

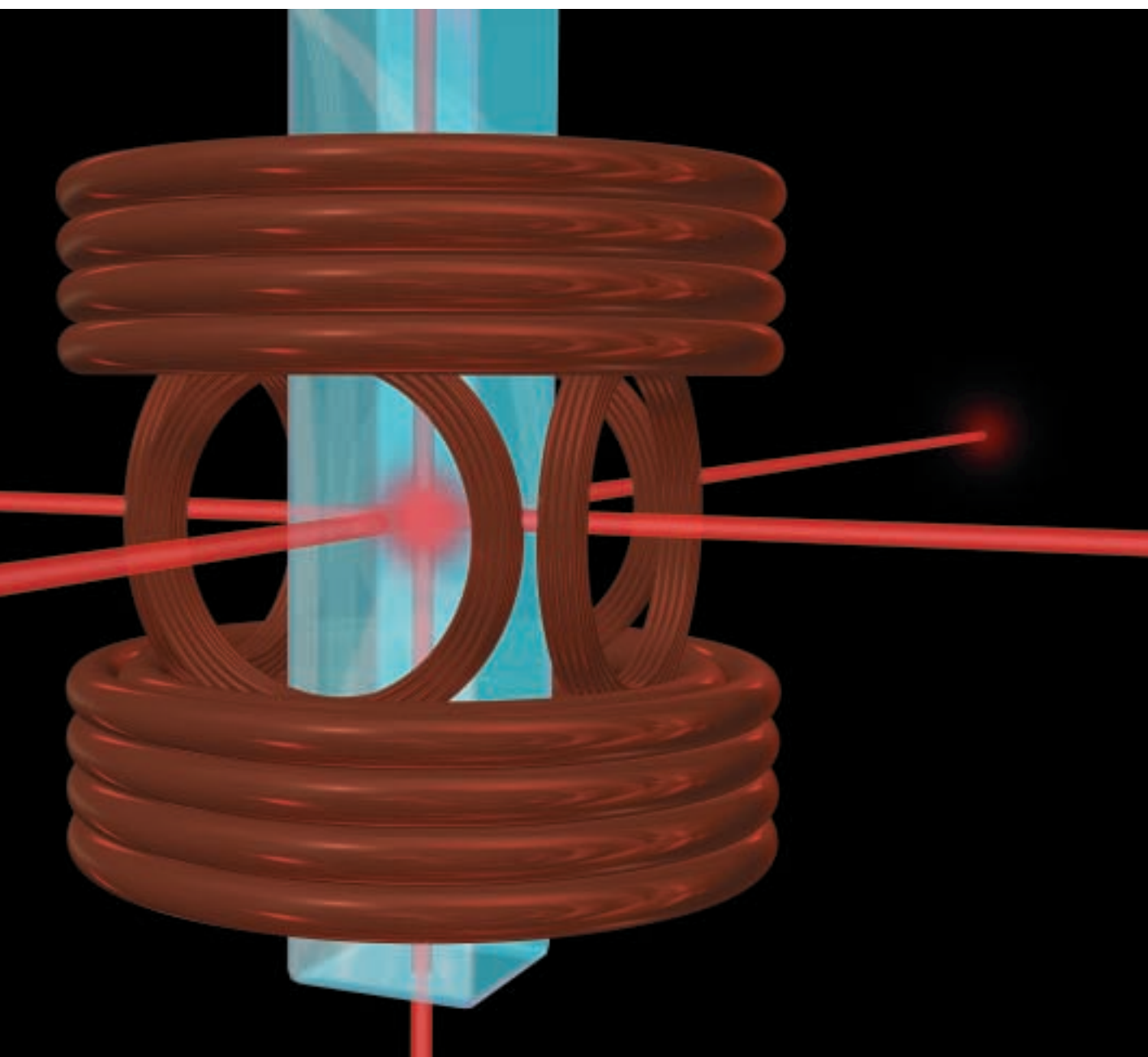
la position et la vitesse de chacun de ses éléments. Par exemple, le tirage du loto n'est possible que parce que l'on peut discerner les balles numérotées qui rebondissent dans un tambour en rotation et sortent les unes après les autres dans une rigole.

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

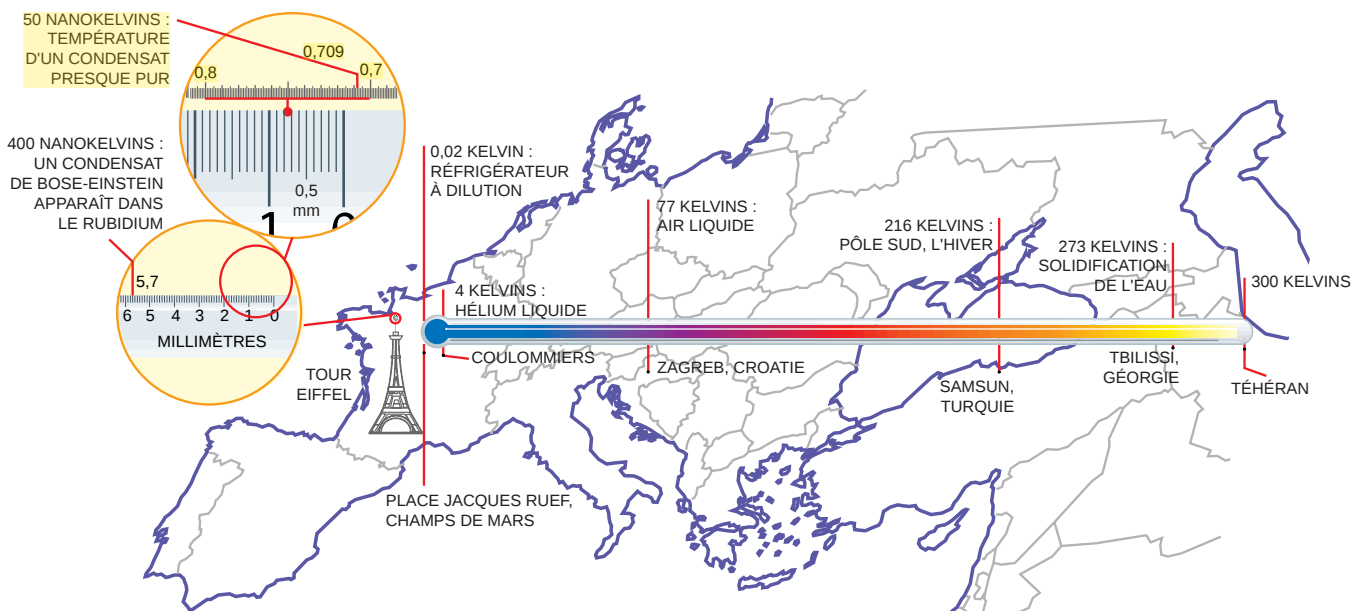
pas, c'est en raison de collisions particulières qui chauffent le gaz plus vite qu'il ne le refroidit.

Toutes ces équipes utilisent le même principe expérimental : on extrait de la chaleur de l'échantillon tout en l'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 $-273,15^{\circ}\text{C}$)

au sommet de la Tour Eiffel et la graduation des 300 kelvins (27°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.