

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

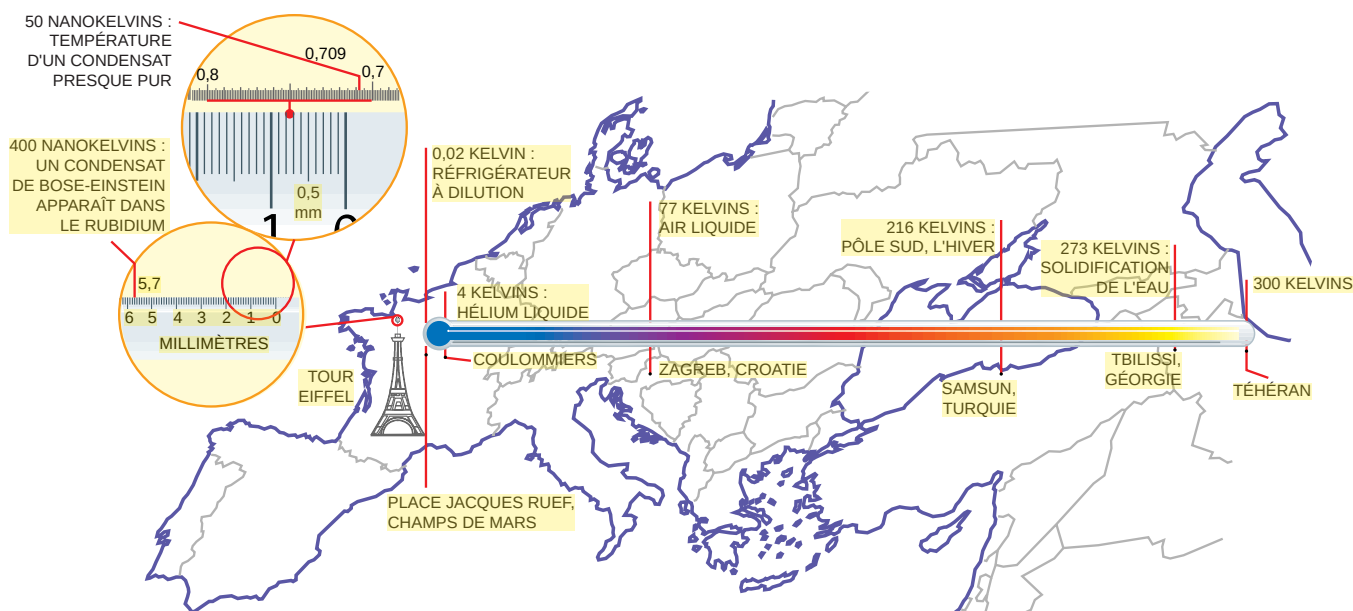
pas, c'est en raison de collisions particulières qui chauffent le gaz plus vite qu'il ne le refroidit.

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.

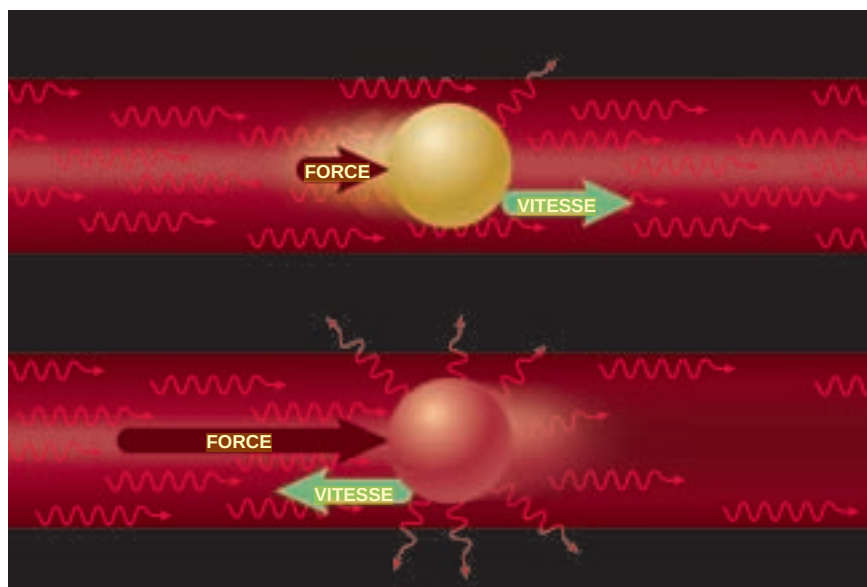
lions chaque seconde), l'atome recule légèrement dans la direction opposée à la direction d'incidence des photons. Ce recul résulte de la pression de radiation. On refroidit le gaz en forçant les atomes à absorber majoritairement des photons de direction opposée à leur vitesse. Ainsi la vitesse d'agitation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