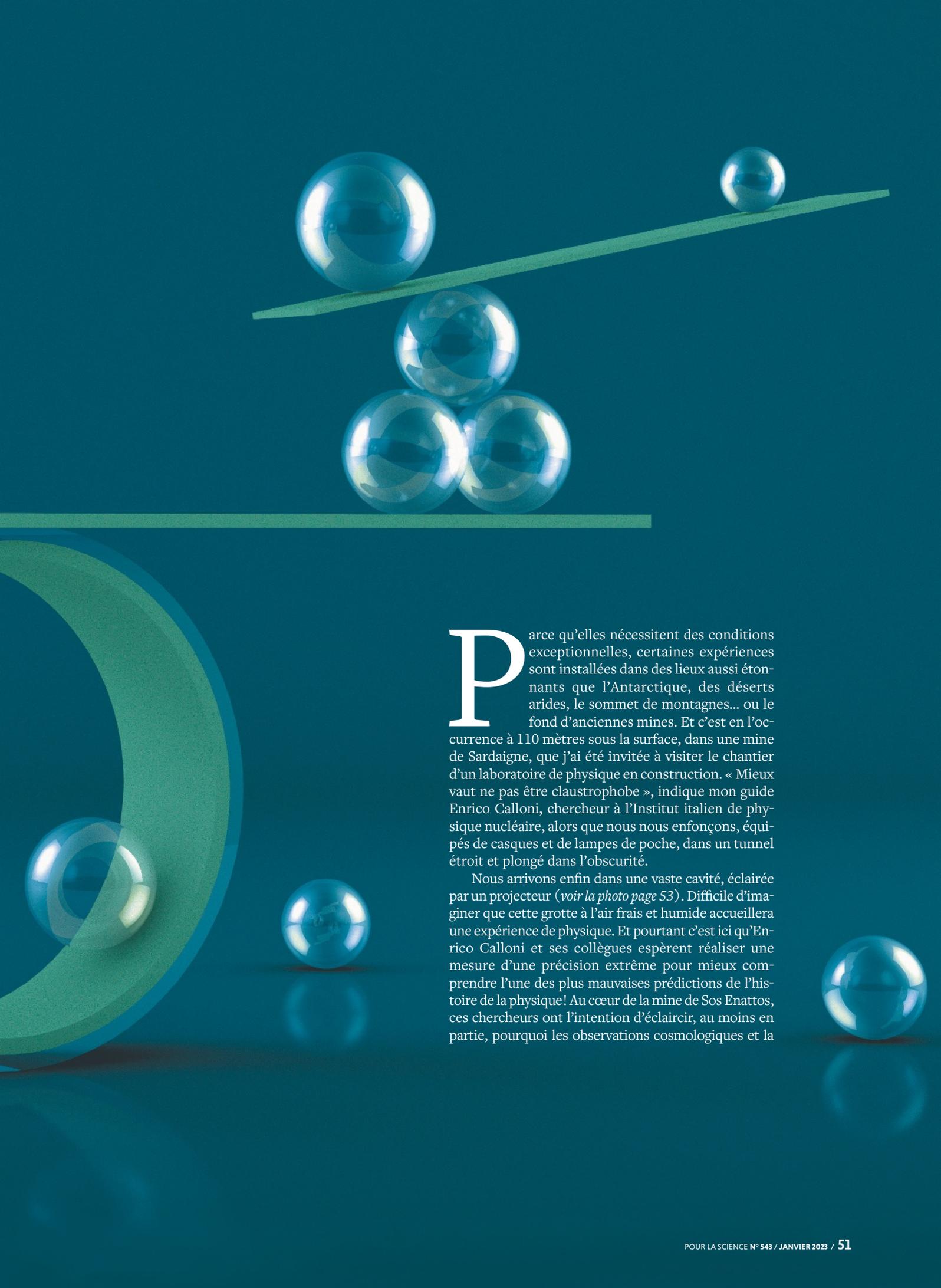


Une balance pour peser le vide

Un des problèmes les plus embarrassants en physique concerne l'énergie du vide. Le calcul théorique et les contraintes observationnelles présentent un désaccord de près de 120 ordres de grandeur... Pour comprendre cette différence, des chercheurs ont conçu une expérience pour peser le vide!





Parce qu'elles nécessitent des conditions exceptionnelles, certaines expériences sont installées dans des lieux aussi étonnants que l'Antarctique, des déserts arides, le sommet de montagnes... ou le fond d'anciennes mines. Et c'est en l'occurrence à 110 mètres sous la surface, dans une mine de Sardaigne, que j'ai été invitée à visiter le chantier d'un laboratoire de physique en construction. « Mieux vaut ne pas être claustrophobe », indique mon guide Enrico Calloni, chercheur à l'Institut italien de physique nucléaire, alors que nous nous enfonçons, équipés de casques et de lampes de poche, dans un tunnel étroit et plongé dans l'obscurité.

Nous arrivons enfin dans une vaste cavité, éclairée par un projecteur (*voir la photo page 53*). Difficile d'imaginer que cette grotte à l'air frais et humide accueillera une expérience de physique. Et pourtant c'est ici qu'Enrico Calloni et ses collègues espèrent réaliser une mesure d'une précision extrême pour mieux comprendre l'une des plus mauvaises prédictions de l'histoire de la physique! Au cœur de la mine de Sos Enattos, ces chercheurs ont l'intention d'éclaircir, au moins en partie, pourquoi les observations cosmologiques et la

L'ESSENTIEL

> D'après la physique quantique, le vide n'est pas vide : il fourmille de paires de particules qui apparaissent spontanément et disparaissent presque aussitôt.

> Ces fluctuations conduisent le vide à avoir une certaine énergie, qui est peut-être la source de l'énergie noire, la composante de l'Univers à l'origine de son expansion accélérée.

> Mais la densité d'énergie calculée à partir de la physique quantique et celle qui est requise pour décrire la dynamique de l'Univers diffèrent par 120 ordres de grandeur.

> Grâce à une balance modernisée et ultraprécise, les physiciens veulent caractériser le comportement de ces particules fugaces dans un champ de pesanteur. En somme, ils espèrent « peser le vide ».

L'AUTRICE



MANON BISCHOFF
journaliste scientifique
chez *Spektrum der
Wissenschaft*, docteure
en physique théorique

physique quantique divergent de plus de 120 ordres de grandeur (un 1 suivi de 120 zéros) dans le calcul de la densité d'énergie du vide, un paramètre fondamental pour la description de l'Univers. Leur objectif se résume en trois mots : « peser le vide ».

Contrairement à ce que beaucoup pensent, le vide n'est pas totalement vide. La raison se cache dans les phénomènes contre-intuitifs de la physique quantique, en l'occurrence le principe d'incertitude d'Heisenberg. Celui-ci énonce qu'il existe une limite fondamentale sur la précision avec laquelle il est possible de connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule. Cette limite s'applique aussi à d'autres couples de propriétés d'une particule, comme l'énergie et le temps. Ce principe a une conséquence spectaculaire : alors que l'énergie est une quantité conservée, la nature peut en « emprunter » pendant une courte période et produire des particules, qui finissent par s'annihiler et restituer l'énergie empruntée. Et plus la période d'emprunt est courte, plus la quantité d'énergie qui peut être empruntée est élevée.

UNE ACTIVITÉ BOUILLONNANTE

De ce fait, l'espace, que l'on supposait vide, fourmille de particules, qui apparaissent et disparaissent aussitôt. Toutefois, certaines règles doivent être respectées : par exemple, la charge électrique globale d'un système ne peut pas varier. Dès lors, seules des particules neutres comme les photons ou des paires particule-antiparticule (comme une paire électron-positron) peuvent peupler brièvement le vide. En physique, ces particules sont dites « virtuelles » parce qu'elles ne sont pas directement mesurables avec des détecteurs. En revanche, il est possible d'observer leur effet global. En particulier, cette activité bouillonnante conduit le vide à avoir une densité d'énergie non nulle.

De nombreuses expériences ont prouvé que les particules virtuelles ne sont pas juste une

Ce texte est adapté de l'article « Eine Waage für das Vakuum », publié dans *Spektrum der Wissenschaft*, le 14 septembre 2022.

construction mathématique, mais bien une réalité. L'une d'elles repose sur l'effet Casimir, formulé en 1948 par le physicien néerlandais Hendrik Casimir. Cet effet prédit que, lorsque deux plaques métalliques sont placées l'une en face de l'autre dans le vide, elles s'attirent (et bien plus fortement que par la seule attraction gravitationnelle qui s'exerce entre les plaques). Les particules virtuelles sont responsables de cet effet. Pour le comprendre, il faut rappeler que, d'après la physique quantique, une particule se comporte aussi comme une onde (dotée d'une longueur d'onde). Les deux plaques métalliques forment une cavité dans laquelle les particules virtuelles se réfléchissent d'une paroi sur l'autre. Mais seules les particules virtuelles dont la longueur d'onde divise exactement la distance entre les plaques sont autorisées à y apparaître. Dès lors, la densité de particules virtuelles est plus faible à l'intérieur de la cavité qu'à l'extérieur, où ces contraintes ne s'appliquent pas.

Même si les particules virtuelles n'existent que brièvement, elles exercent dans leur ensemble une pression sur les plaques. Et cette pression est plus forte à l'extérieur, ce qui conduit à un rapprochement des deux plaques. C'est l'effet Casimir. Il est donc *a priori* mesurable, mais les premières tentatives



La nature emprunte de l'énergie au vide pour une courte période et produit des particules



manquaient de précision pour le mettre en évidence. Il a fallu attendre 1997 pour que Steve Lamoreaux, alors à l'université de Washington, à Seattle, propose une expérience qui atteignait une précision suffisante. Il a ainsi confirmé l'existence de l'effet Casimir.

Enrico Calloni et ses collègues veulent mettre à profit l'effet Casimir d'une façon originale pour « peser » le vide. Leur intention est de préciser certaines propriétés des particules virtuelles, à l'aune du problème de la densité d'énergie du vide.

Le calcul de la densité d'énergie du vide repose sur l'électrodynamique quantique (la version quantique de l'électromagnétisme), qui est généralement considérée comme la théorie la plus précise et la mieux vérifiée en sciences fondamentales: dans certaines expériences de précision, les valeurs mesurées correspondent aux prédictions théoriques parfois jusqu'à huit chiffres significatifs après la virgule. Pourtant, le calcul de la densité d'énergie du vide est mis en défaut... de façon spectaculaire. En effet, la situation se complique quand on considère la possibilité que l'énergie du vide puisse influencer sur la dynamique de l'Univers sous la forme d'énergie noire.

En 1917, rapidement après avoir développé la théorie de la relativité générale, Albert Einstein s'est rendu compte qu'il pouvait utiliser ses équations pour décrire l'Univers dans sa globalité. Ces équations relient le contenu (en matière et en énergie) de l'Univers à sa géométrie et sa dynamique. En accord avec la vision des scientifiques de l'époque, Einstein a d'abord supposé que le cosmos est statique: l'espace n'était ni en expansion ni en contraction. Pour reproduire cette situation, il a compris que ses équations autorisaient un terme supplémentaire, la constante cosmologique, capable de contrebalancer l'effet de la matière qui induit une contraction de l'Univers.

Or, en 1929, l'astronome Edwin Hubble a montré que l'Univers était en expansion. La constante cosmologique devenait alors inutile. On dit souvent qu'Einstein l'a qualifiée de « plus grosse erreur » de sa vie. En 1998, ce terme a pourtant fait un retour fracassant et inattendu quand deux équipes d'astronomes ont constaté de façon indépendante, en observant des supernovæ lointaines, que l'expansion de l'Univers n'était pas constante mais accélérée.

La force motrice qui étire l'espace de plus en plus vite est nommée « énergie noire ». Grâce aux données collectées à l'échelle cosmique, les physiciens ont estimé que l'énergie noire représente environ 68% de l'énergie totale de l'Univers (la matière noire et la matière ordinaire se partageant l'essentiel du reste). Mais comme elle est diluée sur l'ensemble de l'espace, sa densité locale est très faible. Quelle est l'origine de l'énergie noire?



Dans la mine de Sos Enattos, en Sardaigne, une équipe de chercheurs construit un laboratoire pour « peser » le vide à l'abri de perturbations plus importantes à la surface.

Différentes pistes ont été explorées, mais la plus simple et compatible avec les observations est celle de la constante cosmologique, dont la densité ne varie pas au cours de l'histoire de l'Univers. Et cette constante cosmologique résulterait elle-même de l'énergie du vide.

UN CALCUL EMBARRASSANT

Dans un premier temps, les spécialistes se sont réjouis: deux domaines différents de la physique semblaient se rejoindre et expliquaient l'expansion accélérée de l'Univers. Mais l'enthousiasme a été de courte durée. Lorsque la contribution énergétique du vide a été calculée à partir la théorie quantique, elle s'est avérée plus importante que la valeur de la constante cosmologique nécessaire pour reproduire la dynamique de l'Univers... d'environ 120 ordres de grandeur!

La situation est d'autant plus problématique que l'existence des fluctuations du vide est confirmée par l'observation de l'effet Casimir et que, dans le même temps, le calcul repose sur une des théories les mieux testées, et donc *a priori* fiable. Mais jusqu'à présent, on n'a jamais étudié la manière dont les particules virtuelles se comportent par rapport à la gravité. Ces particules interagissent peut-être différemment dans un champ gravitationnel que

les particules de la matière ordinaire. Et si tel est le cas, leur contribution dans les équations d'Einstein devrait changer et peut-être sera-t-il possible de résoudre l'incompatibilité des deux résultats. C'est ce comportement dans un champ de gravité que se proposent de vérifier Enrico Calloni et ses collègues, en pesant les particules virtuelles à l'aide d'une « simple » balance à fléau, à l'image de celles qu'utilisaient les commerçants par le passé.

L'idée a germé dans l'esprit d'Enrico Calloni il y a près de vingt ans. Elle s'appuie sur le principe d'Archimède, selon lequel un corps plongé dans un fluide en présence d'un champ de pesanteur subit une poussée verticale. Si on remplace le fluide par le vide et qu'on y place une cavité constituée de plaques métalliques, la densité d'énergie dans la cavité devrait être moindre que celle à l'extérieur. Si les particules virtuelles se comportent comme les particules ordinaires dans un champ gravitationnel, la cavité devrait ressentir la poussée d'Archimède.

En 2002, l'équipe d'Enrico Calloni a commencé à développer un modèle théorique permettant de calculer l'intensité de la force de flottaison pour différents systèmes, afin de déterminer le dispositif expérimental le plus intéressant. Comme les spécialistes l'ont découvert, la force serait d'environ 10^{-16} newtons dans des configurations réalistes. Pour la mesurer, des appareils de mesure extrêmement sensibles étaient indispensables. « Cette valeur si infime explique pourquoi personne n'avait essayé jusqu'à présent », explique le chercheur. En effet, ce n'est que depuis quelques années que des systèmes capables de détecter des valeurs aussi petites sont disponibles, déployés notamment dans le cadre des expériences de détection d'ondes gravitationnelles, comme *Virgo*, à laquelle a participé Enrico Calloni.

Mais même avec des solutions avec un bon niveau de précision, la mise en œuvre de l'expérience d'Archimède est loin d'être simple. La solution envisagée par les chercheurs italiens consiste à développer une version moderne de la balance à fléau. Pour cela, deux échantillons (les matériaux qui composent les cavités) sont suspendus aux extrémités des bras de la balance. Les chercheurs s'arrangent pour que l'effet Casimir ne se manifeste que dans un seul. La solution est de refroidir et chauffer l'un des échantillons autour d'une température de transition qui le fait passer d'un état isolant à supraconducteur et inversement, tandis que l'autre échantillon reste tout le temps isolant. Quand les deux échantillons sont isolants, la balance est à l'équilibre. Quand le premier échantillon devient supraconducteur, la réflexion sur les parois est plus grande et l'effet Casimir opère. La poussée d'Archimède crée alors un déséquilibre. En modifiant de façon régulière l'état du premier échantillon, les chercheurs font osciller la balance.

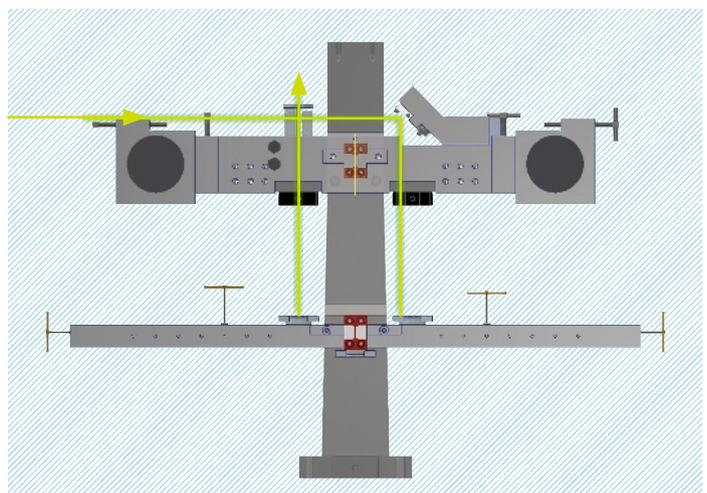
UNE BALANCE DANS LE VIDE

L'amplitude attendue sera très faible en raison de l'intensité limitée de la poussée d'Archimède. Dès lors, il faudra contrôler parfaitement les vibrations parasites que produisent le dispositif et l'environnement (avec les secousses sismiques ou les variations thermiques) pour pouvoir extraire un signal exploitable. Il est donc extrêmement important d'isoler au maximum la balance du monde extérieur. Comme point de départ, il faut un lieu d'expérimentation où l'activité sismique est la plus faible possible.

En cherchant un site adéquat, les équipes de recherche se sont rapidement tournées vers la Sardaigne. En effet, on sait depuis longtemps

UN INTERFÉROMÈTRE POUR UNE BALANCE DE PRÉCISION

Un faisceau laser (en vert) est dirigé depuis la gauche sur une séparatrice, où il se divise en deux faisceaux. Le premier est dévié vers le bas et frappe un miroir du bras inférieur de la balance, ce qui le réfléchit tout droit vers le haut. Il atterrit alors dans un détecteur. Le deuxième rayon poursuit son chemin vers la droite, où il est réfléchi vers le bas par un miroir sur la partie droite de la poutre inférieure. Il est ensuite lui aussi dirigé de manière à atteindre le détecteur. Si la barre – à laquelle les deux échantillons sont suspendus dans l'expérience – est légèrement inclinée, le trajet des deux faisceaux et donc le signal dans le détecteur sont modifiés.





Pour tester la faisabilité d'une balance à fléau aussi sensible, les chercheurs ont d'abord conçu un prototype, légèrement plus petit et plus simple que la structure finale.

que l'île méditerranéenne est extrêmement silencieuse d'un point de vue géologique. De plus, elle n'est pas trop densément peuplée, ce qui limite aussi le bruit dû aux activités humaines. Enfin, l'île dispose de nombreuses mines, qui sont intéressantes pour les physiciens car les secousses dans le sous-sol sont plus faibles qu'en surface. Et la température à l'intérieur d'une mine est très stable, ce qui facilite également les mesures. Les exploitants de la mine Sos Enattos à l'est de l'île, fermée depuis les années 1990, ont proposé leur site pour accueillir l'expérience. Elle poursuit ainsi sa longue histoire qui a commencé durant l'Antiquité, alors que les Romains exploitaient les minerais qu'elle contenait.

La cavité dans laquelle l'expérience doit se dérouler a déjà été passablement agrandie, mais il reste encore beaucoup d'aménagements à réaliser. En effet, la pièce n'est pas encore assez grande, il manque un puits d'aération, il faut poser un vrai sol, etc. En attendant, l'équipe prévoit malgré tout de présenter ses premiers résultats dès 2024, avec des mesures réalisées en surface. « Nous devons alors laisser les expériences opérer un peu plus longtemps pour compenser un bruit de fond plus important. Mais d'après nos calculs, il devrait être possible de mesurer le signal souhaité ici aussi », explique Enrico Calloni.

C'est l'avantage d'un système oscillant. En effet, au lieu de faire une pesée directe, comme pour des fruits au supermarché, les physiciens chauffent et refroidissent les échantillons à

intervalles fixes pour avoir une oscillation régulière. Ainsi, ils n'obtiennent pas une mesure unique, mais un signal périodique. L'analyse de ce signal permet plus facilement d'extraire l'information utile d'un éventuel bruit de fond. Car, même en isolant du mieux possible l'appareil de son environnement, des perturbations se produisent malgré tout. Grâce à cette méthode, le signal devrait être visible à la surface. Mais en sous-sol, il sera d'autant plus net.

Pour construire un instrument d'une telle précision, il faut agrémenter la balance à fléau de quelques astuces techniques. Les infimes oscillations sont mesurées par des systèmes laser et l'ensemble de l'appareil doit être placé sous vide et refroidi en dessous de 90 kelvins (environ $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$). En outre, les échantillons doivent suivre un cahier des charges complexe. Ils doivent chauffer et se refroidir vite et de façon uniforme, et présenter un effet Casimir le plus fort possible.

Du point de vue mécanique, le dispositif constitue un défi: comment fixer la balance de sorte à limiter les vibrations dues à l'environnement, tout en étant assez précis pour détecter les moindres variations de poids des échantillons? Les détecteurs d'ondes gravitationnelles



Les chercheurs exploitent le savoir-faire acquis sur l'interféromètre géant « Virgo »



Ligo et *Virgo* ont été confrontés aux mêmes questions. Une solution a consisté notamment à suspendre les miroirs des interféromètres par des fils afin de réduire le bruit parasite. Comme Enrico Calloni, plusieurs de ses collègues ont participé au développement de *Virgo* et ils appliquent leur savoir-faire acquis sur l'interféromètre géant à leur nouvelle expérience. La balance est donc suspendue et non fixée au sol. Différents systèmes sont ajoutés pour régler la balance à distance sans avoir à y toucher ou pour amortir par un dispositif à induction les vibrations parasites, encore une fois sans entrer en contact avec les bras.

Pour mesurer les minuscules oscillations, les spécialistes utilisent un interféromètre qui enregistre même les plus petites variations d'angle de basculement: un rayon laser est envoyé sur

une séparatrice, qui achemine deux faisceaux vers la partie inférieure de la balance (voir l'encadré page 54), où ils sont réfléchis par des miroirs. Les faisceaux sont ensuite de nouveau réunis par d'autres miroirs et renvoyés vers un détecteur. Si le fléau de la balance est en équilibre, les deux rayons parcourent exactement la même distance. En revanche, si le bras est légèrement incliné dans une direction, la distance des deux trajets diffère. Cela se traduit par une variation de l'intensité dans le détecteur.

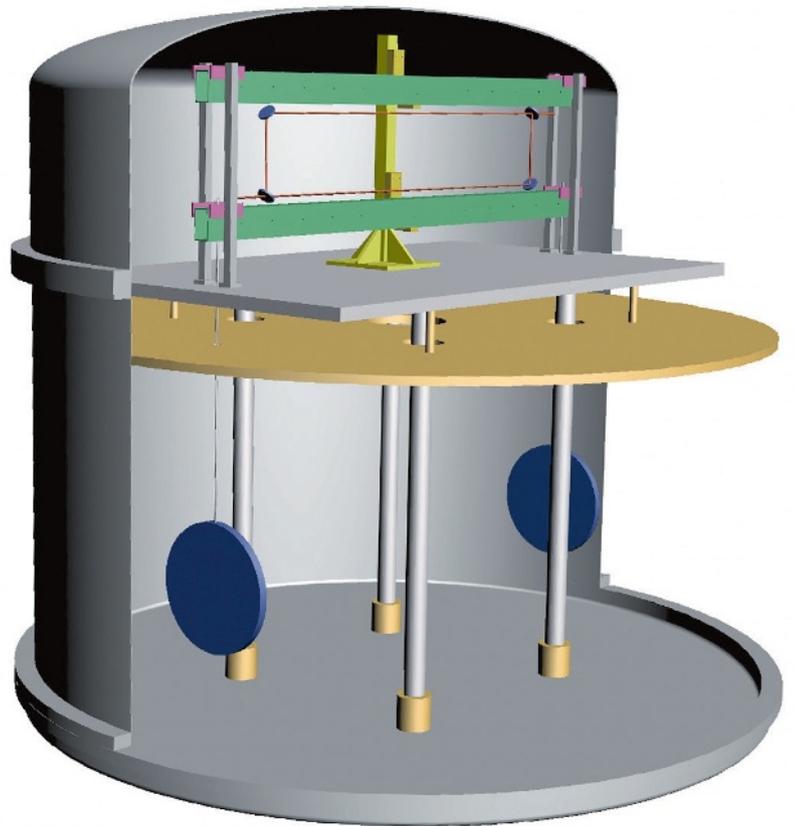
UN SISMOMÈTRE ULTRAPRÉCIS

Pour tester la précision de l'interféromètre de leur balance, les chercheurs ont commencé par construire un prototype. Contrairement à l'appareil final, celui-ci n'est pas suspendu par des fils, mais solidement fixé au sol; il opère à température ambiante et est plus petit que la version définitive. Il est néanmoins déjà capable de mesurer l'activité sismique avec une extrême précision. « À ma connaissance, il s'agit du sismomètre le plus précis actuellement disponible », déclare Enrico Calloni. Il fonctionne si bien que les physiciens ont décidé de fabriquer un deuxième prototype qui mesure les secousses du sol dans le laboratoire de l'interféromètre *Virgo*.

Entre-temps, les chercheurs ont également monté la version finale de la balance d'Archimède et l'ont expédiée en Sardaigne. La structure mesure près de 2 mètres de hauteur et environ 1,50 mètre de largeur. Elle se compose de deux poutres qui peuvent osciller librement. Les échantillons sont fixés sur le bras inférieur, tandis que le bras supérieur sert de référence. C'est sur ce dernier que sont fixés les miroirs et les séparateurs de faisceau pour le système laser.

L'assemblage complet du dispositif est un vrai défi, car l'expérience est comme une poupée russe, cachée à l'intérieur de trois enceintes métalliques. La première qui entoure au plus près la balance constitue la chambre à vide. La deuxième enveloppe est remplie d'azote liquide. Le troisième récipient est vidé de son air pour agir comme un Thermos et éviter que l'azote ne se réchauffe trop vite. Il faut également prévoir le passage de nombreux câbles reliant la balance à l'extérieur, câbles qui doivent résister à des conditions extrêmes de vide et de température très basse. Au final, l'ensemble de la structure mesurera environ 5 mètres de hauteur et de diamètre, pour un poids de plusieurs tonnes.

La conception des échantillons a aussi été une étape délicate. Lorsque Enrico Calloni a imaginé la version initiale de l'expérience d'Archimède, il voulait utiliser des matériaux constitués de trois couches, la couche supérieure et la couche inférieure étant supraconductrices. Ces dernières jouent le rôle des plaques métalliques



Le schéma indique les éléments essentiels de la balance d'Archimède: les deux bras (en vert), le système laser (en rouge) et les deux échantillons quasi identiques suspendus aux extrémités du bras inférieur (disques bleus). L'ensemble sera scellé dans une triple cloche pour mettre l'expérience sous vide et à basse température. À droite, la balance est en cours d'assemblage. Les deux bras sont déjà installés, ainsi que l'interféromètre.

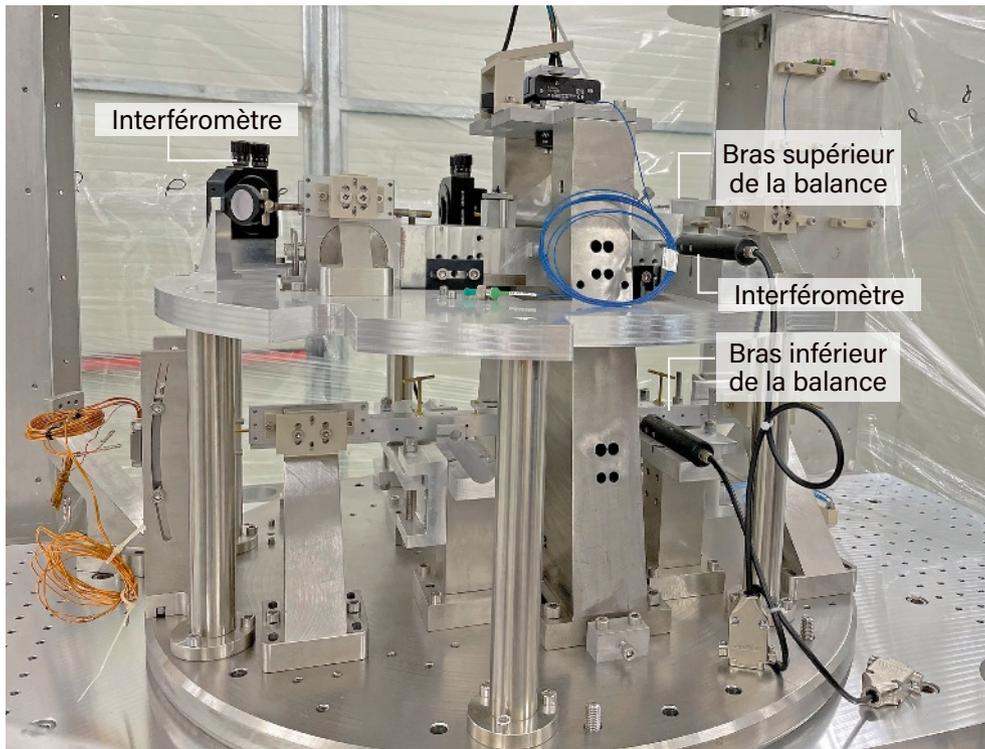
de l'expérience qui met en évidence l'effet Casimir. L'intérêt est qu'ici la structure cristalline est rigide, donc la distance entre les deux plans conducteurs reste inchangée. La poussée d'Archimède qui s'applique sur cette cavité devrait donc être constante.

Pendant, une seule cavité ne produit pas un effet assez important pour être mesurable. L'idée est alors d'en empiler plusieurs. Une telle cavité mesurant 200 nanomètres d'épaisseur, il faut un système qui mesure plusieurs centimètres d'épaisseur pour avoir la sensibilité requise. Or, il est quasiment impossible de chauffer et de refroidir de façon uniforme un solide de cette taille – et encore moins dans des intervalles de temps aussi courts que ceux envisagés pour l'expérience.

Quelques années après cette idée de départ, Enrico Calloni est tombé par hasard sur une publication d'Achim Kempf, de l'université de Waterloo, au Canada. Le physicien y calculait la force de l'effet Casimir dans certains cristaux supraconducteurs. Celle-ci semblait assez prononcée pour être utilisée dans l'expérience d'Archimède. La particularité de ces cristaux: ils ne font que quelques nanomètres d'épaisseur. Ainsi, en les superposant, l'échantillon ne mesurerait que quelques millimètres.

UN SANDWICH POUR CASIMIR

Cela semblait presque trop beau pour être vrai. Enrico Calloni en a parlé à des collègues et leur a demandé s'ils pouvaient confirmer les



résultats du physicien canadien. Ce domaine de recherche est encore peu exploré et souffre de questions sans réponse, ne serait-ce que pour comprendre pourquoi certains matériaux sont supraconducteurs à « haute température », c'est-à-dire à plusieurs dizaines de degrés au-dessus du zéro absolu. Pour vérifier les calculs d'Achim Kempf, Luigi Rosa, de l'INFN (Institut national italien de physique nucléaire), à Naples, a choisi une approche théorique différente et a retrouvé le même résultat.

Les échantillons se présentent sous la forme de deux disques d'une dizaine de centimètres de diamètre et de quelques millimètres d'épaisseur. Pour chauffer et refroidir les échantillons de façon uniforme et sans que l'apport de chaleur ne perturbe la balance, les chercheurs les placent dans une boîte noire qui fonctionne comme une sorte de four. Éclairée de l'extérieur par un laser, elle s'échauffe et transmet la chaleur à la structure cristalline de façon homogène de tous les côtés. Lorsque le laser est éteint, l'azote liquide refroidit à nouveau le système. Ce changement est relativement rapide, il s'effectue en quelques dixièmes de seconde.

Pour être efficace, la transition de l'état isolant à l'état supraconducteur doit être la plus abrupte possible. Le supraconducteur doit passer d'un état à l'autre lorsque la température varie d'un seul degré. Toutefois, si le processus de fabrication ne produit pas des échantillons assez purs (dénués d'impuretés

ou de défauts cristallins), la transition peut s'étaler sur plusieurs degrés. Les expérimentateurs ont travaillé en étroite collaboration avec le fabricant des cristaux. En procédant à plusieurs essais, ils ont trouvé ensemble le candidat le plus approprié de la famille des cristaux décrite par Achim Kempf.

Les différents composants de l'expérience d'Archimède sont ainsi tous prêts, en principe... Et les préparatifs battent leur plein. Les chercheurs sont impatients de pouvoir commencer les mesures. Si, d'après ces dernières, les particules virtuelles se comportent comme la matière ordinaire dans le champ gravitationnel, on saura alors définitivement que les fluctuations du vide jouent un rôle dans les équations d'Einstein. Par conséquent, elles devraient avoir des effets très importants à l'échelle cosmique. Dans ce cas, les cosmologistes devront expliquer ce qui supprime l'influence de l'énergie du vide dans l'Univers.

En revanche, si les oscillations de la balance diffèrent des prédictions standard, cela ouvrirait la voie à une toute nouvelle physique – un résultat extraordinaire qui demandera à être confirmé par d'autres expériences. Il restera alors à comprendre comment les particules virtuelles se comportent précisément en présence de gravité. Ou à repenser le lien qui unit l'énergie et la masse... « Nous ne voulons pas faire de pronostics pour ne pas fausser l'expérience, explique Enrico Calloni, mais dans tous les cas le résultat sera passionnant. » ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Calloni *et al.*, **High-bandwidth beam balance for vacuum-weight experiment and Newtonian noise subtraction**, *European Physical Journal Plus*, 2021.

A. Allocca *et al.*, **Picoradiant tiltmeter and direct ground tilt measurements at the Sos Enattos site**, *European Physical Journal Plus*, 2021.

E. Calloni *et al.*, **Towards weighing the condensation energy to ascertain the Archimedes force of vacuum**, *Physical Review D*, 2014.

A. Allocca *et al.*, **Measuring the influence of Casimir energy on superconducting phase transitions : A cross-correlation data analysis**, en ligne sur arXiv, 2012.

E. Calloni *et al.*, **Vacuum fluctuation force on a rigid Casimir cavity in a gravitational field**, *Physics Letters A*, 2002.