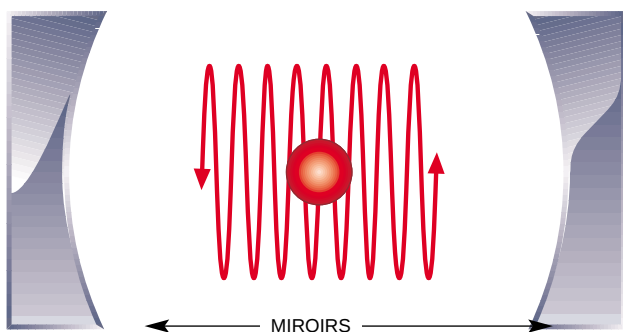
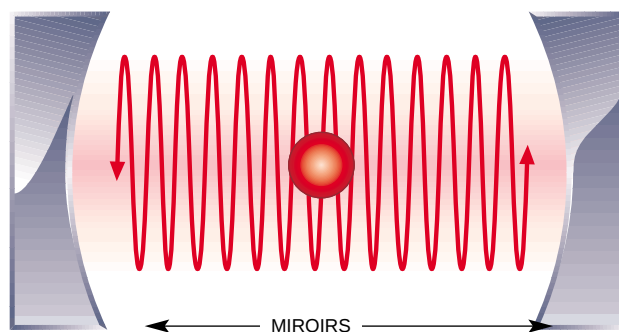


b
OSCILLATION DUE AU VIDE



c
OSCILLATION DE RABI



Toutefois notre laser nous intéresse surtout parce qu'il permet l'étude des interactions de la matière et de la lumière. La création du faisceau laser résulte d'un phénomène quantique à partir duquel les physiciens testent les prévisions de la mécanique quantique. Notre premier laser à un atome convenait mal, pour de telles expériences, parce que les interactions atomiques dans le résonateur n'étaient pas uniformes : le champ électromagnétique dans la cavité formait une onde stationnaire entre les miroirs, avec une amplitude qui augmentait et diminuait de façon sinusoïdale comme les vibrations d'une corde de guitare. De ce fait, les interactions des atomes et de la cavité dépendaient du trajet suivi par les atomes : ceux qui passaient dans les régions de forte amplitude émettaient plus de photons que ceux qui passaient dans les régions de faible amplitude, et qui interagissaient peu avec le champ électromagnétique.

Nous avons résolu ce problème en inclinant le faisceau d'atomes par rapport à l'axe de la cavité. De ce fait, la vitesse relative des photons qui proviennent des deux miroirs est différente ; nous réglons la cavité de sorte qu'une seule des ondes soit accordée. Les atomes traversent alors tous des régions de même amplitude, et ils ont la même probabilité d'émission.

Dans notre premier laser à un atome, les atomes de baryum éjectés par le four n'avaient pas tous la même vitesse. Or ceux qui traversaient rapidement la cavité interagissaient moins avec le champ électromagnétique, de sorte que la probabilité d'émission de photons était inférieure. Nous avons donc modifié le système d'excitation des atomes de baryum : avec deux lasers classiques, nous parve-

nons à ne placer dans l'état d'énergie supérieure que les atomes de vitesse déterminée.

Nous cherchons maintenant à analyser le spectre d'émission du laser à un seul atome. Les premières expériences ont montré comment un atome placé dans une cavité résonante interagit avec la lumière issue d'un laser classique. Lorsque la cavité est vide, l'intensité de lumière qui la traverse augmente brusquement quand la fréquence du laser est voisine de la fréquence de résonance de la cavité. Autrement dit, la «courbe d'accord» de la cavité comporte un pic unique. En revanche, quand un atome est dans la cavité, l'intensité de la lumière du laser croît brusquement, à deux fréquences respectivement inférieure et supérieure à la fréquence de résonance. La courbe d'accord de la cavité possède alors deux modes.

Le spectre d'émission du laser à un seul atome est également une courbe à deux pics lorsque le débit d'atomes est faible et que tous les photons ont quitté le résonateur avant qu'un autre atome ne rentre. Lorsque le débit d'atomes est notable et que les photons emplissent en permanence le résonateur, le spectre d'émission évolue vers la courbe à un seul pic caractéristique du laser. Pourquoi cette évolution ? La théorie reste à faire.

Nous avons aussi prévu d'utiliser ce dispositif pour étudier les «états piégés», un phénomène quantique qui se produit quand un atome pénètre dans la cavité et subit une ou plusieurs oscillations de Rabi. Lors d'une oscillation complète, l'atome émet un photon dans la cavité, puis absorbe un photon provenant du champ et quitte le résonateur dans un état excité. Le nombre de photons n'augmente pas, car les atomes entrent et sortent de la

cavité dans le même état. Dans nos premières expériences, nous n'avons pas observé d'oscillations complètes, parce que les atomes de baryum se déplaçaient trop rapidement : ils n'effectuaient qu'un sixième d'oscillation dans la cavité. Nous ne pourrions étudier les états piégés que si nous ralentissons les atomes.

Ces études présentent aussi un autre avantage, pratique celui-là : la faible incertitude sur l'amplitude du champ des états piégés permettra peut-être d'utiliser le laser à un seul atome fonctionnant dans ce mode pour des traitements de l'information précis ou pour la spectroscopie de précision. Et si l'on parvient à construire des lasers à un atome sur des matériaux semiconducteurs, on pourra les intégrer dans des ordinateurs optiques, beaucoup plus rapides que les ordinateurs actuels.

Michael S. FELD est professeur de physique à l'Institut de technologie du Massachusetts et directeur du Centre de spectroscopie George Harrison. Kyungwom AN est professeur de l'Institut coréen des sciences et des techniques de Taejon.

Serge HAROCHE et Daniel KLEPPNER, *Cavity Quantum Electrodynamics*, in *Physics Today*, Vol. 42, n° 1, pp. 24-30, janvier 1989.

G. RAITHEL et al., *The micromaser : A Proving Ground for Quantum Physics*, in *Cavity Quantum Electrodynamics*, sous la direction de Paul R. Berman, Academic Press, 1994.

Kyungwom AN, Ramachandra R. Dasari Michael S. FELD, *The Microlaser : A Fundamental Quantum Generator of light*, in *Atomic and Quantum Optics : High-Precision Measurements*, SPIE Proceedings Series, Vol. 2799, pp. 14-21, 1996.

Un regard nouveau sur les quasars

MICHAEL DISNEY

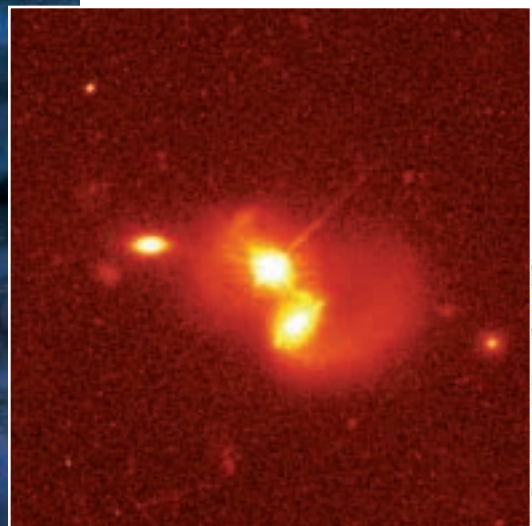
Des observations du télescope spatial Hubble explorent la nature et l'origine des quasars, ces mystérieuses centrales d'énergie cosmiques.



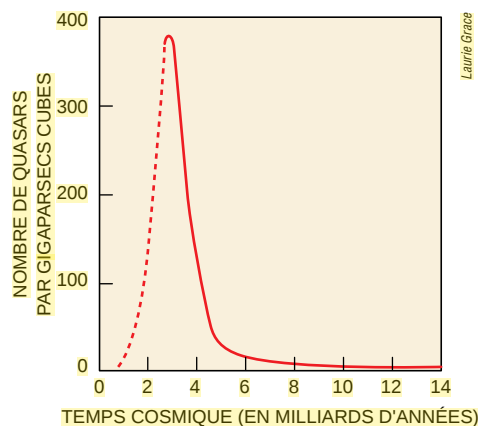
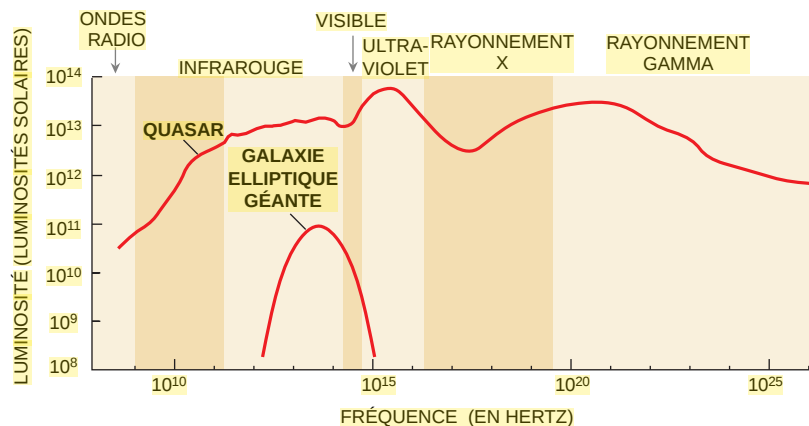
Les quasars sont les objets les plus lumineux de l'Univers. Ils rayonnent des centaines de fois plus qu'une galaxie comme notre Voie lactée, qui brille elle-même comme dix milliards de soleils. Néanmoins, à l'échelle de l'Univers, les quasars sont des objets minuscules. Leur diamètre, de quelques jours-lumière à peine, est bien inférieur à celui d'une galaxie comme la nôtre. Comment produisent-ils tant d'énergie dans un volume aussi restreint? Quels sont leur structure et leur fonctionnement? Pour répondre à ces questions, les astronomes braquent leurs instruments les plus performants – tel le télescope spatial *Hubble* – sur ces vedettes célestes.

Le premier quasar fut découvert en 1962 par Cyril Hazard, de l'Université de Sydney : il étudiait une puissante source d'ondes radio de la constellation de la Vierge, mais le radiotélescope qu'il utilisait était trop imprécis pour qu'il en identifie la source. Le jeune astronome remarqua alors que la Lune occulterait la région du ciel d'où provenait la source lors de son passage devant la constellation de la Vierge. Avec John Bolton, le directeur du tout nouveau radiotélescope construit à Parkes, en Australie, il imagina de pointer l'antenne géante vers la radiosource et d'attendre que la Lune l'occulte : en surveillant le moment de la disparition et celui de la réapparition du signal radio, ils espéraient attribuer la source du signal à un objet visible qui disparaîtrait et réapparaîtrait simultanément. L'expérience faillit rater : au début de l'occultation, la grande antenne était si inclinée qu'elle butait contre ses cales de sécurité. Sans se soucier des risques, J. Bolton arra-

1. LA COLLISION DE GALAXIES engendre parfois un quasar. Un trou noir massif, au centre de l'une des galaxies, aspire les étoiles et le gaz de l'autre galaxie : le maelström de matière qui en résulte engendre un intense rayonnement. Ce mécanisme semble se dérouler dans le quasar PG 1012+008 (*médaille*), observé par le télescope spatial *Hubble*. Ce quasar se trouve à 1,6 milliard d'années-lumière de la Terre.



John Bahcall, *Institute for Advanced Study* et NASA



2. LE SPECTRE DU QUASAR 3C273 – l'un des quasars les plus brillants – est bien plus étendu et plus intense que le spectre d'une galaxie elliptique géante (à gauche). Dans le domaine visible, le quasar est des centaines de fois plus lumineux qu'une galaxie typique. Les quasars étaient plus nombreux lorsque l'Univers

était âgé de deux à quatre milliards d'années (à droite). Aujourd'hui, ils sont 1 000 fois moins nombreux. Au début de l'Univers, les quasars étaient également rares, mais les nombres exacts sont incertains (un gigaparsec est égal à 3,26 milliards d'années-lumière).

cha les cales, afin que le télescope suive l'occultation jusqu'à ce que le bord de l'antenne touche presque le sol.

Cette audace fut récompensée : C. Hazard localisa la radiosource et observa, à la position calculée, un objet brillant d'apparence stellaire. Il communiqua la position de cet objet – nommé 3C273 – à Maarten Schmidt, de l'Observatoire du mont Palomar, en Californie, qui enregistra son spectre dans le domaine visible. Après un moment de perplexité, M. Schmidt comprit que le spectre qu'il avait obtenu était celui de l'hydrogène, mais considérablement décalé vers le rouge. En raison de l'expansion de l'Univers, les objets cosmiques s'éloignent de la Terre d'autant plus rapidement qu'ils sont loin ; la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent est allongée par l'effet Doppler cosmologique, analogue à l'effet Doppler sonore qui fait entendre plus grave la sirène d'une ambulance qui s'éloigne. Le rougissement de 16 pour cent (les longueurs d'onde sont multipliées par 1,16) de 3C273 indiquait que l'objet se trouvait à une distance de près de deux milliards d'années-lumière de la Terre. Compte tenu de la distance et de la luminosité apparente de l'objet, M. Schmidt calcula qu'il émettait autant de lumière que plusieurs centaines de galaxies. La première radiosource quasi stellaire – ou quasar – était découverte.

Par la suite, les astronomes identifièrent de nombreux autres quasars. La luminosité dans le domaine des X de certains d'entre eux varie brusquement : ils deviennent dix fois plus brillants en quelques jours seulement. Comme aucune fluctuation ne se propage plus

vite que la lumière, il en découlait que la région qui émet ce rayonnement très énergétique mesurait seulement quelques semaines-lumière de diamètre. Comment des objets si lumineux étaient-ils si petits ? Des astronomes réputés refusèrent initialement de croire aux quasars, mais maintenant des milliers de quasars ont été catalogués ; pour certains, le rougissement atteint 500 pour cent (la longueur d'onde est multipliée par cinq).

Un problème récurrent

Les astronomes qui étudient les quasars examinent quatre grandes questions. D'abord, quel lien existe-t-il entre les quasars, les galaxies et les étoiles ? Ensuite, pendant combien de temps les quasars déversent-ils leurs torrents d'énergie ? Troisièmement, on compte un quasar par million de galaxies dans notre voisinage cosmique immédiat (à moins d'un milliard d'années-lumière de la Terre), mais cela ne signifie pas que les quasars sont plus rares que les galaxies : ils pourraient être aussi nombreux, et briller moins longtemps. À une distance d'environ dix milliards d'années-lumière, les quasars sont 1 000 fois plus nombreux qu'aujourd'hui. D'où la question : pourquoi les quasars furent-ils beaucoup plus nombreux dans le passé ? Enfin, comment les quasars engendrent-ils leur prodigieuse énergie ?

Les recherches sont difficiles, parce que les quasars sont si loin de la Terre que leur image, dans les plus grands télescopes, est 100 millions de fois trop petite pour être résolue. Depuis la découverte du premier quasar, une partie des astronomes suppose que les quasars résident au sein des galaxies,

probablement dans leurs noyaux. Ils ont cherché à montrer que tous les phénomènes observés dans les quasars se manifestent, sous une forme atténuée, dans les noyaux d'environ un pour cent des galaxies géantes proches de la Voie lactée. Lors de cette recherche, ils ont découvert une grande variété de noyaux actifs de galaxies : radiogalaxies, galaxies de Seyfert, blasars, etc. Toutefois, on n'a pas su établir (et on ne sait toujours pas) si ces objets constituaient des classes distinctes de noyaux galactiques ou s'ils étaient des manifestations du même phénomène, vu sous des angles différents ou à divers stades de son développement. D'autres astronomes opposaient aux partisans du rapprochement entre les quasars et les noyaux actifs de galaxies que leur caractéristique principale – la puissance rayonnée – différait trop : la luminosité des noyaux actifs est considérablement inférieure à celle des quasars.

En 1973, à l'Observatoire du mont Palomar, Jerry Kristian pensa que, si des quasars logeaient dans des galaxies hôtes géantes, les images des quasars les plus proches comporteraient un halo diffus de lumière, en raison de la présence d'étoiles de la galaxie hôte. L'observation de ce halo était difficile, parce que la lumière du quasar brillant, diffusée par l'atmosphère terrestre, occulterait la lumière plus faible de la galaxie, mais il le détecta. Sa démonstration restait toutefois peu probante, parce qu'on ne pouvait pratiquement rien discerner des galaxies hôtes, pas même s'il s'agissait de galaxies spirales ou elliptiques.

Lorsque le télescope spatial *Hubble* fut proposé, au milieu des années 1970, la plupart des observateurs de quasars