

Pourquoi
 $E = mc^2$?

Brian Cox
Jeff Forshaw

Pourquoi
 $E = mc^2$?

Et comment ça marche

Traduit de l'anglais par Guy Chouraki

EKHO

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée par
DaCapo Press en 2009 en langue anglaise sous le titre
Why Does $E=mc^2$?

Why Does $E=mc^2$? was originally published by Da Capo
Press in 2009.

Copyright © 2009 Brian Cox et Jeff Forshaw

Couverture : Delphine Dupuy

© Dunod, 2012 pour la traduction française,
2019 pour la présente édition
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-079172-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

*Pour nos familles, en particulier pour Gia, Mo,
George David, Barbara, Sandra, Naomi, Isabel,
Sylvia, Thomas, et Michael.*

Avant-propos

Notre but est de décrire la théorie d'Einstein sur l'espace et le temps, de la manière la plus simple possible, tout en révélant sa beauté profonde. Cela nous permettra de parvenir à la fameuse équation $E = mc^2$ sans utiliser un niveau mathématique dépassant le théorème de Pythagore (ne vous inquiétez pas si vous n'en avez plus aucun souvenir, nous l'expliquerons aussi)... Tout aussi important, nous voulons que chaque lecteur de ce petit livre puisse voir comment les physiciens modernes pensent la nature, construisent des théories qui peuvent se révéler utiles, et vont parfois jusqu'à changer nos vies. En imaginant un nouveau modèle d'espace et de temps, Einstein a permis de comprendre ce qui fait briller les étoiles, a découvert la raison pour laquelle les moteurs électriques et les générateurs fonctionnent et, finalement, a jeté les bases sur lesquelles toute la physique moderne repose. Ce livre se veut également provocateur et stimulant ; il ne s'agit pas de remettre en cause la physique elle-même : les théories d'Einstein sont très bien établies et soutenues par un grand nombre de preuves expérimentales, comme nous allons le découvrir au cours de notre développement. Cependant, le temps venu, les théories d'Einstein pourront être contraintes de céder

la place à une représentation encore plus fidèle de la nature. En science, il n'existe pas de vérités éternelles, seulement des représentations du monde qui ne se sont pas encore révélées fausses. Tout ce dont nous sommes sûrs, c'est que, pour l'instant, ces théories fonctionnent. Le côté provocateur de ce livre tient tout entier dans la refonte radicale que la science impose à notre vision du monde. Scientifique ou pas, chacun de nous a de l'intuition, et l'utilise pour déduire beaucoup de choses sur son environnement, à partir de son expérience quotidienne. Cependant, si nous soumettons nos conclusions à la lumière froide et précise de la méthode scientifique, nous découvrons souvent que la nature dément ces intuitions. Au fur et à mesure de notre progression, nous constaterons par exemple que, pour des objets se déplaçant à très haute vitesse, les notions de bon sens concernant l'espace et le temps sont bouleversées de fond en comble et remplacées par d'élégantes perspectives, totalement nouvelles et inattendues. Cette leçon est salutaire car elle incite à la prudence et doit inspirer un sentiment d'humilité respectueuse : l'univers est bien plus riche que ce que pourraient faire croire nos expériences quotidiennes. Enfin, plus merveilleux encore, la nouvelle physique, dans toute sa richesse, se caractérise par une élégance mathématique à couper le souffle.

Malgré sa difficulté apparente, la science n'est pas excessivement compliquée au fond. Elle consiste surtout à éliminer nos préjugés pour nous permettre d'observer le monde le plus objectivement possible. Elle accomplit cette tâche avec plus ou moins de succès, cependant peu de gens nieraient qu'elle parvient à expliquer le fonctionnement de l'univers. Il est malaisé d'apprendre à se méfier du « bon sens ». Pourtant, en nous amenant à accepter

la nature telle qu'elle est, et non telle que nos idées préconçues nous la présentent, la méthode scientifique nous a ouvert l'accès à toutes les technologies modernes. En bref, la science, ça marche !

Dans la première moitié du livre, nous démontrerons l'équation $E = mc^2$. Par « démontrer », nous voulons dire que nous allons expliquer comment Einstein est parvenu à la conclusion que l'énergie est égale à la masse multipliée par le carré de la vitesse de la lumière – c'est mot pour mot exactement ce que dit l'équation. Cette manière de lier la notion d'énergie et la notion de masse est pour le moins étrange. Réfléchissons-y un peu. Le genre d'énergie le plus familier est sans doute celui lié au mouvement : si vous recevez une balle de tennis en pleine figure, vous le sentirez ; un physicien dirait que la raquette de l'adversaire a communiqué de l'énergie à la balle, et que cette énergie est transmise à votre visage lorsque ce dernier arrête la balle. Quant à la masse, c'est une mesure de la quantité de matière contenue dans un objet. Une balle de tennis est plus massive qu'une balle de ping-pong, mais moins massive que la planète. Or, qu'est-ce que l'équation $E = mc^2$ exprime essentiellement ? Que l'énergie et la masse sont interchangeable, un peu comme on échange des monnaies, à un taux qui serait le carré de la vitesse de la lumière. Comment diable Einstein a-t-il pu aboutir à pareille conclusion, et que vient faire la vitesse de la lumière dans une équation reliant l'énergie et la masse ? Pour aborder ces questions, nous ne supposerons aucune connaissance scientifique préalable et nous éviterons les mathématiques autant que possible. Néanmoins, notre but est d'offrir au lecteur une réelle explication (et non pas une simple description). À cet égard, nous espérons apporter quelque chose de nouveau.

Dans les dernières parties du livre, nous constaterons à quel point l'équation $E = mc^2$ sous-tend notre compréhension des rouages de l'univers. Pourquoi les étoiles brillent-elles ? Comment l'énergie nucléaire concurrence-t-elle le charbon ou le pétrole ? Qu'est-ce que la masse ? Cette dernière question nous conduira dans le monde de la physique moderne des particules, au LHC (*Large Hadron Collider : Grand Collisionneur de Hadrons*), l'accélérateur de particules géant du CERN à Genève. Elle mettra également l'accent sur l'importance du mystérieux boson de Higgs, une particule qui détiendrait l'explication de l'origine même de la masse, un objet de recherches très actives dans ce laboratoire. Le livre se terminera sur cette remarquable découverte d'Einstein : la structure de l'espace et du temps est en définitive à l'origine de la force de gravitation, ce qui se traduit par exemple par l'étrange idée que la Terre tombe « en ligne droite » autour du Soleil !

L'espace et le temps

Que signifient pour vous les mots « espace » et « temps » ? Peut-être vous représentez-vous l'espace comme cette zone obscure comprise entre les étoiles que vous observez dans le ciel par une froide nuit d'hiver ? Ou bien ce mot vous évoque-t-il, un vaisseau spatial scintillant, recouvert d'une pellicule dorée digne de Star Wars ou de Toy Story, glissant entre Lune et Terre ? Le temps, quant à lui, convoquera-t-il dans votre esprit le tic-tac de l'horloge ou bien les feuilles rougies par l'automne, quand la course annuelle du Soleil plonge dans l'ombre, pour la cinq milliardième fois, les régions de l'hémisphère Nord ? Nous avons tous une idée intuitive de l'espace et du temps qui sont l'étoffe même de notre existence. Nous nous déplaçons à travers l'espace sur la surface de notre planète bleue, tandis que s'égrène le tic-tac du temps.

Durant les dernières années du XIX^e siècle, une série d'avancées scientifiques, dans des domaines apparemment sans rapport entre eux, ont forcé les physiciens à remettre en question ces représentations simples et intuitives. Dans les premières années du XX^e siècle, Hermann Minkowski, un collègue d'Albert Einstein qui joua pour

lui le rôle de tuteur, a sans doute éprouvé une certaine émotion en écrivant son article nécrologique désormais célèbre sur la défunte notion d'espace : « Désormais, l'espace en lui-même ainsi que le temps en lui-même doivent s'évanouir tels de vulgaires spectres, et seule une sorte d'union des deux gardera une existence indépendante. » Qu'entendait donc Minkowski par « une sorte d'union » de l'espace et du temps ? Pénétrer le sens de cette affirmation presque mystique c'est saisir l'essence de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein – celle-là même qui engendra la plus célèbre de toutes les équations de la physique, $E = mc^2$, et poussa à jamais sur le devant de la scène la quantité désignée par c , la vitesse de la lumière, dans notre compréhension du théâtre de l'univers.

La théorie de la relativité d'Einstein est fondamentalement une description de l'espace et du temps, or, au centre de cette théorie, il y a le concept d'une vitesse particulière que rien dans l'univers ne peut dépasser, quelle que soit la puissance dont on dispose. Cette vitesse est la vitesse de la lumière, 299 792 458 mètres par seconde dans le vide. Voyageant à cette vitesse, un flash de lumière émis à partir de la Terre met une seconde pour arriver jusqu'à la Lune, huit minutes pour passer près du Soleil, 100 000 ans pour traverser notre propre galaxie, la Voie lactée, et plus de 2 millions d'années pour atteindre sa voisine, Andromède. Cette nuit, les plus grands télescopes terrestres vont sonder l'espace obscur afin de capter l'antique lumière de lointains soleils, morts depuis longtemps, à la frontière de l'univers observable. Cette lumière a commencé son voyage il y a plus de 10 milliards d'années, bien avant que la Terre ne naisse de l'effondrement d'un nuage de poussière interstellaire. La vitesse de la lumière est énorme à l'échelle humaine, mais elle n'est pas infinie. Bien au contraire,

lorsqu'elle se trouve confrontée aux immenses distances cosmiques entre étoiles, entre galaxies, la lumière est d'une lenteur décourageante ; elle est même suffisamment lente pour que, à l'aide de machines telles que le grand collisionneur de hadrons de 27 kilomètres au centre européen de physique des particules, le CERN à Genève, nous puissions accélérer de très petits objets jusqu'à une vitesse extrêmement proche de la vitesse de la lumière.

Ce concept de limite cosmique imposée à la vitesse est bien étrange, et comme nous le découvrirons plus tard, identifier cette limite à la vitesse de la lumière se révèle réducteur. Cette limite joue un rôle bien plus profond dans l'univers d'Einstein. Il y a même une bonne raison pour que la lumière se déplace justement à cette vitesse-là. Nous en parlerons plus tard. Pour l'instant, qu'il nous suffise de mentionner que lorsque des objets s'approchent de la vitesse limite, des phénomènes curieux se produisent. Comment pourrait-on dans le cas contraire interdire à un objet de dépasser la vitesse limite ? C'est comme si une loi universelle de la physique empêchait votre voiture de dépasser 100 km/h, quelle que soit la puissance de son moteur, et que, contrairement au cas d'une limitation réglementaire, aucune force de police cosmique ne serait nécessaire pour la faire respecter. En effet, la structure même de l'espace et du temps est telle qu'il est absolument impossible de transgresser la loi, ce qui est heureux, sinon des conséquences désagréables se produiraient. Ainsi, nous verrons que s'il était possible de dépasser la vitesse de la lumière, il deviendrait envisageable de construire des machines capables de nous transporter dans le temps. Nous pourrions ainsi imaginer remonter vers une époque antérieure à notre naissance et, par accident ou à dessein, empêcher nos parents de se rencontrer. C'est un excellent

thème de science-fiction, mais il n'y a aucun moyen de construire réellement un tel univers, et comme Einstein l'a montré, notre univers ne fonctionne pas comme ça. Espace et temps sont délicatement entrelacés, d'une façon telle que ces paradoxes ne peuvent se produire. Cependant, il y a un prix à payer : il faudra nous débarrasser de nos notions intuitives de l'espace et du temps. L'univers d'Einstein est celui où les horloges en mouvement ralentissent leur tic-tac, où les objets se contractent lorsqu'ils se déplacent, et où nous pouvons voyager des milliards d'années durant à la seule condition que ce soit dans le futur. C'est un univers dans lequel la durée d'une vie humaine peut s'allonger presque indéfiniment. Nous pourrions observer la mort du Soleil, l'évaporation des océans et notre système solaire plongé dans une nuit perpétuelle. Nous pourrions assister à la naissance d'étoiles à partir de tourbillons de nuages de poussière, à la formation des planètes, et peut-être à l'apparition de la vie sur de nouveaux mondes encore informes. L'univers d'Einstein autorise ces voyages dans un futur même lointain, mais derrière nous, les portes du passé demeurent fermement closes.

Nous allons voir comment Einstein a été amené à concevoir une image aussi fantastique de l'univers, et comment cette image s'est révélée parfaitement exacte, et même nécessaire, à travers d'innombrables expériences scientifiques et applications technologiques. Par exemple, le système GPS de votre voiture tient compte du fait que le temps ne s'écoule pas au même rythme sur Terre et dans les satellites en orbite ! La vision d'Einstein est radicalement décapante : l'espace et le temps ne sont pas ce qu'ils paraissent.

Mais pour partager et apprécier la bouleversante vision d'Einstein, il va nous falloir accepter de réfléchir très

profondément à l'espace et au temps, ces deux concepts au cœur de la théorie de la relativité.

Imaginez-vous, lisant un livre durant un voyage en avion. À 12 h 00, vous jetez un coup d'œil à votre montre, vous décidez de poser votre livre, de quitter votre siège, et de marcher dans l'allée pour discuter avec un ami, dix rangées plus loin. À 12 h 15, vous retournez à votre siège, vous vous asseyez et reprenez votre livre. Aucun doute, vous êtes revenu exactement au même endroit. Vous avez remonté les dix mêmes rangées pour revenir à votre siège, et vous avez retrouvé votre livre là où vous l'aviez laissé. Mais maintenant, pensez un peu plus attentivement à cette notion de « au même endroit ». Cela peut sembler totalement inutile, tant le simple bon sens en donne une idée parfaitement claire. Quand nous téléphonons à un ami et que nous lui fixons un rendez-vous pour boire un verre dans tel ou tel café, nous savons bien que le café se trouvera « au même endroit » que la dernière fois ! Certes, le type de discussion que nous entreprenons dans ce chapitre peut paraître totalement oiseux, mais persistons dans ce sens, car en remettant en question des évidences, nous mettons nos pas dans ceux d'Aristote, Galilée, Newton et Einstein. Ainsi, comment définir précisément ce que nous entendons par « au même endroit » ? Sur la surface de la Terre, cela ne pose pas de problème particulier. Il suffit de se représenter sur notre globe une sorte de grille ou de quadrillage, les lignes de latitude et de longitude. Tout endroit peut alors être repéré par deux nombres, qui représentent sa position sur cette grille. Par exemple, la ville de Manchester au Royaume-Uni se situe à 53 degrés 30 minutes au nord de l'équateur, et 2 degrés 15 minutes à l'ouest du méridien de Greenwich. Ces deux nombres suffisent pour définir

exactement la position de Manchester, puisque tout le monde s'accorde sur la localisation de l'équateur et la définition du méridien de Greenwich. Généralisons : pour définir n'importe quel point, sur la surface de la Terre ou au-dessus d'elle, il suffit d'imaginer une grille tridimensionnelle, s'étendant vers le haut à partir de la surface. Cette grille peut même être prolongée vers le bas, vers le centre de la Terre et au-delà, de l'autre côté de la Terre. On peut ainsi repérer tout point par rapport à la grille, que ce soit en l'air, à la surface, ou sous Terre. En fait, cette technique ne se limite pas à la Terre. La grille pourrait s'étendre vers l'extérieur au-delà de la Lune, au-delà de Jupiter, Neptune et Pluton, au-delà même du bord de la Voie lactée, jusqu'aux confins de l'univers. À l'aide de notre grille géante, potentiellement infinie, nous avons la possibilité de savoir où chaque chose se trouve et, comme dirait Woody Allen, c'est bien utile quand on a perdu son stylo... Notre grille définit donc une arène dans laquelle se trouve tout ce qui existe, une sorte de boîte géante contenant tous les objets de l'univers. Dès lors, il est bien tentant d'affirmer : cette arène, cette boîte, c'est cela l'espace.

Mais revenons d'abord à la question de ce qu'on entend par « au même endroit », et reprenons l'exemple de l'avion. Nous avons supposé que, à 12 h 00 puis à 12 h 15, nous nous étions retrouvés au même point de l'espace. Et pourtant, imaginez comment la séquence des événements apparaît pour une personne située au sol, qui regarde l'avion. Elle le voit passer au-dessus d'elle à 800 km/h ; elle dirait que, entre 12 h 00 et 12 h 15, vous vous êtes déplacé de 200 km, et que vous n'êtes évidemment pas revenu « au même endroit ». Qui a raison ? Qui est en mouvement ? Qui est immobile ?

Il est tout à fait légitime d'hésiter devant ces questions simples en apparence : Aristote, l'un des plus grands esprits de la Grèce antique, aurait par exemple donné une réponse radicalement fautive. Il aurait affirmé, sans doute possible, que c'est vous, le passager de l'avion, qui êtes en mouvement. En effet, Aristote voyait la Terre au centre de l'univers. Selon lui, le Soleil, la Lune, les planètes et les étoiles tournaient autour d'elle, sur cinquante-cinq sphères transparentes concentriques, emboîtées comme des poupées russes. Il partageait ce concept intuitivement convaincant de l'espace comme une arène, ou une boîte, dans laquelle on trouverait la Terre et les sphères. Cette image de l'univers constitué de la Terre et d'un ensemble de sphères paraît ridicule aujourd'hui. Mais supposez que personne ne nous ait dit que la Terre tourne autour du Soleil, que les étoiles sont des soleils lointains, des milliers de fois plus brillants que le nôtre, mais à des milliards de milliards de kilomètres. Percevriions-nous que la Terre est en mouvement dans un univers incroyablement grand ? Notre vision actuelle du monde fut loin d'être aisée à construire, car elle va souvent à rebours de nos intuitions. Si cette image de l'univers échafaudée par des milliers d'années d'expérience et de réflexion était si évidente, alors les plus grands esprits du passé, comme Aristote, l'auraient élaborée eux-mêmes. De même, si tel ou tel concept de ce livre vous semble difficile, rassurez-vous : les plus grands esprits de l'antiquité en auraient également convenu.

Pour trouver la faille dans le raisonnement d'Aristote, commençons par accepter un instant son point de vue, et voyons où cela nous mène. Selon lui, tout l'espace contient nécessairement une grille imaginaire centrée sur la Terre, grâce à laquelle on peut repérer la position de toute chose, et définir avec certitude ce qui est en mouvement ou ce

qui est immobile. Si l'on accepte cette image de l'espace comme la boîte qui contient tout, la Terre immobile en occupant le centre, alors il devient clair que vous, le passager de l'avion, avez changé de place dans la boîte, alors que la personne qui regardait voler l'avion est restée immobile à la surface de la Terre, elle-même fixe. En d'autres termes, il existe un mouvement absolu, et du même coup, un espace absolu. Un objet est en mouvement absolu s'il change de place dans l'espace au cours du temps, par rapport à la grille imaginaire fixée au centre de la Terre.

Le problème avec cette image, bien sûr, est que la Terre n'est pas immobile au centre de l'univers : c'est une boule qui tourne en orbite autour du Soleil. De fait, la Terre se déplace à plus de 100 000 km à l'heure par rapport au Soleil. Quand vous vous couchez le soir et que vous dormez durant huit heures, vous avez parcouru plus de 800 000 km à votre réveil. Vous pourriez alors affirmer que, dans 365 jours environ, votre chambre retrouvera exactement le même point de l'espace, puisque la Terre aura bouclé une orbite complète autour du Soleil. On pourrait ainsi se contenter de modifier un peu notre représentation, tout en sauvegardant l'essentiel du point de vue d'Aristote : il suffirait de choisir le Soleil comme centre de la grille. Cette idée est assez simple, mais elle n'est pas bonne non plus, car le Soleil lui-même tourne autour du centre de la Voie lactée. La Voie lactée est notre île locale, de plus de 200 000 millions de soleils. Comme vous pouvez l'imaginer, elle est immensément grande, et il faut un certain temps pour en faire le tour. Le Soleil, avec la Terre à sa suite, se déplace autour de la Voie lactée à près de 800 000 km/h, à une distance de 250 millions de milliards de kilomètres du centre. À cette vitesse, il faut 226 millions d'années pour parcourir une

orbite. Bon, peut-être suffirait-il d'un pas de plus pour sauver le point de vue d'Aristote. Nous pourrions décider de placer le centre de la grille au centre de la Voie lactée : si par exemple vous êtes dans votre lit, imaginez ce qui se passait, la dernière fois que la Terre était « ici », à ce point très précis de l'espace. Un dinosaure était en train de paître paisiblement, dans la lumière du petit matin, mangeant des plantes préhistoriques, à l'emplacement même de votre chambre. Mais attention, c'est encore faux : en réalité, les galaxies elles-mêmes s'enfuient les unes par rapport aux autres, et plus elles sont lointaines, plus grande est leur vitesse de déplacement. Il est donc évident que, vu la complexité de notre mouvement parmi les innombrables galaxies de l'univers, ramener celui-ci à une conception simple est impossible.

La vision aristotélicienne d'une grille immobile fixée « quelque part » est donc confrontée à une difficulté considérable : comment définir exactement ce qu'on entend par le mot « immobile » ? En d'autres termes, il se révèle impossible de savoir où mettre le centre de la grille imaginaire permettant de définir la position d'un point quelconque, et donc de trancher entre ce qui est immobile et ce qui est en mouvement. Aristote lui-même n'a jamais eu à affronter ce problème, car sa conception d'une Terre immobile, entourée de sphères en rotation, n'a jamais été sérieusement contestée durant près de 2 000 ans. Certes, cette conception aurait dû être remise en question, mais comme nous l'avons déjà dit, ces choses sont loin d'être évidentes, même pour les plus grands esprits. Claudius Ptolemaeus, connu plus communément sous le nom de Ptolémée, travaillait à la grande Bibliothèque d'Alexandrie en Égypte, au 11^e siècle. C'était un observateur attentif du ciel nocturne, et il s'inquiétait du mouvement céleste