

est la causalité : on peut influencer sur certains événements – ceux du futur causal – mais pas sur d’autres – ceux du passé causal. En physique newtonienne, la causalité se confond avec la chronologie.

À chacun sa durée

Or la relativité restreinte – et *a fortiori* la relativité générale – remet en cause toutes ces propriétés. Il est par exemple impossible d’assigner une durée bien définie à un processus physique. Imaginons le trajet d’un photon, de son émission par une étoile à sa réception par un télescope au sol. Bien que l’universalité de la méthode de mesure elle-même pose problème, supposons qu’il existe un tel protocole. Un premier observateur, sur Terre, l’applique et mesure une « durée » t_1 . Un autre, situé sur le trajet, effectue une observation identique, et trouve une durée t_2 , tandis qu’un troisième, se déplaçant le long du trajet, mesure une durée t_3 . La physique newtonienne considère que t_1 , t_2 et t_3 sont trois mesures d’une même grandeur, la durée : elles doivent donc être égales.

Mais de nombreuses observations (cascades de particules engendrées par les rayons cosmiques, désintégration dans les accélérateurs de particules, phénomènes astrophysiques à haute énergie, ainsi que des expériences en laboratoire ou en orbite, etc.) prouvent que ce n’est pas le cas : en général, les valeurs mesurées par différents observateurs ne sont pas les mêmes, écarts que prédisent avec exactitude les théories relativistes.

La seule explication cohérente est que ces mesures concernent en fait des grandeurs différentes ; autrement dit, il n’existe pas de grandeur que l’on pourrait appeler sans ambiguïté « durée » d’un phénomène. Toute autre interprétation cherchant à relier les différentes « durées » mesurées à une durée intrinsèque conduit à des paradoxes.

Il existe pourtant une durée en un sens « plus valable » que les autres. Les équations de la relativité indiquent que dans notre exemple, plus le trajet d’un observateur est proche de celui du photon émis par l’étoile, plus la « durée » qu’il va mesurer est petite. De façon générale, l’observateur qui est lié à un processus et l’accompagne du début à la fin mesurera la durée la plus petite possible. Nommée « durée propre », on peut considérer que c’est la « vraie » durée du processus.

Dans notre exemple, la durée propre du phénomène est celle que mesurerait le photon. Or la relativité indique que la durée propre d’un photon est... nulle. Cela n’est qu’une manifestation du fait qu’il voyage à la vitesse limite, celle de la lumière ; de façon générale, c’est vrai pour toute particule de masse nulle. Ainsi, la durée propre du trajet d’un photon, de son émission dans une galaxie lointaine à sa réception, est nulle. On aurait pourtant envie de dire que le trajet dure des milliards d’années !

Dès lors, comment différents observateurs peuvent-ils comparer les durées entre deux événements donnés ? Chaque observateur ne peut mesurer que sa durée propre, le long de sa trajectoire dans

Les durées dépendent de l’observateur

La notion de durée d’un phénomène est différente d’un observateur à l’autre. Imaginons par exemple un train en mouvement uniforme, qui passe devant une gare. Une impulsion lumineuse est envoyée du sol vers le plafond du train, où elle est réfléchi par un miroir vers son point de départ.

Pour un observateur assis dans le train, la durée du trajet de la lumière est $d = 2h/c$, où h est la hauteur du plafond et c la vitesse de la lumière. Mais pour un observateur sur le quai de la gare, puisque le train a avancé pendant le trajet de la lumière, le point de réflexion

de la lumière au plafond, et encore plus le point d’impact au retour sur le plancher, sont décalés par rapport à la verticale du point d’émission.

Comme ce point de retour ne se trouve pas là où se situe l’observateur de la gare, celui-ci ne peut mesurer directement la durée du phénomène (on dit que cet événement n’appartient pas à sa « ligne d’univers », qu’il décrit dans l’espace-temps.) Il peut cependant reconstituer ce qu’il qualifiera – de façon impropre, au sens strict – de durée du phénomène.

La vitesse de la lumière étant invariante, l’aller-retour

de la lumière dure ainsi plus longtemps observé depuis la gare. Un calcul géométrique simple montre que la « durée » observée depuis le quai est :

$$d' = d / \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

où v est la vitesse du train. Le « temps » du train et le temps de la gare ne sont donc pas identiques.

Cependant, pour avoir une compréhension correcte de la situation, il faudrait comparer les durées de phénomènes se situant sur la trajectoire des différents observateurs dans l’espace-temps. C’est tout l’objet du « paradoxe des jumeaux » (voir l’encadré page suivante).

