

LA RELATIVITE

Christian SCOTTA

Christian Scotta explore ici, sans équation, les concepts de la relativité restreinte et générale. Il aborde des sujets comme l'invariance de la vitesse de la lumière, l'équivalence entre accélération et gravitation, la courbure de l'espace-temps, et la déviation de la lumière. En relativité générale, la gravitation n'est plus une force, mais une manifestation de la courbure de l'espace-temps provoquée par la masse. Ainsi, les planètes suivent les « géodésiques » de cet espace courbe. Le temps lui-même est affecté : une horloge proche d'un objet massif tourne plus lentement. Les observations confirment cette théorie.



SOCIÉTÉ
d'ASTRONOMIE
DE NANTES

X,00 €

Société Scientifique d'Éducation Populaire auprès de la Jeunesse et Sports
35, boulevard Louis Millet - 44300 NANTES - Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23
Internet : www.san-fr.com - E-mail : san@san-fr.com



N° 12

LA RELATIVITE

Christian SCOTTA



Les Cahiers de la SAN

La Société d'Astronomie de Nantes

Résolument tournée vers le grand public, la SAN vous propose de découvrir l'astronomie ou d'approfondir vos connaissances dans ce domaine de multiples façons :

- Assister aux exposés d'astronomie présentés lors des réunions du vendredi soir, ouvertes à tous les adhérents, au local de la Société à partir de 20h30.
- Consulter ou emprunter l'un des mille ouvrages que possède le fonds bibliothécaire.
- Participer aux observations de découverte ou de perfectionnement. Vous pouvez également emprunter un instrument.
- Assister aux conférences au cours desquelles des astronomes et astrophysiciens de renom viennent présenter les derniers acquis de leurs travaux.
- Solliciter la SAN pour animer des actions pédagogiques préparées à l'attention de public scolaire ou adulte.
- Visiter les expositions auxquelles la SAN participe régulièrement.
- Apporter votre contribution à la réalisation de travaux pratiques d'astronomie tels que la mesure de la masse de Jupiter ou l'évaluation des altitudes des reliefs lunaires.
- Réfléchir et débattre des grands thèmes de la physique, de l'astrophysique et de la science en général au sein d'un groupe de réflexion théorique.
- Enfin, l'astronomie nécessitant des connaissances et des compétences multiples (en optique, mécanique, électronique, etc.), offrir un peu de votre temps pour la conception ou à la réalisation de projets astronomiques.

Pour participer à ces activités, il vous suffit de devenir adhérent.

La Société d'Astronomie de Nantes est une association fondée en 1971 et régie par la loi de 1901.

LA RELATIVITÉ

Christian SCOTTA

Qualité auteur

Édition 2011

Conclusion

Dans la Relativité Générale, l'espace et le temps sont indissociables et on parle d'un continuum espace-temps. L'existence de l'espace et du temps dépend de celle de la matière. La matière, dans son ensemble, déforme l'espace, et les objets suivent la courbure de cet espace. Pour être plus rigoureux, il convient de dire que l'énergie déforme l'espace, en vertu du principe de l'équivalence entre la masse et l'énergie.

Nous avons décrit certains effets relativistes, en nous servant du langage newtonien, pour les comprendre plus facilement. Mais les deux théories sont fondamentalement différentes. Ce que la physique newtonienne traite en terme de force, la Relativité le traite en terme de déformation de l'espace et du temps. Cependant, quand les vitesses sont petites par rapport à celle de la lumière, la relativité donne les mêmes résultats que l'attraction newtonienne. C'est ce qui arrive dans le système solaire, où on peut négliger les effets relativistes (la vitesse moyenne de Mercure sur son orbite est seulement de $47,83 \text{ km.s}^{-1}$ Dans le cas de l'avance du périhélie de Mercure, l'effet relativiste représente seulement 8 % de l'effet total).

D'un point de vue philosophique, la Relativité aboutit à une vision platonicienne du monde. Les corps se déplacent dans un espace courbe à trois dimensions : la projection de ces trajectoires sur un plan donne l'illusion d'une attraction vers un centre. Nous ne voyons qu'un aspect des choses. Notre situation est la même que les habitants de la caverne de PLATON qui ne voient que les ombres des passants projetées sur un mur, et qui identifient ces ombres à la réalité ⁽¹¹⁾. Mieux, il faut nous méfier de notre « sens commun » (ainsi, la vitesse des objets ne se compose pas avec la vitesse de la lumière).

© *Société d'Astronomie de Nantes, 1998*

Les « **Cabiers de la SAN** » sont édités par la Société d'Astronomie de Nantes,
Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports.

35, boulevard Louis-Millet
44300 NANTES

Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23 - E-mail : san@san-fr.com

© Toute reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit,
sans l'autorisation de la Société d'Astronomie de Nantes, est interdite.

Déviations de la lumière

Cela nous conduit à évoquer la déviation de la lumière. Les rayons lumineux suivent la courbure de l'espace-temps, tout comme les planètes ⁽¹⁰⁾.

Reprenons l'exemple du laboratoire accéléré « vers le haut ». Un rayon lumineux pénètre par une fenêtre située sur le côté du laboratoire. Si le laboratoire était immobile, le rayon traverserait le laboratoire et sortirait par la fenêtre opposée. Mais le laboratoire est accéléré « vers le haut » : pendant que le rayon traverse le laboratoire à vitesse finie, le plancher va à la rencontre du rayon. Le rayon s'incurve donc vers le plancher, comme s'il était attiré par une force vers le bas. On observerait le même phénomène pour un laboratoire situé sur le sol, en vertu du principe d'équivalence.

Le rayon ne peut aller sur une droite que dans un espace plat, vide de matière. Mais dans un espace où se trouve des corps massifs, la trajectoire devient une « géodésique » : le rayon suit la courbure de l'espace provoquée par la matière.

Une telle déviation était prévisible dans la mécanique de NEWTON. Celui-ci avait soutenu une théorie corpusculaire de la lumière : la lumière est composée de corpuscules dotés d'une masse, qui se déplacent en ligne droite dans le vide. Ils sont donc affectés par la gravitation. En 1804, un astronome allemand, J. SOLDNER, calcule la déviation subie par des rayons frôlant le Soleil à cause de son attraction. Mais le résultat n'est pas conforme à l'expérience. L'effet prévu par EINSTEIN et vérifié lors de l'éclipse de 1919 est deux fois plus grand que celui prévu dans le modèle newtonien de SOLDNER.

¹⁰ Cela ne se produirait pas pour des ondes sonores. Imaginons que le laboratoire soit rempli d'air et que le plancher (ou le plafond) émette des ondes sonores. Étant accéléré vers le haut, le laboratoire communique son accélération à l'air qu'il renferme. Par conséquent, les molécules d'air sont au repos entre elles et avec les parois de la cabine. Les ondes sonores, qui sont portées par les molécules de l'air, s'y déplacent comme si la cabine était au repos.

Préface



aurait pu être connu depuis longtemps : puisque la lumière met huit minutes pour parvenir du Soleil jusqu'à nous, tout événement qui survient maintenant sur le Soleil, ne nous sera connu que dans huit minutes.

Mais le mouvement affecte la mesure du temps⁽⁸⁾. Reprenons la cabine en accélération « vers le haut » et à grande vitesse. Au plancher, une horloge émet des photons qui montent vers le plafond de la cabine à *. Mais au fur et à mesure que ces photons montent vers le plafond, le plafond fuit devant eux. Les impulsions lumineuses arrivent au plafond à un rythme plus faible que celui où elles sont émises du plancher. Un observateur placé au plafond constate que l'horloge du plancher fonctionne plus lentement que celle du plafond, bien que les deux horloges fonctionnent au même rythme.

Maintenant, l'observateur est au plancher et l'horloge du plafond émet des photons vers le plancher. Comme le laboratoire est toujours accéléré « vers le haut », le plancher se précipite vers le haut et les impulsions venues du plafond parviennent au plancher à un rythme plus rapide. Pour l'observateur placé au plancher, l'horloge du haut fonctionne plus rapidement⁽⁹⁾.

On observera les mêmes phénomènes dans un laboratoire placé sur le sol, en vertu du principe d'équivalence.

L'horloge mesure le temps : comme les deux horloges ne fonctionnent plus au même rythme, selon la position de l'observateur dans le laboratoire, le temps ne s'écoule pas de la même manière pour deux observateurs placés à différents endroits du laboratoire. L'accélération affecte la mesure du temps et la gravitation produit le même effet.

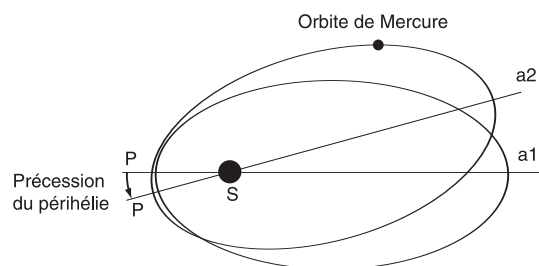
⁸ Banesh HOFFMAN, *Histoire d'une grande idée, la relativité*, Belin, p. 167-169

⁹ Einstein / Infeld, *L'évolution des idées en physique*, Petite bibliothèque Payot, p. 208

moyenne du corps augmente. D'autre part, puisque le corps se rapproche du corps central, et va (par exemple) de P1 à P2, il en résulte une avance de l'apoastre de $a1$ en $a2$: la ligne des apsides avance. Il faut se rappeler que dans la théorie newtonienne, une telle avance est due à la force perturbatrice d'un troisième corps. Mais dans le cas de deux corps, le grand axe de l'ellipse devrait être fixe.

Par exemple, l'avance du périhélie de Mercure dû à l'effet relativiste est de quarante trois secondes d'arc par siècle ou en trente six mille cinq cent jours.

L'avance du périastre du pulsar double 1913+16 dû à l'effet relativiste est de quarante deux secondes par jour. L'effet est trente six mille fois plus important que pour Mercure.



Précession du périhélie de la planète Mercure

Figure 2

Une planète se déplace librement dans l'espace-temps courbé par le Soleil. Dans un espace plat, une planète décrit une ellipse. Mais dans un espace courbe, la géodésique correspondante n'est pas identique et son effet se traduit par une avance de la ligne des apsides.

Une masse déforme aussi le temps

Pour Newton, le temps est immuable : comment, en effet, mesurer la vitesse d'un mobile, si l'unité de temps était variable ?

En relativité, rien de tel : la simultanéité des événements est impossible, parce que la vitesse de la lumière est finie. Cela

Table des Matières

Relativité restreinte.....	7
Relativité générale.....	10
Conclusion	19

La déviation ne provient plus de la force centripète issue du Soleil, mais de la résistance de la coquille (comme lorsque l'on fait rouler une bille dans un bol). Mais si l'éther est invisible, tout se passera, pour un observateur, comme si la planète était attirée par le Soleil.

Ce qui arrête NEWTON, c'est, entre autres, que ce modèle n'explique pas le caractère mutuel de l'attraction.

En relativité, le Soleil déforme l'espace autour de lui et la Terre va suivre la courbure de cet espace. Mais la Terre déforme, elle aussi, l'espace, à proportion de sa masse (trois cent trente mille fois moins) et le Soleil va suivre, lui aussi, la courbure de cet espace.

Une masse déforme l'espace, et la déformation se propage à la vitesse de la lumière.

Propagation de la gravitation à vitesse finie

Dans la théorie de NEWTON, la force est dirigée vers la position instantanée du corps central. La force se diffuse de façon instantanée. Si bien que si le Soleil cessait d'exister, la Terre filerait aussitôt par la tangente, alors que l'éclairage du Soleil ne cesserait qu'au bout de huit minutes.

Dans la théorie d'EINSTEIN, aucun signal ne peut aller plus vite que la lumière. En langage newtonien, la « force » se propage à une vitesse finie, celle de la lumière. La force est alors dirigée vers la position « retardée » du corps central, c'est-à-dire « en arrière » par rapport au sens de la marche du corps. La force newtonienne a donc une composante supplémentaire, dans la direction de la vitesse relative entre les corps, ici, « en arrière » ⁽⁷⁾.

Une force opposée à la vitesse accélère le mouvement orbital : le corps est freiné (il est tiré en arrière) ; comme l'attraction vers le corps central reste la même, la trajectoire du corps en révolution s'incurve en direction du corps central (en effet, « les corps plus rapides sont moins déviés du trajet rectiligne »). La distance au corps central (ou le rayon vecteur) diminue. L'orbite à décrire est donc plus petite, et la période pour la décrire devient aussi plus petite. Ainsi, la vitesse

dans un tapis de mousse. Les trajectoires d'une bille vont suivre la courbure : les unes aboutiront directement au fond, mais d'autres feront le tour de la cuvette en montant et en descendant alternativement.

Ce que nous voyons n'est que la projection de ces trajectoires sur un plan, nous donnant l'illusion d'une attraction vers un centre (Figure 1).

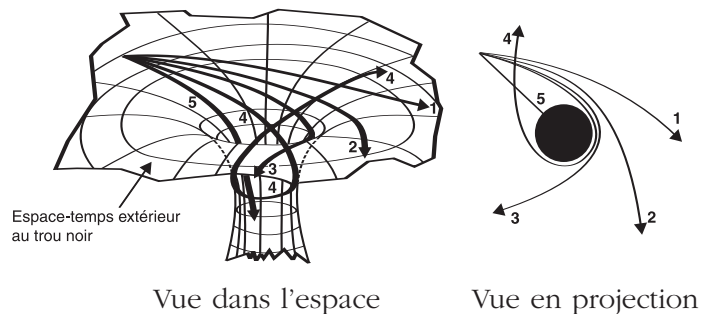


Figure 1

Newton avait eu l'idée d'une telle projection pour expliquer la gravitation. Il pensait que l'espace autour du Soleil était rempli par un Éther, dont la densité augmentait avec la distance. Imaginons des « coquilles d'éther » concentriques. Une planète va toujours droit devant elle (par son inertie) mais elle suivra la courbure de la coquille

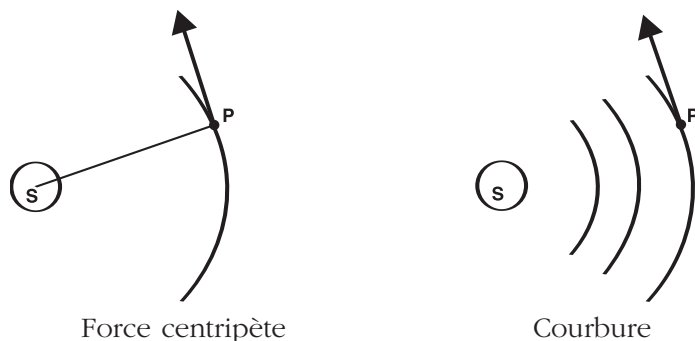


Figure 2

LA RELATIVITÉ

Relativité restreinte

Relativité Galiléenne

GALILÉE montre qu'il n'y a pas de différence entre le repos et le mouvement rectiligne uniforme. Ainsi, les boules d'un jeu de billard se comporteront de la même manière, que la table de billard soit dans un local fixé au sol, ou qu'elle soit dans un wagon voyageant en ligne droite à vitesse constante.

Nous prenons l'exemple du train, cher à EINSTEIN ; GALILÉE, DESCARTES et NEWTON ⁽¹⁾ prenaient l'exemple d'un bateau sur une eau calme.

Descartes va étendre abusivement cette relativité à tous les mouvements, quels qu'ils soient (rectilignes ou circulaires). Or, le mouvement circulaire est accéléré (il y a changement de direction, même si la vitesse est constante).

De plus, cette relativité mène à des absurdités : ce serait la même chose que de mouvoir le wagon par rapport au sol, que de déplacer la Terre entière par rapport au wagon. En outre, si le train en mouvement uniforme rencontre un obstacle, tous les

¹ Voir Christian SCOTTA, *Isaac Newton*, « Les Cahiers de la SAN n° 29 »

objets et toutes les personnes qu'il contient sont déportés en avant. Le train et tout ce qu'il contient voyagent à la même vitesse : mais au moment du choc du train contre l'obstacle, les objets et les personnes qui ne sont pas fixés au train continuent leurs mouvements en ligne droite, jusqu'à ce qu'ils rencontrent un obstacle. Un changement de mouvement inertiel est dû à une force (ici, la force de l'obstacle qui arrête le train) et produit une force (celle du choc des objets et des personnes contre les parois du wagon).

Au cours du XIX^e siècle, l'éther indispensable à la transmission des vibrations lumineuses matérialise l'espace absolu de NEWTON.

Albert MICHELSON et Edward MORLEY (1887) vont établir l'invariance de la vitesse de la lumière ⁽²⁾.

La terre se déplace dans l'éther à la vitesse de 30 km.s⁻¹. Deux rayons lumineux sont émis depuis la Terre, l'un dans la direction de son mouvement et l'autre perpendiculaire à cette direction. Tout se passe comme pour un nageur dans un courant : quand il nage dans le sens du courant, il est porté par ce courant, et sa vitesse s'ajoute à celle du courant. S'il nage en sens contraire, il lutte contre le courant et sa vitesse se retranche de celle du courant. S'il nage perpendiculairement, la vitesse du nageur est inchangée. Donc, la vitesse de la lumière devrait être de 300 030 km.s⁻¹ dans le sens du mouvement de la Terre et de 300 000 km.s⁻¹ dans la direction perpendiculaire. Ceci résulte de la composition des vitesses et des mouvements tels qu'ils s'opèrent en mécanique classique. Or, l'expérience de Michelson et Morley montrait que la vitesse de la lumière était la même dans les deux cas (~ 300 000 km.s⁻¹).

Comment interpréter ces résultats ?

Georges FITZGERALD et Hendrik LORENTZ émettent l'hypothèse que tous les corps se contractent un peu à cause de

La courbure de l'espace

Dans la physique newtonienne, l'espace est plat. La géométrie appliquée y est dite « euclidienne » : deux droites parallèles ne s'y rencontreront jamais, et la somme des angles d'un triangle y est égale à 180°. Un objet libre de toute force décrit une droite, le plus court chemin entre deux points en géométrie euclidienne. En relativité restreinte également, l'espace est plat, car il n'y a pas de gravitation, et donc pas de matière.

Le principe d'inertie trouve sa pleine expression pour un seul objet dans un univers vide : mais, dans ce cas, il est impossible de discerner le repos du mouvement rectiligne uniforme, car il n'y a aucun repère. Si on place un second objet, même très lointain du premier, les deux corps vont s'attirer et ils ne seront plus en mouvement inertiel.

Dans l'espace réel, la matière est présente. Suivons la trajectoire d'un projectile, par exemple un boulet de canon. Selon NEWTON, le boulet est détourné à chaque instant de son trajet rectiligne et il décrit une parabole. Pour EINSTEIN, le trajet rectiligne n'a de sens qu'en l'absence de gravité, donc en l'absence de matière. Seule la parabole a une signification physique : la matière a pour effet de déformer l'espace-temps, de courber sa géométrie. La trajectoire du boulet est une « géodésique », c'est-à-dire, le plus court chemin entre deux points dans un espace courbe. L'espace a donc une « réalité physique », on peut dire qu'il est substantiel, puisqu'il contraint les objets à suivre sa courbure comme s'il était solide, ou plutôt élastique.

Dans un espace courbe, deux droites parallèles peuvent se rejoindre et la somme des angles d'un triangle est différente de 180°. La surface terrestre est un exemple d'espace courbe fermé (sa surface est finie) mais sans limite (il n'y a pas de bord).

Le meilleur moyen de représenter la courbure de l'espace autour d'une étoile ou d'une planète, est de figurer l'astre au fond d'une cuvette, comme celle que fait une boule de pétanque

² Banesh HOFFMAN, *Histoire d'une grande idée, la Relativité*, Belin, p. 95-100

L'effet global de toutes les manifestations locales de la courbure de l'espace prend l'aspect d'une gravitation centrée sur la Terre.

Exemple du disque tournant

Imaginons un observateur placé sur la circonférence d'un disque tournant à très grande vitesse ⁽⁶⁾. Vu de l'extérieur, cet observateur est soumis à « une force centrifuge » qui agit vers l'extérieur selon le rayon, et qui est proportionnelle au rayon. L'observateur ne voit pas le monde extérieur. Pour lui, le disque ne tourne pas. Il est retenu sur « le sol » (la partie concave de la circonférence) par une force d'attraction proportionnelle au rayon. C'est l'équivalence entre une accélération et un champ de gravitation, appliquée à un mouvement de rotation.

NEWTON avait envisagé les effets d'une pesanteur augmentant avec la distance au centre. Une telle pesanteur artificielle est réalisée dans une station spatiale en rotation autour de son axe.

Maintenant, l'observateur mesure le rayon du disque au moyen d'une règle. Il trouve une valeur en « mètres étalons ». S'il mesure la circonférence avec la même règle, la règle va se contracter dans le sens du mouvement (comme le prévoyaient FITZGERALD et LORENTZ). S'il effectue le rapport de la circonférence sur le diamètre, il obtiendra un nombre supérieur au nombre π ($\sim 3,14$). Alors qu'un observateur immobile placé à l'extérieur trouverait le nombre π en divisant la circonférence par le diamètre), car sa règle n'est pas contractée lorsqu'il mesure la circonférence du disque.

Ainsi, quand on détermine la géométrie à bord d'un disque en rotation rapide, on trouve que la géométrie sur ce disque n'est pas euclidienne.

⁶ EINSTEIN / INFELD, *L'évolution des idées en physique*, Petite bibliothèque Payot, p. 214-215

la pression de l'éther. Par exemple, étant donné la vitesse de la Terre, son diamètre doit se raccourcir de six centimètres dans la direction de son mouvement ⁽³⁾.

Ainsi, dans le bras parallèle au mouvement de la Terre, le faisceau lumineux plus rapide a une distance plus courte à parcourir. La vitesse est alors la même dans les deux cas.

Mais quand la vitesse atteint celle de la lumière, la longueur devient nulle.

La Relativité Restreinte d'Einstein

La Relativité Restreinte d'EINSTEIN reprend celle de GALILÉE, mais en y incluant les conséquences de l'invariance de la vitesse de la lumière : la vitesse de la lumière ne dépend pas du mouvement de l'observateur par rapport à la source de lumière.

L'éther devient inutile si on abandonne l'idée d'un espace absolu. EINSTEIN remarque d'abord que rien n'est fixe dans l'Univers : tout bouge. Donc, il n'y a ni repos absolu ni mouvement absolu (comme NEWTON le supposait dans sa première loi du mouvement). Le mouvement est donc relatif (comme le pensait DESCARTES). Le changement de mouvement (deuxième loi de NEWTON) est lui-aussi relatif, puisqu'il dépend du point fixe que l'on choisit pour le repérer : la force est donc relative. L'espace et le temps sont indissociables et constituent un « continuum ».

Pour un observateur extérieur, une règle en mouvement rapide se contracte dans la direction de son mouvement et une horloge en mouvement rapide fonctionne plus lentement. Mais un observateur solidaire de la règle ou de l'horloge ne verrait aucune différence. En outre, la masse augmente avec la vitesse : la masse est de l'énergie cinétique (proportionnelle au carré de la vitesse) transformée en matière : quand le corps approche de la vitesse de la lumière, sa masse devient infinie. C'est pourquoi cette vitesse est une limite infranchissable.

³ Banesh HOFFMAN, *Histoire d'une grande idée, la Relativité*, Belin, p. 102

Relativité Générale

Espace absolu

Selon NEWTON, un mouvement absolu peut être détecté sans repère extérieur. Par exemple, on repère la rotation de la Terre sur son axe par rapport aux « étoiles fixes ». Mais l'effet centrifuge produit par cette rotation fait qu'une bille en chute libre depuis le sommet d'une tour ou d'un puits est déviée vers l'est, par rapport à la verticale (NEWTON préconisa cette expérience, mais la déviation est trop petite pour être détectée à l'époque). Par ailleurs, l'expérience du pendule de FOUCAULT permet de détecter la rotation de la Terre : le plan d'oscillation du pendule est invariable alors que son support suit la rotation de la Terre. Ces deux phénomènes montrent que la rotation de la Terre pourrait être détectée même si on ne voyait pas les étoiles.

C'est pourquoi NEWTON stipulait l'existence d'un espace absolu, invisible, auquel se rapportent tous les mouvements : l'effet centrifuge de deux sphères en rotation dans l'espace libre trahit leur rotation absolue l'une par rapport à l'autre, quand bien même il n'y aurait aucune étoile fixe lointaine.

MACH rejette l'espace absolu : l'effet centrifuge doit être rapporté à la distribution des masses dans l'Univers. Dans cette optique, le plan d'oscillation du pendule est fixe, non pas par rapport à l'espace absolu, mais par rapport aux masses les plus significatives de l'Univers. Toute la matière est interconnectée par la gravitation ⁽⁴⁾.

Principe d'équivalence

EINSTEIN est gêné par le caractère absolu de l'accélération. Il va montrer qu'un champ de gravité uniforme peut être aboli

ou simulé par une accélération, et vice-versa ⁽⁵⁾.

Pour l'observateur en chute libre dans le vide, les objets qui l'accompagnent et qui tombent à la même vitesse que lui, apparaissent en repos relatif et semblent n'être soumis à aucune force et être donc libres.

À l'intérieur d'une cabine en chute libre, tous les corps restent au repos ou sont en mouvement rectiligne uniforme, car ils tombent à la même vitesse que les parois de la cabine. Un observateur placé à l'intérieur de cette cabine a l'impression que les objets et lui-même sont en situation inertielle. C'est ce qui se passe dans les laboratoires placés en orbite autour de la Terre (impesanteur).

EINSTEIN montre l'équivalence entre l'accélération et la gravitation. Un laboratoire ne subit aucune attraction : il flotte dans le vide. S'il est accéléré vers « le haut », les objets placés dedans subiront une accélération vers « le bas », puisque le plancher vient à leur rencontre et les entraîne avec lui vers le haut.

Les objets placés dans un laboratoire situé sur le sol subissent une accélération « vers le bas », due à la pesanteur. Si les deux accélérations ont la même valeur, il y a équivalence entre une accélération uniforme et un champ de gravitation uniforme.

Mais ce principe n'est valable que si le laboratoire est de petite dimension et n'est pas en rotation, et si on considère de petites durées de temps. Car si le laboratoire posé sur le sol est grand, les trajectoires de deux billes en chute libre ne sont plus parallèles, puisqu'elles tendent au centre de la Terre. L'accélération relative entre les deux billes est un effet local de la courbure de l'espace. Maintenant, considérons un ensemble de ces billes accélérées vers le bas et placées circulairement autour de la Terre à une distance donnée : les billes vont se rapprocher les unes des autres et le cercle qu'elles constituent va se contracter, de sorte que leur distance à la Terre va diminuer.

⁴ Hubert REEVES, *Patience dans l'azur*, Seuil, pages 198-201

⁵ EINSTEIN / INFELD, *L'évolution des idées en physique*, Petite bibliothèque Payot, p. 202-206