



La gravité à très courte distance

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-PHILIPPE UZAN

La force de gravitation est bien connue à grande distance, mais reste un mystère en dessous du millimètre.

La gravitation est étudiée depuis longtemps, pourtant elle est mal connue. Sa faiblesse extrême la rend difficile à mesurer à petite échelle. Une revue rapide de la progression des idées sur cette interaction révèle tout l'intérêt des expériences entreprises aujourd'hui pour mieux comprendre cette force.

L'étude moderne de la gravitation commence avec Galilée au XVII^e siècle. Le savant italien (1564-1642) étudie le premier la chute des corps en détail, et montre que le mouvement d'une bille sur un plan incliné s'accélère uniformément. Il remarque aussi que la résistance de l'air ralentit plus les corps légers que les corps lourds. Qu'en est-il dans le vide? Galilée se pose la question, et réalise de cette façon que l'accélération d'un corps en chute libre ne dépend ni de sa masse, ni de sa forme, ni de sa composition chimique. Un kilogramme de fer tombe aussi vite qu'un kilogramme de plume ou d'acide sulfurique... Toutefois, à l'époque de Galilée, la découverte est d'importance. En fait, elle traduit un principe physique essentiel toujours mal compris aujourd'hui : le principe d'équivalence. Il stipule que la masse gravitationnelle, celle qui intervient dans le calcul du poids d'un corps, et la masse inertielle, celle qui quantifie la résistance d'un corps à une accélération, sont une seule et même grandeur.

Isaac Newton (1642-1727) est le premier à publier une véritable théorie de la gravitation en 1687. Il y énonce la «loi d'attraction universelle», selon laquelle l'intensité de la force que deux corps exercent l'un sur l'autre est proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Newton fonde ainsi la théorie de la gravitation sur le principe d'équivalence et sur la loi d'attraction universelle. Deux lois qui, aujourd'hui encore, n'ont pas été vérifiées dans toutes les situations.

Au début du XX^e siècle, Albert Einstein généralise la théorie de la gravitation. Il fait du principe d'équivalence le fondement de la nouvelle théorie, la relativité

générale. La gravitation change de statut : elle est réinterprétée comme la conséquence de la géométrie de l'espace-temps, elle-même déterminée par son contenu matériel et énergétique. Ainsi la géométrie de l'espace n'est pas la même dans le voisinage d'une grande masse (étoile) et à distance de cette étoile. En relativité générale, la théorie de Newton correspond à un cas limite, celui où le champ de gravitation a une faible intensité, comme c'est le cas par exemple loin d'une étoile.

La gravitation a d'abord été testée grâce à l'observation des mouvements planétaires. Dans la nature, il n'y a que deux forces qui agissent sur de grandes distances : la gravitation et la force électrostatique. Dans la pratique, cette dernière n'a cependant qu'une portée limitée. Les charges électriques sont disposées de façon à créer des ensembles neutres, c'est-à-dire sans charge électrique. Le champ électrique produit par une charge est masqué dans la plupart des cas par celui d'une charge voisine, de signe opposé. Puisqu'il n'existe pas de masses négatives, il en va tout autrement avec la gravité. Cette force n'est jamais répulsive, et pour cette raison, domine toutes les autres à grande distance, où elle est la seule qui subsiste : c'est pourquoi elle a été établie, puis vérifiée aux grandes échelles.

En fait, Newton avait formulé la loi d'attraction universelle afin d'expliquer les lois du mouvement des corps célestes. Trois lois que l'astronome Johannes Kepler avait établies au début du XVII^e siècle grâce aux observations de l'astronome danois Tycho Brahe. Toutefois, le triomphe de la théorie newtonienne ne fut vraiment assuré que le jour où la loi d'attraction universelle expliqua aussi des phénomènes plus compliqués. Le calcul du passage au périhélie de la comète de Halley par Alexis Clairaut en 1759 en fut un ; il démontra toute la puissance de la théorie newtonienne, laquelle fut ultérieurement confirmée par d'autres

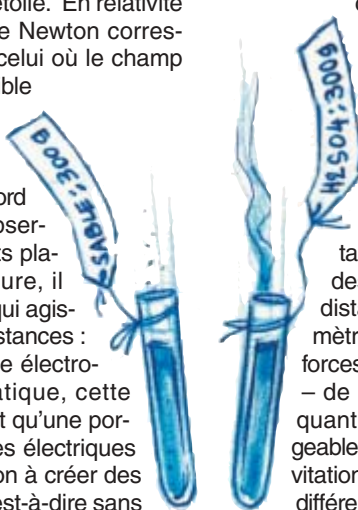
succès. Urbain le Verrier (1811-1877) prédit par exemple l'existence de Neptune, avant que la planète ne fut découverte en 1846. Plus récemment, l'étude par télémétrie laser de l'orbite lunaire (mesure du temps d'aller-retour d'une impulsion laser entre la Terre et la Lune) raffina notre connaissance de la trajectoire du satellite de la Terre, au point que sa position est aujourd'hui connue à un centimètre près!

Ainsi, la loi de Newton est vérifiée dans toutes les interactions gravitationnelles à grandes distances. Que se passe-t-il lors des interactions à très courtes distances, inférieures au millimètre. À cette échelle, d'autres forces courantes dans la matière – de nature électrostatique ou quantique – ne sont plus négligeables vis-à-vis des forces de gravitation. Il devient alors difficile de différencier les rôles joués par chacune de ces forces. C'est Henri

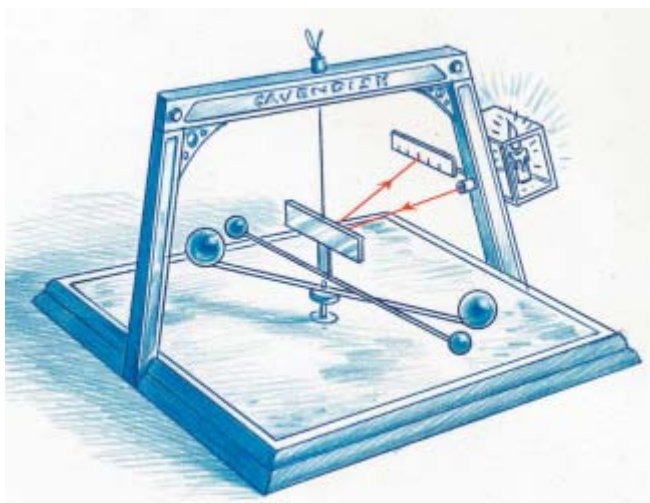
Cavendish (1731-1810), qui fit la première tentative pour mesurer la gravitation à petite échelle. Il publia en 1798 les résultats de son expérience de «pesée du monde».

Le montage confirmait la validité de la loi d'attraction universelle et livrait la première estimation expérimentale fine de la constante de gravitation universelle G , c'est-à-dire du coefficient qui intervient dans la loi d'attraction universelle. Cavendish

Galilée (en haut) fut le premier à réaliser que la façon dont un corps chute ne dépend pas de sa composition chimique. Newton (ci-contre) conçut la première théorie de la gravitation.



Dessins de Bruno Vacaro



1. Cette machine, inventée il y a 200 ans par Cavendish, livra la première estimation expérimentale de la constante de gravitation universelle : les sphères, suspendues à un pendule de torsion sont attirées par des boules placées à proximité. L'attraction entre les masses s'oppose à la torsion du fil. Le pendule oscille et la mesure de sa période d'oscillation conduit à la constante de gravitation.

utilisait un pendule de torsion à l'extrémité duquel sont accrochées deux petites sphères pesantes (voir la figure 1). Lorsque deux boules massives identiques sont placées à proximité de chacune des deux sphères, celles-ci sont attirées et le pendule tourne. Le système est conçu de telle façon que l'attraction gravitationnelle entre les grandes et les petites sphères s'oppose à la torsion du fil. L'attraction des masses fait tourner le pendule d'un très petit angle, et influe sur sa période d'oscillation ; la mesure de la période conduit notamment à G . Pour comprendre quelle virtuosité expérimentale Cavendish déploya, il faut réaliser que, dans ce montage, la force d'attraction entre les corps est 500 millions de fois plus petite que leur poids !

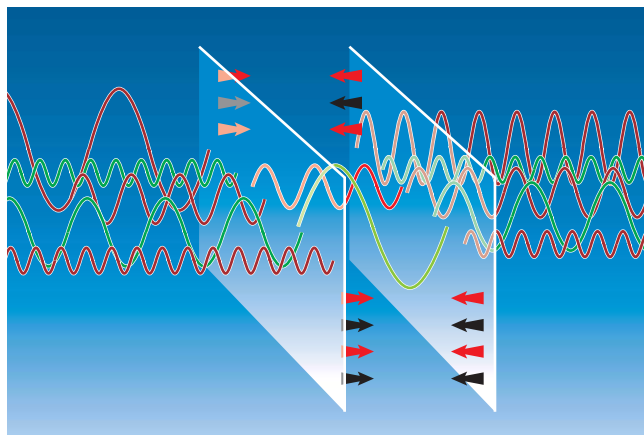
VAN DER WAALS ET CASIMIR

Aller plus loin était difficile. Un problème est la nature cumulative de la gravité à petite échelle. Ainsi, quand un corps interagit par la gravitation avec un autre, chacune de ses particules est concernée ; leur position dans l'espace joue un rôle essentiel dans la force d'attraction résultante. Une difficulté que le cas de deux sphères quasi tangentes illustre bien. Proportionnelle au produit de leurs masses (et donc à R^3 au carré, soit R^6) divisé par le carré de leurs distances (R^2), leur attraction gravitationnelle varie selon la puissance quatrième de leur rayon (R^4). Cette dépendance implique que l'attraction gravitationnelle entre deux sphères est très petite à courte distance. Pour pallier cette difficulté, on choisit des dispositifs, où la plupart des particules des deux corps sont à la même distance, par exemple en utilisant des plaques parallèles. Malheureusement, une autre difficulté gêne l'étude de la gravitation entre

deux plaques : deux forces s'ajoutent à l'attraction gravitationnelle. La première, la force de Van der Waals, est une force intermoléculaire d'origine électrostatique, qui apparaît entre particules proches. La seconde, la force de Casimir, est d'origine quantique.

Le physicien théoricien Hendrick Casimir montra en 1948 que les fluctuations quantiques du vide électromagnétique engendrent une force à courte portée entre deux plaques conductrices (voir la figure 2). Quelle pourrait en être la cause ? Représentons-nous le vide comme une mer agitée de clapot : des vaguelettes apparaissent à la surface, au hasard, semble-t-il, mais toujours de sorte que le niveau moyen de la mer reste le même. Ces fluctuations du vide correspondent à la superposition d'oscillateurs (photons, paires particules-antiparticules...) de toutes longueurs d'onde. Comme le clapot à la surface de la mer, ces fluctuations apparaissent et disparaissent sans cesse, et assurent au vide un niveau d'énergie constant.

Que se passe-t-il lorsque l'on plonge dans ce vide agité deux plaques infinies, parfaitement conductrices et parallèles ? Dans l'intervalle qu'elles délimitent, seuls les oscillateurs dont la longueur d'onde est un sous-multiple de la distance séparant les plaques, peuvent exister. On peut les comparer à des cordes de guitare fixées aux deux extrémités, et qui ne vibrent qu'avec des fréquences bien précises. La « pression de rayonnement » engendrée par les fluctuations électromagnétiques est plus faible à l'intérieur qu'à l'extérieur des plaques. Ainsi, une force d'attraction à courte portée règne entre les plaques : à température ambiante, elle varie comme l'inverse du cube de la distance entre plaques. Le calcul montre que pour des plaques carrées en cuivre d'un millimètre d'épaisseur, à



2. Entre deux plaques proches s'exercent les forces de Van der Waals, l'attraction gravitationnelle et la force de Casimir due aux fluctuations quantiques du vide. Entre les deux plaques, seules les longueurs d'onde égales à la distance des plaques ou à des sous-multiples de cette distance sont tolérées. La pression de radiation créée par les ondes extérieures aux plaques tend à les rapprocher.

300 kelvins, et éloignées d'un micromètre, la somme des forces de Van der Waals et de Casimir est égale à la force d'attraction gravitationnelle. Longtemps, l'absence de mesures fiables de la force de Casimir a empêché l'étude de la gravitation à petite échelle. Ce n'est plus le cas depuis qu'en 1997, le physicien américain Steven Lamoreaux mesura la force de Casimir avec précision.

Le principe d'équivalence devait être aussi testé. Les succès des théories qui se fondent sur lui constituent, certes, une sorte de vérification *a posteriori*. Le baron Roland von Eötvös fut le premier à vouloir aller plus loin en 1886. À l'aide d'une version modifiée du dispositif de Cavendish, il montra que l'écart relatif entre masse gravitationnelle et masse inertielle est inférieur à un milliardième. Cette expérience fut reprise et améliorée par Robert Dicke en 1966 et par Vladimir Braginsky en 1972 ; ils en augmentèrent notablement la précision. La future expérience spatiale STEP (*Satellite Test of the Equivalence Principle*) devrait atteindre la précision fabuleuse d'un centième de milliardième de milliardième (10^{-17}) !

Ainsi l'extrême difficulté de réaliser des expériences à très petites distances explique pourquoi la gravité est si mal testée en deçà du millimètre. Y varie-t-elle par rapport à la loi de Newton ? Le vérifier serait précieux : un écart serait un indice de nouvelles structures de l'espace.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au service d'astrophysique du CEA. **Jean-Philippe UZAN**, chargé de recherche au CNRS, travaille au laboratoire de physique théorique de l'Université d'Orsay.

Les enfants d'Einstein, Clifford Will, 1988.
Y.T. CHEN et A. COOK, Gravitational Experiments in the Laboratory, Cambridge University Press, 1993.