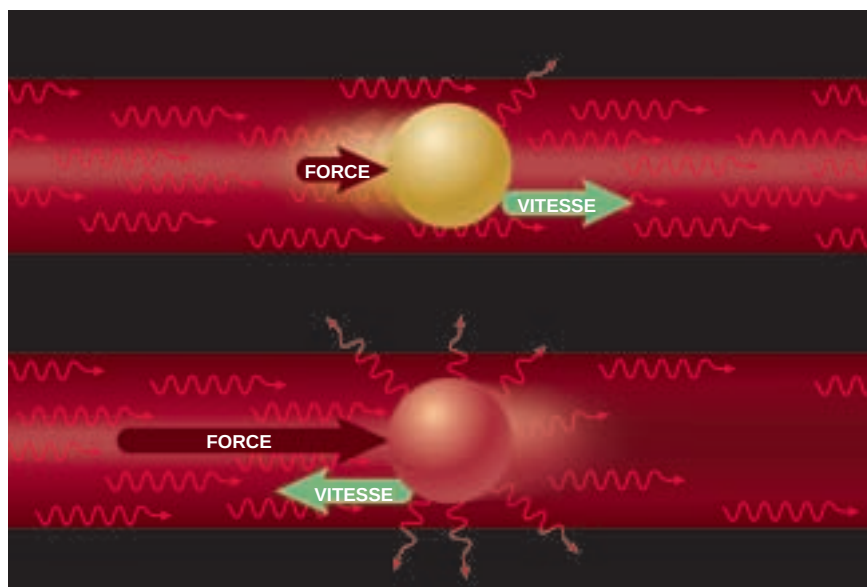
lions chaque seconde), l'atome recule légèrement dans la direction opposée à la direction d'incidence des photons. Ce recul résulte de la pression de radiation. On refroidit le gaz en forçant les atomes à absorber majoritairement des photons de direction opposée à leur vitesse. Ainsi la vitesse d'agitation 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 cherchée, 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.

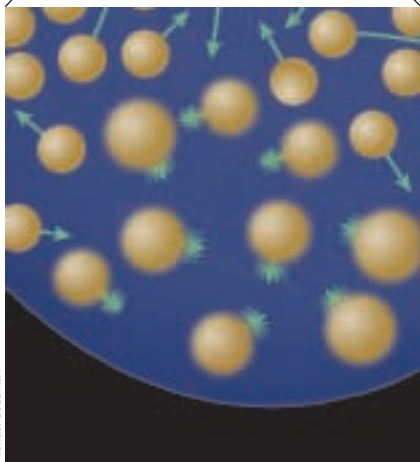
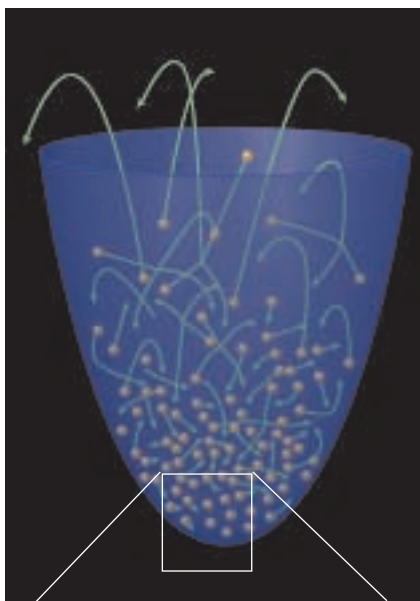
Ce refroidissement par évaporation est celui que l'on obtient quand on souffle sur de la soupe chaude. Les molécules d'eau les plus énergétiques qui s'échappent de l'assiette vers l'air sont éliminées par le souffle, de sorte que l'énergie moyenne du liquide restant diminue ; les molécules du liquide 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 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.

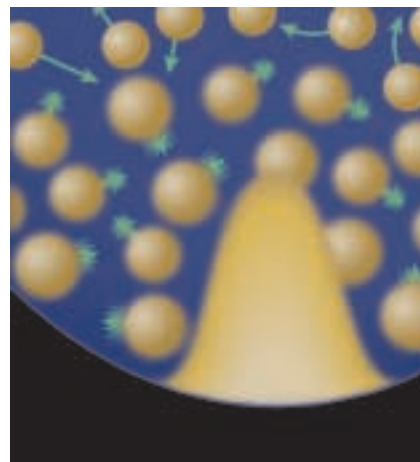
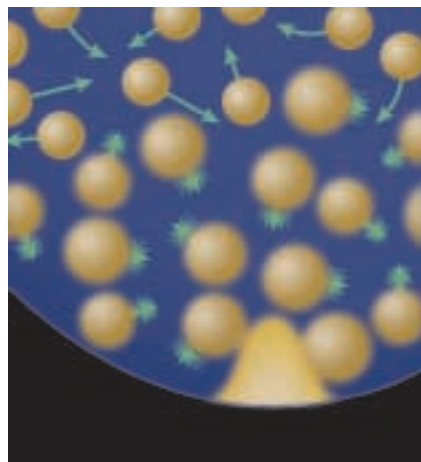
Instantané d'un superatome

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.

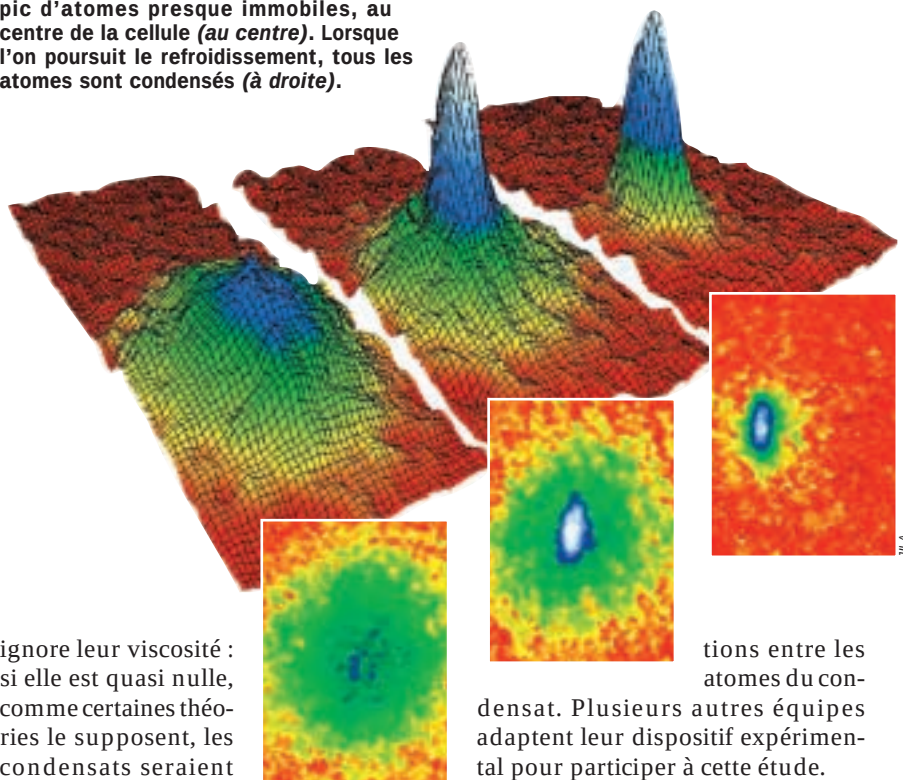
L'ultime précision

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>

