

LA MATIERE

ANNEXES

ANNEXE 2:

LA THEORIE DE LA RELATIVITE

Présentation de la théorie de la relativité :

La théorie de la relativité tendait initialement d'expliquer le mouvement relatif des corps. La physique moderne connaît deux concepts très différents, la relativité restreinte et la relativité générale.

Jusqu'au XIX^e siècle, les lois de la mécanique classique étaient communément acceptées par les scientifiques. A partir de ce moment-là, des théories nouvelles apparurent. Il a été montré alors que les lois de la mécanique classique restent valables pour des situations physiques simples. Par contre, lorsque la vitesse des corps, (particules), est proche de la vitesse de la lumière, il faut appliquer les lois de la mécanique relativiste.

La limite d'application de la mécanique classique à un corps en mouvement est définie par un facteur représenté par la formule β (bêta) = v/c , avec v la vitesse du corps et c la vitesse de la lumière, soit $3 \cdot 10^8$ m/s. On utilise la mécanique classique lorsque β est négligeable devant 1. Pour β proche de 1, il faut appliquer la mécanique relativiste. Ainsi, pour les phénomènes terrestres courants (mécanique du solide, balistique), les corrections relativistes peuvent être négligées. Par contre, lorsque les vitesses des corps deviennent très élevées, comme dans certains phénomènes astronomiques, les corrections relativistes sont significatives. De même, lorsque les distances considérées sont très grandes, ou lorsque l'on étudie des agrégats de matière quantitativement importants, l'utilisation des principes relativistes est indispensable.

De la même façon que la théorie quantique s'applique à l'infiniment petit, la théorie de la relativité s'applique à l'infiniment grand.

La relativité restreinte :

Elle apparut au début du XX^e siècle avec Einstein.

Le scientifique nie alors l'existence du mouvement absolu. Selon lui, dans l'Univers, aucun corps particulier ne peut fournir de système de coordonnées de référence universel qui soit au repos absolu. Tout corps fournit par contre un système de référence convenable, dans lequel tout mouvement peut être étudié. Il est donc tout aussi correct d'affirmer qu'un train passe devant une gare, ou que la gare se déplace par rapport au train. Selon Einstein, tout mouvement est donc relatif et on doit préciser le référentiel d'étude.

Aucune des hypothèses fondamentales d'Einstein n'est révolutionnaire, surtout si l'on se borne à l'exemple du train. En effet, Newton avait déjà affirmé que le repos absolu ne pouvait pas être défini par rapport à la position des corps qui nous entourent. Ce qui fut nouveau, c'était d'affirmer que la vitesse relative de tout observateur par rapport à un rayon lumineux est toujours la même, soit approximativement 300 000 km/s. Ainsi, si deux observateurs se déplacent l'un par rapport à l'autre à une vitesse de 160 000 km/s, et mesurent la vitesse d'un même rayon de lumière, ils trouveront tous les deux que ce dernier se déplace à 300 000 km/s. Ce résultat apparemment anormal fut démontré par l'expérience.

Chaque observateur utilise en effet un système de coordonnées propre comme référentiel. On peut passer d'un système de coordonnées à l'autre par une transformation mathématique. Einstein a

avancé que la vitesse de la lumière reste invariable.

D'après la théorie relativiste, les distances sont modifiées dans le sens du mouvement de l'objet, ainsi que la masse et le temps. Ces transformations sont déterminées par le facteur gamma.

L'électron, découvert au début du XX^e siècle, constitue un bon objet d'étude pour vérifier de telles assertions. Les électrons émis par des substances radioactives ont des vitesses proches de celle de la lumière. Lorsqu'un électron se déplace rapidement dans un champ magnétique, sa masse peut être facilement déterminée en mesurant la courbure de sa trajectoire. Lorsque le champ est constant, plus l'électron est lourd, plus son inertie est grande et la courbure de la trajectoire petite. On constate qu'au cours du mouvement, la masse de l'électron est doublée. Les expériences confirment les prédictions d'Einstein : La masse de l'électron augmente exactement de la valeur prédite. L'énergie cinétique de l'électron accéléré est convertie en masse, selon la formule $E = mc^2$, qui traduit l'équivalence masse-énergie.

L'hypothèse fondamentale soutenant la théorie d'Einstein est la non-existence du repos absolu dans l'Univers. Einstein postula que deux observateurs, se déplaçant l'un par rapport à l'autre à une vitesse constante, observent des lois de la nature identiques. Toutefois, l'un des observateurs peut enregistrer deux événements sur des étoiles éloignées comme s'ils avaient lieu simultanément, pendant que le second observateur constate qu'un événement s'est produit avant l'autre. Cette divergence des observations n'est pas une objection valable à la théorie de la relativité. En effet, selon cette dernière, la simultanéité n'existe pas pour des événements éloignés. En d'autres termes, il est impossible de seulement spécifier le moment où l'événement se produit, sans préciser l'endroit où il a lieu. La distance ou l'intervalle entre deux événements peut être décrit exactement en combinant les intervalles de temps et d'espace, mais pas par l'un ou l'autre séparément. L'espace-temps à quatre dimensions (trois dimensions pour l'espace et une pour le temps), dans lequel tous les événements de l'Univers ont lieu, est appelé continuum espace-temps. Dans cet espace, le mouvement spatio-temporel d'un corps est décrit par sa ligne universelle.

La relativité générale :

Puis Einstein introduisit la théorie de la relativité générale dans laquelle il considère des corps accélérés les uns par rapport aux autres. Son but initial était d'expliquer les divergences apparentes entre les lois relativistes et la loi de la gravitation. Il adopta alors une nouvelle approche du concept de gravité, fondée sur le principe de l'équivalence.

D'après ce principe, les forces de gravitation sont en tout point équivalentes aux forces d'accélération. Ainsi, dans une expérience, il est théoriquement impossible de différencier les deux types de forces. D'après la théorie de la relativité restreinte, une personne située dans une voiture qui roule sur une route lisse ne peut pas savoir si elle est au repos ou animée d'un mouvement uniforme. Selon la théorie de la relativité générale, lorsque la voiture est accélérée, ralentie, ou engagée dans un virage, l'occupant ne peut savoir si les forces produites sont dues à la gravitation ou à l'accélération.

L'accélération est la variation de la vitesse au cours du temps. Considérons un astronaute debout dans une fusée avant son décollage. En raison de la gravité, l'astronaute est maintenu debout par une force équivalente à son poids p . Considérons la même fusée dans l'espace interplanétaire, loin de tout corps et ne subissant aucune gravité. Lorsque la fusée accélère, l'astronaute subit à nouveau la poussée qui le maintient debout. Si l'accélération est de $9,8 \text{ m/s}^2$ (accélération de la pesanteur à la surface de la Terre), la poussée qui s'exerce sur l'astronaute est égale à p , poids de l'astronaute. S'il ne regarde pas à travers le hublot, l'astronaute ne sait pas si la fusée est au repos sur la Terre ou en accélération constante dans l'espace interplanétaire. La force due à l'accélération ne peut donc pas être distinguée de la force de gravitation. Selon la théorie d'Einstein, la loi newtonienne de la gravitation est une hypothèse non nécessaire. Einstein assimile toutes les forces, aussi bien la gravité que les forces associées à l'accélération, à des effets de l'accélération. Lorsque la fusée est au repos sur Terre, elle est attirée vers le centre de celle-ci. Einstein déclare que ce phénomène d'attraction est dû à une accélération de la fusée. Certes, dans l'espace tridimensionnel, la fusée est stationnaire, elle n'est donc pas accélérée. Mais dans un espace-temps à quatre dimensions, la fusée est en mouvement suivant sa ligne universelle. La courbure du continuum à proximité de la Terre implique une courbure de la ligne universelle de la fusée, ce qui explique son mouvement relativiste.

L'hypothèse de Newton, selon laquelle deux corps sont soumis à une attraction mutuelle

proportionnelle à leur masse, est donc remplacée par l'hypothèse relativiste, selon laquelle le continuum est courbe à proximité des corps massifs. La loi de la gravitation d'Einstein affirme alors simplement que la ligne universelle de chaque corps est une géodésique dans le continuum. Une géodésique est le chemin le plus court entre deux points. Dans un espace courbe, les géodésiques ne sont pas nécessairement des droites. Ainsi, les géodésiques à la surface de la Terre sont de grands cercles.

Confirmation et modifications de la théorie :

La théorie de la relativité générale fut confirmée de plusieurs façons. En voici quelques exemples:

La théorie prédit notamment que la trajectoire d'un rayon lumineux est courbe au voisinage immédiat d'un corps massif comme le Soleil. Ces prédictions ont été validées par des observations. Des tests comparables ont été faits sur les déflexions des ondes radio provenant de quasars éloignés.

On sait que le point le plus proche du Soleil, par lequel passe Mercure, se déplace autour du Soleil avec une période de 3 millions d'années. Contrairement à la théorie classique, la théorie de la relativité prédit ce mouvement. Effectuées récemment par radar, des mesures de l'orbite de Mercure ont confirmé les prédictions relativistes avec une incertitude de seulement 0,5 p. 100.

D'autres chercheurs se sont efforcés d'élargir la théorie de la relativité pour y inclure des phénomènes électromagnétiques.

Plusieurs chercheurs ont tenté d'unifier la théorie gravitationnelle relativiste avec l'électromagnétisme et les interactions nucléaires fortes et faibles, mais sans succès à ce jour.

Bien que quelques progrès aient été réalisés, aucune théorie n'est aujourd'hui acceptée de façon générale.

Remarques :

Dans le cadre des axiomes d'Einstein, plusieurs voies de développement sont possibles. L'espace, par exemple, est courbe, et son degré exact de courbure à proximité des corps lourds est connu. Mais sa courbure dans l'espace vide, causée par la matière et le rayonnement de l'Univers tout entier, demeure incertaine. Par ailleurs, les scientifiques ne savent pas encore si cette courbe est fermée (c'est-à-dire analogue à une sphère), ou ouverte (analogue à un cylindre ou à un bol aux parois infinies). La théorie de la relativité implique également la possibilité d'expansion de l'Univers. Cette théorie de l'expansion rend crédible l'hypothèse selon laquelle l'histoire passée de l'Univers est finie. A la suite des prédictions d'Einstein, un autre sujet important de la recherche en physique est l'étude des ondes gravitationnelles, qui sont par exemple issues de l'oscillation ou de l'effondrement d'étoiles massives, et qui perturbent le continuum espace-temps.

Une grande part des dernières recherches sur la relativité est consacrée à la création d'une mécanique quantique relativiste qui soit pratique à manipuler.

Une théorie satisfaisante, appelée électrodynamique quantique, a unifié les concepts de la relativité et de la physique quantique.

Cette théorie est particulière à l'étude de l'interaction entre les électrons, les positrons et le rayonnement électromagnétique. Certains tentent une intégration totale de la mécanique quantique et de la théorie relativiste. Finalement, les théories de la relativité ont totalement bouleversé la notion d'espace-temps.