

DES ATOMES PIÉGÉS PAR LE FROID

En théorie, à des températures extrêmement basses, des gaz d'atomes devraient présenter d'étonnantes propriétés : une absence totale de viscosité et une conduction instantanée de la chaleur. La vérification expérimentale de cet effet, encore jamais réalisée, dépendra des développements d'une technique toute nouvelle : le piégeage et l'immobilisation d'atomes dans un rets de lasers.

PAR JEAN DALIBARD

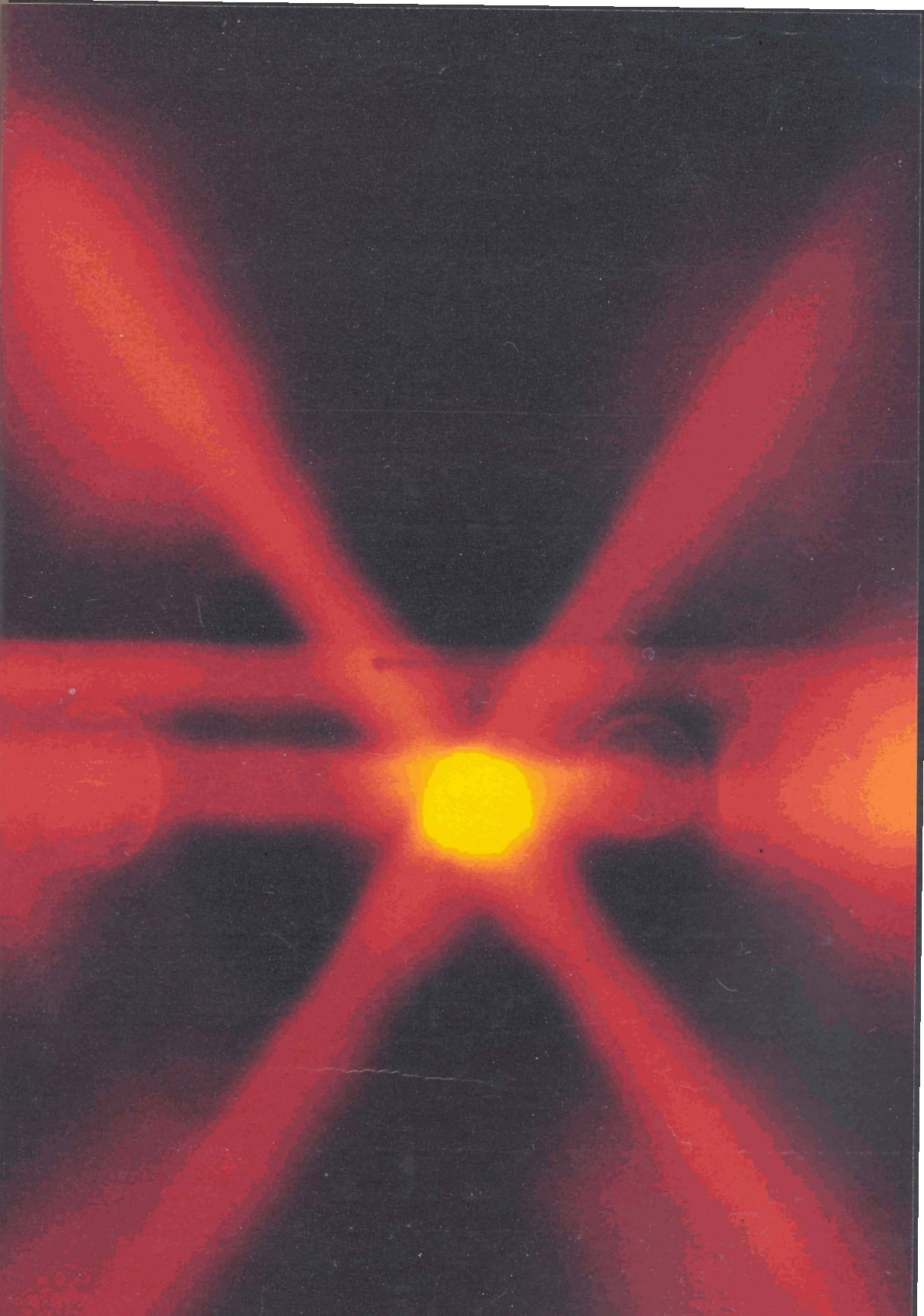
Traditionnellement, l'image associée au rayonnement laser est celle d'une chaleur intense. Tout le monde sait par exemple qu'on utilise des lasers dans l'industrie pour graver, découper ou souder, opérations qui impliquent en général de faire fondre de la matière. Pourtant, au cours de ces dernières années, le laser s'est également révélé comme un moyen de refroidissement extrêmement efficace en physique atomique. En d'autres termes, les lasers peuvent être utilisés pour produire des atomes *ultra-froids*, c'est-à-dire quasi immobiles. Ces atomes ne sont évidemment pas confinés dans des boîtes ordinaires, mais dans des sortes de boîtes immatérielles : des *pièges magnétiques* ou lu-

mineux. Précisons tout de suite, mais nous y reviendrons, qu'à moyen ou long terme, de tels pièges pourraient avoir des applications importantes dans des domaines très variés allant de la mesure du temps au stockage de l'énergie.

Aujourd'hui, les atomes piégés sont un outil privilégié dans l'étude d'un effet physique prédit en 1925 par Albert Einstein et qu'on appelle la condensation d'un gaz de Bose-Einstein. Cet effet, établi en théorie à partir des principes de base de la mécanique statistique mais *qui n'a encore jamais été vérifié expérimentalement*, devrait se manifester à très basse température par une condensation, une accumulation locale du gaz d'atomes piégés dans l'état d'énergie minimale du piège⁽¹⁾. Essayons d'être plus clairs : très schématiquement, et approximativement, car l'image qui va suivre ne tient entre autres choses pas compte des propriétés quantiques du système, ces atomes à l'état gazeux se comporteraient dans ces températures un peu à la façon de vapeur d'eau se liquéfiant sur les parois froides d'un récipient et formant flaque en son fond. Toutefois, et c'est une différence de taille, cette "flaque" ne serait pas liquide, mais gazeuse à cause de l'absence de parois.

Les propriétés d'un tel condensat devraient être en réalité étonnantes, telles une absence totale de viscosité, ou une conduction instantanée de la chaleur⁽¹⁾. D'ores et déjà, et bien que l'on ne sache pas encore accumuler suffisamment d'atomes dans les pièges pour atteindre le seuil de condensation, de nombreuses équipes se sont engagées dans cette recherche : l'étude des nouveaux domaines de

(1) A basse température ($T < 2,18^\circ$ Kelvin), l'hélium manifeste dans sa phase superfluide des propriétés semblables à celles décrites par A. Einstein. Mais il s'agit alors d'un liquide, et l'interprétation des effets observés fait appel à une théorie beaucoup plus complexe que celle initialement développée par Einstein pour les gaz.



Six faisceaux laser opposés créent une mélasse optique dans laquelle des atomes de sodium sont quasiment "gelés".

température ouverts par le refroidissement laser de gaz s'annonce en effet passionnante.

La mélasse optique

Cette nouvelle utilisation du laser comme "réfrigérateur à atomes" s'appuie sur l'idée que le rayonnement laser est un système très ordonné : la direction et la fréquence de ce rayonnement sont déterminées avec une grande précision. En envoyant le rayonnement laser sur un gaz, on peut transférer une partie de cet ordre au gaz lui-même, ce qui d'après la thermodynamique, la science qui étudie les transferts d'énergie entre systèmes, refroidit ce gaz. Ainsi, à la température ambiante (20 degrés Celsius, soit 293 degrés Kelvin en température absolue), les atomes d'une vapeur de sodium sont animés de mouvements désordonnés, avec une vitesse moyenne de 500 mètres par seconde environ. *Après refroidissement laser*, cette vitesse moyenne n'est plus que de 50 centimètres par seconde ; la température absolue du gaz n'est alors que de 0,3 millième de degré Kelvin.

L'élément de base du refroidissement laser est la *mélasse optique*, réalisée pour la première fois aux laboratoires Bell (USA) en 1985. Cette configuration de plusieurs faisceaux laser (voir photo p. précédente) délimite une zone dans laquelle les atomes sont figés à la façon d'une cuillère dans un pot de miel. Si l'atome est immobile, il n'est soumis à aucune force ; en revanche, s'il est en mouvement, les faisceaux laser créent une force qui s'oppose à ce mouvement et freine l'atome immédiatement.

La force exercée par un faisceau laser sur un atome est appelée *force de pression de*

radiation. Cette force, qui résulte des nombreux "chocs" subis par l'atome avec les photons du rayon laser, avait été pressentie par Kepler dès 1619 (à une époque où bien entendu les lasers n'avaient pas encore été inventés, fût-ce même par les Chinois) pour expliquer l'orientation de la queue des comètes vis-à-vis du soleil. Elle a pour effet de pousser les atomes dans la direction du faisceau lumineux. L'accélération due à cette force peut être considérable : jusqu'à 100 000

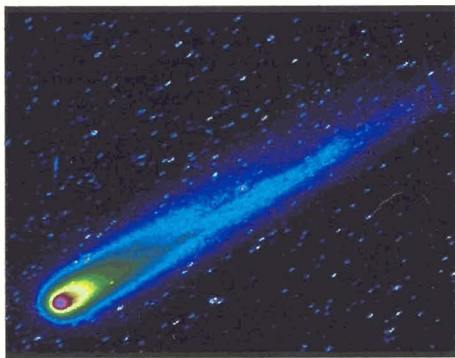
fois l'accélération de la pesanteur pour un atome de sodium dans un faisceau laser intense. Une condition est néanmoins requise pour atteindre une telle force : la longueur d'onde du faisceau laser doit être exactement égale à la longueur d'onde de résonance de l'atome en jeu. En d'autres termes, l'énergie des photons laser doit être exactement égale à l'écart d'énergie entre le niveau fondamental de l'atome et son premier niveau excité (2).

Dans la mélasse optique, les atomes sont éclairés par six faisceaux opposés deux à deux, et dirigés suivant trois axes orthogonaux. Un atome immobile dans cette mélasse ne ressent donc aucune force, puisque la pression de radiation créée par un faisceau donné est annulée

par la pression de radiation du faisceau venant en sens inverse. En revanche, dès que l'atome bouge, cet équilibre des forces est rompu. En raison d'un second effet, l'effet Doppler, l'atome en mouvement voit la fréquence des ondes lumineuses issues des lasers modifiée.

(2) D'un point de vue énergétique, un atome présente plusieurs configurations possibles, depuis un état énergétique minimal — dit fondamental — jusqu'à des états d'excitation de plus en plus élevés. L'important est de savoir que le passage de l'état fondamental à un état excité n'est pas continu mais discontinu (en tout ou rien). En d'autres termes s'opère un saut, impliquant l'apport d'une quantité finie d'énergie, d'un quantum.

COLLECTION VIOLETTE



J. Kepler, astronome allemand, avait, en observant les queues des comètes en fonction du soleil, pressenti les effets du rayonnement lumineux sur le mouvement propre des petites particules. En dessous, la comète de Halley.

J.-M. MALHERBE-CNRS / OBS PARIS

Rappelons que l'effet Doppler, bien connu en acoustique — c'est lui qui fait que le bruit d'une automobile change à mesure qu'elle s'approche puis s'éloigne de nous —, associe la variation de fréquence d'une onde avec la vitesse de l'objet qui l'émet. Les ondes venant à la rencontre de l'atome ont une fréquence apparente augmentée, alors que celles allant dans le même sens que l'atome ont une fréquence apparente diminuée. L'idée très astucieuse de A. Schawlow (prix Nobel de physique 1982) et T.W. Hänsch fut de proposer, dès 1975, de prendre pour chacun des faisceaux laser une fréquence trop basse pour pousser efficacement un atome au repos. Au contraire, lorsqu'un atome bouge, il "voit" les ondes venant à sa rencontre devenir pratiquement résonantes puisque leur fréquence apparente est augmentée. L'atome subit donc de la part de ces ondes (et de ces ondes seulement) une force de pression de radiation importante qui, par construction même, est opposée à la vitesse de l'atome : c'est la force de mélasse.

Des pièges lumineux ou magnétiques

Pour conserver le gaz ultra-froid produit par une mélasse optique, il est impossible d'utiliser les cellules en verre ou en métal habituelles dans les laboratoires. Les atomes froids seraient en effet immédiatement réchauffés au contact des parois du récipient. On utilise donc des pièges à atomes, qui sont des boîtes sans parois matérielles, et qui peuvent être de deux types, magnétiques ou lumineux.

Le principe de ces pièges consiste à faire varier la position des niveaux d'énergie atomique dans l'espace, en leur donnant une forme de cuvette. Les atomes vont alors se piéger au fond de la cuvette, là où l'énergie est minimale. Le seul défaut de ces pièges est leur très faible profondeur : la vitesse maximale que peut avoir un atome de sodium piégé est à l'heure actuelle de quelques mètres par seconde. Ceci explique qu'il ait fallu attendre la mise au point des techniques de refroidissement très efficaces, comme le refroidissement laser ou des techniques de cryogénie complexes, pour voir la réalisation expérimentale de tels pièges. On comprend également qu'il faille placer ces pièges dans des enceintes où règne un vide très poussé, pour éviter toute collision entre les atomes piégés très lents et les atomes du gaz résiduel très rapides.

Les atomes piégés sont facilement détec-

tables, grâce à la lumière qu'ils réémettent lorsqu'ils sont éclairés par un faisceau laser. On peut ainsi, en étudiant cette lumière de fluorescence, déterminer le nombre d'atomes dans le piège, car l'intensité de cette lumière est directement proportionnelle au nombre d'atomes présents. Le premier piège magnétique pour atomes neutres a été réalisé en 1985 par W. Phillips et H. Metcalf, au National Bureau of Standards, à Washington. Ce piège était constitué de deux bobines identiques, parallèles, parcourues par un même courant en des sens opposés. Les atomes étaient piégés au point médian, entre les centres des bobines. La durée du piégeage n'était que de quelques secondes, et le nombre d'atomes piégés était relativement faible, une centaine environ.

Un an plus tard, en 1986, le piège lumineux fut réalisé par l'équipe des laboratoires Bell. Ils utilisèrent pour cela un faisceau laser intense, qu'ils focalisèrent à l'intérieur d'une mélasse optique. Les atomes présents dans la mélasse vinrent alors se piéger autour de la zone focale du faisceau intense.

Depuis ces deux "premières", plusieurs pièges fonctionnant sur les mêmes principes ont été réalisés, avec des performances sans cesse croissantes. On sait maintenant piéger environ 100 millions d'atomes, pendant plusieurs minutes, dans un volume de l'ordre d'un millimètre cube. La température des atomes piégés reste voisine de celle obtenue dans une mélasse optique, inférieure au millièbre de degré Kelvin.

Une variante très intéressante de ces pièges a été mise au point à Paris, au laboratoire de l'École Normale Supérieure, par une équipe dirigée par Claude Cohen-Tannoudji. Elle a consisté à guider des atomes dans des "canaux lumineux" parallèles, séparés les uns des autres par une fraction de micron (1 micron = 1 millièbre de millimètre). Cette expérience (voir dessin page suivante) constitue un nouvel exemple de piégeage d'atomes par de la lumière. Son intérêt principal réside dans le volume du piège qui est ici extrêmement réduit par rapport aux expériences précédentes, la dimension caractéristique étant le micron, au lieu du millimètre.

Condensera, condensera pas ?

Maintenant que l'excitation consécutive à la réalisation des premiers pièges à atomes neutres est quelque peu retombée, plusieurs



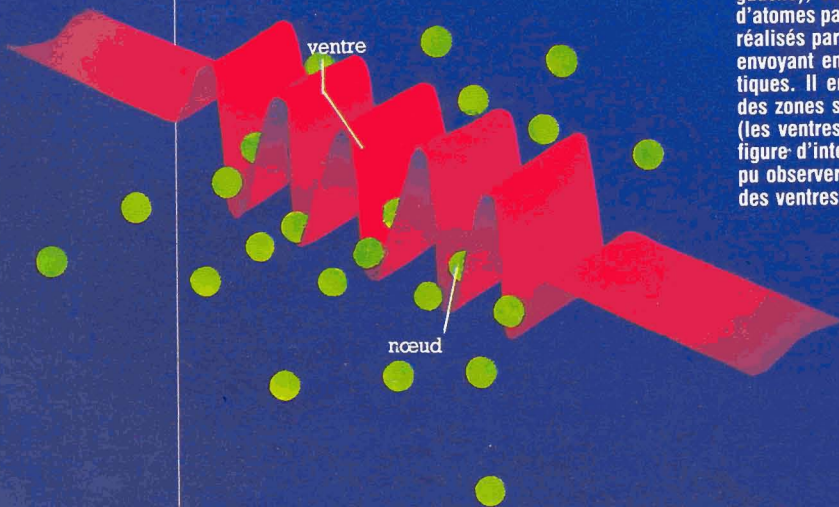
four à
atomes

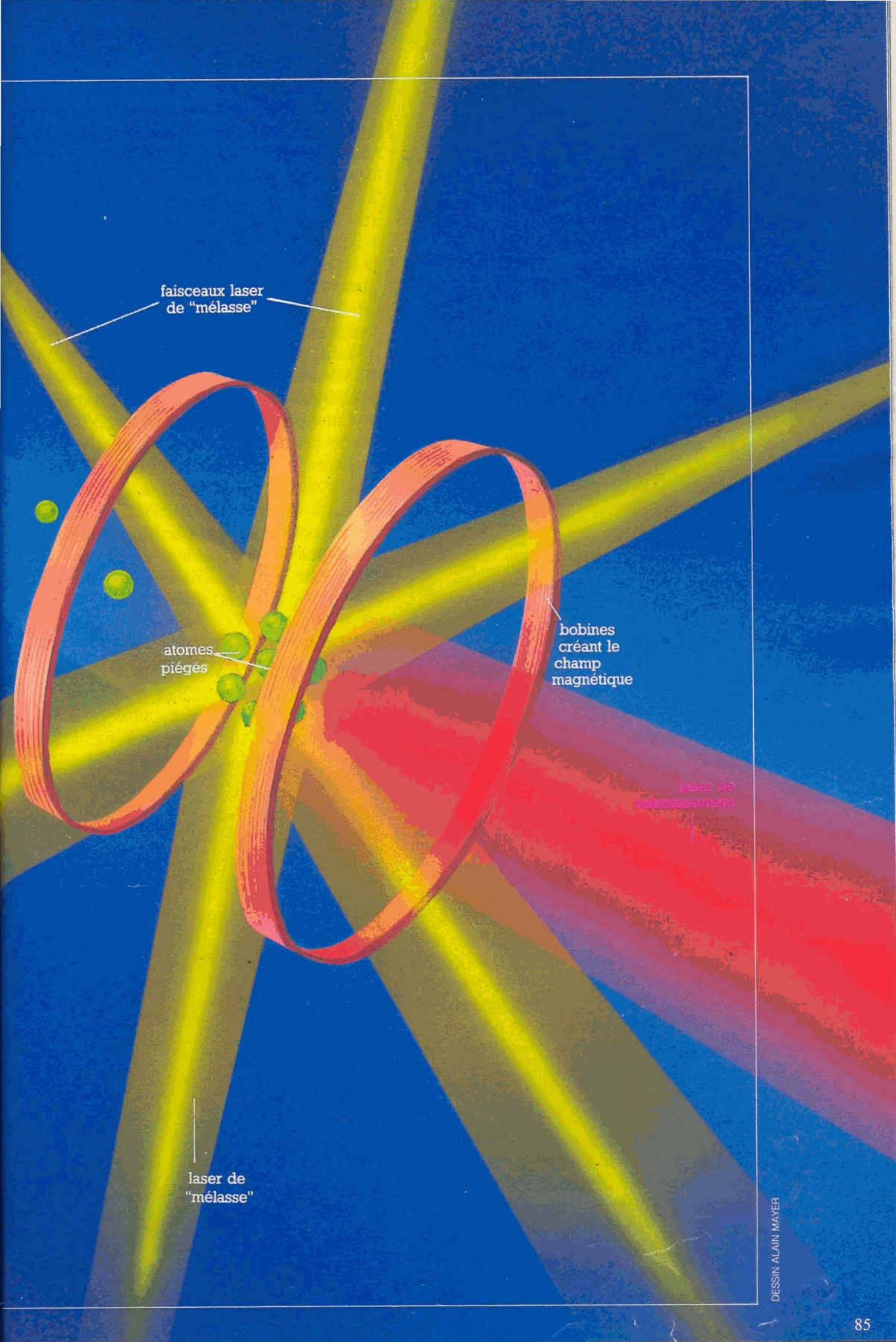
DES CAGES SANS PAROIS POUR ATOMES ULTRAFROIDS

Comment stopper net des particules 10 millions de fois plus petites qu'une tête d'épingle lancées à 1 000 mètres par seconde ? Il faut les "geler" sur place. Le rayonnement laser est capable, lorsqu'il est accordé en fréquence, de contrecarrer l'agitation d'un gaz et, de ce fait, de le refroidir. Dans ce piège à atomes, un premier laser (en rouge) ralentit des atomes de sodium issus d'un four : il lui faut environ un mètre pour les stopper par pression de radiation. Pris dans

une mélasse optique constituée par plusieurs faisceaux laser opposés, les atomes sont quasiment immobilisés (50 cm/s) et parfois à 0,3 millièème de degrés Kelvin. Enfin, l'application d'un champ magnétique, entretenu par deux bobines (en orange) parcourues par des courants opposés, piège les atomes dans la mélasse. Ils orbitent autour du point où le champ magnétique est nul, au centre de symétrie du système.

Dans une expérience réalisée récemment au laboratoire de l'École Normale Supérieure à Paris (à gauche), on a pu mettre en évidence la canalisation d'atomes par de la lumière. Les canaux lumineux sont réalisés par une onde laser stationnaire, obtenue, en envoyant en sens opposé deux faisceaux laser identiques. Il en résulte une figure d'interférence, avec des zones sombres (les nœuds) et des zones claires (les ventres). En envoyant un jet atomique sur cette figure d'interférence, les chercheurs de l'E.N.S. ont pu observer la canalisation des atomes au voisinage des ventres de l'onde stationnaire.





faisceaux laser de "mélasse"

atomes piégés

bobines créant le champ magnétique

laser de refroidissement

laser de "mélasse"

DESSIN ALAIN MAYER

A défaut d'arrêter le temps, rêve secret d'Harold Lloyd, on ne peut que s'efforcer d'en mesurer la plus petite unité possible. La technique des gaz ultrafroids permettra d'améliorer la précision de la mesure d'une période atomique et de ce fait, celle de la seconde de temps.



BUSCA-JERRICAN

groupes se sont attelés à la recherche de l'effet de condensation de Bose-Einstein. Il faut pour observer cet effet beaucoup d'atomes très froids. Plus précisément, c'est le rapport de la densité atomique sur la température à la puissance 1,5 qui doit dépasser un certain seuil. Plus la température est basse, moins la densité nécessaire est élevée. Aux températures des mélasses que l'on sait réaliser, il faudrait accumuler plus de 10^{13} atomes par millimètre cube (dix mille milliards), ce qui est près de 10 000 fois supérieur à ce qu'on sait faire aujourd'hui.

Que se passera-t-il lorsqu'on augmentera la densité atomique dans un piège ? Selon certains physiciens, l'effet de condensation cherché va en fait être masqué par des phénomènes plus classiques, comme la formation de molécules ou d'agrégats qui ne seront pas piégés, et qui s'échapperont définitivement. Le débat est ainsi très ouvert, et le problème est suffisamment complexe pour qu'il soit difficile de trancher sur des arguments théoriques : seule l'expérience apportera une réponse indiscutable.

Les atomes ralentis par laser vont également permettre de mettre en œuvre des expériences d'interférométrie atomique. On sait, grâce à Louis de Broglie, qu'à toute particule en mouvement est associée une onde. Le but de l'interférométrie atomique serait de faire des expériences d'interférence avec cette onde de De Broglie associée aux

atomes, tout comme on sait faire interférer des ondes lumineuses, ou des ondes associées à des électrons. Pour des atomes à la température usuelle, il est difficile de mettre en évidence un comportement ondulatoire, car la longueur d'onde de De Broglie est trop courte (de l'ordre de l'ångström, soit un dix-millionième de millimètre). Au contraire, pour les atomes ralentis par laser, les longueurs d'onde de De Broglie sont beaucoup plus grandes : elles peuvent approcher les longueurs d'onde lumineuse, c'est-à-dire le millième de millimètre. On devrait alors être en mesure de transposer les schémas des interféromètres utilisés en optique au domaine de l'interférométrie atomique. De telles expériences permettront de poser en termes nouveaux, et peut-être plus clairs, les vieux débats sur la limite entre objets microscopiques soumis à la mécanique quantique, et objets macroscopiques au comportement classique. De ce point de vue, les atomes, objets complexes mais encore microscopiques, sont certainement d'excellents sujets d'étude.

De pièges à anti-matière

D'un point de vue plus appliqué, les atomes ultra-froids ouvrent également plusieurs perspectives alléchantes, par exemple pour les métrologistes, les spécialistes de la mesure, à

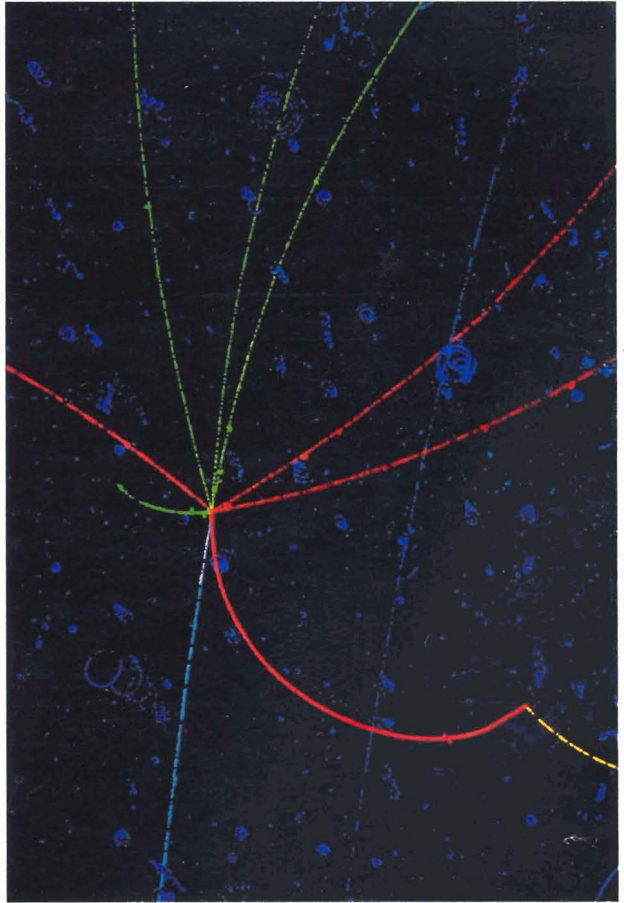


la recherche d'outils toujours plus précis. Ainsi les horloges étalons actuelles, auxquelles on a recours dans des domaines aussi variés que la navigation aérienne, les télécommunications, l'astronomie, utilisent l'interaction entre un jet atomique (de césium pour être précis) et une onde électromagnétique radio-fréquence. En ralentissant les atomes, on pourra augmenter le temps d'interaction atome-onde radio, et améliorer la précision de la mesure de la période atomique qui permet en définitive de définir la seconde.

Une perspective beaucoup plus futuriste, mais qui fait d'ores et déjà l'objet de contrats de recherche, aux Etats-Unis notamment, concerne les pièges à anti-matière. L'anti-matière ainsi stockée pourrait servir de carburant extrêmement énergétique lors des vols spatiaux de très longue durée par exemple.

Pour comprendre le principe d'un tel piège, rappelons qu'à chaque particule usuelle (proton, électron) on peut associer une anti-particule (antiproton, antiélectron). Lorsqu'un antiproton rencontre un proton, il y a aussitôt annihilation, et toute la masse de ces particules est convertie en énergie principalement sous forme de photons. Il est donc impossible de fabriquer et de conserver des antiatomes dans des boîtes ordinaires, puisque cet antiatome s'annihilerait immédiatement au

LAWRENCE BERKELEY LAB - SCIENCE PHOTO LIBRARY



En haut : collision d'un proton et d'un anti-proton dans une chambre à bulles : l'énergie libérée se rematérise sous la forme de 4 particules positives (rouges) et de 4 négatives (vertes). La technique du piégeage par le rayonnement s'oriente en particulier vers la capture de l'anti-matière, qui constituerait une source extraordinaire d'énergie, et ouvrirait la porte aux voyages interplanétaires lointains.

contact des parois. On peut en revanche songer stocker une quantité importante d'anti-atomes, de l'antihydrogène par exemple (un antiproton + un antiélectron), dans un piège magnétique. Cet antihydrogène pourrait ultérieurement être utilisé comme carburant très énergétique : 1 milligramme d'antihydrogène, s'annihilant avec 1 milligramme d'hydrogène libère une énergie suffisante pour mettre en orbite une navette spatiale !

Comme on le voit, la physique des atomes piégés n'est probablement qu'à ses premiers pas. Située au carrefour de plusieurs disciplines, physique atomique et moléculaire, physique des lasers, physique statistique, elle fournit un bon exemple de la versatilité de la physique "basse énergie". Les quelques théoriciens qui exploraient le sujet avant 1980 sont désormais secondés par plus d'une vingtaine de groupes dans le monde, dont deux en France à Paris et à Orsay. Gageons qu'ils sauront déboucher sur de nombreuses idées nouvelles concernant les propriétés et les applications de ces "atomes gelés par la lumière".

JULIAN BAUM - SCIENCE PHOTO LIBRARY

