

gravitationnelle continue, elle est compatible avec les contraintes expérimentales actuelles. Cela s'explique par la faiblesse de la gravitation. Entre deux particules élémentaires, cette force est bien trop petite pour être détectable. Elle n'est observable qu'avec des objets macroscopiques, et même une balle de golf, constituée

variantes où, par exemple, chaque flash a une certaine extension spatiale, ou subsiste au-delà de l'instant de son apparition. Cela modifie les prédictions quantitatives, qu'il sera intéressant de confronter avec les expériences. Cette flexibilité pourrait cependant devenir une faiblesse: si tout résultat expérimental est explicable *a posteriori* en changeant le modèle à la marge, l'approche globale perdra son caractère prédictif. Ainsi, alors que le problème initial était l'impossibilité apparente de construire un seul modèle de gravité semi-classique cohérent, on risque de se retrouver au contraire avec trop de solutions.

Une tout autre façon d'aborder le problème de la gravité classique ou quantique est de rechercher des signatures expérimentales qui permettraient de tester la pertinence de la gravité semi-classique indépendamment du modèle. En 2017, une équipe d'expérimentateurs et de théoriciens, menés par Sougato Bose, à l'University College de Londres, ont répondu précisément à ce défi. Ils ont proposé une expérience permettant de conclure quant au caractère quantique ou non de la gravitation.

Pour ce faire, ils exploitent une différence qualitative entre toutes les approches semi-classiques cohérentes et une hypothétique théorie quantique. L'idée est d'intriquer une fonction d'onde *via* la force gravitationnelle (voir la figure page 34). Cela n'est possible que si cette force est de nature quantique. Si la force gravitationnelle n'est pas quantique, on n'observera pas d'intrication.

UNE RÉPONSE D'ICI À QUELQUES ANNÉES ?

La difficulté de l'expérience de Bose est de trouver une configuration telle que toutes les autres forces, notamment la force de Casimir, liée aux fluctuations électromagnétiques du vide, sont bien négligeables devant la gravité. La surprise est que les avancées techniques requises sont assez raisonnables en termes de microfabrication, de contrôle quantique des systèmes... Des défis, certes, mais sans commune mesure avec celui d'un accélérateur de particules grand comme le Système solaire, qui semble indispensable pour détecter directement des gravitons.

Dans les années 1980, les physiciens pensaient que la nature quantique ou classique de la gravité était une question théorique. Elle sera peut-être expérimentale dans un futur proche. Le résultat le plus intéressant serait de découvrir que la gravité n'est pas quantique. Cela irait à contre-courant de ce que pensent la majorité des physiciens et des efforts consentis ces soixante dernières années. À l'inverse, si la gravité est quantique, une théorie de la gravité quantique n'en deviendra que plus indispensable. ■



Un objet du quotidien d'environ 10^{23} atomes subirait des milliards de flashes par milliseconde



pourtant de plus de 10^{23} atomes, produit une force gravitationnelle à peine détectable.

Dans cette balle ou dans tout objet macroscopique, les milliards de flashes et d'à-coups gravitationnels qui apparaissent chaque milliseconde donnent aux observateurs l'impression d'un champ gravitationnel évoluant de façon douce et continue. Le phénomène est analogue à la persistance rétinienne, grâce à laquelle une succession de 24 images statiques par seconde nous fait apparaître un mouvement fluide et non saccadé.

Un tel modèle, où les flashes sont la source de la force gravitationnelle, présente un certain nombre de signatures expérimentales potentiellement détectables. Par exemple, chaque flash ajoute de l'énergie cinétique aux particules. Cette petite augmentation d'énergie serait observable sous la forme d'un réchauffement mesurable, par exemple, dans des condensats d'atomes ultrafroids.

Faut-il croire à ce modèle ? Probablement pas : rappelons qu'il ne fonctionne que dans le régime non relativiste. Il sera intéressant de le réfuter par des expériences pour tester les limites de la physique quantique. Mais en développant ce modèle, notre objectif était surtout de fournir un contre-exemple à l'affirmation selon laquelle une théorie hybride, où la gravité serait classique, est impossible à construire. Disposer d'un modèle cohérent, même s'il est *in fine* réfuté, permet de prouver que la question de la quantification de la gravité est bien empirique et se tranchera par l'expérience.

Ce modèle peut aussi servir de point de départ pour construire de nombreuses

BIBLIOGRAPHIE

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, EDP Sciences (2^e éd.), 2018.

A. Tilloy, **Ghirardi-Rimini-Weber model with massive flashes**, *Phys. Rev. D*, vol. 97(2), 021502, 2017.

S. Bose et al., **A spin entanglement witness for quantum gravity**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119(24), article 240401, 2017.

G. Ghirardi, **Collapse theories**, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.), 2016.

N. Gisin, **Stochastic quantum dynamics and relativity**, *Helv. Phys. Acta*, vol. 62, pp. 363-371, 1989.

Le Ruapehu, un volcan sensible à la Lune



On sait que la Lune ne fait pas pousser les cheveux ni ne déclenche les naissances. Mais l'astre de la nuit agit sur les marées... et peut-être sur les volcans.



Le mont Ruapehu, un puissant volcan de l'île nord de la Nouvelle-Zélande, semble sensible à la Lune pendant ses phases prééruptives.

© Junki Asano - thechatai/Shutterstock.com

L'ESSENTIEL

> Le suivi sismique du volcan néozélandais Ruapehu trahit une sensibilité aux cycles lunaires préalables aux éruptions phréatiques.

> La modélisation mécanique du volcan suggère que l'attraction gravitationnelle de la Lune suffit à moduler

les vibrations de la poche de gaz qui surmonte la colonne de magma.

> Si l'étude d'autres volcans – ceux pour lesquels il existe suffisamment de données sismiques – confirme cet effet, on aurait un moyen potentiel de surveiller les éruptions phréatiques.

L'AUTEUR



CORENTIN CAUDRON
volcanologue
à l'Institut des sciences
de la Terre, à Chambéry

Le 25 septembre 2007, le volcan néozélandais Ruapehu entre en éruption. Une colonne de vapeur et de cendres s'élève rapidement à plus de 4600 mètres au-dessus du lac de cratère. Des vibrations sismiques secouent les alentours pendant de longues minutes. Deux lahars – des coulées de boue formées par l'éjection du lac de cratère et l'interaction de son eau avec la neige – se forment et deux alpinistes, réfugiés à proximité du sommet, sont blessés par des blocs projetés par l'éruption.

L'événement, heureusement, s'est produit durant la nuit et n'a pas fait davantage de dégâts. Comme souvent lors des éruptions phréatiques, aucun signal précurseur n'a pu être mis en évidence. Le volcan était sismiquement silencieux et le lac de cratère bleu turquoise – un formidable outil de surveillance, puisqu'il intègre les flux de chaleur et condense les gaz volcaniques – était particulièrement froid. Les très compétents volcanologues néozélandais nomment poétiquement ces éruptions des *blue-sky events*, c'est-à-dire des « événements surgis d'un ciel bleu » ; en d'autres termes : complètement inattendus. De fait, après avoir soigneusement réétudié les données, ils n'ont décelé ni hausse de température, ni séisme inhabituel, ni première irruption en surface pouvant être vus comme des prémices. Bref, aucun signal géophysique n'a annoncé l'éruption.

Pour autant, avec le géophysicien Tártilo Girona, du Jet propulsion laboratory à la Nasa, en Californie, nous avons réexaminé la situation sous un autre angle et conçu l'espoir de déceler tout de même des signes précurseurs. Selon nous, c'est du côté du ciel que l'on pourrait trouver une solution... L'étude de l'influence gravitationnelle de la Lune sur les ondes sismiques précédant l'éruption

phréatique du Ruapehu suggère en effet une évolution vers une phase explosive.

Depuis la nuit des temps, l'humanité a conscience de l'influence importante de la Lune sur les animaux ou sur les marées ; et des chercheurs s'interrogent depuis des siècles sur son emprise sur des phénomènes géologiques tels que les éruptions volcaniques ou les tremblements de terre. S'il est évident que la Lune exerce une influence sur d'énormes masses d'eau (les marées), pourrait-elle avoir aussi un impact sur cette épaisse mousse visqueuse emplie de gaz qu'est le magma ?

LA LUNE PEUT-ELLE AGIR SUR UN VOLCAN ?

Lors des périodes de pleine lune et de nouvelle lune, les forces gravitationnelles exercées par la Lune et par le Soleil s'alignent, ce qui provoque à la surface océanique des gonflements tidaux plus importants qu'en moyenne, d'où les grandes marées. Au contraire, lors des premiers et derniers quartiers lunaires, ces gonflements sont plus faibles qu'en moyenne. Cette influence lunaire a des effets concrets observables non seulement sur les mers, mais aussi sur la croûte terrestre.

Les pressions d'origine lunaire sur la croûte terrestre sont de quelques kilopascals, c'est-à-dire quelques centièmes de kilogramme par centimètre carré. Elles sont à l'évidence trop faibles pour déclencher une éruption. Néanmoins, leurs effets sur les systèmes volcaniques demeurent mal connus.

Tous les volcans n'entrent pas en éruption en émettant du magma en surface. Certaines cocottes-minute volcaniques – des volcans renfermant d'importantes masses d'eau souterraine – produisent ce que l'on nomme les éruptions phréatiques, éruptions où l'eau souterraine joue un grand rôle. Souvent spectaculaires, elles s'accompagnent d'émissions de gaz, >