

des impulsions de lumière ralentie avant nous, mais elles utilisaient des gaz d'atomes à température ambiante et le ralentissement obtenu était limité.

Nous avons créé les conditions nécessaires à l'obtention de la transparence électromagnétique induite dans un nuage d'atomes de sodium en forme de cigare – d'environ 0,2 millimètre de longueur et 0,05 millimètre de diamètre – piégé dans un champ magnétique et refroidi à moins d'un millionième de degré au-dessus du zéro absolu.

Nous refroidissons nos atomes de sodium à l'aide d'un dispositif combinant des faisceaux lasers, des champs magnétiques et des ondes radio. Le sodium est émis par un four chaud sous la forme d'un intense faisceau d'atomes propulsés à environ 2 600 kilomètres par heure. Ils sont alors heurtés de plein fouet par un faisceau laser qui, en une milliseconde, les ralentit à 160 kilomètres par heure – soit une décélération de 70 000 fois l'accélération de la pesanteur, g , produite par un faisceau laser qui ne brûlerait même pas les

doigts. La poursuite du refroidissement s'opère à l'intérieur d'une «mélasse optique», au moyen de six faisceaux qui baignent les atomes de tous côtés, et ralentissent encore les atomes au point des les amener à 50 millionièmes de degré au-dessus du zéro absolu. En quelques secondes, 10 milliards d'atomes s'accumulent ainsi dans la mélasse optique. Nous éteignons alors les faisceaux laser, plongeant le laboratoire dans une obscurité totale, puis nous établissons des électroaimants dont le champ piège le nuage atomique. Durant 38 secondes, nous refroidissons les atomes par évaporation, éjectant les plus rapides d'entre eux pour ne garder que les plus lents, c'est-à-dire les plus froids. Des ondes radio minutieusement ajustées accélèrent l'éjection des atomes rapides. Tout ce phénomène – de la production du faisceau chaud jusqu'au confinement des atomes froids – se déroule à l'intérieur d'une chambre à vide où règne une pression 10^{14} fois inférieure à la pression atmosphérique (10 millionièmes de milliards d'atmosphère).

Une fois notre nuage refroidi à environ 500 milliardièmes de degré, il forme un condensat de Bose-Einstein, où les quelques millions d'atomes restant après l'évaporation se comportent de façon totalement synchrone. Le milieu le plus froid de l'Univers se trouve alors suspendu par des champs magnétiques au centre d'une chambre à vide.

Le reste de notre dispositif expérimental, à un centimètre du nuage, est à la température ambiante. Des hublots hermétiques, sur les parois de la chambre, nous permettent d'observer les atomes en cours de refroidissement : un nuage atomique froid dans une mélasse optique ressemble à un petit soleil brillant, de cinq millimètres de diamètre.

Une fois notre cigare d'atomes en place, nous l'éclairons latéralement avec le laser de couplage, puis nous émettons une impulsion lumineuse le long son axe. Pour déterminer la vitesse de l'impulsion lumineuse dans le nuage, nous plaçons un détecteur de lumière derrière le nuage d'atomes et nous attendons que l'impulsion émerge pour

Vitesse de phase, vitesse de groupe

Une impulsion lumineuse est une oscillation électromagnétique de courte durée. Par définition la vitesse de phase est la célérité d'un point de cette oscillation. La vitesse de groupe, V_g , est la vitesse à laquelle progresse l'enveloppe tout entière de ce motif oscillant (voir la figure a).

Une impulsion lumineuse n'est jamais composée d'une seule fréquence, mais de la somme d'ondes sinusoïdales. L'intensité maximale de l'impulsion correspond au point où toutes ces ondes sinu-

soïdales sont en phase (où leurs crêtes coïncident). Quand l'indice de réfraction du milieu où se propagent ces ondes ne varie pas avec la fréquence, toutes les composantes «voyagent» à la même vitesse, et le point où elles sont en phase également : la vitesse de groupe et la vitesse de phase sont égales. En revanche, quand l'indice de réfraction du milieu varie avec la fréquence, les composantes de l'impulsion se déplacent alors à des célérités différentes, de sorte que la vitesse de groupe et la vitesse de phase (V_ϕ) sont différentes.

Dans le cas simple de deux ondes sinusoïdales de fréquences f_1 et f_2 , l'onde résultante est une oscillation comprise à l'intérieur d'une enveloppe dont la forme est une sinusoïde de période supérieure (voir la figure b). Cette onde résultante est le produit de deux ondes sinusoïdales que l'on désigne par l'onde «motif» et l'onde «enveloppe».

La fréquence de l'onde «motif» est la moyenne des fréquences f_1 et f_2 . Sa vitesse, qui n'est autre que la vitesse de phase, est donnée par l'indice de réfraction pour cette fréquence moyenne. Quant à l'onde «enveloppe», sa fréquence est proportionnelle à la différence entre f_1 et f_2 . On s'en convainc en se rappelant que si, à la limite, f_1 et f_2 sont égales, l'onde résultante est une sinusoïde «plate» (l'enveloppe est de fréquence nulle). En conséquence, la vitesse de groupe dépend également de l'écart entre les deux indices de réfraction $n(f_1)$ et $n(f_2)$, c'est-à-dire de la variation de l'indice de réfraction avec la fréquence.

Ce raisonnement reste valable lorsque l'on ajoute de nombreuses composantes dont les fréquences sont, cette fois, séparées par des écarts infinitésimaux. La vitesse de phase est donnée par l'indice de réfraction à la fréquence moyenne de l'impulsion, et la vitesse de groupe dépend, de plus, de la variation de l'indice de réfraction. En fait, quand l'indice croît avec la fréquence, la vitesse de groupe est d'autant plus petite que l'indice varie rapidement.

