

ALESSANDRO  
ROUSSEL

LES  
**GRANDES LOIS  
DE L'UNIVERS**

**DE LA GRAVITATION  
AUX PARTICULES  
QUANTIQUES**



ALISIO  
SCIENCES

De Galilée à Hawking, en passant par Newton, Schrödinger, ou Einstein, Alessandro Roussel vous invite à un étonnant et fascinant voyage dans le monde des physiciens, à la découverte de l'Univers. Grâce à une approche vivante, accessible et visuelle, le créateur de la chaîne *ScienceClic* décrypte les grandes théories de la physique moderne : de la relativité générale à la physique quantique. Des plus lointaines galaxies jusqu'au cœur des atomes, vous croiserez des trous noirs, des ondes gravitationnelles, et des particules élémentaires dont les pouvoirs étranges dépassent de loin les hypothèses les plus folles de la science-fiction !

**COMPRENDRE EN IMAGES LES THÉORIES LES PLUS  
COMPLEXES DE LA SCIENCE MODERNE  
AVEC LE CRÉATEUR DE LA CHAÎNE SCIENCECLIC  
40 MILLIONS DE VUES SUR YOUTUBE**

Diplômé en physique théorique et mathématiques appliquées, Alessandro Roussel est un passionné de sciences et de cinéma. À tout juste 16 ans, il crée l'excellente chaîne YouTube *ScienceClic* pour découvrir et comprendre les théories scientifiques les plus complexes à la base du Cosmos. Ses vidéos proches du documentaire immersif atteignent des millions de vues. Sa chaîne est aujourd'hui diffusée en trois langues et cumule plus de 800 000 abonnés.

ISBN : 978-2-37935-324-6



21 €  
prix TTC  
France

ALISIO  
SCIENCES



Rayon : Sciences

LES  
**GRANDES LOIS  
DE L'UNIVERS**

**DE LA GRAVITATION  
AUX PARTICULES  
QUANTIQUES**

# ALISIO

*L'éditeur des voix qui inspirent*

Suivez notre actualité sur **www.alisio.fr**  
et sur les réseaux sociaux  
LinkedIn, Instagram, Facebook et Twitter !

## **Alisio s'engage pour une fabrication écoresponsable !**

« Des livres pour mieux vivre », c'est la devise de notre maison.

Et vivre mieux, c'est vivre en impactant positivement  
le monde qui nous entoure ! C'est pourquoi nous avons fait  
le choix de l'écoresponsabilité.

Pour en savoir plus, rendez-vous sur notre site.

Conseiller éditorial : Antoine Beauchamp

Suivi éditorial : Irène Gallois

Relecture-correction : Gaëlle Fontaine

Design de couverture : Primo & Primo

Graphisme et maquette : Primo & Primo

Illustrations : Alessandro Roussel

Sagittarius A\* © EHT Collaboration, p. 78

Voie lactée © ESO/S. Brunier, p. 78

© 2023 Alisio, une marque des éditions Leduc

10, place des Cinq-Martyrs-du-Lycée-Bufferon  
75015 Paris

ISBN : 978-2-37935-324-6

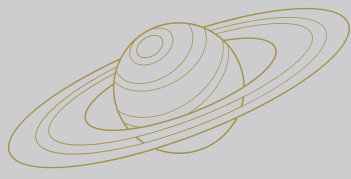
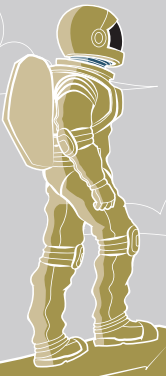
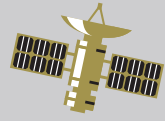
**LES  
GRANDES LOIS  
DE L'UNIVERS**

**DE LA GRAVITATION  
AUX PARTICULES  
QUANTIQUES**

Alessandro Roussel

ALISIO

# SOMMAIRE





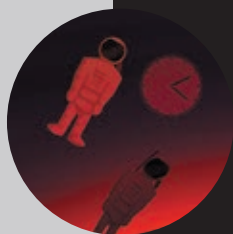
## L'UNIVERS À GRANDE ÉCHELLE

<b>1</b>	La théorie de la relativité restreinte	17
<b>2</b>	L'espace-temps	25
<b>3</b>	La gravitation selon Newton	33
<b>4</b>	L'idée la plus heureuse d'Einstein	39
<b>5</b>	La théorie de la relativité générale	45
<b>6</b>	Les ondes gravitationnelles	57
<b>7</b>	L'histoire de l'Univers	65
<b>8</b>	Les trous noirs	73

### EN IMAGES

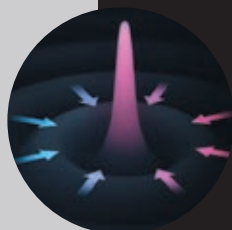
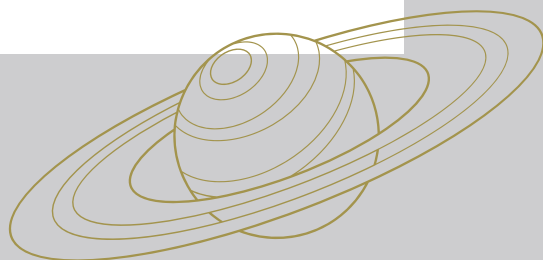
#### L'UNIVERS À GRANDE ÉCHELLE

Comment visualiser la relativité générale	52-55
D'autres effets de la relativité générale	62-63
L'histoire de l'Univers	70-71
À quoi ressemble un trou noir ?	78-79
Que se passe-t-il dans un trou noir ?	80-81



## LE MONDE QUANTIQUE

9	Le modèle standard	85
10	Superpositions et probabilités	93
11	Le problème de la mesure	105
12	Quelques étrangetés quantiques	115
13	Les champs quantiques	125
14	Interactions quantiques	133



### EN IMAGES

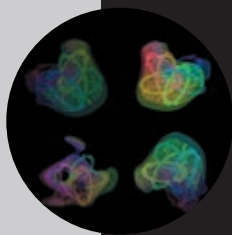
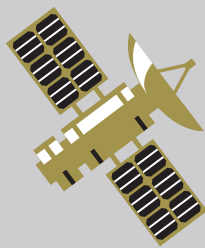
#### LE MONDE QUANTIQUE

Le modèle standard des particules	90-91
Plusieurs interprétations	112-113
Quelques applications pratiques	122-123
Les 4 interactions de l'Univers	140-141



## VERS UNE THÉORIE UNIQUE ?

<b>15</b>	Les symétries, un formalisme universel	145
<b>16</b>	La supersymétrie	155
<b>17</b>	Les trous noirs quantiques	161
<b>18</b>	Théorie des cordes et autres approches	167
	<b>Conclusion</b>	179
	<b>Remerciements</b>	181



## EN IMAGES

### VERS UNE THÉORIE UNIQUE

Les symétries de l'espace-temps	152
Les symétries des champs quantiques	153
Le monde des cordes	172-173
La gravité quantique à boucles	174-175
D'autres approches de gravité quantique	176-177



# Introduction



## Les Grandes Lois de l'Univers, de la gravitation aux particules quantiques

Voilà un titre pour le moins ambitieux pour un premier ouvrage ! Avant que vous ne vous lanciez dans sa lecture, je tenais à vous présenter en quelques mots ce qui m'amène à écrire ce livre aujourd'hui.

Comme beaucoup, j'ai été séduit par la vulgarisation scientifique dès le plus jeune âge. De la littérature jeunesse à la télévision, de nombreux contenus ont profondément marqué ma génération : « Il était une fois... l'Homme<sup>1</sup> », « Walking with Dinosaurs<sup>2</sup> » et bien sûr, l'indétrônable « C'est pas sorcier<sup>3</sup> ».

Évoluant dans une famille d'artistes, j'ai la chance d'accéder très tôt à du matériel de création : des instruments de musique, un ordinateur ou encore des logiciels d'image et de vidéo. En Italie, mon grand-père enseigne la science à l'école primaire et me montre des tas de petites expériences.

C'est en 2009 que je découvre YouTube, un site web encore naissant mais au potentiel exceptionnel. J'y publie quelques premières vidéos très modestes, sans imaginer que quelques années plus tard cette plateforme va changer ma vie.

---

**1.** Série d'animation française créée par le réalisateur, auteur, scénariste et producteur Albert Barillé diffusée en 1978 sur FR3.

**2.** Série documentaire britannique diffusée à partir de 1999 réalisé par Tim Haines et Jasper James et en France en 2000, sous le titre « Sur la Terre des dinosaures ».

**3.** Magazine télévisuel français de vulgarisation scientifique créé par le réalisateur Bernard Gonner, présenté par Jamy Gourmaud, Frédéric Courant et Sabine Quindou, diffusé de 1993 à 2014 sur France 3.

Au cours de mes années de lycée, le cinéma met la physique et les mathématiques sur le devant de la scène : *Gravity*, *Interstellar*, *Imitation Game* ou *Une merveilleuse histoire du temps*<sup>4</sup>. Mon intérêt scientifique s'affine. Lorsque je découvre l'ouvrage *Une brève histoire du temps* de Hawking<sup>5</sup>, je me passionne irrémédiablement pour la physique fondamentale.

Dans les salles de classe cela dit, la physique me séduit moins. Dépité après un cours sur l'effet Doppler que je ne parviens pas à comprendre, je tombe un peu par hasard sur une vidéo qui explique le phénomène en images. Enfin tout s'éclaire ! À ce moment précis, je prends conscience du pouvoir de l'image : une animation toute simple vaut parfois mieux que des heures de cours. Cette idée en tête, j'ouvre en 2014 une chaîne YouTube, ScienceClic, et y publie une première vidéo : « L'Effet Doppler, en 2 minutes ».

Au fil des vidéos, je me rends toutefois vite compte de mes limites : avant de vouloir innover dans la vulgarisation, il va me falloir maîtriser un peu mieux les théories complexes que je prétends expliquer ! Une fois mon bac en poche, je m'engage donc pour une licence de mathématiques et de physique à l'université de Paris-VI, avant de poursuivre mes études en Angleterre, pour y réaliser un master de physique théorique. À l'université de Cambridge, je me passionne pour la relativité générale et les trous noirs et, inspiré par *Interstellar*, je m'essaie à simuler l'apparence de ces phénomènes extrêmes en codant des programmes qui incorporent les équations de la relativité. Vous trouverez certaines de ces images au fil de l'ouvrage.

En 2020, suite au succès de ScienceClic et des 300 000 abonnés qui suivent la chaîne, je décide de me lancer pleinement dans la vulgarisation pour faire de YouTube mon métier. Je souhaite désormais exploiter les connaissances que j'ai acquises pour vulgariser fidèlement les théories modernes. De nouvelles opportunités s'offrent à moi et parmi elles la possibilité d'exaucer l'un de mes rêves d'enfant : écrire un livre. Il s'agit d'un défi de taille, car contrairement au format vidéo que je connais, le livre ne permet pas de recourir à des

---

4. Alfonso Cuarón, *Gravity*, 2013 ; Christopher Nolan, *Interstellar*, 2014 ; James Marsh, *The Theory of Everything (Une merveilleuse histoire du temps en VF)*, 2014 ; Tyldum Morten, *Imitation Game*, 2014.

5. Stephen Hawking, *A Brief History of Time : From the Big Bang to Black Holes*, Bantam Books, 1988 ; traduction française : *Une brève histoire du temps. Du Big Bang aux trous noirs*, Flammarion, 1989.

animations... Il va me falloir illustrer les théories au moyen d'analogies, de petites histoires et croquis qui vous aideront, je l'espère, à appréhender les lois complexes de notre monde.

Mais avant d'entrer dans le vif du sujet, parlons un peu du thème de cet ouvrage : la physique théorique.

## À QUOI SERT LA PHYSIQUE THÉORIQUE ?



Sortez dans la rue, prenez une pomme bras tendu, et demandez à un passant de prédire son mouvement si vous la lâchez. Il vous dira certainement qu'elle va tomber, et il aura raison. Mais comment le sait-il ?

De façon plus ou moins consciente, nous savons tous que l'Univers ne se comporte pas n'importe comment. Les objets semblent obéir à des lois. Au fil de nos vies, nous faisons l'expérience du monde à travers nos sens : notre cerveau apprend à mieux appréhender ce qui nous entoure, et à anticiper les conséquences de nos actes.

« Si je lâche une pomme, elle tombe. »

« Si je mets ma main dans le feu, j'ai mal. »

« Plus je tape fort dans la balle, plus elle part loin. »

Toutes ces lois que notre esprit induit de nos expériences quotidiennes constituent une première base de compréhension et d'appréhension du monde : c'est l'« intuition ». Mais l'intuition se révèle souvent incomplète, approximative, voire inexacte. Elle est en constante évolution et s'affine à mesure que l'on rencontre des phénomènes inédits qui la défient. Qui n'a jamais été surpris en voyant un ballon d'hélium s'élever dans les airs ?

Purement qualitative, l'intuition mérite d'être précisée par les mathématiques : un langage rigoureux et moins ambigu. C'est dans ce cadre qu'intervient la « physique théorique ». Elle a pour objectif de développer des modèles qui décrivent et prédisent les rouages du Cosmos. Si je lâche une pomme, nul besoin d'être expert en physique pour savoir qu'elle va tomber, mais les modèles mathématiques permettent de prédire son mouvement exact, instant après instant, chose qu'il serait difficile de faire par simple intuition !

Cette quête de descriptions toujours plus rigoureuses mène peu à peu les physiciens vers une compréhension profonde de l'Univers, à la découverte de mécanismes dont les secrets sont parfois surprenants.

À l'orée du xx<sup>e</sup> siècle, tout s'accélère...

## LE PARADIGME ACTUEL : DEUX MODÈLES FRUCTUEUX MAIS INCOMPATIBLES

Il y a deux siècles, forts de la révolution industrielle, les physiciens pensaient avoir tout compris aux lois de l'Univers. De la thermodynamique à l'électromagnétisme, leurs théories mathématiques semblaient décrire à la perfection tous les phénomènes du quotidien. Seules deux petites zones de flou restaient à éclaircir.

D'un côté, on ne comprenait pas pourquoi la lumière se comportait différemment des autres corps. De fait, sa vitesse semblait invariante, identique quel que soit l'observateur qui la mesurait, ce qui constituait une énigme à résoudre.

D'autre part, on tentait de décrire le rayonnement des corps chauds, comme la lueur d'un filament d'ampoule. Les calculs mathématiques de l'époque aboutissaient à des résultats absurdes, et l'on ne parvenait pas à rendre compte du phénomène.

Pour régler ces deux difficultés, il fallait en réalité revoir entièrement nos connaissances et élaborer des théories inédites. Au cours du xx<sup>e</sup> siècle, ces deux problèmes ont été peu à peu élucidés et ont donné naissance aux plus grandes théories de la physique moderne : la relativité générale d'une part, la physique quantique d'autre part. Deux modèles offrant des visions du monde extrêmement profondes et plus rigoureuses que jamais : de la structure des atomes à celle des plus grandes galaxies, nous pouvons sonder, prédire et exploiter les mystères de l'Univers à toutes les échelles. Ce sont les deux piliers sur lesquels repose aujourd'hui notre compréhension du Cosmos. À cet égard, elles feront chacune l'objet d'une partie dans ce livre.

Mais même aujourd'hui, un problème demeure : les paradigmes de la relativité générale et de la physique quantique sont inconciliables.

Les théories semblent décrire deux fonctionnements complètement différents. L'enjeu de la science moderne est de tenter de les réunir. Une vision encore fragmentée, des visions d'une précision inouïe mais fondamentalement incompatibles, tel est l'état paradoxal de la physique moderne. Nous nous y pencherons à l'occasion d'une troisième et dernière partie.



Cet ouvrage ne prétend bien sûr pas être exhaustif – il faudrait bien plus qu'un livre pour expliquer l'ensemble des théories modernes –, mais je vais tenter d'y esquisser un panorama de nos connaissances actuelles, afin de rendre limpide les notions essentielles qui vous aideront à comprendre notre Univers. Autant que possible, je m'attacherai à exposer leurs enjeux, leurs perspectives, mais aussi leurs limites. Car oui, bien qu'elle soit si sophistiquée, la science actuelle n'en est peut-être qu'à ses balbutiements, et les plus grandes découvertes restent probablement à venir. C'est à mes yeux ce qui rend cette quête si vivante et fascinante !

De Galilée à Hawking, en passant par Newton, Schrödinger, et bien sûr l'incontournable Einstein, je vous invite à embarquer pour un étonnant voyage dans le monde des physiciens. Vous croiserez des trous noirs, des ondes gravitationnelles, et des particules élémentaires, dont le comportement étrange dépasse de loin les hypothèses les plus folles de la science-fiction !







# L'UNIVERS À GRANDE ÉCHELLE



La première partie de ce livre se focalise sur l'échelle macroscopique.

C'est l'échelle à laquelle les objets sont suffisamment grands pour être visibles à l'œil nu : elle englobe les phénomènes de notre quotidien, les objets qui nous entourent, ainsi que l'infiniment grand, les structures du Cosmos, la dynamique des planètes, ou encore l'évolution de l'Univers.

Que sont l'espace et le temps ? Comment comprendre la chute des corps et le mouvement des astres ? Que verrait-on aux abords d'un trou noir ? Ensemble, nous verrons que les réponses à ces questions convergent vers la théorie de la relativité générale d'Einstein, l'un des deux piliers majeurs de la physique moderne. Une théorie révolutionnaire mais paradoxalement assez méconnue.

Pas à pas, nous tenterons de comprendre les fondements de la relativité, restreinte puis générale, et la façon dont ces modèles se sont fondés sur les découvertes antérieures de Galilée, Kepler ou Newton. À travers les notions d'espace-temps et de l'introduction d'une nouvelle géométrie, nous verrons que ces théories introduisent des bouleversements sans précédent dans notre vision du monde et amenant une nouvelle façon de comprendre la gravité. Nous finirons par explorer certains des phénomènes les plus fascinants qu'elles permettent de décrire : les ondes gravitationnelles, l'expansion de l'Univers et les trous noirs.





# La théorie de la relativité restreinte

---

Le temps et l'espace sont-ils les mêmes pour tous ? En 1905, notre compréhension du monde est chamboulée par une nouvelle théorie : la relativité restreinte. Cette théorie qui précède la relativité générale marque une révolution dans l'histoire des sciences. Tout commence par une simple observation.

---



## Une vitesse est toujours relative à un référentiel

Les lois de l'Univers peuvent sembler inaccessibles, parfois contre-intuitives. Lancez une bille devant vous : en roulant au sol, elle ralentit et finit par s'arrêter. De même, une voiture a besoin d'énergie pour avancer et sans carburant la voiture ralentit et s'arrête. Être immobile semble naturel pour les objets. Et pourtant, tandis que vous êtes tranquillement assis dans votre canapé, le sol sous vos pieds est constamment en mouvement ! Comme une toupie, notre planète tourne sur elle-même à la vitesse folle d'une rotation en 24 heures. Si vous êtes en France, votre canapé file à 1700 km/h autour de la Terre !

Ce n'est pas tout... Non seulement la Terre tourne sur elle-même, mais elle orbite également autour du Soleil : chaque année, notre planète parcourt un milliard de kilomètres et file à plus de 100 000 km/h au sein du système solaire ! Le système solaire tout entier est d'ailleurs lui aussi en mouvement : au sein de notre galaxie, il dérive à toute allure dans l'Univers. Alors que vous vous

croquez immobile sur votre canapé, vous traversez le Cosmos à plus d'un million de km/h !

Cette vitesse est inimaginable. Littéralement. Il est impossible de concevoir un tel nombre dans nos têtes car ces ordres de grandeur dépassent de loin notre entendement. C'est en partie à cela que servent les mathématiques en physique : décrire des phénomènes que notre imagination ne saurait appréhender.

Face à de telles affirmations, nous sommes en droit de nous demander si tout cela a réellement un sens physique. Comment se fait-il que, toujours assis sur votre canapé, vous ne ressentiez rien de spécial ? Vous vous déplacez à plus d'un million de km/h, soit la vitesse qu'il faudrait pour rejoindre la Station spatiale internationale en une seule seconde, et pourtant rien dans votre expérience sensible ne vous met la puce à l'oreille...

Dès le XVII<sup>e</sup> siècle, Galilée comprend que parler de la « vitesse » d'un corps n'a pas de sens dans l'absolu. Une vitesse est toujours relative à un référentiel : certes, votre canapé file à 1 300 000 km/h par rapport aux galaxies, mais il est immobile par rapport à la surface de la Terre, et aucune de ces deux visions n'est plus « vraie » que l'autre. On ne peut pas dire qu'un corps est « immobile » ou « en mouvement », cela n'a pas de sens tant que l'on n'indique pas dans quel référentiel on se place. Dans un train, par exemple, vous êtes en mouvement par rapport à l'extérieur, mais immobile par rapport au wagon. Et si vous fermez les yeux, tant que le train avance tout droit et à vitesse constante, il est impossible de ressentir son mouvement. Pour vous tout se passe comme si vous étiez à l'arrêt : lancez une balle vers le haut et elle retombera à vos pieds. Comme le disait Galilée, « le mouvement est

### **Où tombe la balle ?**

Pour vérifier que vous avez saisi le principe de relativité, tentez de répondre à cette énigme : vous êtes debout sur un tapis roulant qui vous entraîne à vitesse constante. Vous lancez une balle vers le haut, qui monte, ralentit, puis retombe. La question est la suivante : où retombe la balle ? Arrive-t-elle dans votre main, ou derrière vous ? Si vous réalisez l'expérience, vous verrez que la balle retombe bien dans votre main ! Tout se passe comme si vous étiez immobile : vous bougez par rapport au sol, mais ce mouvement est relatif et de votre point de vue c'est le tapis qui est immobile sous vos pieds. Les lois de la physique sont les mêmes que si vous n'avanciez pas.

comme rien », il est relatif : de votre point de vue, le train est immobile et c'est le quai qui se déplace.



### Un paradoxe : la vitesse de la lumière n'est pas relative

Imaginons l'expérience suivante : vous êtes debout sur le pont d'un bateau et vous décidez de lancer une balle devant vous. Quelle est la vitesse de la balle ? De votre point de vue, par rapport au bateau, la balle part simplement à la vitesse que vous lui avez imprimée. Mais du point de vue de votre ami qui serait resté sur le quai, elle se déplace plus vite : à sa vitesse s'additionne également celle du bateau. La balle se déplace dans le bateau, et le bateau se déplace par rapport au quai.



Maintenant, imaginez que, toujours sur le pont du bateau, vous allumiez une bougie. Lorsque la bougie s'allume, sa flamme génère une multitude de faisceaux lumineux qui fendent l'espace tout autour d'elle à la vitesse de la lumière. Il s'agit d'une vitesse démesurée de près de 300 000 km/s. L'un de ces rayons en particulier force en direction de la proue, à l'avant du bateau. Il l'atteint en une fraction de seconde, un million de fois plus vite qu'un clignement d'œil.



Depuis l'intérieur du navire, le faisceau lumineux vous a semblé se propager à la vitesse de la lumière. En mesurant le temps qu'il a pris pour atteindre la proue, vous pouvez calculer qu'il s'est effectivement déplacé à 300 000 km/s. Mais qu'en est-il de votre ami resté sur le quai ? Souvenez-vous, dans le cas où vous lanciez une balle, votre ami mesurait une vitesse plus élevée, car à la vitesse de la balle s'ajoutait celle du bateau. Or cette fois-ci, lorsqu'il observe le rayon lumineux, votre ami mesure exactement la même vitesse que vous...

Quand on y pense, il semble y avoir un paradoxe : le faisceau de lumière traverse le bateau à 300 000 km/s, mais le navire lui-même est en mouvement par rapport au quai et votre ami devrait donc mesurer une vitesse plus élevée. Pourtant, il obtient la même valeur que vous ! La vitesse de la lumière est exactement la même, qu'on la regarde sur le pont du bateau ou depuis le quai.

### **La « vitesse de la lumière »**

En toute rigueur, la vitesse de la lumière dépend du milieu dans lequel elle se propage : elle avance plus lentement dans l'air que dans le vide de l'espace par exemple. Mais dans la suite de l'ouvrage, nous négligerons ce détail. Pour nous, la « vitesse de la lumière » se référera toujours à sa vitesse dans le vide. Cette valeur précise de 300 000 km/s est centrale en relativité, elle dicte le comportement de notre Univers, et nous verrons par la suite qu'elle n'est pas liée qu'à la lumière...

Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, alors qu'on l'observe pour la première fois, ce paradoxe contrarie les physiciens. La vitesse de la lumière est unique en son genre : différente de toutes les autres, elle défie complètement le principe de relativité établi quelques siècles plus tôt par Galilée. Il s'agit d'un tournant dans l'histoire des sciences : l'invariance de la vitesse de la lumière sera l'élément déclencheur d'une série de révolutions et impliquera de revoir entièrement notre vision de l'espace, du temps et de la simultanéité.

### **La lumière est indépassable**

Imaginez que vous tentiez de rattraper un rayon lumineux : vous accélérerez pour vous en approcher, mais quel que soit votre point de vue le rayon file toujours à la même vitesse, il s'éloigne à 300 000 km/s ! Rien à faire, il est impossible

de le devancer ou même de la rattraper ! D'une certaine façon, ces 300 000 km/s jouent le même rôle que l'infini pour les nombres : maximale et indépassable, cette vitesse est plus grande que toutes les vitesses possibles.



## **Einstein : l'espace et le temps sont relatifs**

Pourquoi la vitesse de la lumière ne semble-t-elle pas obéir au principe de relativité ? À la suite de nombreuses recherches, la réponse à ce problème sera finalement apportée en 1905 par Albert Einstein. À la fois simple et élégante, sa théorie de la « relativité restreinte » a des implications bouleversantes.

L'idée d'Einstein est la suivante : et si c'étaient le temps et l'espace eux-mêmes qui se transformaient d'un référentiel à l'autre ? En effet, mesurer une vitesse revient toujours à mesurer une longueur et une durée : la distance parcourue et le temps de parcours. Puisqu'il semble y avoir un hic dans notre compréhension des vitesses, peut-être faut-il revenir sur la définition même des distances et des durées ?

Pour mieux comprendre cette idée, imaginons que vous et votre ami vous munissiez chacun d'une règle graduée et d'un chronomètre extrêmement précis. En observant le trajet du rayon lumineux et en mesurant la distance qu'il parcourt en un intervalle de temps, vous allez pouvoir chacun calculer sa vitesse. Commençons par vous : de votre côté, quand votre chronomètre indique une seconde, le faisceau lumineux parcourt 300 000 km sur votre règle (une très grande règle, certes). Du côté de votre ami maintenant : lorsqu'une seconde s'écoule sur son chronomètre, la lumière parcourt là encore 300 000 km, mais par rapport à SA règle graduée. La différence est cruciale : vous mesurez chacun les distances et les durées, mais sur vos règles et chronomètres respectifs ! Et puisque la vitesse de la lumière ne change pas d'un référentiel à l'autre, peut-être que ce sont les kilomètres et les secondes qui sont altérés ? Cela pourrait aider à résoudre le problème...

Einstein comprend que la règle et le chronomètre de votre ami doivent forcément être différents des vôtres : selon lui, à cause de votre mouvement dans le bateau, votre règle graduée semblerait plus courte ! S'il mesurait l'écart entre ses deux extrémités à un instant donné, elle lui paraîtrait contractée par rapport à la sienne ! Et de même, votre chronomètre lui semblerait tourner au ralenti ! On parle de « contraction des longueurs » et de « dilatation des durées », deux phénomènes indissociables et omniprésents dans l'Univers.



En tenant compte de ces deux phénomènes, le problème est réglé. Dès lors qu'un objet se déplace, sa longueur se comprime, et son horloge ralentit, du point de vue d'un observateur extérieur. Complètement à l'encontre de nos intuitions, le temps et l'espace ne sont pas immuables et absolus : ils sont relatifs. Deux personnes qui suivent des mouvements différents ne mesurent pas les mêmes longueurs et durées.

En introduisant ces phénomènes, Einstein parvient enfin à tenir compte de l'invariance de la vitesse de la lumière : pour votre ami sur le quai, le bateau est contracté, plus court, et la lumière qui le traverse a donc moins de distance à parcourir. De plus, pour lui, l'intérieur du navire semble évoluer au ralenti, et il voit donc le rayon se propager plus lentement. Lorsque s'ajoute le mouvement du bateau, les vitesses se compensent parfaitement, et votre ami mesure lui aussi 300 000 km/s. Le paradoxe est résolu.



### ***L'exemple des muons***

Sur Terre, ces phénomènes sont difficiles à observer car ils ne se manifestent qu'à des vitesses proches de celle de la lumière. Une voiture fonçant sur l'autoroute ne serait contractée que de la taille d'un noyau d'atome ! Mais lorsque certaines particules cosmiques pénètrent notre atmosphère, elles se désintègrent jusqu'à engendrer des « muons », de minuscules particules élémentaires. Généralement, ces muons ont une durée de vie très courte et disparaissent en quelques microsecondes. Mais puisqu'ils tombent extrêmement vite, à près de 99,5 % de la vitesse de

la lumière, la relativité restreinte entre en jeu : de notre point de vue, la dilatation des durées ralentit drastiquement leur durée de vie, comme s'ils « vieillissaient » moins vite, et leur permet d'atteindre le sol avant de se désintégrer. De leur point de vue, les muons ont l'impression d'être immobiles : pour eux ce sont le sol et l'atmosphère qui défilent à 99,5 % de la vitesse de la lumière et, par contraction des longueurs, le trajet leur paraît plus court. Selon les deux points de vue, la relativité prédit que les muons parviendront au sol avant de se désintégrer... et effectivement, on les détecte !

Pour clore ce chapitre, on retiendra qu'une simple observation – l'invariance de la vitesse de la lumière – entraîne des conséquences vertigineuses. Chaque objet dans l'Univers possède son propre « temps » et son propre « espace » ! Loin d'être immuables, les distances et les durées sont relatives, flexibles, variant d'un référentiel à l'autre. Toutes nos croyances sur l'espace et le temps s'en trouvent renversées, ce qui ne cessera d'alimenter l'imagination des auteurs de science-fiction. Avec la publication de cette théorie, c'est un chantier colossal qui s'ouvre aux physiciens : toute notre conception de l'Univers est à revoir. Ils baseront désormais leurs modèles sur une nouvelle notion, l'« espace-temps », que je vous propose d'aborder dans le chapitre suivant.





# L'espace-temps

Découlant directement de la relativité restreinte, la notion d'espace-temps va permettre de comprendre les effets étranges de dilatations des durées et de contractions des longueurs au travers d'une vision géométrique.



## Minkowski : le temps comme quatrième dimension de l'Univers

Mettons de côté la relativité pendant un instant, et concentrons-nous sur les concepts d'« espace » et de « temps ». Si vous deviez décrire la trajectoire d'un avion, comment procéderiez-vous ? L'approche classique consisterait à repérer sa position à chaque instant, pour ainsi tracer sa trajectoire dans un diagramme. Chaque point représente la position de l'avion à un instant donné : dans un tel diagramme, l'avion se déplace à travers les trois dimensions d'espace – largeur, hauteur, profondeur – et on considère le temps comme une graduation, un paramètre extérieur qui s'écoule et qui tient compte de son évolution.

