

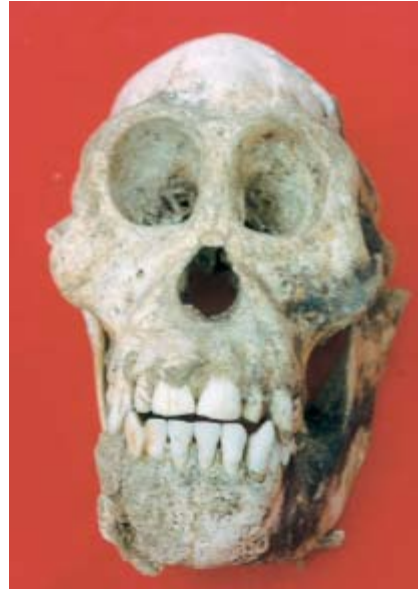
cène. Dans la partie de l'Asie qui nous intéresse, les terres émergées formaient le plateau de Sunda. L'Australie et la Papouasie formaient le plateau de Sahul, indépendant. Ce n'est qu'à la fin de cette période, il y a 10 000 ans, que l'immersion de Sunda, due à une remontée des eaux de 120 mètres, a modelé le continent eurasiatique tel qu'on le connaît aujourd'hui. La mer a séparé du continent les îles de l'Indonésie. Ces mouvements expliquent comment les faunes mammaliennes ont été morcelées et isolées géographiquement : certaines populations sont restées sur le continent, d'autres sur les îles.

Parallèlement au niveau des mers, le climat en Asie a aussi influé sur la distribution des zones subtropicales et tropicales où vivaient les orangs-outans. Ces zones ont été repoussées à la fois vers l'Est et vers le Sud : le recul des orangs-outans vers le Sud semble coïncider avec le recul de ces zones tropicales. Ces bouleversements ont aussi agi sur la répartition des grands mammifères et des autres primates, chaque espèce ayant évolué en fonction de ses capacités à s'adapter à ces changements environnementaux.

Une faible adaptabilité

L'équipe de Nina Jablonski, de l'Académie des sciences de Californie, a mis en évidence la variété des adaptations des primates aux modifications de l'environnement. Au Pléistocène inférieur, les gibbons, les orangs-outans et les gigantopithèques, une espèce de grand singe aujourd'hui disparue, occupaient essentiellement les zones tropicales, alors que les singes cercopithèques (les macaques et les colobes) et les hommes avaient une répartition plus étendue vers le Nord, dans les zones subtropicales. Au Pléistocène moyen, avec le recul de la forêt tropicale, l'aire de répartition des gibbons et des orangs-outans s'est concentrée vers le Sud. Au Pléistocène supérieur, alors que les cercopithèques et les hommes s'étendaient vers le Nord et s'adaptaient aux zones tropicales autant que tempérées, et jusqu'aux montagnes enneigées, les orangs-outans, plus vulnérables, se raréfiaient et ne survivaient que dans les zones qui deviendront les îles de Bornéo et de Sumatra lorsque le niveau des mers remontera à la fin du Pléistocène supérieur.

La présence de l'homme a également participé à la disparition de certaines populations d'orangs-outans. Par



4. LE SEUL SQUELETTE complet d'un orang-outan adulte a été trouvé dans une grotte, à Hoà Binh, au Vietnam, à quelques kilomètres de Hanoi. Il s'agit probablement d'une femelle (crâne de face et de profil).

exemple, de nombreux restes d'orangs-outans ont été trouvés dans des grottes de Sarawak et de Sabah, sur l'île de Bornéo. Ils ont vraisemblablement été la proie de chasseurs. De plus, il y a encore peu de temps, la tribu des Dayaks, à Bornéo, tuait les orangs-outans, des proies faciles en raison de leur lenteur, pour en consommer la chair. La vulnérabilité de ces grands singes a sans doute été un facteur important de raréfaction, voire de disparition. Toutefois, l'intervention de l'homme n'explique pas à elle seule l'éradication de ce primate sur le continent.

Ce primate serait-il plus fragile que les autres ? R. Delgado et C. van Shaik ont dressé l'inventaire des particularités anatomiques et physiologiques qui mettent en péril la survie de cette espèce : une durée de gestation longue et une première gestation tardive ; un intervalle de temps entre les naissances très long, jusqu'à huit ans ; le besoin d'une nourriture abondante et riche en calories ; un régime alimentaire composé principalement de fruits et de jeunes feuilles. Ces caractéristiques contrastent avec le taux de reproduction élevé et la nourriture plus variée des cercopithèques, ainsi plus aptes à s'adapter aux changements.

N. Jablonski avance d'autres arguments. Un poids élevé et un cerveau

volumineux imposent aux orangs-outans une nourriture abondante et énergétique : ils ne peuvent survivre dans une forêt où l'alternance de saisons trop contrastées prédomine. Quand les fruits se raréfient, les animaux ne peuvent maintenir leur poids. La première reproduction des femelles est alors retardée et la survie de l'espèce menacée.

Pour d'autres primatologues, les principaux facteurs qui fragiliseraient les orangs-outans sont une faible densité de population, la nécessité de parcourir une grande superficie pour la recherche de la nourriture, ou encore une localisation des populations aux basses latitudes.

Quoi qu'il en soit, une forte spécialisation, alimentaire notamment, serait la cause la plus vraisemblable d'un manque de plasticité adaptative lors des variations des conditions climatiques et environnementales.

Si l'on postule que les populations d'orangs-outans du Pléistocène avaient les mêmes caractéristiques que les populations actuelles, leur manque d'adaptabilité aux changements drastiques du climat qui ont eu lieu il y a quelque 10 000 ans expliquerait leur disparition des terres continentales de l'Asie du Sud-Est.

Anne-Marie BACON est paléontologue dans l'UPR 2147 du CNRS, «Dynamique de l'évolution humaine».

Nina JABLONSKI, M. WHITFORT, X. QIN-QI et N. ROBERTS-SMITH, *The influence of life history and diet on the distribution of catarrhine primates during the Pleistocene in eastern Asia*, in *Journal of Human Evolution*, n° 39, pp. 131-157, 2000.

A.-M. BACON et VU THE LONG, *The first discovery of a complete skeleton of an orang-utan in a cave of the Hoà Binh Province, Vietnam*, in *Journal of Human Evolution*, n° 41, pp. 227-241, 2001.

R.A. DELGADO et C.P. van SHAIK, *The behavioral Ecology and conservation of the Orang-utan : A tale of two islands*, in *Evolutionary Anthropology*, pp. 201-218, 2001.

D'étranges objets quantiques

GRAHAM COLLINS

À l'échelle macroscopique, les condensats de Bose-Einstein révèlent les étranges comportements des objets quantiques.

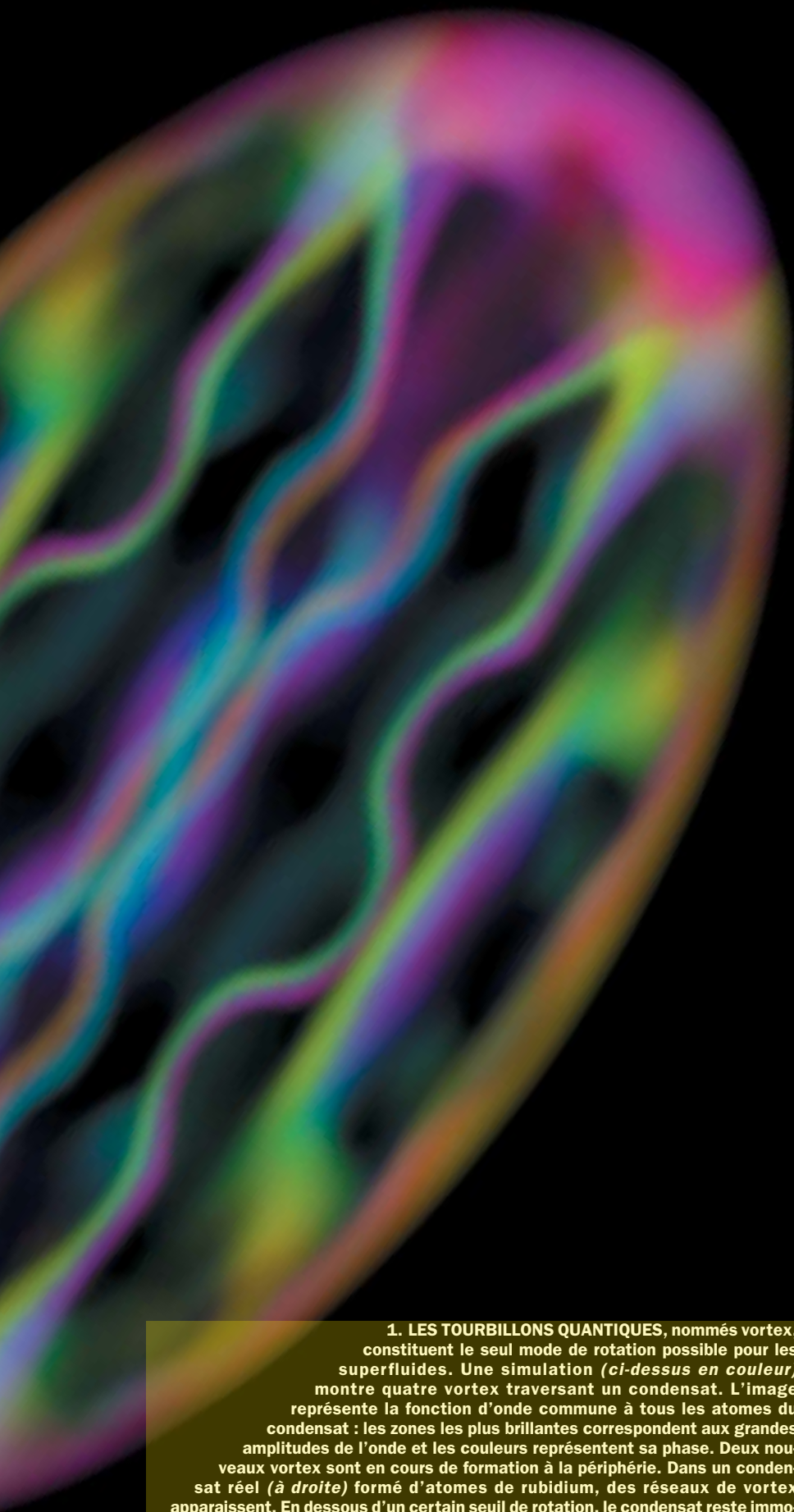
A la fin des années 1940, pour instruire ses lecteurs de la physique moderne, le physicien américain d'origine russe George Gamow, écrivit une série de livres intitulée *Les aventures de Monsieur Tompkins*. Il projetait son héros dans des contrées mystérieuses où les constantes fondamentales, par exemple la vitesse de la lumière ou la constante de Planck, prenaient des valeurs accessibles à l'entendement humain. Grâce à cet artifice, Monsieur Tompkins vivait au quotidien des effets relativistes ou quantiques. Par certains aspects, les condensats de Bose-Einstein font du rêve de Gamow une réalité : ce sont des manifestations à l'échelle humaine de phénomènes quantiques.

Imaginons Monsieur Tompkins réduit à la taille d'une molécule et plongé dans un des nuages de gaz où les physiciens fabriquent les condensats de Bose-Einstein. Les atomes lui apparaissent comme des billes de verre insécables, s'entrechoquant continuellement. Dans un premier temps, la vitesse des billes diminue, les distances qui les séparent décroissent et la densité du gaz augmente à mesure qu'il se refroidit. Puis les billes elles-mêmes changent d'aspect : les plus lentes deviennent troubles et un millier de fois plus «grosses», et les atomes deviennent fantomatiques. Au centre du nuage, deux des atomes parmi les plus lents et les plus nébuleux s'enveloppent mutuellement et semblent fusionner, formant un unique globule qui absorbe d'autres atomes, d'abord par petits groupes, puis par dizaines, jusqu'à ce que, soudain, il ne subsiste plus du nuage qu'une énorme bulle immobile. Quel est cet objet mystérieux ? Un «condensat de Bose-Einstein». Bien que les atomes qui le constituent aient conservé leur existence propre, ils ont perdu leur individualité.

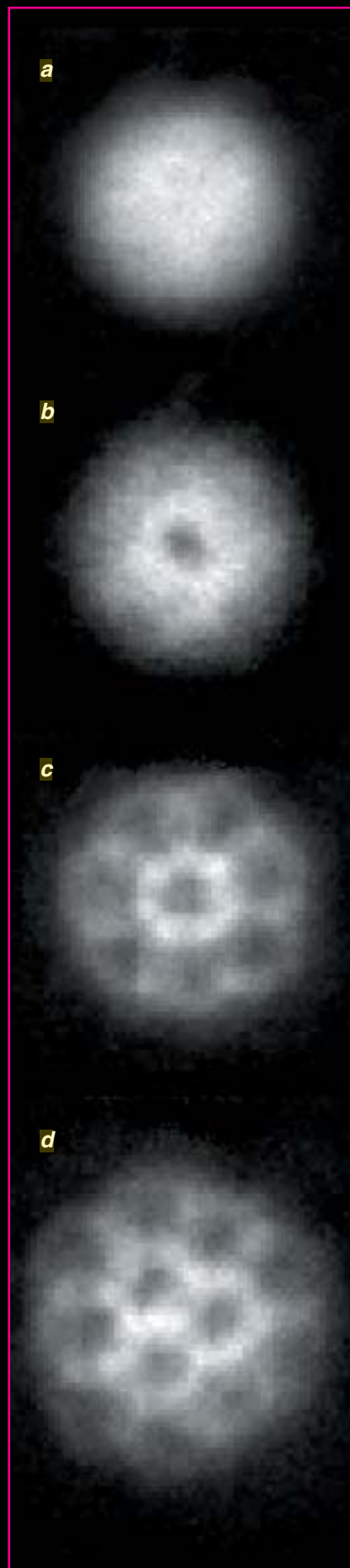
La mécanique quantique gouverne le monde. La plupart du temps, lorsque des myriades de particules sont en jeu, leurs étranges comportements quantiques se compensent mutuellement, créant ainsi la façade de physique classique que nous considérons comme la réalité.

La formation d'un condensat de Bose-Einstein repose sur quatre concepts fondamentaux qui régissent le monde quantique. Tout d'abord, les particules ne sont pas seulement de simples entités ponctuelles, mais se comportent aussi comme des ondes. Toute l'information qu'il est possible de connaître sur une particule est contenue dans une «onde de probabilité» que l'on nomme fonction d'onde de la particule : en chaque point de l'espace, l'amplitude de la fonction d'onde d'un électron, par exemple, donne sa probabilité de présence.

Le deuxième concept fut découvert en 1926 par le physicien allemand Werner Heisenberg. Il stipule que certains couples de grandeurs physiques ne peuvent être simultanément déterminés avec une précision parfaite. De même qu'une impulsion (lumineuse ou sonore) est un mélange de plusieurs fréquences, la fonction d'onde d'une particule



1. LES TOURBILLONS QUANTIQUES, nommés vortex, constituent le seul mode de rotation possible pour les superfluides. Une simulation (*ci-dessus en couleur*) montre quatre vortex traversant un condensat. L'image représente la fonction d'onde commune à tous les atomes du condensat : les zones les plus brillantes correspondent aux grandes amplitudes de l'onde et les couleurs représentent sa phase. Deux nouveaux vortex sont en cours de formation à la périphérie. Dans un condensat réel (*à droite*) formé d'atomes de rubidium, des réseaux de vortex apparaissent. En dessous d'un certain seuil de rotation, le condensat reste immobile (*a*). Une fois ce seuil franchi, un vortex apparaît (*b*). L'augmentation de la rotation engendre de nouveaux vortex (*c et d*).



À gauche : D. Feder et P. Kéckham ; à droite : K. Madison, Laboratoire Kastler-Brossel

«contient» de nombreuses composantes de vitesses différentes ; une grande précision sur la position d'une particule entraîne une grande imprécision sur sa vitesse, et réciproquement.

Lorsque l'on refroidit les atomes d'un gaz, on diminue leur vitesse. Quand leur température tend vers le zéro absolu, les effets quantiques dus

au principe d'indétermination d'Heisenberg se révèlent. Puisque l'on force les fonctions d'onde des atomes à adopter des vitesses proches de zéro, et par conséquent, bien déterminées, leur localisation diminue et leur position devient «floue». Les fonctions d'ondes de différents atomes finissent par se recouvrir.

La condensation dans tous ses états

La condensation de Bose-Einstein est à l'œuvre dans plusieurs phénomènes que les physiciens connaissaient bien avant 1995, date de la création des premiers condensats atomiques.

L'hélium superfluide

Lorsque l'on refroidit de l'hélium 4 au-dessous de 2,2 kelvins, il devient superfluide, c'est-à-dire qu'il s'écoule sans la moindre viscosité. On fabrique ainsi des «fontaines d'hélium» (*en bas*) : les forces de capillarité (qui font adhérer le fluide à la paroi du récipient) et un léger chauffage suffisent à vaincre la gravité, de sorte que le liquide jaillit spontanément. Dans cet état superfluide, près de dix pour cent des atomes d'hélium subissent une condensation de Bose-Einstein. Les interactions nombreuses et intenses entre les atomes du liquide rendent très difficile l'étude détaillée de la fraction condensée, tant au niveau théorique qu'expérimental. La création et l'étude de condensats «purs» devrait permettre de faire progresser notre compréhension des états superfluides.

Les lasers

Un faisceau laser peut être considéré comme un condensat de Bose-Einstein fait de photons. Dans la lumière ordinaire – telle celle qu'émet une ampoule usuelle –, les ondes associées aux photons sont indépendantes : leurs longueurs d'onde et leurs phases sont sans corrélation. Au contraire, dans un laser, toutes ces ondes sont «en phase», c'est-à-dire que les photons sont tous dans le même état quantique.

Les supraconducteurs

La condensation de paires d'électrons engendre des propriétés de supraconduction, c'est-à-dire que le courant électrique circule sans aucune résistance. Les électrons étant des fermions, ils ne devraient pas former de condensats de Bose-Einstein, constitués de bosons. Toutefois, dans certaines circonstances – par exemple, lorsqu'on refroidit de l'aluminium à 1,2 kelvin –, les électrons du métal se rassemblent en paires dont le spin est entier. Ces paires d'électrons sont des bosons et ne tardent pas à subir une condensation de Bose-Einstein. De même que les atomes de l'hélium superfluide ne peuvent être mis en mouvement individuellement (le superfluide restant, par conséquent, immobile),

les paires condensées ne peuvent heurter individuellement les atomes du métal, et le courant progresse sans résistance. De façon analogue, même si les atomes d'hélium 3 sont des fermions, on peut obtenir de l'hélium 3 superfluide lorsque les atomes s'associent par paires de spin entier.

Les excitons

Dans les matériaux semi-conducteurs, un déficit localisé d'électrons équivaut à une particule positivement chargée que l'on nomme «trou». Un trou et un électron formés à l'aide d'une impulsion laser peuvent s'apparier brièvement pour former une sorte d'atome exotique, nommé «exciton». Tout comme les électrons appariés dans un métal supraconducteur, ces excitons ont un spin entier et se comportent en bosons. En 1993, on a observé indirectement la formation d'un éphémère condensat d'excitons au sein d'un semi-conducteur d'oxyde de cuivre.

UNE FONTAINE D'HÉLIUM, déclenchée par un anneau de chauffage, est un exemple spectaculaire de superfluidité.

Selon le troisième concept, il existe deux grandes familles de particules, les bosons et les fermions. Les fermions sont «individualistes» : deux fermions ne peuvent se trouver simultanément dans un même état quantique. Ainsi, la probabilité que deux fermions se trouvent au même endroit est nulle. Au contraire, les bosons sont dotés d'un «instinct grégaire». Lorsque les fonctions d'onde de deux bosons se recouvrent, elles peuvent se «concentrer» dans la zone commune. Dans une assemblée constituée de nombreux bosons, les particules sont susceptibles de s'accumuler en un seul et même état quantique : c'est le phénomène de condensation de Bose-Einstein.

Comment des atomes, constitués de particules de matière, tels des électrons et des protons, c'est-à-dire de fermions, peuvent-ils subir cette condensation ? En raison du quatrième concept, le statut de boson ou de fermion d'une particule dépend de la valeur de son spin (une grandeur quantique dont l'équivalent classique serait la rotation de la particule sur elle-même). Les particules de spin entier sont des bosons, celles de spin demi-entier sont des fermions. Le spin d'un édifice de particules, un atome par exemple, est calculé en combinant les spins de tous ses constituants. Certains atomes ont un spin global entier et adoptent le mode de vie des bosons, bien qu'ils soient constitués de fermions. En vertu de ces quatre principes, quand on refroidit de tels atomes au voisinage du zéro absolu, ils se rassemblent en condensats de Bose-Einstein.

Ce type de condensat est 100 000 fois plus gros que le plus gros des atomes ordinaires, plus gros même que les cellules de l'organisme humain. Par conséquent, les physiciens peuvent observer son comportement quantique par des méthodes classiques. Une simple photographie de condensat n'est autre que l'image de la fonction d'onde quantique commune à l'ensemble des atomes du condensat.

Les premiers condensats de Bose-Einstein en phase gazeuse créés en laboratoire datent de 1995, soit 70 ans après que le phénomène a été prédit par Albert Einstein à partir des travaux du physicien indien Satyendra-nath Bose. Les expérimentateurs créent ces condensats dans des pièges magnéto-optiques, des dispositifs



J. Allen, R. Donnelly