

tridimensionnels pourraient être parallèles à la nôtre et placées à moins de un millimètre de la nôtre (voir la figure 5). En outre, bien que toutes les particules du Modèle standard soient nécessairement collées à la membrane qui constitue notre univers, on peut supposer que des particules autres que le graviton ne font pas partie du Modèle standard et se propagent dans les dimensions supplémentaires. Loin d'être vides, les dimensions cachées contiendraient une multitude de structures intéressantes, voire d'autres univers...

L'hypothèse de particules se mouvant dans d'autres dimensions expliquerait deux des plus épais mystères de la physique des particules et de la cosmologie. Les physiciens des particules ignorent en effet si les neutrinos (des particules intervenant dans l'interaction électrofaible) ont une masse ou non. La question est importante pour plusieurs raisons, notamment parce que les neutrinos sont si nombreux dans l'Univers qu'ils déterminent probablement son évolution. Des résultats expérimentaux récents, au Japon, indiquent que les neutrinos auraient une masse non nulle. Or la théorie des dimensions cachées permet de construire un mécanisme pour conférer une masse aux neutrinos et expliquer pourquoi ces masses sont si faibles : elle prévoit que les neutrinos interagissent avec une particule qui habiterait les dimensions cachées. Cette interaction apparaîtrait faible dans nos trois dimensions d'espace, car elle aurait surtout lieu dans les autres dimensions. C'est pourquoi les neutrinos n'auraient qu'une masse faible.

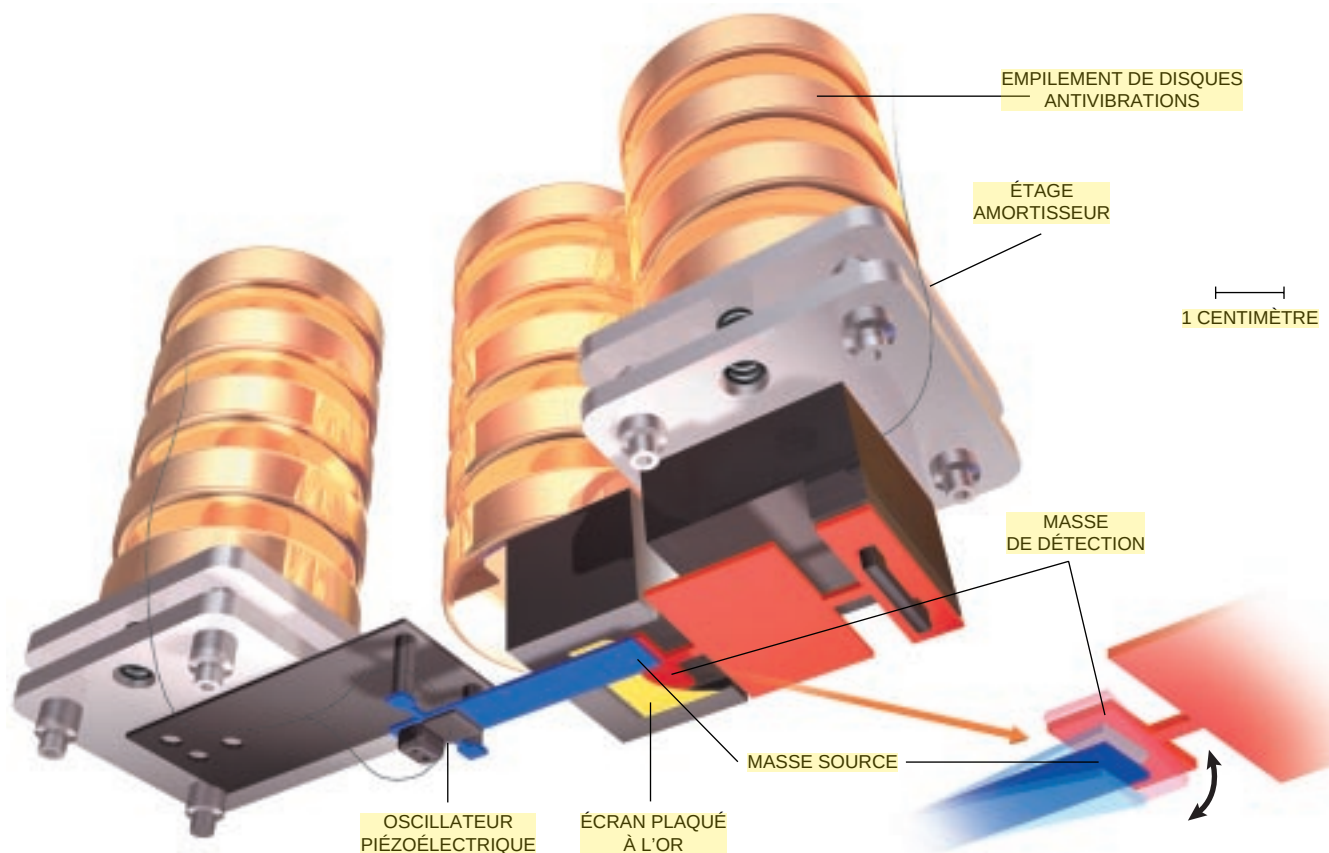
Le problème de la masse cachée de l'Univers est un autre mystère, qui se résoudrait grâce aux dimensions cachées. Invisible, comme son nom l'indique, la «matière noire» semble représenter plus de 90 pour cent de la masse de l'Univers, mais les cosmologistes ne la trouvent pas. Serait-elle dans un ou plusieurs univers parallèles, à partir desquels, elle affecterait notre Univers par l'unique intermédiaire de la gravité? Le caractère invisible de cette matière s'expliquerait alors facilement. Les photons étant confinés à notre membrane, la matière contenue dans les dimensions parallèles n'enverrait aucune lumière vers nos yeux.

Tous les types d'univers parallèles sont envisageables. Il n'y a en effet aucune raison pour que de tels univers aient beaucoup en commun avec le

nôtre, sinon la gravitation. *A priori*, un univers parallèle serait constitué de particules différentes, soumises à des forces différentes, peut-être même confinées dans des membranes au nombre de dimensions différentes. L'une des plus fascinantes possibilités est cependant celle où l'univers parallèle est... le nôtre. Imaginons que la membrane sur laquelle nous vivons soit «pliée» plusieurs fois dans les dimensions supplémentaires (voir la figure 5). Les objets placés de part et d'autre d'un pli pourraient être à la fois à des millions d'années-lumière les uns des autres, à l'intérieur des trois dimensions, et à un millimètre les uns des autres dans les dimensions supplémentaires. Comme la lumière qu'ils émettent doit se propager jusqu'au pli avant de nous revenir, les photons correspondants pourraient être en route depuis la formation de l'Univers! Cependant, nous percevrions l'effet gravitationnel des objets situés au-delà du pli par les gravitons, qui nous atteindraient rapidement. Qu'il s'agisse de particules microscopiques, d'étoiles ou de galaxies ordinaires, ces masses cachées sous les plis de l'Univers seraient à l'origine de nombre d'effets observables intéressants, tels que des ondes gravitationnelles émises par des supernovae invisibles ou d'autres processus astrophysiques violents. À l'aide des détecteurs d'ondes gravitationnelles qui sont en construction, on traquera notamment de tels phénomènes : on cherchera des sources importantes de rayonnement gravitationnel qui ne sont associées à aucune source matérielle visible... de ce côté-ci du pli.

D'autres théories sont possibles

L'approche théorique que nous avons proposée n'est pas la première qui considère de grandes dimensions cachées. Dès 1990, à l'École polytechnique, Ignatios Antoniadis a montré comment certaines dimensions de la théorie des cordes pouvaient atteindre 10^{-19} mètre. Toutefois, il avait conservé l'échelle de Planck aux alentours de 10^{-35} mètre. En 1996, à Princeton, Petr Horava et Edward Witten remarquaient qu'une unique dimension supplémentaire de 10^{-30} mètre suffirait à unifier la gravitation et les autres forces dans un cadre supersymétrique, aux environs de 10^{-32} mètre. Reprenant cette



8. UN OSCILLATEUR À TORSION, construit à l'Université du Colorado, mesure des forces de gravitation à des distances comprises entre 0,05 et 1,0 millimètre. Des cristaux piézo-électriques font vibrer une lame en tungstène (en violet) comme un plongeur. Toute force agissant entre la masse source et le détecteur (également en tungstène, en rouge) produit des oscillations de torsion du détecteur (cartouche), qui sont détectées par un dispositif électronique. Un bouclier recouvert d'une mince couche

d'or supprime les forces électrostatiques, et la suspension des piles d'isolation en laiton empêche les vibrations de se propager de la source au détecteur. Les boucliers électrostatiques entourant le dispositif ne sont pas représentés ici. On attend cette année les résultats des expériences effectuées à la température ambiante. Ultérieurement, afin d'obtenir des mesures plus précises, on refroidira le dispositif à l'hélium liquide, jusqu'à une température de quatre kelvins (-269°C).

idée, Joseph Lykken a ensuite tenté d'abaisser l'échelle d'unification à 10^{-19} mètre, mais sans invoquer de grandes dimensions supplémentaires. De leur côté, Keith Dienes et Tony Gherghetta, au CERN, ont observé en 1998 que des dimensions supplémentaires de rayon inférieur à 10^{-19} mètre permettraient une unification des forces à des distances bien supérieures à 10^{-32} mètre.

Après la publication de notre théorie, en 1998, plusieurs propositions dérivées sont apparues. Toutes font appel aux mêmes ingrédients de base : des dimensions supplémentaires cycliques et un modèle de monde sur une membrane. Ainsi, nos collègues Lisa Randall et Raman Sundrum ont proposé que la gravitation soit confinée dans une membrane à cinq dimensions infinies (non cycliques). Dans un tel univers, la gravitation serait nécessairement plus faible, car nous ne serions pas sur la membrane où elle se fait sentir.

Toutes ces théories cherchent différemment à résoudre le même pro-

blème de la hiérarchie. Pendant 20 ans, on a laissé l'échelle de Planck à 10^{-35} mètre tout en supposant que les interactions changent à partir de 10^{-19} mètre. Cette approche a le défaut de reléguer toute tentative de quantifier la gravitation au statut de pure spéculation théorique, à jamais hors de portée de l'expérience! Les deux années écoulées ont révélé une nouvelle voie. Si des dimensions cachées existent, si nous détectons bientôt des écarts par rapport à la loi de New-

ton, si le LHC révèle l'existence de minuscules trous noirs et d'états exotiques dus aux vibrations des cordes, la théorie quantique de la gravitation et celle des cordes deviendront des théories réfutables. Quoi qu'il en soit, l'étude du comportement de la gravité dans le domaine submillimétrique va enfin être entreprise. Avant 2010, nous appréhenderons mieux pourquoi la gravitation est si faible et nous saurons peut-être dans quel univers nous vivons.

Nima ARKANI-HAMED, Savas DIMOPOULOS et Georgi DVALI ont inventé la théorie des dimensions supplémentaires alors qu'ils étaient réunis à l'Université de Stanford, en février 1998. N. Arkani-Hamed est physicien à l'Université de Berkeley. S. Dimopoulos est professeur de physique à l'Université de Stanford. G. Dvali est professeur de physique à l'Université de New York.

Michael DUFF, *Les nouvelles théories des cordes*, in *Pour la Science*, avril 1998.

Edward KEARNS, Takaaki KAJITA et Yoji TOITSUKA, *La détection des neutrinos massifs*, in *Pour la Science*, septembre 1999.

Brian GREENE, *The Elegant Universe : Superstrings, Hidden Dimensions and the Quest for the Ultimate Theory*, W.W. Norton, 1999.

Steven WEINBERG, *Vers l'unification de la physique*, in *Pour la Science*, janvier 2000.

Chris Llewellyn SMITH, *Le Grand Collisionneur de hadrons*, in *Pour la Science*, septembre 2000.