

# Relativités et mécanique quantique


G.Paturel, Observatoire de Lyon

**Résumé :** Le 20<sup>ème</sup> siècle a vu naître plusieurs théories qui ont profondément bouleversé nos conceptions de la physique. Il s'agit de la Relativité Restreinte, de la Relativité Générale et de la Mécanique Quantique (dite aussi mécanique ondulatoire). Nous allons donner un bref aperçu des origines, des préceptes et des conséquences de ces théories. Nous concluons ainsi ce dossier consacré à l'Année Mondiale de la Physique et à Einstein.

## Relativité restreinte

La théorie de la Relativité Restreinte a été élaborée par A. Einstein en 1905. D'autres savants, comme Poincaré, Lorentz ou Hertz, avaient approché cette théorie mais sans lui donner la portée générale qu'Einstein a pu lui trouver.

Le problème s'est posé ainsi : le principe de relativité de Galilée stipulait que les lois de la mécanique demeuraient inchangées quand on les exprimait dans des systèmes de références en mouvement de translation uniforme les uns par rapport aux autres (ce qu'on appelle les systèmes galiléens). Il n'y avait pas de système de référence privilégié. Dit d'une autre manière, quand on rapporte une loi de la mécanique à un repère (par exemple le sol), cette loi est la même quand on l'exprime dans un repère en mouvement uniforme (par exemple un train roulant en ligne droite, à vitesse constante, par rapport au sol). Le changement de coordonnées galiléen fait apparaître explicitement la vitesse relative du train et du sol, mais la loi n'est pas changée. Par exemple, la loi fondamentale de la mécanique est invariante dans un tel changement de repère.



Comme vous avez raison de dire que la vitesse est une notion relative!

Mais, ce qui semblait vrai pour les lois de mécanique ne l'était plus pour les lois de l'électrodynamique, rassemblées en une formulation remarquable par Maxwell. Où était l'erreur ? Fallait-il renoncer à une généralisation du principe de relativité ? Les équations de Maxwell étaient-elles incomplètes ou fallait-il invoquer une nouvelle loi de la nature ? La transformation de Galilée, pourtant si naturelle, devait-elle être remise en cause ? Toutes ces hypothèses ont été envisagées. C'est la dernière hypothèse qui a prévalu.

Le postulat principal d'Einstein est que la vitesse de la lumière devait être constante pour tout repère galiléen. Dans son petit livre de vulgarisation : "La Relativité", Einstein dit que l'astronome Hollandais De Sitter avait montré que la vitesse de la lumière ne dépendait pas de la vitesse de la source émissive. Un tel postulat semblait incompatible avec le principe de relativité galiléen.

Si l'addition classique des vitesses est vraie, ce postulat de la constance de la vitesse de la lumière ne pouvait pas tenir. Mais, et c'est là l'apport considérable, Einstein a montré que la notion de simultanéité n'avait pas un caractère absolu. De là, découle que le temps est relatif et non absolu. Chaque repère galiléen emporte son propre temps. La transformation de Galilée n'est plus correcte. Les longueurs ne sont plus des quantités absolues, mais elles changent quand on passe d'un repère galiléen à un autre animé d'une vitesse uniforme. L'addition des vitesses doit être révisée. Elle obéit désormais à une transformation qui laisse inchangée la vitesse de la lumière.

Les physiciens Michelson et Morley ont pu montrer, par une expérience interférométrique d'une remarquable finesse, que la vitesse de la lumière n'était pas affectée par le déplacement de la Terre

sur son orbite. Dans la conception classique, galiléenne, cette observation ne pouvait pas être comprise. Certes, on pouvait "sauver les faits" en supposant, avec Fitzgerald ou Lorentz, que les longueurs se contractaient dans le sens du déplacement de la Terre. Mais cette explication était quelque peu *ad hoc*. Or, par son hypothèse de constance de la vitesse de la lumière, Einstein expliquait cette contraction des longueurs de manière très naturelle. Il prédisait aussi la dilatation des durées mesurées depuis un autre repère galiléen. La nouvelle transformation qui permet de passer d'un repère galiléen à un autre, s'appelle la transformation de Lorentz (ou de Fitzgerald-Lorentz). Pour des vitesses faibles devant la vitesse de la lumière, la nouvelle transformation se réduit à la transformation classique de Galilée. La nouvelle théorie englobe donc l'ancienne en la généralisant.

A partir de lois classiques (aberration de la lumière, pression de radiation et conservation de la quantité de mouvement), Einstein a aussi déduit une relation étonnante  $E=mc^2$ . Cette relation montre l'équivalence entre énergie et masse.

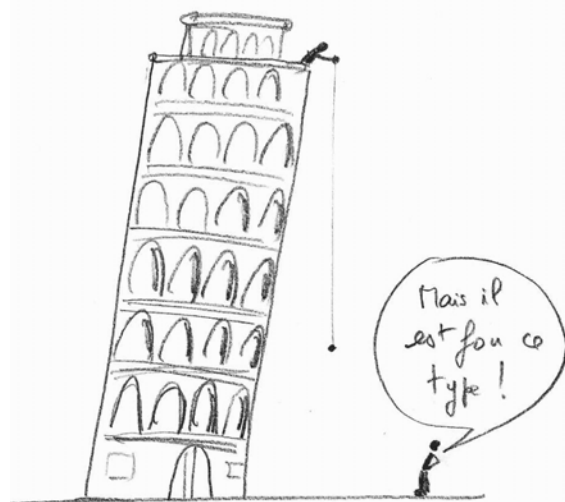
## Relativité générale

Après les succès de la Relativité Restreinte, applicable aux repères en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres, Einstein a cherché à étendre sa théorie aux repères accélérés.

Une difficulté apparaissait : la loi d'inertie, qui veut qu'un corps garde son état de mouvement, n'était plus valable quand on considérait des repères non plus galiléens, mais des repères accélérés. Par rapport à ces derniers, des forces nouvelles (forces d'inertie) apparaissent qui modifient l'état de mouvement des corps. Fallait-il concevoir une physique valable pour des repères galiléens et une physique valable pour des repères non galiléens ? Einstein posait la question suivante : "Comment est-il possible que certains repères soient préférés à d'autres repères ? Quelle est la raison de cette préférence ? Il fallait trouver en effet une cause à ces comportements différents. Einstein trouve la solution en reprenant une analyse de Newton.

Une distinction subtile avait été faite par Newton entre la masse *grave* et la masse *inerte*. De quoi s'agit-il ? Quand deux corps s'attirent mutuellement sous l'effet de la gravitation universelle, la force d'attraction dépend du produit des deux masses. Ces masses s'appellent les masses *graves* car elles interviennent dans la gravitation. En

revanche, quand nous appliquons une force sur un corps pour le mettre en mouvement, le corps montre une inertie qui s'oppose au changement de mouvement. Cette inertie qui s'exprime dans la loi fondamentale de la dynamique ( $F=m.a$ ) fait intervenir la masse *inerte* du corps. On l'appelle ainsi car elle intervient dans l'inertie. Expérimentalement on constate que tous les corps qui sont sollicités par un même champ de gravitation, acquièrent des vitesses identiques. C'est la célèbre expérience de Galilée qui, lâchant des sphères de différentes natures du haut de la tour de Pise, constata qu'elles tombaient toutes à la même vitesse.



La force d'attraction était plus forte pour les sphères très lourdes (masse grave importante) mais ces mêmes sphères résistaient d'avantage à leur mise en mouvement (masse inerte importante). Il semblait donc, expérimentalement, que ces deux masses étaient identiques. Einstein en fit un postulat.

Pourquoi ce postulat résolvait-il le problème ? La masse inerte étant identifiée à la masse grave, un repère accéléré était donc identifié à un repère galiléen dans un champ de gravitation. Des physiciens, faisant une expérience à l'intérieur d'un ascenseur accéléré, pourraient considérer qu'ils sont dans un repère galiléen, mais soumis à un champ de gravitation. Einstein nourrissait l'espoir que l'étude des champs de gravitation particuliers, nés de ces repères accélérés, allaient nous éclairer d'avantage

sur la loi générale de la gravitation. C'est ce qui s'est produit. La théorie de la Relativité Générale est en cela une théorie de la gravitation.

Pour ce qui est du formalisme adopté pour la théorie de la Relativité Générale, une idée révolutionnaire allait être utilisée par Einstein : l'abandon de l'espace Euclidien.

Dans un espace Euclidien, le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre vaut exactement  $\pi=3,1415926\dots$ . Ce n'est pas la seule propriété, mais c'en est une. Imaginons deux observateurs, l'un sur un disque tournant, l'autre en dehors. Le premier pourra considérer qu'il est dans un repère galiléen soumis à un champ de gravitation qui le pousse vers l'extérieur du disque. Les deux observateurs ne mesureront pas la même circonférence à cause du mouvement uniforme entre les deux repères. Le diamètre en revanche sera le même car il est perpendiculaire au mouvement. Le rapport de la circonférence au diamètre ne sera pas le même pour les deux observateurs. Cette propriété importante de l'espace euclidien aura disparu pour le premier observateur. Il devra conclure que le champ de gravitation modifie la nature euclidienne de son repère "galiléen".

L'abandon de l'espace euclidien en présence d'un champ de gravitation, conduira Einstein à adopter un espace courbe dont la courbure résulte du champ de gravitation. Ainsi, tous les corps se déplaçant librement dans cet espace courbe, auront des trajectoires similaires. On explique ainsi que la chute des corps soit la même, quelle que soit leur nature, conformément à l'expérience de Galilée. Cette identité de la masse grave et de la masse inerte ne repose que sur l'expérience. L'expérience de Eötvös a permis de mettre une limite à l'égalité des masses grave et inerte. L'égalité serait vraie à au moins un dix milliardième près. De nouvelles expériences spatiales tentent d'abaisser cette limite ou de mettre ce principe d'équivalence en défaut.

## **Mécanique quantique (ou ondulatoire)**

La mécanique quantique est une théorie aussi déroutante que les théories de la Relativité. Les bases en furent jetées quand le physicien Planck

essaya d'interpréter le rayonnement d'un corps parfaitement émissif et parfaitement absorbant (ce qu'on appelle le corps noir). Planck montra que les échanges d'énergie du rayonnement ne pouvaient se faire que par paquets, bien définis : les quanta.

Il en résultait que l'incertitude sur l'énergie multipliée par l'incertitude sur le temps (ou de manière équivalente, l'incertitude sur la quantité de mouvement multipliée par l'incertitude sur la position) devait être un multiple d'une quantité constante, la constante de Planck. Il en découlait alors un résultat surprenant : on ne pouvait pas connaître avec une précision infinie, et simultanément, la position et la quantité de mouvement d'une particule élémentaire (où de manière équivalente, l'énergie et le temps). Si on augmentait indéfiniment la précision de la mesure de la position selon une direction, la mesure de la quantité de mouvement, selon cette même direction, devenait très incertaine. Il le faut bien pour que le produit des deux reste constant.

En adoptant l'hypothèse de Planck, Bohr réussit à interpréter les raies énigmatiques qui apparaissaient dans les spectres lumineux et qui résultaient de l'absorption (ou de l'émission) de la lumière par les atomes ; c'est ce que nous avons vu en détail dans le précédent Cahier (CC111). Cette hypothèse conduisait à des prédictions qui furent vérifiées.

Par une autre voie, de Broglie montra qu'à toute particule en mouvement, on pouvait associer une onde qui caractérisait seulement la probabilité de présence de cette particule. Une particule pouvait être considérée comme une onde et réciproquement. Cette conception fut vérifiée quand on put observer des interférences obtenues avec un faisceau d'électrons animés par la même vitesse.

Ainsi, de la description mécaniste, où la précision n'était limitée que par la finesse de l'expérience et l'habileté de l'expérimentateur, on arrivait à une description probabiliste, où il y avait une impossibilité fondamentale à connaître toute l'information sur une particule, et plus généralement sur un objet.

■