ARTICLE DE FOND

Pourquoi doit-on considérer la vitesse de la lumière comme constante en présence d'un champ de gravitation?

Georges Paturel, astronome retraité de l'Observatoire de Lyon

Cet article aborde quelques points particuliers concernant la relativité restreinte et la relativité générale. Dans les deux cas Einstein recherchait une unification des lois de la physique. La relativité restreinte permet d'établir des équations entre différents référentiels d'inertie. La relativité Générale dérive de la relativité restreinte mais elle englobe aussi la gravitation. Une gravitation qui ne se conçoit plus comme une force mais comme une courbure de l'espace-temps, dépendant de la répartition des masses. L'article relève quelques difficultés spécifiques lorsque l'on cherche à passer d'une théorie à l'autre.

Introduction

La question du titre peut paraître étrange alors qu'on pense admis depuis Einstein que la vitesse de la lumière est une constante universelle, au point que sa valeur a été fixée conventionnellement. Souvent d'ailleurs, dans certains ouvrages la valeur est fixée à la valeur unité (i.e., c_0=1).
Pourtant si on lit Einstein lui-même dans son petit livre : "*La Relativité*" voici ce qu'on trouve (chapitre 22) :
"*... cette conséquence* [observation de la courbure d'un rayon lumineux au voisinage d'une masse] *montre que, conformément à la théorie de la relativité générale, la loi déjà souvent mentionnée de la constance de la vitesse de la lumière dans le vide, qui est une des deux suppositions fondamentales de la Théorie de la relativité restreinte, ne peut pas prétendre à une validité illimitée. En effet, une courbure des rayons lumineux ne peut se produire que si la vitesse de propagation de la lumière varie avec le lieu*."
Plus loin (chapitre 27), nous trouvons encore cette mention.
Cette affirmation sous la plume d'Einstein peut même sembler naturelle. En effet, en optique, on considère que la lumière se propage dans un milieu quelconque avec une vitesse différente de celle qu'elle aurait dans le vide ($c \neq c_0$). Le rapport $n = c_0/c$ s'appelle l'indice de réfraction. Si l'indice de réfraction change le long du trajet lumineux, le rayon lumineux se courbe. Par exemple, un rayon lumineux traversant l'atmosphère terrestre, où l'indice de réfraction varie de manière continue, change de direction.
Ne serait-ce pas un progrès d'expliquer de manière unitaire la courbure d'un rayon lumineux dans un champ de gravitation par un effet comparable à la réfraction (i.e. changement de la vitesse de la lumière) ? Nous allons voir que, dans l'interprétation de la relativité, ce n'est pas ainsi qu'il faut comprendre la courbure d'un rayon lumineux au voisinage d'une masse.

Le principe d'équivalence

Le principe d'équivalence stipule que, *dans une région limitée de l'espace,* vous ne pouvez pas faire la différence entre un champ de gravitation et une accélération. Il découle de l'expérience de Eötvös, qui montre que la masse qui intervient dans l'inertie d'un corps est la même que celle qui intervient dans la gravitation. Il s'ensuit que si vous êtes en chute libre dans un champ de gravitation, vous avez l'impression d'être dans un repère libre de tout champ de gravitation, dans un repère euclidien.
Si donc, dans un champ de gravitation, on choisissait un référentiel en chute libre dans ce champ, le champ disparaissant, la vitesse de la lumière serait constante, exactement comme dans tout repère euclidien. Il semble que ce soit donc facile de se ramener au cas de la relativité restreinte, par ce choix. C'est vrai, mais c'est un peu plus compliqué.

Peut-on définir un repère euclidien dans un champ de gravitation ?

Pour définir un repère euclidien, il faut un point origine et des axes représentés par des droites distinctes, passant par l'origine et munies de vecteurs définissant le sens et la mesure.

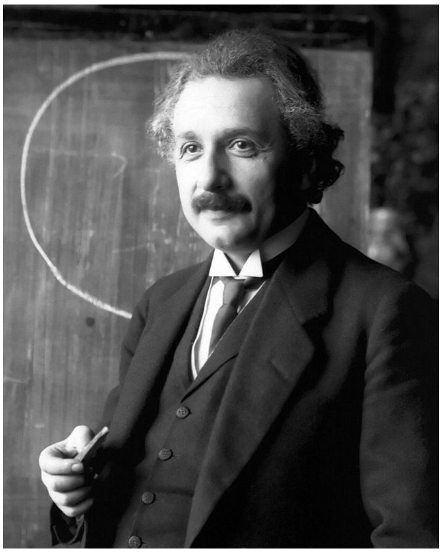
En présence d'un champ de gravitation, comment fait-on pour construire une droite ? Vous allez dire qu'il suffit de choisir deux points et qu'entre les deux on aura une droite, par définition. Est-on sûr que la ligne entre les deux est une droite au sens d'Euclide ? Notre univers est-il euclidien ? Comment le savoir ?
Une méthode imaginée par Gauss consiste à prendre trois points pour former un triangle et à mesurer la somme des angles. On mesure ainsi une propriété intrinsèque de l'espace. C'est ce que pourrait faire des êtres infiniment plats sur une sphère, même s'ils étaient incapables de visualiser la sphère en trois dimensions. Si le triangle est très petit, la somme de ses angles vaudra 180°. Mais si on considère une région très étendue, le résultat sera différent.
Dans le livre cité en introduction, Einstein montre avec l'exemple d'un disque tournant (chapitre 23), qu'on ne peut pas y définir un repère euclidien. Un observateur participant à la rotation peut considérer qu'il est dans un champ de gravitation et il peut prouver que son espace tournant n'est pas euclidien puisque le rapport de la circonférence par le diamètre ne donne pas le nombre π, ceci en vertu de la Relativité Restreinte.
En conclusion, dans un champ de gravitation, un repère euclidien ne peut être défini que dans une région très petite, car on ne peut pas trouver un même repère euclidien en chute libre et annulant partout le champ de gravitation. Que faire ?

La Relativité Générale

La Relativité Générale résout le problème en abandonnant l'hypothèse que l'univers et euclidien. En chaque point de l'espace quadridimensionnel on définit un repère euclidien en chute libre dans le champ gravitationnel local. Ce repère n'est pas utilisé loin du point considéré, mais seulement dans son voisinage infiniment proche où le champ est uniforme. Comme nous l'avons vu, en vertu du principe d'équivalence, la chute libre efface le champ gravitationnel. La vitesse de la lumière doit y être constante.
Pour passer au point voisin, on choisit un nouveau repère euclidien, infiniment proche du précédent et on décrit le passage de l'un à l'autre. Par exemple, un vecteur du second repère est exprimé dans le premier en prenant en compte le transport non seulement des composantes de ce vecteur mais aussi le transport des vecteurs de bases de ce second repère. C'est ce que réalise le calcul tensoriel. On parvient ainsi à rester toujours dans un espace euclidien, mais jamais le même, en passant *de proche en proche* de l'un à l'autre. Un avantage est que, la description mathématique d'une loi, ne dépend plus du tout d'un référentiel particulier. On obtient ainsi un espace courbe, dont la courbure définit les trajectoires des corps en chute libre, y compris les photons. Ces trajectoires, qu'on appelle des géodésiques, sont, de fait, les nouvelles "droites" de l'espace courbe.
Comme le souligne C. Will dans son merveilleux livre "*Les enfants d'Einstein*", on est tenté en mesurant l'accroissement du temps de parcours d'un signal lumineux passant dans un champ gravitationnel intense, d'interpréter ce retard comme un ralentissement de la vitesse de la lumière. Il s'agit en réalité d'un allongement du trajet à cause de la courbure de l'espace.

Une vitesse limite universelle

Terminons par un résultat intéressant démontré par J.M. Levy-Leblond[1] : la transformation de Lorentz utilisée en Relativité Restreinte découle simplement de quatre hypothèses, sans qu'il soit besoin de parler de la vitesse de la lumière : 1) l'espace-temps est homogène et les transformations cherchées sont linéaires ; 2) l'espace est isotrope ; 3) la transformation a les propriétés d'un Groupe (i.e. existence d'une transformation neutre, d'une transformation inverse, et d'une loi de composition) ; 4) la transformation respecte le principe de causalité.
Une vitesse particulière apparaît comme vitesse limite. On l'identifie à *c*, qui devient ainsi une constante universelle.



1 Publié en anglais dans *American Journal of Physics* Vol. 44, N°3, mars 1976, mais traduit en français par O. Castéra et disponible sur internet sous le titre : "Une dérivation de plus des transformations de Lorentz".