

Einstein

et la relativité

par Jean-Pierre MARATREY

Parmi les innombrables savants qui ont participé aux progrès des sciences au cours de ce siècle, le plus connu et le plus populaire est sans aucun doute Albert Einstein (1879-1955). Il représente l'image du savant hirsute et distrait, toujours plongé dans ses formules.

En fait, il a révolutionné notre façon de voir le monde. Son travail le plus connu est sa théorie de la relativité qui a eu un impact énorme sur notre vision de l'infiniment grand. Il a également contribué à la théorie de l'infiniment petit : la mécanique quantique.

La connaissance de l'Univers avant Einstein

Lors de la naissance d'Albert Einstein en 1879, tout (ou presque...) va pour le mieux dans le meilleur des mondes de la physique. Les lois de Kepler font merveille, et Newton en donne une explication convaincante. Adams et Leverrier, en 1846, découvrent Neptune par le calcul, à l'aide de la théorie de Newton. L'Univers connu, encore petit à cette époque, ne semble plus poser de problèmes insurmontables. C'est le triomphe de la "mécanique classique". L'Univers plat et infini devait céder tous ses secrets. Cependant, quelques points résistaient à l'analyse selon Newton, en particulier, l'orbite de Mercure ne collait pas avec les calculs. Einstein refusa les théories de ses pairs.

Les dates marquantes

1905

Einstein publie, comme thèse de doctorat, trois théories. La première décrit le mouvement d'agitation des molécules (mouvement brownien), la deuxième, l'effet photo-électrique. Il en profite pour émettre quelques suppositions sur la nature de la lumière. La troisième enfin, étudie à fond un principe déjà existant, mais passé sous silence, le principe de relativité. Cette théorie sera appelée plus tard, théorie de la relativité restreinte.

1915

Poussant le raisonnement plus loin, Einstein introduit le phénomène de gravitation dans sa théorie qui devient le relativité générale.

1919

Première validation éclatante de la relativité avec la mise en évidence de la courbure de la lumière. Pendant l'éclipse totale de soleil observée par Eddington.

1921

Einstein reçoit le prix Nobel, non pas pour sa théorie de la relativité, mais pour ses études sur l'effet photo-électrique.

A partir de 1905, il approfondit, avec d'autres les résultats de ses équations et participe à l'élaboration de la mécanique quantique.

Les coups de génie d'Einstein

4 éléments fondamentaux sont à la base des théories de la relativité. Le premier reconnaît la vitesse de la lumière dans le vide comme constante et comme une vitesse maximale autorisée dans l'Univers. Quelques expériences avaient démontré, sans convaincre les physiciens d'alors, la constance de la vitesse de la lumière. Les trois autres coups de génie mettent en valeur des équivalences entre des phénomènes physiques jusqu'alors dissociés. Il s'agit des équivalences entre l'Espace et le Temps, entre la Matière et l'Energie, et entre l'Accélération et la Gravité.

LA RELATIVITÉ RESTREINTE

Le principe de la constance de la lumière dans le vide a été démontré par l'expérience de Michelson. Einstein ajoute que cette vitesse est une limite supérieure infranchissable. Seules les particules immatérielles comme la lumière peuvent l'atteindre. Pour un corps matériel, atteindre

la vitesse de la lumière nécessite une énergie infinie.

Le principe de relativité

Pour illustrer la relativité nous allons prendre un abonnement dans un train un peu spécial, qui nous servira de support à différentes démonstrations, comme Einstein l'a fait lui-même pour se faire comprendre. Pour l'instant, ce train roule en ligne droite à vitesse constante (mouvement de translation uniforme). Nous nous trouvons dans ce train et nous laissons tomber une pomme sur le sol du wagon. Comme l'a judicieusement remarqué Newton, la pomme tombe, pour nous, en ligne droite jusqu'au sol. Un observateur situé en dehors du train, sur le talus, verra la pomme décrire une parabole. Quelle est la vraie trajectoire de la pomme ? Une parabole ou une droite ?

La question n'a de sens que si l'on décrit le système de coordonnées de référence considéré. Si la référence est le train en mouvement, la trajectoire est une droite. Si la référence est le talus, la trajectoire est parabolique.

Le principe de relativité, émis bien avant Einstein, affirme que les phénomènes de la nature se déroulent selon les mêmes lois, quel que soit le système de référence envisagé. Seule la façon de les décrire peut varier. Ce principe est vérifié par la pomme tombant au sol. Le phénomène physique est la chute de la pomme attirée par la gravité (selon Newton) de la Terre. La description de la chute varie selon l'endroit où se trouve l'observateur.

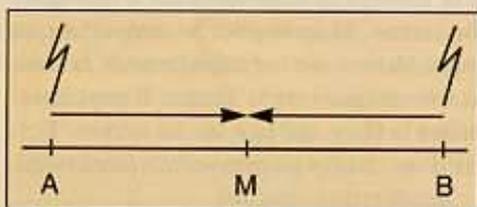
Le théorème d'addition des vitesses

Notre train roule à une vitesse $v = 100$ km/h. Un homme se déplace dans le sens de la marche à la vitesse $w = 4$ km/h. Par rapport à un observateur extérieur au train, sur le talus, l'homme se déplace à la vitesse $W = w + v$, soit 104 km/h (selon la mécanique classique). Ce petit calcul simple n'est, pour Einstein, pas tout à fait exact. Remplaçons l'homme du train par un

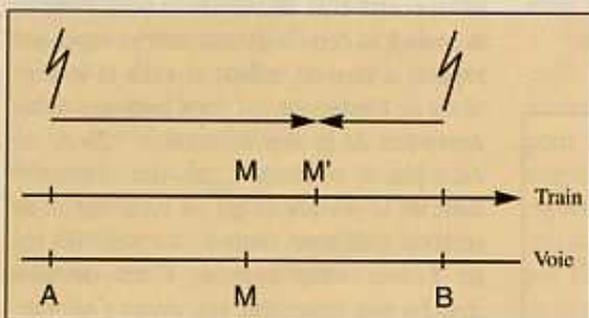
rayon lumineux qui, comme chacun sait, se déplace en ligne droite à la vitesse $c = 300\,000\text{ km/s}$. La vitesse de ce rayon, vu du talus sera légèrement supérieure à c ($c + v$), selon la mécanique classique, dont on entrevoit là une des limitations. De même, l'observateur du train voit-il un rayon lumineux émis par l'observateur du talus se déplacer à la vitesse $c - w$? Suffit-il de prendre le train pour générer des vitesses supérieures à celle de la lumière ? La vitesse de la lumière varie-t-elle avec la position de l'observateur ? Doit-on rejeter le principe de relativité, ou la loi de propagation de la lumière ? La théorie de la relativité restreinte permet de conserver ces deux principes.

La notion de simultanéité

Supposons un orage au dessus de notre voie ferrée, sans train. Deux éclairs tombent au même moment sur deux points de la voie, en A et B, situés à égale distance de l'observateur du talus situé en M. Ce dernier verra la lumière des deux éclairs simultanément.



Mettons nous maintenant à la place du voyageur du train roulant dans le sens de A vers B. Au moment de l'impact des éclairs, il se situe au point M' , qui coïncide à ce moment précis au point M du talus. Pendant le temps mis par la lumière des éclairs pour arriver des points d'impact A et B au point M' , le train a parcouru une certaine distance MM' . Le point M' s'est décalé vers B. Notre homme du train verra l'impact B avant l'impact A. Il n'y a plus simultanéité.



La simultanéité, là encore, n'a de sens que si l'on décrit le système de référence, dans le train, ou à l'extérieur. Chaque système a donc son temps propre, contrairement à ce qu'affirme la physique classique, pour qui le temps est immuable et s'écoule régulièrement, toujours dans le même sens.

La notion de distance spatiale

Prenons deux points sur le train : le milieu du premier wagon (point A), et le milieu du dernier (point B). Faisons mesurer la distance entre ces deux points par l'occupant du train qui commence à en avoir assez de regarder passer les photons. Occupons de la même façon l'observateur du talus en lui proposant de mesurer la distance en question en reportant sur la voie les points A et B. Rien ne prouve que cette nouvelle mesure corresponde à la première car la simultanéité du report des points A et B sur le talus n'est plus évidente lorsque le train se déplace. Le signal donné en A pour ce report mettra un certain temps pour arriver en B, temps pendant lequel le train aura avancé !

Les transformations de Lorentz

Nous savons maintenant que chaque système de référence possède son temps propre et sa mesure des distances propre. Les propositions de la mécanique classique sont à l'opposé de ces affirmations, mais la nouvelle théorie lève les ambiguïtés rencontrées précédemment, notamment en ce qui concerne le théorème d'addition des vitesses., et nous allons voir comment.

Il s'agit de trouver un moyen de passer d'un système à l'autre, qui conserve intactes les lois de la nature, comme l'exige le principe de relativité. Ce passage est réalisé par une transformation mathématique, la transformation de Lorentz qui fait intervenir le facteur

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

où v est la vitesse du premier système par rapport au deuxième, et c la vitesse de la lumière.

Plaçons une règle de 1 m sur le talus. Quelle est la longueur de la règle, vue par l'observateur du train en mouvement uniforme ? La transformation de Lorentz indique que la règle mesure

$$l \times \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ mètre,}$$

soit moins de 1 mètre. La règle vue du train est plus courte que la règle vue du talus, et ce d'autant plus que la vitesse du train est élevée ! Les distances raccourcissent. Bien entendu, à l'échelle des vitesses atteintes par les trains actuels, le raccourcissement est

négligeable (à 10^{13} près pour un train à 300 km/h, soit un dix millionième de micron). Si le train atteignait la moitié de la vitesse de la lumière (150 000 km/s), le mètre mesurerait 87 cm. A la vitesse de la lumière, la règle disparaît, ayant une longueur nulle.

Imaginons maintenant une horloge battant la seconde embarquée dans le train. Pour l'observateur du talus, l'espace de temps entre deux battements n'est pas de 1 seconde mais de

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

seconde, c'est-à-dire, moins de 1 seconde. Par suite de son mouvement, l'horloge marche plus lentement que si elle est au repos, et d'autant plus lentement que son mouvement est rapide. **Le temps s'allonge.** A la moitié de la vitesse de la lumière, la seconde du train mesure 1,15 secondes du talus.

Le théorème d'addition des vitesses (suite et fin)

En appliquant la transformation de Lorentz au théorème de l'addition des vitesses, on obtient la relation suivante :

$$W = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}}$$

ou v et w sont les deux vitesses colinéaires à ajouter, au lieu de $W = v + w$ dans le cas de la mécanique classique.

Pour le marcheur du train, la deuxième équation donne le résultat de 104 km/h, alors que la première équation donne 104 km/h à 10^{16} près.

Pour le rayon lumineux tiré du train dans le sens de la marche de celui-ci et vu du talus, le calcul montre que $W = c$ dans tous les cas (même si le train approche la vitesse de la lumière), alors que la mécanique classique indiquait une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Avec la théorie de la relativité restreinte, la vitesse de la lumière reste constante, quel que soit le système de référence envisagé.

Le paradoxe des jumeaux (ou paradoxe de Langevin)

Imaginons deux jumeaux âgés de 20 ans, Rémi et Eloi. Rémi embarque à bord d'une fusée pour un voyage en ligne droite, à vitesse constante, le menant jusqu'à une planète située à 7 années-lumière de la Terre. L'engin le propulse à 99% de la

vitesse de la lumière, soit 296 794 km/s. Une fois à destination, il effectue un demi-tour instantané et s'en retourne en sens inverse à la même vitesse.

Eloi, resté sur Terre, constate à son retour que Rémi a 12 ans de moins que lui. Eloi a 34 ans (le voyage a duré 2 fois 7 ans) et Rémi en a 22 (pour lui, le voyage a duré 2 ans - se vérifie avec la transformation de Lorentz). Les frères ne sont plus jumeaux. Mais le paradoxe n'est pas là.

Si l'on en croit le principe de relativité, le point de vue sur lequel on se place ne modifie pas un phénomène physique. Les deux frères sont en mouvement relatif et l'on peut dire que c'est Eloi, sur Terre, qui s'éloigne de la fusée de son frère et c'est donc Eloi qui voyage, et Rémi qui reste immobile dans son référentiel. Au bout du voyage, on peut aussi dire, de ce point de vue, qu'Eloi a 22 ans et Rémi 34 !

Le paradoxe s'explique par le fait que la fusée, pour atteindre 99 % de la vitesse de la lumière, a besoin d'être accélérée au départ, au demi-tour et à l'arrivée. Ces accélérations, seule la fusée la ressent, par la Terre. La situation n'est donc pas symétrique.

L'équivalence masse-énergie : $E = mc^2$

Cette équation connue de tous est issue de considérations mathématiques de la notion d'énergie cinétique et a été mise en évidence par Einstein. Elle fait apparaître la première équivalence citée plus haut, entre l'énergie E et la masse m (c étant la vitesse de la lumière). Elle démontre que l'énergie, c'est de la masse, donc de la matière et inversement. Il est possible de créer de la matière à partir d'énergie, et de l'énergie à partir de la matière. Le très grand coefficient de proportionnalité (c^2) explique les gigantesques quantités d'énergie mises en jeu lors de la transformation.

Cette notion importante d'équivalence masse-énergie est à l'origine, entre autres, de l'industrie nucléaire dans laquelle une quantité infime de matière est transformée en une quantité énorme d'énergie. Elle est également la source d'énergie des étoiles, mais le rendement de ces réactions ne dépasse jamais quelques pour mille.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

La théorie précédemment décrite est dite restreinte car elle s'applique à des systèmes de coordonnées en mouvement rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres. La théorie de la relativité générale

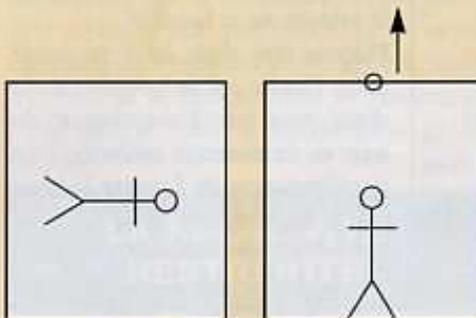
considère les mouvements de rotation et les variations de vitesse, et donc envisage les mouvements quelconques.

Dans le cas de notre train en mouvement rectiligne et uniforme, on peut dire que le talus est en mouvement et le train au repos, si le système de référence est bien choisi. La sensation de repos est réelle pour le voyageur, il ne ressent pas le mouvement (notre train parfait ne provoque pas de vibrations, ni de roulis). Il n'en est pas de même si le train aborde une courbe ou s'il freine.

Laissons tomber une pomme de notre main. Newton nous apprend que l'action de la Terre sur la pomme est indirecte. La Terre engendre dans son voisinage un champ de gravitation qui lui-même agit sur la pomme et provoque sa chute. Cette action est d'autant plus faible que l'objet est éloigné de la Terre. La loi qui régit la chute d'un corps est indépendante de la nature de celui-ci. L'accélération, qui décrit la variation de la vitesse, est la même pour un morceau de plomb ou un morceau de bois. Seule l'intensité du champ de gravitation interviendra.

L'équivalence accélération-gravité

Imaginons une boîte de la dimension d'une chambre et située dans l'espace, loin de toute influence gravitationnelle. Plaçons-y un observateur (1). Pour lui, la pesanteur n'existe pas. Fixons sur le toit de la boîte un crochet auquel est attachée une corde. Un être extraterrestre tire sur cette corde avec une force constante dans une direction que nous appellerons le "haut". La boîte et l'observateur se déplacent d'un mouvement uniformément accéléré vers le "haut". Comment notre homme juge-t-il l'événement ? (2)



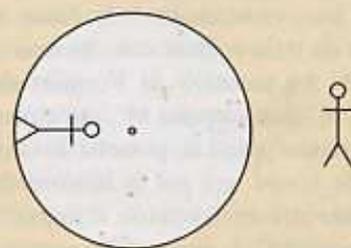
Il est projeté contre le plancher et doit absorber la pression avec ses jambes. Il se retrouve donc debout, tout comme sur Terre. S'il lâche une pomme de sa main, l'accélération de la boîte n'est plus transmise au fruit qui se rapprochera alors du plancher avec un mouvement relatif accé-

léré. L'observateur arrivera à la conclusion qu'il se trouve dans un champ de gravitation constant engendré par une planète ou une étoile proche. Il pourra s'étonner de ne pas tomber dessus, mais en apercevant le crochet, il conclura qu'il est suspendu avec lui et reste immobile dans le champ de gravitation.

Il y a donc analogie de comportement entre la gravité et l'accélération. Les deux phénomènes différents sont ressentis de la même manière. Le principe de relativité est ainsi étendu aux mouvements non uniformes. En d'autres termes, la relativité générale intègre la gravitation.

Le comportement des distances et du temps sur un corps en rotation

Considérons un observateur situé loin de toute influence, quelque part dans l'Univers. Il observe une gigantesque roue en rotation uniforme. Un observateur debout en périphérie de la roue est soumis à la force centrifuge qui tend à l'éloigner du centre. Mais il peut se considérer au repos, debout sur la face interne de la roue, la tête dirigée vers le centre. Il peut interpréter la force qui agit sur lui comme l'effet d'un champ de gravitation (équivalence accélération-gravité).

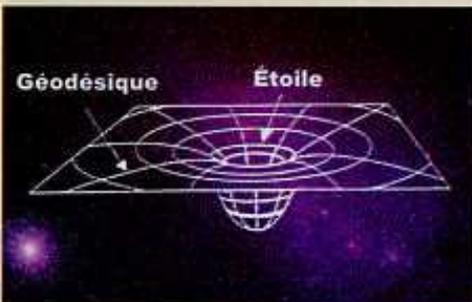


L'observateur de la roue essaie de mesurer le temps. Il possède deux horloges identiques battant la seconde. Il place la première au centre et la deuxième en périphérie de la roue. Les deux horloges sont au repos par rapport à la roue, même si celle-ci tourne. Vues de l'extérieur, les deux horloges avancent-elles de la même manière ? Non, car celle placée au centre a une vitesse nulle et celle de la périphérie est en mouvement de rotation uniforme, toujours du point de vue de l'observateur externe. Cette dernière marche plus lentement, son temps s'allonge. Sur la roue, et plus généralement dans un champ de gravitation, une horloge marchera plus ou moins vite selon la position qu'elle occupe au repos. On ne peut donc pas donner ici de définition précise du temps. De même, si l'on tente une mesure de la longueur de la circonférence de la roue, l'observateur extérieur verra cette longueur plus petite que l'observateur de la roue.

Le mouvement des astres vu par la relativité générale

Un corps pesant comme une étoile a un effet direct sur son environnement spatial et temporel (on dit spatio-temporel). Les corps passant dans son voisinage sont accélérés et déviés. L'interprétation du mouvement d'une planète autour de son étoile par exemple, vue par la relativité générale, est la suivante :

L'Univers est constitué par un maillage plat - l'espace-temps - (en 4 dimensions !) déformé par la masse des objets qui s'y trouvent. Plus la masse de l'objet est grande, plus le maillage est déformé. Le champ de gravité déforme l'espace - temps à la manière simpliste (en 2 dimensions) d'une toile tendue sur laquelle sont posées des billes plus ou moins lourdes en guise d'étoiles. La toile se déforme autour de la bille qui plonge dans le trou qu'elle a engendré. La toile est courbée au voisinage de la bille. Elle perd sa courbure à grande distance et devient plate. Une géodésique est le mot donné à la ligne la plus courte joignant deux points d'une surface courbe. Une planète suit les géodésiques créées par son étoile. Son mouvement est donc le plus court possible, si l'on considère la géométrie dans laquelle elle évolue.



A grande distance, les théories de Newton et d'Einstein se rejoignent et les lois de Kepler décrivent admirablement le mouvement des planètes du système solaire (sauf pour Mercure). Il faut pour cela que le champ de gravitation soit relativement faible et que les vitesses soient loin de celle de la lumière (non relativistes). Lorsque l'espace-temps est très déformé, au voisinage d'un pulsar ou d'un trou noir, les équations de Kepler sont insuffisantes pour décrire la réalité observée.

Pour Newton, les objets s'attirent du fait de leur masse. La lumière n'en possédant pas n'est pas déviée en passant auprès d'une étoile.

Pour Einstein, la lumière suit les géodésiques de l'espace-temps courbe et est déviée. L'observation lui donnera raison dès 1919.

Réflexions sur l'Univers

Si l'on en croit la théorie de Newton où toutes les masses s'attirent mutuellement, L'Univers aurait une sorte de centre où la densité d'étoiles est maximale, cette densité diminuant à mesure que l'on avance du centre vers l'extérieur pour faire place, au loin, au vide infini. Le monde des étoiles constituerait une île finie plongée dans l'océan infini de l'espace. Ce n'est pas conforme à l'observation.

Les chercheurs de cette époque et Einstein propose un monde fini et cependant non limité, à l'instar de la surface d'une sphère (finie) sur laquelle on peut marcher indéfiniment sans rencontrer de bord ni de limite. (Géométrie non euclidienne, courbe). Cette idée repose sur la courbure de l'espace-temps refermé sur lui-même, engendré par la masse de L'Univers. Le calcul montre que si la matière est suffisante et uniformément répartie, à grande échelle, L'Univers est forcément sphérique. Il existe d'ailleurs une relation simple entre son rayon et sa masse. Comme dans le détail, la matière n'est pas uniformément répartie, il sera localement déformé par rapport à la sphère et se présentera comme une orange globalement sphérique mais à la peau localement bosselée.

La constante cosmologique

Einstein croyait, jusque dans les années 20, que L'Univers était statique et immuable, à grande échelle, homogène et éternel. C'était à cette époque une vérité première héritée de plus de 2000 ans de croyance.

Mais les équations de sa propre théorie refusent de lui donner raison. Elles donnent comme résultat un univers en expansion, donc avec une histoire. Tout de même persuadé d'avoir raison, il introduit dans ses équations un facteur qui compense cet effet d'expansion. Ce facteur s'appelle la Constante Cosmologique qu'il nomme lui-même "constante universelle pour l'instant inconnue". Il aboutit ainsi à son univers parfait, statique et en équilibre. Après les travaux de E. Hubble qui démontra, avec Hubble, l'expansion de L'Univers par l'éloignement des galaxies, il répudiera sa propre constante en admettant que ce terme constituait sa plus grande erreur.

Aujourd'hui, aucune certitude n'apparaît sur la validité ou la valeur de cette constante qui resurgit néanmoins de ses cendres actuellement en expliquant un certain nombre d'anomalies de la théorie du big-bang, en particuliers l'âge de L'Univers.

Les destins de l'Univers

La courbure de L'Univers prévoit 3 scénarios pour son futur. Ces scénarios dépendent uniquement de sa densité ρ_0 , c'est à dire (l'énergie totale) par unité de volume.

Si $\rho_0 > 3$ protons / m³

L'Univers sera fermé et courbe. Après la période actuelle d'expansion, il se contractera jusqu'au Big-Crunch.

Si $\rho_0 < 3$ protons / m³

L'Univers est ouvert et courbe, son expansion continue

Si $\rho_0 = 3$ protons / m³

L'Univers est en dilatation éternelle et tendra à devenir plat.

Le problème est que l'on ne connaît pas actuellement la densité de l'Univers. On pense que la matière visible ne représente que quelques centièmes de la masse totale de l'Univers.

Retour à la case départ

En alliant la relativité générale avec la théorie du big-bang et de l'expansion de L'Univers, il apparaît à grande échelle, que chaque amas de galaxies s'éloigne de ses voisins de façon homogène et symétrique. Chacun de ces groupements de matière possède son temps propre, mais par le fait même de la symétrie de l'expansion, ces temps propres sont les mêmes pour tous. En admettant localement des variations du temps, la relativité générale autorise la définition d'un temps commun appelé temps cosmique à l'échelle de L'Univers tout entier. Un temps qui ressemble au temps de ... Newton, fixe et immuable !



La déviation de la lumière

Il a été dit que la lumière, comme tout corps, est déviée en passant à proximité d'un champ gravitationnel, en suivant les géodésiques. Cette prédiction d'Einstein fut confirmée en 1919. Lors de l'éclipse du 28 mai, Sir Arthur Eddington observa au Brésil la déviation de la position des étoiles situées au bord du disque solaire. Les plaques photographiques montrèrent un décalage de 1,75 seconde d'arc, exactement le chiffre avancé par Einstein avant l'expérience.

L'avance du périhélie de Mercure

La théorie de Newton et les équations de Kepler n'expliquaient pas complètement le décalage faible mais régulier du point où Mercure passe au plus près du soleil, son périhélie. Le calcul de la trajectoire de la planète avec les équations de la relativité générale se montra conforme à l'observation. Einstein retrouva les 43 secondes d'arc par siècle manquant à Newton. A noter que toute planète subit ce phénomène, d'autant plus fortement qu'elle est proche du soleil.

Le déplacement des raies spectrales

Le temps se ralentissant à proximité des champs gravitationnels, la longueur d'onde du rayonnement émis nous semble augmenter. Les raies des spectres des étoiles massives et denses sont donc décalées vers le rouge, conformément à l'effet Doppler, et ce d'autant plus que le champ gravitationnel est grand. L'effet n'est pas mesurable pour le soleil (2 milliardièmes de la longueur d'onde !) mais a été mis en évidence pour le compa-

gnon de Sirius, naine blanche très dense. S'il est faible, même pour les naines blanches, le décalage pourrait jouer un rôle important dans le cas des quasars.

Le ralentissement des horloges

Des horloges ultra-précises ont été embarquées dans deux avions tournant autour de la Terre en sens inverse. L'un additionnait sa vitesse à celle de la rotation de la planète, l'autre la soustrayait. La différence de marche des horloges prévue par la théorie fut confirmée par l'expérience.

Les mirages gravitationnels

Les lentilles gravitationnelles (ou mirages gravitationnels) sont une autre conséquence de la courbure de la lumière dans un champ de gravité. Dans une lentille conventionnelle, la lumière est déviée et permet de grossir les objets situés derrière elle. De même, un amas important de matière (des galaxies) permet de grossir l'image d'un astre placé derrière, dans la ligne de visée. On obtient soit des arcs, soit des images multiples du même objet, soit les deux

Les trous noirs

Les trous noirs sont des objets encore hypothétiques mais prévus par la théorie, dont la densité est telle que le champ de gravitation engendré courbe l'espace-temps jusqu'à une discontinuité. Il troue l'espace-temps de sorte qu'aucun objet ne peut s'en échapper, pas même la lumière. Imaginons un voyageur imprudent voulant pénétrer dans le trou noir, observé par un collègue moins téméraire resté loin du danger. Ce dernier aura l'impression que son compagnon progresse de plus en plus lentement. En fait, le temps se ralentira jusqu'à ne plus exister au niveau de la limite du trou noir. Il ne le verra jamais pénétrer. Si le voyageur pouvait observer une horloge restée à l'extérieur, il verrait, en se rapprochant du trou noir, le mouvement des aiguilles s'accélérer de plus en plus. La théorie prévoit ensuite un changement de sens du mouvement des aiguilles en passant la limite du trou noir. Il remonterait alors le temps !

Autour des trous noirs se déroulent des phénomènes violents d'accrétion très bien observés à l'heure actuelle en rayons K et X. Notre propre galaxie aurait en son centre un trou noir.

