

l'espace-temps (sa ligne d'univers). Or, entre les deux phénomènes, ces trajectoires diffèrent en général. Le « paradoxe des jumeaux », proposé par le physicien Paul Langevin, en est une illustration (voir l'encadré ci-dessous).

En résumé, il n'existe pas de moyen objectif de définir une durée entre deux événements. On peut définir une durée propre, mais celle-ci n'a rien à voir avec ce

que peut mesurer un observateur ; ni avec ce que nous appelons intuitivement durée.

Pour évoquer cette situation, on parle fréquemment de « dilatation des durées » selon les observateurs. C'est un abus de langage. En réalité, il existe seulement différentes mesures, qui concernent des grandeurs distinctes, et il n'y a pas grand sens à les comparer. De même, l'idée que la « vitesse d'écoulement du temps » varierait selon les observateurs n'a pas de sens. Cela suggérerait qu'il y a un temps universel et absolu qui s'écoulerait plus ou moins vite en fonction du contexte. En réalité, il existe simplement différents temps, propres à chaque observateur.

L'absence de durée implique celle de temps absolu. En effet, dans le cas contraire, il suffirait de soustraire la date de fin et de début du phénomène pour mesurer sa durée, comme nous l'avons vu.

Durées et trajectoires dans l'espace-temps

Le « paradoxe » des jumeaux, inventé par le physicien Paul Langevin, est l'une des illustrations les plus connues des implications de la relativité sur les notions temporelles.

Deux jumeaux fêtent leur 20^e anniversaire commun. Peu après, l'un part pour un long voyage dans l'espace. Après son retour, ils fêtent un nouvel anniversaire, mais le jumeau resté sur Terre a alors 40 ans, tandis que voyageur n'en a que 30 ! Comment est-ce possible ?

En fait, la situation des deux jumeaux n'est pas symétrique. Entre le point de départ et le point d'arrivée, les deux jumeaux suivent des trajectoires (ou lignes d'univers) différentes dans l'espace-temps (voir le diagramme ci-dessous). La géométrie de l'espace-temps permet de calculer leur « longueur », qui correspond à la durée propre du phénomène pour celui qui suit cette ligne.

Sur la figure, la trajectoire suivie par le voyageur semble plus longue. Mais dans l'es-

pace-temps relativiste, les longueurs ne se comportent pas comme dans l'espace euclidien ordinaire : la géométrie de Minkowski introduit un signe moins entre les coordonnées spatiales et temporelles, ce qui rend le trajet du voyageur plus court, dans cette métrique, que le trajet du jumeau resté sur Terre.



On peut aussi raisonner en termes de géodésiques. Les géodésiques sont les trajectoires que suit un corps en l'absence de toute accélération. Dans le plan euclidien, les géodésiques sont les droites, de longueur minimale. Mais dans la géométrie relativiste, les géodésiques sont

les trajectoires qui maximisent le temps propre.

Or le jumeau resté sur Terre, au repos, suit une géodésique, tandis que le voyageur suit une trajectoire en partie accélérée, qui n'est plus une géodésique. La durée propre mesurée par ce dernier est donc plus petite. Dans le cas limite où le voyageur se déplacerait à la vitesse de la lumière, la durée propre de son voyage serait égale à zéro.

Remarquons que le temps du voyageur ne s'écoule pas plus vite que sur Terre, ou inversement. Les années sont les mêmes pour les deux jumeaux, et les processus biologiques se déroulent au même rythme. C'est comme si vous alliez de Paris à Marseille en passant par Toulouse : vous aurez parcouru plus de kilomètres que par le trajet direct, mais ces kilomètres sont les mêmes. Ici, les deux jumeaux suivent simplement des trajectoires de l'espace-temps qui ont des « longueurs » ou, de façon équivalente, des durées propres, différentes.

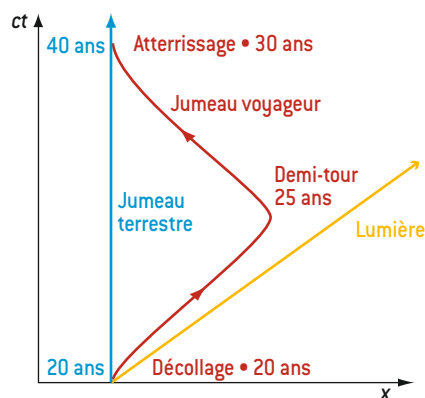


DIAGRAMME D'ESPACE-TEMPS. Dans le référentiel inertiel de la Terre (où, par commodité, ne figure qu'une seule coordonnée spatiale), on a représenté le trajet des jumeaux dans l'espace-temps. La ligne d'univers du frère resté sur Terre (en bleu) est une géodésique. Son jumeau décolle de la Terre et s'éloigne à grande vitesse, fait demi-tour et revient (courbe rouge). De façon contre-intuitive, dans la géométrie de l'espace-temps relativiste, la courbe rouge est plus « courte », en terme de durée propre, que la bleue. La ligne jaune représente la ligne d'univers d'un signal lumineux émis au départ ; elle est de « longueur » nulle.

Chacun son ordre

Les notions de simultanéité et de chronologie ne résistent pas plus à l'analyse dans le cadre relativiste. Imaginons qu'une supernova explose dans la galaxie d'Andromède et qu'une météorite s'écrase sur Terre. Les phénomènes sont-ils simultanés ? L'un s'est-il déroulé avant l'autre ? Réponse possible : un observateur terrestre voit la météorite tomber avant l'explosion ; un observateur dans Andromède voit la supernova exploser avant la chute ; et l'on peut trouver un troisième observateur pour qui les deux événements sont simultanés (voir l'encadré page 46). Du fait de la vitesse finie de l'information, chaque observateur voit les événements survenir à différents moments en fonction de sa position et de sa vitesse par rapport à eux. L'ordre dans lequel l'un voit des événements contredira l'ordre de l'autre. La chronologie et *a fortiori* la simultanéité sont relatives. Cela est manifestement incompatible avec l'existence du temps universel, car dans ce cas, il suffirait de comparer les dates des événements pour savoir lequel précède l'autre ou s'ils sont simultanés.

La causalité, en revanche, reste un concept parfaitement défini en relativité, même si elle n'est plus équivalente à la chronologie. En physique classique, deux situations sont possibles : soit l'événement A influence l'événement B, qui est alors dans le futur causal de A ; soit au contraire A peut avoir été influencé par B, auquel cas B est dans le passé causal

de A. La causalité distingue le passé et le futur. Dans le cadre de la théorie de la relativité, il existe un troisième cas : l'événement A ne peut influencer l'événement B ni inversement.

Une fois encore, c'est dû à la vitesse finie de l'information. Par exemple, une explosion survenue à la surface du Soleil « il y a trois minutes » dans un référentiel qui m'est associé ne peut avoir d'impact sur un événement se déroulant au moment présent sur Terre, car la lumière met au minimum huit minutes pour nous parvenir. Inversement, ce qui se passe sur Terre au moment présent ne peut influencer sur l'explosion à la surface du Soleil. Les deux événements sont « non causalement liés ». En termes mathématiques, la relation de causalité relativiste est une relation d'ordre partielle, et non plus totale comme en physique newtonienne.

Le temps universel n'existe donc pas. Au quotidien, cela reste cependant une approximation utile. Deux horloges marquent chacune l'écoulement de leur temps propre. Mais si elles sont voisines

et au repos l'une par rapport à l'autre, ces deux grandeurs sont très proches, et l'on peut les confondre (la proximité et le repos dépendant de la précision considérée). Deux observateurs assez proches peuvent considérer qu'un même temps s'écoule pour eux. De fait, nous et nos horloges occupons un minuscule coin de l'Univers, et nous sommes tous au repos les uns par rapport aux autres en comparaison des distances cosmiques et de la vitesse de la lumière. En pratique, il est légitime de considérer que nous partageons un temps propre commun ; ce qui revient à dire que, dans notre environnement et pour des vitesses assez petites par rapport à celle de la lumière, on peut appliquer la physique newtonienne. C'est ce temps propre commun que Newton a qualifié d'universel. Mais c'est un choix arbitraire et valable localement.

Tant qu'elle n'a pas eu affaire à des vitesses très élevées et que la précision des mesures temporelles est restée limitée, la physique a pu s'accommoder du temps universel. À l'époque de Newton, aucune

L'AUTEUR



Marc LACHIÈZE-REY est directeur de recherche au Laboratoire Astroparticule et cosmologie (CNRS-Université Paris 7-Denis Diderot)



Research

- Salon européen des carrières de la recherche
- Europäische Messe für Forschung und Karriere
- European research career fair




Paris

19 novembre 2010
November 19, 2010

- **60 exposants**
Entreprises, centres et laboratoires de recherches, campus européens
- 60 exhibitors**
Companies, Research centres and laboratories, European campuses
- **5 conférences**
5 conferences

L'événement européen de votre carrière

The European event dedicated to your career

- **Recrutement/Recruitment**
- **Conseils/Advice**

Pré-inscription et informations sur:
Registration and information online:
www.ResearchCareerFair.com







