

PAUL LANGEVIN

LE PRINCIPE

DE

RELATIVITÉ

I. — LA RELATIVITÉ RESTREINTE

La relativité en mécanique. — La relativité en physique. — L'expérience de Michelson et la contraction de Lorentz. — Actions à distance et actions de contact. — La composition des vitesses. — Les rayons β du radium. — L'entraînement des ondes. — Le temps et l'espace relatifs. — Le temps propre. — La dynamique de la relativité. — Variation de la masse avec la vitesse. — Vérifications expérimentales. — La structure des raies de l'hydrogène. — Les petits écarts de la loi de Prout.

II. — LA RELATIVITÉ GÉNÉRALISÉE

La pesanteur de l'énergie. — Le boulet de Jules Verne. — La loi de gravitation. — Le champ de gravitation d'un centre. — Le mouvement des planètes. — Le mouvement de Mercure. — La déviation de la lumière.

(Conférence faite à la Société des Electriciens)

Étienne CHIRON, éditeur, 40, rue de Seine, PARIS-6^e

LE PRINCIPE
DE RELATIVITÉ

BIBLIOTHÈQUE DE SYNTHÈSE SCIENTIFIQUE

publiée sous la direction de M. Louis ROUGIER

PAUL LANGEVIN

Professeur de Physique expérimentale
au Collège de France.

LE PRINCIPE
DE RELATIVITÉ

Conférence faite à la
Société Française des Électriciens

PARIS
ETIENNE CHIRON, Éditeur
40, Rue de Seine

1922

LE PRINCIPE DE RELATIVITÉ

Le 9 novembre 1919, la Société royale et la Société astronomique de Londres se réunissaient en séance solennelle, sous la présidence de Sir Joseph Thomson, pour recevoir communication des résultats obtenus par les deux expéditions chargées d'observer l'éclipse totale de Soleil du 29 mai 1919. Le but essentiel de ces expéditions était de vérifier les prévisions théoriques de M. Einstein sur la déviation de la lumière par le champ de gravitation du Soleil : une étoile vue dans une direction voisine du bord de l'astre devait paraître écartée de sa position normale d'un angle égal à $1''74$ vers l'extérieur du Soleil.

La vérification complète, qualitative et quantitative de cette prévision, venant après d'autres confirmations expérimentales non moins frappantes dont j'ai l'intention de vous entretenir ici, appelle vivement l'attention, même du grand public, si l'on en juge par les nombreux articles que lui a consacrés la presse, sur la théorie de la relativité grâce à laquelle ces résultats ont été obtenus.

La puissance d'explication et de prévision de cette théorie, imposée par les faits et confirmée par eux, est aussi grande que sa structure logique est rigoureuse et belle. Son développement a été poursuivi, principalement par M. Einstein, avec une admirable continuité de pensée, en deux étapes principales : celle de la relativité restreinte de 1905 à 1912 et depuis 1912

celle de la relativité généralisée. La nouveauté et quelquefois l'étrangeté des conceptions auxquelles elle conduit rend particulièrement difficile sa pleine intelligence, mais son importance justifie largement l'effort qu'elle peut demander. Son étude est d'autant plus nécessaire qu'elle représente l'aboutissement actuel du travail progressif d'adaptation de la pensée aux faits et d'élimination des absolus arbitraires introduits dans les constructions provisoires par lesquelles la Science a tenté, avec un succès croissant, de représenter les lois de l'Univers.

I.

LA RELATIVITÉ RESTREINTE.

1. *La relativité en Mécanique.* — L'expérience montre que les phénomènes mécaniques se passent de la même manière lorsqu'ils sont observés à partir de systèmes matériels en mouvement de translation uniforme les uns par rapport aux autres, qu'ils suivent les mêmes lois pour des observateurs liés à la Terre et pour d'autres opérant à l'intérieur d'un véhicule lancé à toute vitesse d'un mouvement uniforme. On peut encore dire qu'*il n'y a pas de translation absolue*, l'expérience ne peut mettre en évidence que le mouvement de translation relatif de deux portions de matière.

La translation relative la plus rapide que nous ayons à notre disposition pour vérifier cette loi nous est fournie par le mouvement annuel de la Terre : à six mois d'intervalle, celle-ci se trouve dans deux positions diamétralement opposées sur l'orbite et des systèmes d'axes qui lui sont liés aux deux instants possèdent l'un par rapport à l'autre une vitesse relative de 60 km par seconde. S'il était possible, par d'autres expériences que celles de Mécanique, de définir des axes absolus et par rapport à eux le repos absolu, comme on a espéré pouvoir le faire en Optique et en Electricité au moyen de l'éther, milieu hypothétique à travers lequel se propagent les ondes lumineuses et se transmettent les actions électromagnétiques, la vitesse de translation de la Terre par rapport à ces axes changerait constamment au cours de l'année, et, quel que soit le mouvement du Soleil par rapport à eux, prendrait au moins un moment une valeur égale ou supérieure à 30 km par seconde, vitesse de la Terre par rapport au Soleil.

Le fait que les lois de la Mécanique, au degré de précision des mesures, sont exactement les mêmes en janvier et en juillet met bien en évidence le caractère relatif de la translation.

S'il n'y a pas, au moins en Mécanique, de translation absolue, il y a au contraire rotation absolue comme en témoignent les effets de force centrifuge en statique et de force centrifuge composée en dynamique. Des expériences faites à l'intérieur d'un système matériel permettent de mettre en évidence un mouvement de rotation d'ensemble.

Il est nécessaire de voir comment la Mécanique rationnelle traduit dans ses formules cette relativité de la translation. Je définirai à ce propos quelques expressions qui nous seront utiles par la suite.

2. *L'Univers cinématique.* — La présence d'une portion de matière, d'un mobile par exemple, en un certain lieu à un certain instant est un *événement*. En général nous appellerons *événement* le fait qu'une chose matérielle ou non, portion de matière ou onde électromagnétique par exemple, se trouve ou passe en un lieu donné à un instant donné. Nous appellerons *Univers* l'ensemble des événements. Pour repérer ceux-ci, nous pouvons faire choix de divers *systèmes de référence*, par exemple d'axes rectangulaires liés à un groupe donné d'observateurs. Pour ceux-ci, la situation de chaque événement sera caractérisée par quatre coordonnées, x , y , z , t , dont trois d'espace et une de temps. L'ensemble de toutes les situations possibles d'événements constitue l'*Univers cinématique* défini comme étant une multiplicité à quatre dimensions.

Les coordonnées d'un même événement changent avec le système de référence, soit parce qu'on modifie l'orientation des axes, soit parce que cet événement

est observé par différents groupes d'expérimentateurs, est rapporté à divers systèmes de référence en mouvement les uns par rapport aux autres. Nous supposons toujours, au moins en relativité restreinte, que tous les observateurs emploient les mêmes unités, se servent, en particulier pour les mesures d'espace et de temps, de règles et d'horloges définies de la même manière.

Le cas le plus simple, le seul que nous considérerons ici, est celui où les deux systèmes d'axes ont même orientation et une vitesse de translation relative uniforme v , dans la direction commune des x . Les origines O et O' des coordonnées d'espace sont supposées coïncider à l'origine du temps. Dans ces conditions, la cinématique ordinaire fournit les relations suivantes entre les coordonnées d'espace et de temps d'un même événement x, y, z, t pour l'un des systèmes et x', y', z', t' pour l'autre :

$$(1) \quad x = x' + vt', \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$

Ces formules caractérisent une transformation faisant partie de ce que nous appellerons le *groupe de Galilée*. On entend par là que deux transformations successives de cette nature, correspondant à des vitesses v et v' , équivalent à une transformation unique de même forme avec une valeur de la vitesse égale à

$$(2) \quad v'' = v + v',$$

c'est, pour le cas simple actuel, la loi bien connue de composition des vitesses. Elle signifie encore qu'un mobile ayant dans la direction des x la vitesse v' par rapport au système O' a, par rapport au système O , dans la même direction une vitesse v'' définie par la formule (2).

Ce groupe de Galilée possède les propriétés suivantes, fondamentales en cinématique ordinaire.

L'intervalle de temps entre deux événements a la même valeur dans tous les systèmes de référence (temps absolu). En particulier, la simultanéité a un sens absolu, deux événements simultanés pour un groupe d'observateurs sont simultanés pour tous autres quel que soit leur mouvement par rapport aux premiers. Le temps est un invariant du groupe de Galilée.

La distance dans l'espace de deux événements *simultanés* est la même pour tous les observateurs. La forme d'un corps, définie pour des observateurs par rapport aux quels il est en mouvement comme étant le lieu des positions simultanées des différents points de la surface du corps, est la même dans tous les systèmes de référence. L'espace, comme le temps, est le même pour tous.

Au contraire, deux événements *successifs*, séparés par un intervalle de temps t , ont *une distance dans l'espace variable avec le système de référence*. Cela résulte immédiatement des formules (1) et peut s'illustrer par un exemple concret simple : un wagon se mouvant par rapport au sol avec la vitesse v porte une ouverture par laquelle les observateurs liés au wagon laissent tomber successivement deux objets à intervalle de temps t . Les deux événements que constituent les passages des objets par l'ouverture se passent au même point, ont une distance nulle dans l'espace pour les gens du wagon ; ils sont au contraire distants de vt dans l'espace pour des observateurs liés au sol.

Le groupe de Galilée, qui caractérise la cinématique ordinaire, introduit ainsi entre la distance dans l'espace et l'intervalle dans le temps de deux événements quelconques une dissymétrie qui disparaît dans la cinématique nouvelle. Nous verrons que, pour celle-ci, l'intervalle dans le temps varie aussi

bien que la distance dans l'espace avec le mouvement du système de référence.

C'est seulement dans le cas où il y aurait coïncidence des événements dans l'espace et dans le temps, *coïncidence absolue* comme nous dirons, que la distance dans l'espace et l'intervalle dans le temps doivent s'annuler à la fois pour tous les groupes d'observateurs. Et il en sera nécessairement ainsi même en relativité généralisée puisque cette coïncidence complète des événements a un sens absolu, étant donné qu'un effet, un phénomène, en peut résulter sur l'existence duquel tous les observateurs seront nécessairement d'accord : par exemple les objets peuvent se briser par choc mutuel en passant en même temps par la même ouverture.

Il est important de remarquer dès maintenant que toute notre expérience, *toutes les sensations par lesquelles nous percevons l'Univers, sont déterminées par de telles coïncidences absolues*, contact de notre corps avec les objets ou coïncidence absolue d'un signal lumineux avec notre rétine. *Les liaisons causales que la mémoire et l'habitude nous permettent d'établir entre des séries de semblables coïncidences doivent avoir le même caractère absolu, et, comme toute notre science est fondée sur de telles constatations, les lois qui régissent l'Univers de notre expérience, le seul qui soit objet de science, doivent avoir (ou pouvoir être mises sous) une forme complètement indépendante du système de référence.* On voit apparaître ici l'idée profonde qui semble avoir guidé M. Einstein à travers toutes les difficultés de la seconde étape du développement de la relativité et lui a donné, avant le succès complet atteint seulement à la fin de 1915, la conviction profonde qu'il était possible et même nécessaire de donner aux lois de la physique une forme complètement invariante pour toutes les transformations qui permettent de passer d'un système

de référence à un autre en mouvement *quelconque* par rapport au premier, et non plus seulement dans le cas du mouvement de translation uniforme auquel se limitait le principe de relativité restreinte.

3. *La Mécanique rationnelle.* — A la cinématique, définie par le groupe de Galilée, la Mécanique rationnelle associe tout d'abord les notions de masse et de force. La première y est considérée comme un invariant : la masse ou coefficient d'inertie d'une portion de matière est admise *a priori* comme constante, indépendante de l'état de repos ou de mouvement ou des changements d'état physique ou chimique que cette portion de matière peut subir. Le mouvement d'un point matériel est régi par, et la mécanique rationnelle est construite sur les équations fondamentales de la forme

$$(3) \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = F,$$

F étant la composante dans la direction des x de la force qui agit sur le point matériel.

Si nous associons aux relations (1) la condition d'invariance de la masse

$$(4) \quad m = m',$$

et la condition qui traduit dans notre cas particulier le caractère vectoriel de la force

$$(5) \quad F = F',$$

nous obtenons, comme conséquence de (1), (3), (4) et (5),

$$(6) \quad m' \frac{d^2x'}{dt'^2} = F',$$