

Alain Riazuelo

Pourquoi
 $E = mc^2$

COMMENT
A-T-ON
SU

une collection dirigée par
Étienne Klein

humerSciences

Pourquoi $E = m c^2$

Dans la même collection

L'histoire secrète des fleurs, François Parcy, 2019.

Pourquoi la Terre est ronde, Alain Riazuelo, 2019.

Pourquoi le Soleil brille, Roland Lehoucq, 2020.

Comment pensent les animaux, Loïc Bollache, 2020.

La folle histoire des virus, Tania Louis, 2020.

L'âge de l'Univers, Marc Lachièze-Rey, 2021.

Alain Riazuelo

Pourquoi $E = m c^2$

COMMENT A-T-ON SU

Collection dirigée par
Étienne Klein



Prolongez l'expérience avec la newsletter de Cogito
sur www.humensciences.com

« Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des paragraphes 2 et 3 de l'article L122-5, 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, sous réserve du nom de l'auteur et de la source, que "les analyses et les courtes citations justifiées par le caractère critique, polémique, pédagogique, scientifique ou d'information", toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, faite sans consentement de l'auteur ou de ses ayants droit, est illicite (art. L122-4). Toute représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, notamment par téléchargement ou sortie imprimante, constituera donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. »

ISBN: 9782379311895

Dépôt légal: janvier 2022

© Éditions humenSciences / Humensis, 2022
170 bis, boulevard du Montparnasse, 75014 Paris
Tél.: 01 55 42 84 00
www.humensciences.com

«L'observation, quelquefois le hasard, découvrent les phénomènes; la méthode expérimentale les développe et détermine leurs lois physiques: mais le dernier mystère des forces élémentaires qui les produisent, ne peut être mis en évidence que par la force de la pensée.»

JEAN-BAPTISTE BIOT,
«Sur l'aimantation imprimée aux métaux
par l'électricité en mouvement»
Journal des Savans, avril 1821, p. 235

ICONIQUE ET POURTANT...

Le but de ce livre est de vous parler de l'équation la plus célèbre de la science, à savoir $E = mc^2$. C'est une formule calligraphiquement très simple. Tous les caractères qu'elle contient sont soit des chiffres, soit des lettres, soit un signe mathématique que tout le monde connaît (le égal), aussi tout un chacun peut prononcer cette formule. Mais ce qu'elle signifie ne saute pas aux yeux et pour cause: si vous ne savez pas à quoi correspondent ce E , ce m et ce c , impossible de comprendre de quoi elle parle. Pourtant, cette équation est omniprésente dans le monde qui nous entoure. C'est même la chose la plus indispensable à notre existence puisque c'est elle qui fait briller le Soleil et elle qui a permis à des générations passées d'étoiles de fabriquer les atomes dont la Terre et nous-mêmes sommes constitués. Mais pour en arriver là, il faut bien sûr expliquer le contexte dans lequel cette

POURQUOI $E = mc^2$

équation est apparue et évoquer son auteur, dont vous avez au moins une fois dans votre vie entendu parler : Albert Einstein. Il faut aussi en expliquer les conséquences, certaines directes – la source d'énergie du Soleil donc – et d'autres plus inattendues comme les trous noirs ou l'histoire de l'Univers.

C'est à cette exploration que j'ai essayé de me livrer, en gardant à l'esprit la collection « Comment a-t-on su ? » de humenSciences, à savoir parler de science en racontant son histoire, non pas de la façon érudite dont le ferait un historien, mais de celle plus personnelle (et néanmoins rigoureuse !) d'un scientifique qui utilise ces concepts dans son activité quotidienne. Et le tout en respectant l'autre caractéristique de cette collection, à savoir un ouvrage qui ne soit ni trop long, ni trop compliqué afin d'être accessible à tous. C'est le résultat de ce travail d'équilibriste que vous tenez entre les mains. Eu égard à la subtilité de certains concepts, certains passages seront sans doute plus ardues que d'autres mais le tout devrait, je l'espère, être à la portée du plus grand nombre, c'est en tout cas le but avoué de l'entreprise. Et si par manque de place certains concepts n'ont pas pu être développés autant qu'ils le méritent, sachez que le but n'était pas de vous en priver mais au contraire de vous donner l'envie d'en savoir plus.

INTRODUCTION

La découverte de l'équation $E = mc^2$ est l'épisode le plus célèbre de la grande quête scientifique visant à déterminer les lois physiques qui gouvernent notre monde. Cette quête a sans doute existé depuis des temps immémoriaux mais de façon rationnelle et avec un certain succès seulement à partir de l'Antiquité grecque. Cependant, ce n'est que bien plus tard et après de longues périodes de stagnation qu'elle a réellement pris son essor, grâce à celui qui longtemps fut considéré comme le plus grand des scientifiques, Isaac Newton (1643-1727). Même s'il est toujours difficile de comparer les époques et les individus, il n'y a sans doute qu'un seul autre homme qui puisse contester ce statut à Newton. C'est le plus célèbre d'entre tous, le seul qui puisse prétendre être universellement connu et reconnu : Albert Einstein (1879-1955). Comme nombre d'entre vous le savent déjà, c'est à Einstein que l'on doit le célèbre – quoique quelque peu mystérieux – $E = mc^2$ qui révolutionna

notre conception du monde, ou en tout cas la conception que s'en faisaient les scientifiques d'alors. Mais ce que le grand public sait sans doute moins, c'est que cette équation et les raisons qui avaient mené à sa découverte annonçaient une faille dans le remarquable édifice bâti par Isaac Newton deux siècles plus tôt. Cette faille indiquait que ce qu'avait découvert le savant anglais n'était pas tout à fait exact et nécessitait donc d'être amendé. Ce que personne ne savait, c'est à quel point corriger ce qui semblait être un défaut mineur allait à nouveau changer notre représentation du monde. C'est encore une fois Albert Einstein qui en fut l'architecte, et c'est cette réalisation-là, bien plus que son iconique $E = mc^2$, qui l'a rendu à jamais célèbre et qui lui vaut d'être considéré comme le plus grand de tous. Les destins de Newton et Einstein sont ainsi indissolublement liés quand bien même ils vécurent à 250 ans d'écart. Mais pour ce qui concerne cet ouvrage, c'est le second nommé qui va focaliser toute notre attention.

Personnage central de cette pièce, Einstein n'en est pas pour autant le seul acteur. L'histoire qui va se dérouler devant vos yeux fait intervenir de nombreux protagonistes. Certains seront d'éphémères figurants, d'autres joueront un rôle important et seront bien plus que des doublures ou des faire-valoir.

INTRODUCTION

Car la chose la plus importante que j'aimerais que vous reteniez, c'est que la science est d'abord et avant tout une œuvre altruiste et collective. Ceux ou celles qui permettent les plus grandes avancées n'en sont pas pour autant infaillibles. Ils ne peuvent réussir seuls dans toutes leurs entreprises ou toujours avoir les bonnes intuitions. Einstein offrira la quintessence de ces deux facettes, par ses immenses accomplissements bien sûr, mais aussi parce que ça ne l'empêchera pas d'être parfois dépassé par ses propres créations. Loin de ternir sa légende, ces (rares) mauvais choix donneront plus d'épaisseur, plus d'humanité au personnage.

Mais plus que les glorieux ou discrets accomplissements des uns et des autres, l'aspect qui à titre personnel me fascine le plus en science est cette capacité qu'elle donne à ses protagonistes de dialoguer à travers les siècles. Bien sûr les morts ne parlent pas, mais les vivants écrivent. Vous aurez plusieurs fois l'occasion de voir comment des scientifiques d'époques différentes ont en quelque sorte échangé par-delà leur brève existence. Ceux et celles des temps jadis ont légué à leurs successeurs des observations ou enseignements dont ces derniers se serviront longtemps après, et qui en retour en donneront une signification plus grande que celle imaginée par leurs prédécesseurs. Je me permettrai en quelques

occasions de vous prévenir quand ce sera le cas. Dans d'autres, je vous laisserai la surprise de le découvrir.

Bref, vous l'aurez compris, à mes yeux parler de l'équation $E = mc^2$ sans expliquer d'où elle vient ou quelles en furent les conséquences n'a guère de sens : en science comme dans bien des domaines, énoncer des faits sans en présenter le contexte n'aide en rien à les appréhender mais, au contraire, contribue à en donner une idée fautive, ce qui serait un comble pour un ouvrage de vulgarisation scientifique. L'histoire de $E = mc^2$ va donc nécessiter quelques détours indispensables avant d'entrer dans le vif du sujet. Elle débute ainsi par une problématique avec laquelle cette équation n'entretient qu'un rapport en apparence très distant, à savoir la lumière. En effet, pour anticiper la suite de ce livre, dans $E = mc^2$, le E de l'équation représente de l'énergie et le m de la masse. Or la lumière est une entité qui certes possède de l'énergie... mais qui n'a pas de masse. Le lien entre la lumière et la fameuse équation apparaît donc très ténu à première vue. Pourtant, c'est par l'intermédiaire d'une stupéfiante propriété de la lumière que sera trouvée la fameuse équation. C'est donc par là que commence cette histoire...

TOUT COMMENCE PAR LA LUMIÈRE

Qu'est-ce que la lumière? Comme souvent quand il s'agit de questions scientifiques fondamentales, c'est aux penseurs de la Grèce antique que l'on doit les premières réflexions abouties. S'agissait-il d'un « feu continu », ou d'une myriade de particules élémentaires? Émergeait-elle des corps incandescents ou était-elle une propriété émanant de nos yeux? Se propageait-elle instantanément ou alors à une vitesse finie? Quantité d'hypothèses, souvent contradictoires, avaient été formulées sur ces questions et bien d'autres. Toutes n'étaient pas justes, loin de là, mais au moins le foisonnement intellectuel que permettait cette civilisation avait-il commencé à débroussailler le sujet.

Il n'est pas facile de détailler en quelques lignes toutes les étapes par lesquelles s'est élaborée la vision moderne du phénomène, mais certains jalons

essentiels doivent être mentionnés. La question de la vitesse de la lumière est la première à être tranchée définitivement. En 1676, l'astronome d'origine danoise Ole Rømer (1644-1710; prononcez « Reumair ») observe des anomalies dans le mouvement des satellites de Jupiter. Bien que ceux-ci soient en apparence d'une remarquable régularité, certains événements que l'on peut dater de façon très précise, comme le moment où un satellite éclairé par le Soleil disparaît dans l'ombre de Jupiter ou émerge de celle-ci, ne se produisent pas à intervalles parfaitement réguliers, leur date semblant se décaler au cours de l'année d'une dizaine de minutes en avance ou en retard sur l'horaire attendu. Rømer finit par comprendre que la raison n'est pas à chercher du côté des mouvements des satellites, qui se font effectivement à une cadence de métronome, mais dans le délai avec lesquels on les observe. Si la lumière voyage à une vitesse grande mais finie, alors ce que nous percevons n'est pas le reflet du présent immédiat mais d'un passé plus ou moins lointain que nous voyons avec un délai d'autant plus grand que la lumière a voyagé longtemps, c'est-à-dire que la distance qui nous sépare du phénomène que nous observons est grande. Jupiter et la Terre tournent autour du Soleil le long de trajectoires à peu près circulaires mais à des

vitesse et des distances différentes de notre étoile, aussi la distance entre la Terre et Jupiter varie-t-elle au cours de l'année. Si la lumière voyage à une vitesse finie, alors le ballet des satellites de Jupiter sera vu depuis une distance plus grande quand la Terre et Jupiter sont de part et d'autre du Soleil que quand elles sont du même côté. L'avance ou le retard apparents des phénomènes observés sont donc simplement liés à la variation de distance entre ces configurations planétaires, c'est-à-dire au fait que, selon les mots de Rømer, « la lumière demande du temps » pour parcourir cette distance supplémentaire. À l'époque de Rømer, la valeur de la distance entre la Terre et le Soleil n'est pas encore bien connue et la précision avec laquelle les phénomènes d'éclipses sont datés est, elle aussi, assez incertaine eu égard aux limitations des horloges. Aussi Rømer ne se risque-t-il pas à en donner de valeur. Celle-ci sera dans un premier temps estimée de l'ordre de 200 000 kilomètres par seconde (symbole km/s, on va souvent l'utiliser). Par la suite, des tentatives de plus en plus précises de mesures de la vitesse de la lumière seront faites, en particulier par les Français Hippolyte Fizeau (1819-1896) puis Léon Foucault (1819-1868) au milieu du XIX^e siècle. Elles finiront par converger vers une valeur presque égale à 300 000 km/s. La valeur exacte importe peu dans ce

qui va suivre, aussi j'utiliserai systématiquement cette valeur approchée de 300 000 km/s quand bien même la vraie valeur en diffère légèrement*.

La question de la vitesse de la lumière étant réglée, restait celle de sa nature. S'agissait-il d'une entité discrète, c'est-à-dire constituée de particules, ou d'une sorte de milieu continu? Le débat existait depuis l'Antiquité et faisait écho à celui de la matière: était-elle constituée d'entités élémentaires, les atomes (nous y reviendrons), ou d'une substance divisible à l'infini? Pour Platon (env. - 427 à - 348) par exemple, matière et lumière étaient des entités discrètes et la lumière était composée de myriades de minuscules tétraèdres se déplaçant dans l'espace (si vous vous demandez pourquoi diable des tétraèdres, ne vous inquiétez pas, vous aurez la réponse bientôt). Mais en ces temps reculés, il était impossible de trancher le débat et deux mille ans plus tard, à la fin du XVII^e siècle, celui-ci faisait encore rage entre tenants de la théorie corpusculaire et ceux en faveur d'une nature ondulatoire, c'est-à-dire défendant l'idée que

* Elle vaut exactement 299 792 458 mètres par seconde ou, si vous préférez, 299 792,458 km/s, de quoi faire plus de sept fois le tour de la Terre en une seconde. On comprend aisément pourquoi des observations sur des distances astronomiques sont plus efficaces pour mettre en évidence sa vitesse finie.

la lumière était une ondulation de quelque chose qui se propageait de proche en proche, comme les ronds dans l'eau quand on y jette un caillou. Le chef de file des seconds était le Néerlandais Christiaan Huygens (1629-1695), en face duquel se posait le plus grand scientifique de l'époque (et un des plus grands de l'Histoire, donc), Isaac Newton. Le premier était un opticien hors pair. Il a perfectionné à un très haut degré de précision pour l'époque la lunette astronomique inventée par Galilée (1564-1642). Grâce à ses instruments, il a découvert un satellite autour de Saturne, Titan. Il a aussi grandement amélioré la précision des horloges de son époque, très utile pour l'étude de certains phénomènes astronomiques... comme la mesure précise des mouvements des satellites de Jupiter. Ses travaux en optique l'amènent à expliquer une loi empirique trouvée au début de ce siècle par deux savants, son compatriote Willebrord Snell (1580-1626) et le Français René Descartes (1596-1650). La loi en question portait sur la réfraction, c'est-à-dire le fait que quand la lumière passe d'un milieu à un autre (par exemple de l'air à l'eau ou inversement), sa direction est déviée. C'est ce phénomène qui est à l'origine de la difficulté à évaluer la profondeur d'une piscine qui a toujours l'air moins profonde quand elle est remplie d'eau que quand elle

est vide, et c'est aussi grâce à cela que fonctionnent beaucoup d'instruments optiques au premier chef desquels les lunettes de vue que vous portez peut-être sur le nez: la lumière est également déviée quand elle traverse le verre ou tout autre solide transparent, ce qui pour des lunettes de vue est utilisé pour corriger les imperfections de vos yeux. Huygens démontre que si la lumière est une onde, alors il est possible d'expliquer les lois de la réfraction. Mais s'oppose à lui Isaac Newton. Ce dernier est surtout connu pour avoir formulé en 1687 les lois de la gravitation universelle – j'y reviendrai – qui, comme leur nom l'indique, sont universelles entre autres parce qu'elles expliquent à la fois des phénomènes de la vie courante (l'exemple le plus illustre étant la fameuse pomme qui tombe d'un arbre) et les phénomènes célestes, de la trajectoire de la Lune autour de la Terre à la course des planètes autour du Soleil. Newton a lui aussi étudié la lumière. Il a notamment réussi à montrer que la lumière produite par une source lumineuse est bien souvent composée d'une multitude de lumières élémentaires qui ont chacune une couleur précise. Les gouttes d'eau peuvent naturellement décomposer la lumière en la somme de ses lumières élémentaires: c'est le phénomène bien connu de l'arc-en-ciel, qui nous dit que la lumière du Soleil que nos yeux perçoivent



Roland Lehoucq

Pourquoi le Soleil brille

Collection « Comment a-t-on su »

Postface d'Étienne Klein

Comment fait le Soleil pour briller aussi fort et depuis si longtemps ?

De nombreuses hypothèses furent avancées pour comprendre la nature et l'origine de la prodigieuse luminosité de notre étoile. Ici, on imagina que le Soleil était une boule de feu, là qu'il était bombardé de matière interplanétaire, ailleurs qu'il tirait son énergie de sa propre masse ! Et quand une explication semblait satisfaisante, comment la vérifier, par quelles habiles observations s'assurer de sa pertinence ? Ce livre raconte les grandes étapes de cette quête, et les scientifiques qui ont trouvé la cause et expliqué l'ancienneté de ce formidable éclat.

Il fallait tout le talent de l'astrophysicien Roland Lehoucq pour mettre en scène cette épopée de la connaissance qui commence au VI^e siècle avant notre ère avec les Grecs Anciens, et s'achève aux dernières années du XX^e siècle.

Comme les autres récits de cette collection, illustre la puissance de l'intellect humain, excité par un beau problème. Éclairant à tout point de vue !

Roland Lehoucq est astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, il a particulièrement œuvré en astrophysique des hautes énergies et en cosmologie. Il enseigne à Sciences Po et à l'université Paris-Diderot.



Marc Lachièze-Rey
L'âge de l'Univers

Collection « Comment a-t-on su ? »
Postface d'Étienne Klein

Une des questions les plus vertigineuses de l'astrophysique !

Quel est l'âge de l'Univers ? Nous croyons tous connaître la réponse : 13,7 milliards d'années. Mais s'arrêter là serait se priver de l'essentiel. Ce chiffre est le fruit d'une quête passionnante où l'on retrouve Einstein, Hubble, Lemaître..., les subtilités de la physique relativiste et de la cosmologie moderne.

Définir une notion d'âge pour un système aussi complexe n'a rien d'évident. Prenez le corps humain, son âge biologique n'est pas celui des atomes qui le constituent, dont la plupart ont été fabriqués par des réactions nucléaires au cœur d'étoiles anciennes il y a des milliards d'années ! Pour l'Univers, c'est encore pire. Physiciens et cosmologues ont contourné le problème en fabriquant la notion de temps cosmique. Mais ce n'est pas une grandeur que peuvent indiquer des horloges et reconstituer sa valeur repose sur des hypothèses théoriques.

C'est pourquoi la question est encore aujourd'hui débattue.

Enfin vous découvrirez comment on peut aborder l'âge de l'Univers en se passant de la notion de temps, devenue périmée avec la physique moderne.

Alors attachez votre ceinture cosmique...

Marc Lachièze-Rey est astrophysicien et physicien théoricien, directeur de recherche émérite au CNRS. Ses travaux portent essentiellement sur les questions de cosmologie, de gravitation et d'espace-temps, auxquelles il a consacré de nombreux ouvrages de vulgarisation.