

# La relativité

en

1

Complexe, impossible à se représenter, incompatible avec la mécanique quantique... Difficile d'y voir clair quand on parle de la théorie de la relativité générale. Son centenaire est l'occasion de répondre à certaines questions parmi les plus fréquentes sur le sujet.

## Qu'est-ce que la relativité générale ?

**1** La relativité générale est une théorie proposée en 1915 par Albert Einstein pour décrire la gravitation d'une façon qui résout certains problèmes conceptuels de la théorie alors en place – la gravitation newtonienne. Selon cette dernière, les corps massifs exercent entre eux une force dont l'intensité est proportionnelle à la masse de chacun des corps et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Cette force est instantanée : la moindre modification de la position d'un des deux corps se traduit par une modification immédiate de la force que subit l'autre. Cela est en contradiction avec l'un des grands principes établis au début du XX<sup>e</sup> siècle et qui est l'un des piliers de la théorie de la relativité restreinte : aucun effet ne peut se propager plus vite que la vitesse de la lumière dans le vide, ce qui exclut toute causalité instantanée. Pour rendre l'interaction gravitationnelle compatible avec la relativité restreinte, Einstein a dû construire un cadre théorique totalement inédit, en s'appuyant sur des outils mathématiques eux aussi nouveaux pour les physiciens de l'époque. Au fil des décennies, cette théorie a été confirmée par de nombreuses expériences. Elle constitue aujourd'hui une des théories les plus abouties en physique.

## Quels sont ses fondements ?

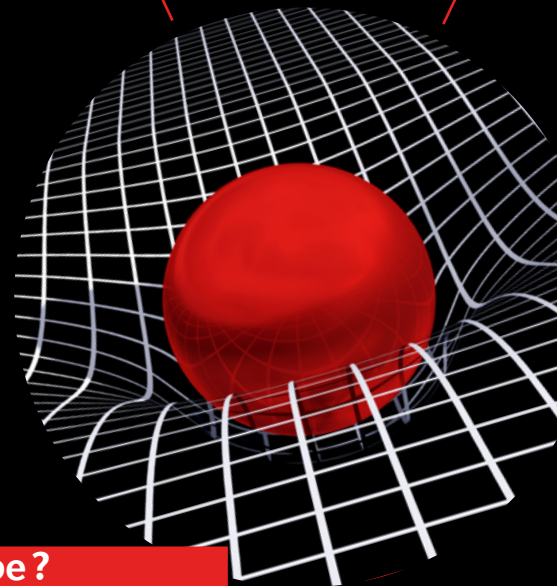
**2** Toutes les théories physiques s'appuient sur quelques principes, des affirmations qu'on ne peut pas prouver directement mais dont les conséquences, elles, sont testables par l'expérience. La relativité générale est fondée sur le « principe d'équivalence » qui stipule que pour un observateur en chute libre, sous l'influence de la gravitation, tout se passe comme s'il était au repos dans une région où la gravité serait localement nulle. C'est la généralisation d'une observation que font, par exemple, les passagers de la Station spatiale internationale. En orbite autour de la Terre (c'est une forme de chute libre), ils sont en état d'apesanteur : ils semblent ne pas ressentir les effets de la gravité. Ce principe, malgré son énoncé assez simple, est extrêmement riche de conséquences. Par exemple, l'espace-temps – défini en relativité restreinte par l'ajout d'une dimension temporelle à notre espace tridimensionnel usuel et par une redéfinition de la notion de distance – peut se déformer et acquérir une courbure en présence de corps massifs. En outre, si on suppose que la nouvelle gravitation relativiste doit coïncider avec la gravitation newtonienne dans les conditions usuelles – où la déformation de l'espace-temps est faible –, la relativité générale d'Einstein découle de façon très naturelle du principe d'équivalence et en constitue la solution la plus simple.

# 2 générale

## questions

RICHARD  
TAILLET

3



### Comment se représenter l'espace-temps courbe ?

**A**vant toute chose, il faut bien noter qu'il n'est pas nécessaire de se faire une image mentale d'un espace-temps courbe pour déterminer très précisément les propriétés mathématiques de cet objet (de la même façon qu'il n'est pas nécessaire, par exemple, de visualiser ce que représentent les nombres 10 000 000 000 et 1 000 000 000 pour les multiplier entre eux). Le premier obstacle pour se représenter l'espace-temps est qu'il est constitué de quatre dimensions. On peut tout de même essayer en commençant par imaginer un espace (sans le « -temps ») courbe à deux dimensions au lieu de trois. Il devient alors possible de représenter la déformation de cet espace par une masse (voir la figure ci-dessus). La peau d'une pomme

est un autre exemple de surface courbe à deux dimensions. La courbure se manifeste par exemple de la façon suivante : deux fourmis voisines qui partent parallèlement l'une à l'autre sur la pomme, puis marchent « tout droit » sans s'occuper de leur voisine, finissent par s'y croiser. L'espace tridimensionnel qui entoure les étoiles et les planètes a des propriétés similaires et deux rayons lumineux initialement parallèles peuvent finir par se croiser. En revanche, se représenter mentalement la courbure de l'espace-temps est une tâche ardue. Même la version « plate », celle de la relativité restreinte, a des propriétés géométriques très éloignées de l'intuition quotidienne (les « distances » peuvent y être positives ou négatives, par exemple).

4

## Qu'est-ce qu'une géodésique ?

Une géodésique est le chemin le plus court entre deux points sur une surface courbe, ou plus précisément un chemin dont une toute petite déformation conduit à un allongement. Les fourmis évoquées précédemment, qui marchent tout droit à leur petite échelle, suivent des géodésiques sur la sphère. La géodésique généralise la notion de ligne droite de la géométrie usuelle pour un espace-temps courbe. En effet, la relativité générale remplace le principe d'inertie au cœur de la loi de Newton - « un corps qui n'est soumis à aucune force est animé d'un mouvement rectiligne uniforme » - par « un corps qui n'est soumis à aucune force progresse selon une géodésique de l'espace-temps ». Le point

crucial est le suivant : la gravitation, en relativité générale, n'est pas considérée comme une force, mais comme la manifestation de la courbure de l'espace-temps. La présence des corps massifs, tel le Soleil, courbe l'espace-temps qui l'entoure. Cela déforme les géodésiques : les trajectoires qui étaient rectilignes en l'absence de gravitation deviennent elliptiques (en toute rigueur, elles prennent des formes très similaires à des ellipses) en présence de gravitation. Une pomme qui tombe de l'arbre suivrait une trajectoire elliptique si elle n'était pas arrêtée par le sol. Pour maintenir un corps sur une trajectoire qui n'est pas une géodésique, il faut lui appliquer une force.

5

## La relativité générale implique-t-elle que la gravitation newtonienne est fautive ?

Disons plutôt que la gravitation newtonienne, en toute rigueur, ne fournit pas une description exacte des phénomènes gravitationnels : elle ne permet pas d'expliquer plusieurs faits expérimentaux que nous décrivons plus loin (dilatation des durées, précession du périhélie de Mercure, etc.). Toutefois, dans certaines conditions (en particulier lorsque les champs gravitationnels sont faibles et lorsque les vitesses des corps qu'on étudie sont faibles devant celle de la lumière), la description newtonienne peut être suffisamment précise pour les problèmes que l'on cherche à résoudre. Par exemple, elle permet d'envoyer des modules ou des sondes se poser sur différents corps de notre Système solaire, la Lune, des comètes, des astéroïdes, etc. Il est ici question de la notion de « domaine de validité » d'une théorie. La relativité générale a un domaine de validité plus étendu, qui englobe celui de la gravitation newtonienne, mais qui a aussi ses limites (voir la question 11).

## Que devient le temps dans le cadre

La relativité générale, bâtie sur les principes de la relativité restreinte, hérite de certaines caractéristiques de cette dernière. D'après la relativité restreinte, un observateur qui regarde passer deux horloges identiques à des vitesses différentes ne les voit pas fonctionner au même rythme. Cela reste vrai en relativité générale, et se complique : un observateur qui regarde deux horloges immobiles, situées dans des champs gravitationnels différents, ne les voit pas non plus fonctionner au même rythme. L'horloge située dans un champ gravitationnel plus intense (plus près de la surface de la Terre, par exemple) semble ralentie par rapport à l'autre. L'effet devient important dans une situation extrême (à proximité d'un trou noir) comme dans le film *Interstellar* de Christopher Nolan, où les différences de temps écoulé se comptent en années entre les personnages. Dans la vie courante, l'effet

6



## de la relativité générale?

est négligeable, mais a été confirmé par de nombreuses expériences en utilisant des horloges très précises, sur Terre et dans l'espace. Il doit être pris en compte dès qu'on cherche à comparer les signaux issus d'horloges situées à des altitudes différentes. C'est notamment le cas pour la localisation par GPS. On peut montrer que cet effet de dilatation temporelle est une conséquence directe du principe d'équivalence. La mise à l'épreuve expérimentale de cet effet fournit donc un moyen de tester directement la validité de ce principe.

## Quelles preuves avons-nous de la relativité générale?

Il existe plusieurs phénomènes physiques que l'on ne sait aujourd'hui expliquer que grâce à la relativité générale. Certains d'entre eux ont même été prédits par cette théorie avant d'être effectivement confirmés par des mesures: cette séquence prédiction-confirmation constitue ce qu'on a de plus proche d'une « preuve » en science. Le premier de ces phénomènes est la forme de la trajectoire des planètes du Système solaire. Elle diffère légèrement d'une ellipse parfaite pour plusieurs raisons (non-sphéricité du Soleil, influence réciproque des planètes), mais ce n'est que par la description de la relativité générale que l'on parvient aujourd'hui à rendre compte de façon satisfaisante de la non-ellipticité de ces trajectoires.

L'explication de l'avance du périhélie de Mercure (le fait que la direction du grand axe de l'ellipse subit une petite rotation à chaque révolution) constitue historiquement le premier succès de cette théorie. La relativité générale permet aussi de rendre compte de la déviation des rayons lumineux par les champs gravitationnels de corps

massifs, même dans le vide. Cette déviation de la lumière conduit au phénomène de « lentille gravitationnelle »: le champ gravitationnel d'une galaxie ou d'un amas de galaxies peut dévier la lumière émise par un objet situé en arrière-plan de façon à en focaliser le rayonnement. Les astronomes utilisent aujourd'hui cet effet pour étudier des objets si éloignés dans l'Univers qu'ils seraient trop peu lumineux sans l'effet de lentille gravitationnelle.

De nombreux autres effets prédits par la relativité générale ont été mis en évidence au fil des années. En 1959, les physiciens Robert Pound et Glen Rebka ont mis en évidence l'effet de dilatation gravitationnelle du temps. Parmi les grands succès de cette théorie, on peut aussi signaler la prédiction de l'existence des ondes gravitationnelles, des sortes d'ondulations de l'espace-temps, hypothèse confirmée de façon indirecte par différentes observations astronomiques. Enfin, les succès de la cosmologie moderne, en grande partie fondée sur la relativité générale, peuvent être portés au crédit de cette dernière.

# 8

## Comment la relativité générale intervient-elle en cosmologie ?

La cosmologie moderne – l'étude de la structure et de l'évolution de l'Univers dans son ensemble – résulte de l'application des lois de la relativité générale à l'Univers tout entier. Einstein lui-même et le physicien et astronome néerlandais Willem de Sitter lancent le mouvement en 1917, suivis, entre autres, du Russe Alexandre Friedmann et du Belge Georges Lemaître. Dans les années 1930, il devient clair que nous vivons dans un Univers en expansion. La récession apparente des galaxies lointaines – le fait que les galaxies s'éloignent les unes des autres, et ce d'autant plus vite

qu'elles sont éloignées (c'est la loi de Hubble) – doit être attribuée à une expansion de l'espace-temps plutôt qu'à un véritable mouvement de ces galaxies.

Cette idée, directement issue de la relativité générale, s'est révélée extrêmement fructueuse. Combinée à la physique des particules, elle permet d'expliquer la formation des éléments légers dans l'Univers primordial, les propriétés du rayonnement de fond cosmologique dans le domaine des ondes radio ou encore la formation des grandes structures cosmiques.

# 9

## Qu'est-ce qu'un trou noir ?

Les trous noirs sont des objets qui confrontent les théoriciens de la relativité générale aux aspects les plus extrêmes de cette théorie. Ces astres courbent l'espace-temps au point que les géodésiques les plus proches de l'astre restent confinées à l'intérieur d'un certain rayon, le « rayon de Schwarzschild ». En des termes plus proches de l'intuition newtonienne, ces corps engendrent une gravité tellement forte que rien ne peut s'en libérer, pas même la lumière, d'où le qualificatif de « noir ». Contrairement à une idée répandue, ce ne sont pas nécessairement des corps très massifs : un corps

léger peut devenir un trou noir si on le comprime suffisamment. En pratique, les trous noirs que l'on observe (indirectement) aujourd'hui sont de deux types : des trous noirs de type stellaire, résultant de l'évolution d'étoiles massives, et des trous noirs de quelques millions de masses solaires, dits « supermassifs », que l'on trouve au centre des galaxies. Certains physiciens envisagent l'existence, dans l'Univers primordial, de trous noirs beaucoup plus légers, de quelques grammes, mais cette hypothèse n'a à ce jour reçu aucune confirmation expérimentale.

# 10

## On a pu dire, au temps d'Einstein, que seules trois personnes comprenaient la relativité générale ; qu'en est-il aujourd'hui ?

La situation a beaucoup évolué de ce point de vue. La relativité générale reste une théorie difficile s'appuyant sur un édifice mathématique qui demande à être dompté par le physicien, mais la plupart des outils mathématiques sont aujourd'hui beaucoup plus accessibles qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle. Par exemple, pour décrire la courbure de l'espace-temps, on fait appel à la géométrie différentielle, une discipline qui était assez nouvelle à l'époque. Les objets mathématiques de base, les « tenseurs », une généralisation des vecteurs, sont utilisés

dans divers domaines de la physique et peuvent être familiers aux chercheurs avant d'étudier la relativité générale. Par ailleurs, depuis la formulation initiale de la théorie, plusieurs grands physiciens ont proposé différentes formulations de la relativité générale, certaines très physiques (par exemple, celle de Steven Weinberg), d'autres très mathématiques, et il est possible d'aborder l'apprentissage de cette théorie sous l'angle qui convient le mieux à sa sensibilité personnelle. C'est une théorie aujourd'hui enseignée au niveau du master, à l'université.

## Quel est le lien entre la relativité générale et la physique quantique ?

Précisément, il n'y en a pas aujourd'hui. C'est l'un des grands problèmes théoriques de la physique moderne. La relativité générale et la théorie quantique ont toutes deux été testées avec succès dans de nombreuses expériences. Elles s'appuient cependant sur des formalismes très différents, mais surtout sur des postulats *a priori* incompatibles. Par exemple, la physique quantique est construite à partir de champs quantiques décrits dans l'espace-temps plat de la relativité restreinte. L'une des premières idées pour les concilier a été de considérer la gravitation comme un champ quantique, mais les calculs donnaient des résultats non physiques. Une théorie quantique de la gravitation constitue l'un des rêves des

physiciens ! Dans la plupart des situations où l'on doit faire appel à la relativité générale, on peut se limiter à une description non quantique des phénomènes, et inversement. C'est une chance, dans la mesure où cela permet de tester la validité de ces deux théories de façon indépendante. C'est aussi la source du problème, car il est difficile de trouver des situations qui donnent des indices sur ce que serait une théorie de la gravitation à la fois quantique et relativiste ! Deux situations retiennent l'attention des spécialistes du domaine : l'Univers primordial et les trous noirs. Dans ces deux cas, la matière atteint des densités phénoménales nécessitant une approche à la fois quantique et relativiste.

# 11

# 12

## A-t-on une piste pour une théorie quantique de la gravitation ?

**P**our construire une théorie de la gravitation quantique qui engloberait la relativité générale et la physique quantique et les rendrait compatibles, il faut inventer un cadre complètement nouveau. Contrairement à ce qui s'est passé historiquement avec le développement de la physique quantique, la nature ne nous livre que très peu d'indices sur ce que pourrait être ce cadre théorique nouveau. Aujourd'hui, deux approches distinctes intéressent les théoriciens du domaine : la théorie des cordes et la gravité quantique à boucles. Dans le premier cas, les objets

élémentaires ne sont plus des points, mais des objets microscopiques étendus (par exemple des cordes), dont la description quantique peut, dans certaines conditions, faire apparaître des interactions qui ressemblent à celles observées, gravitation incluse. Dans le deuxième cas, c'est une description quantique d'un espace-temps discret qui fait émerger des propriétés prometteuses en vue d'une gravitation quantique. Il semble toutefois rester encore un très long chemin à parcourir avant de disposer d'une théorie quantique de la gravitation.

### ■ L'AUTEUR



Richard TAILLET est professeur à l'université Savoie Mont Blanc, à Chambéry, et au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique.

### ■ SUR LE WEB

Le cours d'introduction à la relativité générale de Richard Taillet est disponible en ligne : <http://bit.ly/1iiVIXh>

### ■ BIBLIOGRAPHIE

N. Deruelle, *De Pythagore à Einstein, tout est nombre*, Belin, 2015.

N. Deruelle et J.-Ph. Uzan, *Théories de la relativité*, Belin, 2015.

T. Moore, *Relativité générale*, De Boeck, 2014.

A. Einstein, *La théorie de la relativité restreinte et générale*, Dunod, 2012.

J.-P. Luminet, *Le destin de l'univers : trous noirs et énergie sombre*, Fayard, 2010.

G. Efstathiou *et al.*, *Relativité générale*, De Boeck, 2009.



Ce qu'il y a de plus incompréhensible dans l'Univers, c'est qu'il soit compréhensible.

Albert Einstein [1936]\*

Source : Journal of the Franklin Institute 221