

Etienne Klein*

DÉFIS PHYSIQUES

« *Nous devons savoir, nous saurons* »

David Hilbert

A la fin du XIX^e siècle, grand siècle de la thermodynamique, de l'électromagnétisme et de la mécanique, les physiciens croyaient qu'ils étaient près de tout comprendre. Un peu plus d'un siècle plus tard, malgré les percées vertigineuses qui ont été accomplies, nous constatons à quel point cette impression était fallacieuse. Ce ne sont pas simplement des détails qui manquent à notre compréhension du monde physique, mais des grandes questions dont la réponse continue de nous échapper.

Par exemple, les phénomènes non linéaires, qui se manifestent dans les instabilités hydrodynamiques, la turbulence des fluides, le chaos déterministe, sont encore largement incompris. Or des progrès théoriques dans ces domaines nous permettraient de mieux prédire la météo et l'évolution des climats, de mieux concevoir les ailes d'avion ou les hélices de bateau. Et sans aller chercher aussi loin les limites de nos savoirs, rappelons que l'eau, ce liquide omniprésent, essentiel à la vie, est loin d'avoir révélé tous ces secrets, qu'il s'agisse des propriétés physiques de l'eau pure ou des propriétés physico-chimiques précises qui font de l'eau le solvant qui a permis l'éclosion de la vie (par ailleurs, on ne sait toujours pas bien expliquer pourquoi l'eau solide - la glace - flotte sur l'eau liquide, propriété que l'eau détient en exclusivité....)

La liste des autres défis que les physiciens ont à relever est si longue qu'il serait fastidieux et même vain de vouloir la dresser ici. Je me

* Etienne Klein est physicien, directeur de recherches au CEA et docteur en philosophie des sciences. Il dirige actuellement le Laboratoire de Recherche sur les Sciences de la Matière du CEA (LARSIM). Il vient de publier *Discours sur l'origine de l'univers*, Flammarion, octobre 2010.

contenterai donc d'évoquer deux types de problèmes. Le premier est relatif à la cosmologie, plus exactement au contenu de l'univers : il reste à comprendre de quoi sont constituées la « matière noire » et « l'énergie noire ». Le second est relatif à la physique des particules : depuis plusieurs décennies, les physiciens tentent de comprendre d'où vient que les particules ont une masse.

QUAND LA COSMOLOGIE BROIE DU NOIR

« Vous pouvez choisir la couleur que vous voulez, à condition que ce soit le noir ».

Henry Ford (à propos de la Ford T)

Certains nouveaux savoirs accroissent l'ignorance : grâce à une découverte, on apprend qu'on ne savait pas qu'on ne savait pas et, d'un coup, les perspectives changent, l'horizon se reconfigure.

Par exemple, à la fin des années 1920, l'idée selon laquelle l'électron et le proton suffisaient à rendre compte de la totalité de la matière, était acceptée par presque tous les physiciens de premier plan, Einstein en tête. Mais les années qui suivirent ne cessèrent pas de leur donner tort : de nouvelles particules, à commencer par le neutron, le positron (l'antiparticule de l'électron), le muon et le pion furent rapidement détectées. Aujourd'hui, alors même que des centaines de particules ont été découvertes grâce aux accélérateurs de particules, les physiciens viennent de comprendre qu'ils ne connaissent pas les éléments principaux du mobilier ontologique de l'univers : grâce à des observations astrophysiques permettant notamment de déterminer la densité moyenne de l'univers, ils ont constaté que la matière qu'ils connaissent ne constitue qu'une part très faible du contenu de l'univers, et que tout le reste leur échappe. Nul ne peut dire qu'il ne s'agit là que d'un problème marginal ou anecdotique, écartable d'un revers de main, car on sait que le contenu de l'univers joue un rôle déterminant dans la dynamique de son évolution. Sa caractérisation complète est donc d'une importance cruciale.

De quoi est faite la matière noire ?

Depuis plusieurs décennies, l'observation de plus en plus minutieuse des galaxies sème le trouble. Car la seule façon de comprendre les valeurs des vitesses qu'ont les étoiles au sein d'une galaxie, si l'on fait l'hypothèse que les lois de la gravitation sont celles que nous connaissons, est de supposer que la partie visible des galaxies est enveloppée par une masse énorme de matière invisible, la matière « noire ». Tout récemment, d'autres

phénomènes sont venus renforcer le crédit qu'il faut accorder à cette interprétation. Par exemple, on sait que la lumière est déviée par des masses élevées. Or, pour nous parvenir, la lumière issue de certaines galaxies lointaines a dû passer à proximité d'un amas de galaxies. Sa trajectoire a donc été distordue en cours de route, comme si elle était passée au travers d'un système optique. La galaxie nous apparaît dès lors non plus comme un point brillant, mais comme un arc lumineux (on parle de « mirages gravitationnels »). De la forme et des dimensions de ces arcs, on peut déduire la masse de l'amas de galaxies responsable de cette déformation. Et le résultat obtenu est sans ambiguïté : la masse de l'amas ainsi mesurée est en réalité dix fois supérieure à sa masse apparente, c'est-à-dire à la masse que révèlent les étoiles visibles qu'il contient. Il y a donc bien de la masse invisible, une matière noire qui agit gravitationnellement mais n'émet pas de lumière.

De quoi cette matière noire est-elle faite ? Se pourrait-il qu'elle soit constituée de particules que nous connaissons déjà, par exemple de neutrinos ? Beaucoup de physiciens l'ont pensé dans un premier temps (car le neutrino est la particule connue qui est la plus nombreuse dans l'univers), mais cette hypothèse est aujourd'hui de moins en moins probable. S'agit-il alors d'une matière composée de particules radicalement nouvelles ? Sans doute. Mais lesquelles ? Certaines théories, telle la « supersymétrie » prédisent l'existence d'une particule appelée le « neutralino », dont les caractéristiques sont telles qu'elles en font un candidat privilégié pour former la majeure partie de la matière noire¹. Reste toutefois à démontrer que cette particule existe bel et bien.

Qu'est-ce qui accélère l'expansion de l'univers ?

Grâce à la mise en service de nouveaux moyens de détection, de très nombreuses données ont pu être recueillies ces dernières années en provenance de l'univers. Les astrophysiciens sont notamment parvenus à analyser précisément la lumière émise par certaines étoiles lointaines en cours d'explosion, qu'on appelle des « supernovae ». Et ce qu'ils ont découvert n'a pas manqué de les étonner.

Les supernovae lointaines qu'ils ont observées correspondent à des explosions d'une extraordinaire brillance. Elles sont constituées d'une petite étoile très dense, appelée naine blanche, accouplée à une étoile compagne plus massive. Les naines blanches ont une masse à peu près égale à celle du Soleil, mais concentrée dans un volume égal à celui de la Terre, de sorte que leur champ gravitationnel est très intense. D'où leur terrible voracité : elles arrachent puis absorbent la matière de leur compagne. Cette orgie augmente leur masse et leur densité, jusqu'à provoquer une explosion nucléaire gigantesque. Celle-ci est rendue visible

par l'émission d'une lumière très intense qui persiste pendant plusieurs jours. L'objet brille alors autant qu'un milliard de soleils.

L'intérêt cosmologique de tels événements vient de ce qu'ils servent d'étalons lumineux. Ils constituent des « bougies standard » permettant d'arpenter l'univers à grande échelle. Cette vertu vient de ce que leurs « courbes de lumière » se ressemblent étroitement, avec d'abord un pic de brillance qui dure quelques semaines, suivi d'un affaiblissement plus lent. Toute différence observée entre deux courbes de lumière ne peut donc venir que de la distance : plus la supernova est éloignée, plus la lumière que nous recevons d'elle est faible. À partir d'une mesure de l'intensité de cette lumière, on peut donc calculer la distance de l'étoile qui l'a émise, de la même façon qu'on peut évaluer la distance d'une voiture en comparant la luminosité apparente de ses phares à leur luminosité intrinsèque.

Les résultats obtenus ont montré que ces supernovae sont plus éloignées que ce que prévoyaient les modèles cosmologiques « classiques » ! Ils ont permis de démontrer que l'expansion de l'univers, contrairement à ce qu'on avait imaginé jusque là, est en phase d'accélération depuis plusieurs milliards d'années. Qu'est-ce à dire ? Dans le processus d'expansion, la gravitation, toujours attractive, fait office de frein : elle tend à rapprocher les objets massifs les uns des autres, de sorte que la matière ne peut que ralentir l'expansion. Mais ce que semblent montrer les mesures dont nous parlons, c'est qu'un autre processus s'oppose à elle en jouant au contraire un rôle d'accélérateur. Tout se passe comme si une sorte d'anti-gravité avait pris la direction des affaires, obligeant l'univers à augmenter sans cesse la vitesse de son expansion.

Quel est le moteur de cette accélération ? Personne ne le sait de façon certaine. Alors, bien conscients de leur ignorance, les physiciens parlent d'une mystérieuse « énergie noire » : noire parce qu'on ne la voit pas ; noire aussi parce qu'on en ignore la nature ; énergie dont la contribution à la masse de l'univers croîtrait avec l'expansion, car elle occupe le moindre recoin de son espace.

Les plus courageux avancent quand même quelques hypothèses sur sa nature. L'énergie noire pourrait par exemple être la « constante cosmologique », dont elle a la saveur, la couleur et l'odeur sans qu'on puisse toutefois certifier qu'elles se confondent l'une avec l'autre. Ce paramètre, qu'Einstein avait introduit en 1917, correspond en effet à une sorte de répulsion de l'espace vis-à-vis de lui-même. Dès lors, si sa valeur est non nulle, il devrait imprimer une accélération de l'expansion de l'univers. Mais d'autres pistes sont évoquées. Par exemple, on ne peut pas exclure que l'énergie noire provienne d'une « matière exotique », capable, au contraire de la matière habituelle, d'accélérer l'expansion. Mais de quoi

est-elle faite ? La question, là aussi, reste posée. Enfin, certains physiciens évoquent, comme autres candidats possibles, le vide quantique, même si rien ne permet d'affirmer qu'il exerce une influence gravitationnelle sur l'univers², ou bien des dimensions d'espace supplémentaires, ou bien une mystérieuse « quintessence », ou bien suggèrent des modifications des lois de la gravitation, ou bien disent que le champ associé au boson de Higgs pourrait à lui seul faire l'affaire...

Reste que ce qui est désormais certain, c'est que la matière visible, ordinaire, celle qui compose les étoiles, les galaxies, et est benoîtement constituée d'atomes, n'est en réalité qu'une frange du contenu de l'univers, sa petite écume visible. Elle ne représente que trois ou quatre pour cent du total, pas plus.

Cette conclusion a de quoi rendre modestes les physiciens, en dépit des découvertes extraordinaires qu'ils ont faites. Ils ne sont pas encore parvenus à apporter la lumière sur la nature des deux principaux constituants actuels de l'univers : la matière noire et l'énergie noire, qui représentent respectivement 24 et 72 % du total...

Pour résoudre cette double énigme de l'accélération de l'univers et de son contenu, faudra-t-il bouleverser les concepts les plus fondamentaux de la physique, inventer de nouvelles idées, et ainsi réitérer la double révolution, quantique et relativiste, du début du siècle dernier ?

À QUOI LES PARTICULES DOIVENT-ELLES D'AVOIR UNE MASSE ?

« Les masses ont l'instinct de l'idéal ».

Victor Hugo

Les objets matériels qui nous entourent possèdent à l'évidence une masse, et celle-ci semble leur être consubstantiellement liée : nous éprouvons en effet la même peine à nous figurer ce que pourrait bien être un corps matériel sans masse qu'à imaginer une masse pure qui ne s'incarnerait pas en un corps. Comme si en notre esprit les notions de matière et de masse allaient toujours de pair, participaient l'une comme l'autre - à poids égal si l'on peut dire - de la même idée de « substance ». Dès lors, se poser la question de l'origine de la masse des objets revient à se poser celle de l'origine des objets eux-mêmes.

Mais il faut se méfier de ce type de raisonnement, rapide, abrupt, car dans son déroulement moderne, la physique n'a cessé de plaider pour que les idées convaincantes, y compris les plus incontestables en apparence, soient systématiquement interrogées, critiquées, testées. Depuis Galilée, n'a-t-elle pas outragé à maintes reprises notre « robuste » sens de la réalité,

plusieurs fois condamné un certain sens commun au dépôt de bilan? Et n'a-t-elle pas minutieusement révélé que des idées évidentes au point de sembler refléter la vérité n'étaient en réalité que de simples traces en notre esprit d'expériences de la vie courante ou de préjugés autoritaires ?

Alexandre Koyré expliquait que le pari de la physique moderne, à rebours de celle d'Aristote, consiste à vouloir « expliquer le réel par l'impossible ». Il prenait l'exemple du principe d'inertie qui, pour comprendre l'amortissement du mouvement des corps que nous observons dans le monde empirique, nous prie d'envisager l'idéal d'un mouvement qui ne s'amortit pas, à savoir le moment inertiel, que personne n'observe jamais et qui semble de ce fait impossible. Il écrit précisément ceci : « Il n'est pas étonnant que l'aristotélicien se soit senti étonné et égaré par ce stupéfiant effort pour expliquer le réel par l'impossible – ou ce qui revient au même pour expliquer l'être réel par l'être mathématique. Le concept galiléen du mouvement (de même que celui de l'espace) nous paraît tellement naturel que nous croyons même que la loi d'inertie dérive de l'expérience et de l'observation, bien que, de toute évidence, personne n'a jamais pu observer un mouvement d'inertie pour cette simple raison qu'un tel mouvement est entièrement et absolument impossible. [...]. Nous ne sommes plus conscients du caractère paradoxal de sa décision de traiter la mécanique comme une branche des mathématiques, c'est-à-dire de substituer au monde réel de l'expérience quotidienne un monde géométrique hypostasié et d'expliquer le réel par l'impossible »³. Les véritables lois physiques contredisent en effet l'observation aussi bien que l'intuition, de sorte qu'elles semblent souvent absurdes au premier abord, voire manifestement fausses. Pour les saisir, il ne faut donc pas se fier à l'observation directe, en tout cas pas seulement à elle, mais mettre sur pied une méthode permettant de les découvrir au sens propre du terme, inventer un moyen de trouer l'écran du sensible pour faire apparaître le plan intelligible qu'il recouvre.

Au fin fond de la physique, on trouve donc l'idée, sans doute assez platonicienne, qu'il existe deux mondes : un premier monde fait de concepts, de lois mathématiques, dont l'agencement permet de comprendre les phénomènes physiques qui se déroulent dans le second monde, qui est le monde empirique. Parfois, les lois physiques semblent dire le contraire de ce que nous observons. Voyez la chute des corps : les corps lourds tombent à l'évidence plus vite que les corps légers, et pourtant la loi de la chute des corps découverte par Galilée énonce que tous les corps tombent de la même façon... Comment comprendre que Galilée puisse avoir raison contre les faits ? En changeant leur lecture : la gravité fait chuter tous les corps de la même façon, indépendante de leur masse, mais s'ajoute à elle des effets liés à la résistance de l'air qui, elle, n'agit pas de la même façon sur les corps

lourds que sur les corps légers, ce qui explique pourquoi nous ne voyons pas les boules de pétanque tomber comme les balles de tennis. La compréhension de la chute des corps en est toute renversée.

Il faut donc être prudent et d'emblée considérer que s'interroger à propos de la nature de la masse, c'est peut-être poser une question moins stupide qu'elle en a l'air. Elle pourrait en effet, elle aussi, nous conduire à des renversements. On nous rétorquera que la masse est une propriété évidente des objets, une notion triviale, dépourvue de mystère, une simple quantité à la fois mesurable – elle s'exprime en kilogrammes – et « mesurante » – elle quantifie la matière contenue dans un corps, sa « substantialité ». Que faudrait-il ajouter ? L'alpha et l'oméga de la masse ne sont-ils pas dès lors formulés ?

À cette dernière question, la réponse de la physique contemporaine est heureusement négative. D'une part, parce que cette façon de présenter les choses est en réalité imprécise : à l'examen, la notion de masse apparaît très subtile. D'autre part, parce qu'elle ne prend pas en compte les travaux menés par certains argonautes de l'esprit, qui pourraient bientôt bouleverser notre compréhension de ce qu'est la masse. Car comme nous allons le voir, au lieu d'être une propriété des particules élémentaires, une caractéristique qu'elles porteraient en elles-mêmes, la masse pourrait apparaître comme n'étant qu'une propriété secondaire et indirecte des particules, résultant de leur interaction avec... le vide ! En somme, les particules pourraient n'avoir pas de masse proprement dite, seulement « faire comme si » elles en avaient une... Cela ne déplacerait-il pas singulièrement la question de l'origine de la masse, nous obligeant à repenser le concept même de masse ?

Si cette affaire mérite un petit détour, c'est parce qu'elle illustre ce que la physique a de vraiment passionnant : elle ne cesse de revisiter ses concepts fondamentaux, les fait virevolter sur le dos agité du réel en tentant de les y maintenir le plus longtemps possible, jusqu'à ce qu'elle doive en modifier l'interprétation, au prix d'éventuelles déchirures au sein de son propre corpus. Un tel scénario est justement en train de se dessiner à propos d'une des plus vieilles notions de la physique.

Mais pour comprendre de quoi il retourne, il faut d'abord se remettre les idées bien en place, en commençant – c'est le mieux – par le commencement.

Newton d'abord

C'est Isaac Newton qui, le premier, introduit le concept de masse au sens moderne du mot, en commençant par faire une distinction nette entre poids et masse, deux notions que le langage commun confond encore trop souvent : le poids est une force, la force gravitationnelle qui résulte de ce

que chaque atome de notre corps est attiré par chacun des atomes de la terre (à tout seigneur tout honneur, l'intensité de cette force s'exprime en une unité de mesure appelée le « newton », et non pas en « kilos » comme nous avons pris l'habitude de le croire) ; la masse d'un corps, elle, est l'addition de toutes les masses de ses constituants et s'exprime en kilogrammes. Si un corps est transporté depuis la Terre jusque sur la Lune, sa masse ne changera pas, puisque ses constituants demeureront les mêmes, mais son poids sera diminué puisque la Lune, de moindre masse que la Terre, contient moins d'atomes exerçant une attraction sur ceux du corps.

La masse d'un corps apparaît comme une sorte d'étiquette qu'il porte et par laquelle il se signale au champ de gravitation présent dans ses parages qui, instantanément, agit sur lui en le soumettant à une force (qu'en général on appelle le poids). Mais chose paradoxale, la trajectoire d'un corps dans un champ de gravitation ne dépend pas de... sa masse ! Certes, c'est bien la masse d'un corps particulier qui le fait choir, mais, ainsi que nous venons de le rappeler, il choit de la même façon que tous les autres corps massifs. C'est ce qu'on appelle « l'universalité de la chute libre » : l'accélération de la pesanteur est la même pour tous les corps, quelque soit leur masse, leur composition, leur constitution. Pour être tout à fait précis, la masse dont nous parlons ici s'appelle la masse grave. C'est elle qui connecte le poids d'un corps à l'accélération qu'il subit quand il tombe. Mais Newton établit également qu'il existe une autre sorte de masse, la masse inertielle qui, elle, mesure la difficulté qu'il y a à mettre en mouvement un corps au repos ou à arrêter un corps en mouvement. A priori, les masses inertielle et grave devraient être deux choses ontologiquement différentes, la première exprimant la résistance d'un corps à toute modification de son mouvement, la seconde donnant la valeur de son poids dans un champ de pesanteur donné. Pourquoi devrait-il y avoir le moindre lien entre ces deux notions ? Pourtant, Newton note que si l'on choisit bien le système d'unités, leurs valeurs numériques deviennent rigoureusement égales. Il prend acte de ce résultat, mais ne parvient pas à en donner une interprétation satisfaisante. Cette égalité entre masse grave et masse inerte a des conséquences surprenantes : elle implique par exemple que si l'on remplaçait la Terre par une orange ou une théière, celles-ci décriraient exactement la même orbite que notre planète autour du Soleil...

E = mc² ensuite

Arrive l'inévitable Albert Einstein. De la même façon qu'Arnold Schoenberg bouleverse des formes musicales qui paraissaient immuables, le père de la théorie de la relativité modifie le statut des formes de l'espace et du temps, et leurs relations mutuelles. Cette avancée va bouleverser, de plusieurs façons différentes, le concept de masse, qui était jusqu'alors

confortablement installé dans une posture théorique aussi limpide que sans histoires.

Quand un corps perd de l'énergie par rayonnement (pensons à un radiateur chaud), il émet de la lumière (en l'occurrence infrarouge) qui n'a pas de masse. Or, ainsi que nous l'avons appris à l'école, la masse se conserve. Cela implique que, dès lors qu'un corps émet des particules sans masse, il ne perd pas lui-même de masse, seulement de l'énergie. Mais Einstein montre que ce raisonnement est en réalité faux : même s'il émet des particules qui n'ont pas de masse, un corps perd de la masse du fait même qu'il perd de l'énergie. En d'autres termes, un corps peut se retrouver avec moins de masse sans en avoir perdu... C'est l'une des plus étonnantes conséquences de la formule $E = mc^2$. La masse n'apparaît plus comme la mesure de la quantité de matière contenue dans un corps, mais comme celle de la quantité d'énergie. Dès lors, perdre de l'énergie, c'est *ipso facto* perdre de la masse.

Tout corps massif, même immobile, se voit ainsi doté d'une « énergie de masse », c'est-à-dire d'une énergie qu'il doit au seul fait d'avoir une masse. Mais cette énergie contenue dans la masse des corps nous est en général cachée.

Dans certaines situations, c'est l'énergie qui se transforme en masse (plus exactement en inertie), et non plus l'inverse. Un exemple devrait suffire. Il est emprunté à la cinématique, plus exactement au lien qui existe entre vitesse et énergie cinétique. Lorsque nous circulons en voiture ou même voyageons en avion, l'énergie cinétique du véhicule qui nous transporte croît comme le carré de sa vitesse. L'accélérer, c'est donc augmenter à la fois sa vitesse et son énergie cinétique. Mais dans le contexte de la relativité restreinte, qui envisage des déplacements beaucoup plus rapides que ceux qui sont à notre portée, une certaine vitesse apparaît comme indépassable pour une particule qu'on tente d'accélérer. Cette vitesse, c'est la vitesse de la lumière dans le vide. Cette limitation provient de ce que, au fur et à mesure que sa vitesse et son énergie augmentent, la particule oppose à toute modification de son mouvement une inertie de plus en plus grande (précisément égale à E/c^2 , et non plus à sa masse comme en physique newtonienne). Autrement dit, elle résiste de plus en plus à tout effort fait pour l'accélérer : plus elle va vite, plus il est difficile de la faire aller encore plus vite, jusqu'au moment où elle atteint la vitesse maximale. Dans cette situation, on peut toujours lui conférer de l'énergie cinétique, mais sans modifier notablement sa vitesse. À l'instar de sa pomme, Newton serait sans doute tombé (de sa chaise) si on lui avait raconté pareille histoire.

Le boson de Higgs ou l'argument massue

Mais venons-en maintenant aux particules élémentaires. Nous avons déjà évoqué le modèle standard de la physique des particules qui permet de décrire trois des quatre forces fondamentales grâce à des principes mathématiques semblables. Même si sa consistance et sa robustesse sont aujourd'hui bien établies, des problèmes d'ordre conceptuel apparaissent dans ce modèle lorsqu'il s'agit d'affronter des conditions physiques plus extrêmes que celles qui ont été explorées expérimentalement jusqu'à ce jour. De plus, certaines questions cruciales le concernant attendent des réponses précises. L'une des plus intrigantes concerne justement la masse : d'où vient que les particules possèdent une masse ?

Les étudiants posent souvent la question de savoir comment des particules sans masse, tel le photon, peuvent exister. Les physiciens, quant à eux, se posent la question inverse : comment des particules ont-elles pu acquérir de la masse ? Plus précisément, ils essaient aujourd'hui de comprendre l'origine de la masse des particules en étudiant la manière dont celles-ci se propagent dans le vide quantique. L'idée qu'ils explorent consiste à considérer que la masse des particules ne serait pas une propriété intrinsèque des particules elles-mêmes : elle serait liée à la manière dont celles-ci interagissent avec la structure du vide. Pour traiter les interactions, le modèle standard s'appuie sur un certain nombre de principes de symétrie très efficaces du point de vue des prédictions qu'ils permettent de faire. Mais ils posent aussi un problème irritant. Ils impliquent en effet que les particules d'interaction⁴ doivent avoir... une masse nulle, c'est-à-dire n'opposer aucune résistance au mouvement ! C'est effectivement le cas du photon, le médiateur de l'interaction électromagnétique, mais pas du tout celui des particules qui médient l'interaction nucléaire faible et qu'on appelle les W^+ , W^- et Z^0 : leur masse, dûment mesurée, est très élevée. Elle vaut même près de cent fois la masse d'un proton. Cette contradiction flagrante entre la théorie et l'expérience aurait pu être rédhibitoire pour la théorie. Comment encore croire en une théorie dont les implications sont à l'évidence contredites par l'expérience ? Ne mérite-t-elle pas qu'on la jette immédiatement aux oubliettes ? Mais c'est précisément au moment où pareille tentation surgit en notre esprit qu'il faut se souvenir de la leçon que Galilée nous a offerte : une loi physique peut être exacte tout en énonçant le contraire de ce que nous observons ou mesurons. « Expliquer le réel par l'impossible »... Et, en réalité, la contradiction entre les prédictions du modèle standard, qui indiquent que les particules ne sauraient être massives, et le fait que les particules sont effectivement massives a pu être résolue au sein même du modèle standard, dans les années 1960. La solution, qui n'est encore que théorique, a été proposée par trois physiciens qu'on peut considérer comme de dignes héritiers du découvreur de la loi de

la chute des corps : d'abord par deux belges, François Englert et Robert Brout, puis, de façon indépendante, par un écossais, Peter Higgs. Leur idée est que les particules élémentaires de l'univers sont en réalité sans masse, mais heurtent sans cesse des « bosons de Higgs », présents dans tout l'espace, ce qui ralentit leurs mouvements de la même façon que si elles avaient une masse. Dans ce contexte, dire d'une particule qu'elle est très massive revient à dire qu'elle interagit très fortement avec le boson de Higgs, subit sans cesse des collisions tel un homme pressé qui traverse une foule compacte, ce qui lui confère une inertie apparente. Bien sûr, les particules qui, tel le photon, n'interagissent pas avec le boson de Higgs ne possèdent aucune masse.

On devine qu'un étonnant raccourci relie la démarche de Galilée à celle de nos trois physiciens : le premier expliquait que c'est parce que les corps qui chutent ne tombent pas dans le vide mais interagissent avec l'air ambiant que nous les voyons pas tous choir avec la même vitesse ; les seconds racontent que c'est parce que les particules, qui sont toutes de masse nulle, interagissent plus ou moins fortement avec le vide qu'elles nous semblent avoir des masses différentes. Dans les deux cas, on explique que c'est à cause d'interactions qu'ont les objets avec leur environnement que nous leur attribuons des propriétés qu'en réalité ils ne possèdent pas, ou des comportements qu'ils n'auraient pas si cet environnement n'existait pas.

Cette idée constitue une solution satisfaisante et est en parfaite adéquation avec les théories et les phénomènes établis. Le problème est que personne n'a jamais observé le boson de Higgs lors d'une expérience pour confirmer cette théorie. Existe-t-il vraiment ? Le principal danger qui guette les théoriciens est, on le sait, de voir des fées au fond du jardin. Dès lors, comment détecter le boson de Higgs ? La difficulté principale vient de ce que cette particule responsable de la masse des particules semble être elle-même très... massive ! Pour espérer la détecter, il faut donc atteindre des niveaux d'énergie très élevés.

Grâce au LHC, le *Large Hadron Collider* installé au CERN à Genève, les physiciens peuvent désormais explorer toute la gamme de masses dans laquelle le boson de Higgs est censé se trouver. Les collisions de protons à très haute énergie qui se produisent dans la machine recréent, de façon très localisée et très fugitive, les conditions physiques qui furent celles de l'univers primordial. Grâce à ces chocs très violents et aux interactions entre particules qu'ils engendreront, les physiciens peuvent, entre autres choses, partir à la chasse du boson de Higgs. Si cette particule existe, le LHC finira par en apporter la preuve et l'on pourra alors dire que nous avons compris l'origine de la masse des particules. Mais si ce boson s'avère introuvable, les physiciens auront le champ vraiment libre pour élaborer

une théorie complètement nouvelle, par exemple en proposant qu'existent des dimensions supplémentaires d'espace, ou bien une nouvelle force, ou bien encore en faisant l'hypothèse que le boson de Higgs serait une particule non pas élémentaire mais composite.

La mesure de la masse n'est donc pas encore dite, mais grâce au LHC, on ne devrait pas trop tarder à pouvoir la célébrer, surtout si les idées de Peter Higgs et de ses collègues sont les bonnes. Si tout se passe bien, nous pourrions bientôt affirmer que nous avons compris d'où vient que les particules ont une masse : l'origine de leur masse ne leur appartient pas en propre ; elle vient de ce que, dans l'univers primordial, le vide a soudainement changé ; il s'est rempli avec un champ, le « champ de Higgs » - une sorte de glue partout présente - qui, couplé aux particules, leur donne de l'inertie, c'est-à-dire de la masse.

Notes :

¹ Proposée dans les années 1970, la supersymétrie permet de « desserrer » le modèle standard de la physique des particules et lui donne un jeu suffisant pour, peut-être, commencer à le rendre compatible avec la gravitation. Elle était à l'origine une structure mathématique associant des particules ayant des spins différents. Plus précisément, elle mettait en correspondance les bosons, de spins entiers, aux fermions, de spins demi-entiers, et ce alors même que leurs comportements statistiques sont par essence très différents. Mais on découvrit vite que les choses ne pouvaient pas être aussi simples. On a donc imaginé par la suite que chaque particule connue a sa propre image par la supersymétrie, mais que celle-ci nous serait inconnue. La supersymétrie impliquerait en somme l'existence, pour toutes les particules connues, d'hypothétiques superpartenaires, aussi appelées « sparticules », dont les spins diffèrent de ceux des particules ordinaires d'une demi-unité : le photon serait ainsi associé au « photino », l'électron au « sélectron », les quarks aux « squarks », et ainsi de suite. Cette opération a évidemment pour effet immédiat de doubler l'effectif total des particules élémentaires.

La plupart des sparticules doivent se désintégrer au bout d'un temps extrêmement court. Seule la plus légère doit rester stable : on l'appelle le « neutralino ».

² Et sans compter que l'énergie du vide quantique, qui ressemble bel et bien à l'énergie noire, semble être toutefois 10120 fois trop forte par rapport à ce qu'indiquent les observations... L'explication de cet écart gigantesque constitue sans doute l'un des plus grands défis de la physique théorique contemporaine.

³ Alexandre Koyré, *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, Paris, PUF, 1966, p. 166.

⁴ Pour qu'il y ait interaction entre deux particules, il faut que « quelque chose » soit échangé entre elles, quelque chose de substantiel. Ce « quelque chose » est un quantum, c'est-à-dire une particule caractéristique du champ associé à l'interaction. En d'autres termes, une interaction ne s'exerce entre deux particules que par l'échange d'une troisième. La particule qui transporte l'interaction s'appelle, en termes savants, le « boson de jauge » de l'interaction. Il s'agit du photon pour l'interaction électromagnétique, des « bosons intermédiaires » pour l'interaction nucléaire faible, et des gluons pour l'interaction nucléaire forte.

Bibliographie

- Sébastien Balibar, Edouard Brézin (dir.), *Demain, la physique*, coll. « Sciences », Paris, Odile Jacob, 2009.
- Francis Bernardau, *Cosmologie – Des fondements théoriques aux observations*, Paris, EDP-Sciences, 2007.
- Martin Bojowald, *L'univers en rebond, Avant le Big Bang*, traduit de l'allemand par Jean-Paul Hermann, Bibliothèque Sciences, Paris, Albin Michel, 2010.
- Alain Bouquet, Emmanuel Monnier, *Matière sombre et énergie noire*, Paris, Dunod, 2008.
- Michel Cassé, *Énergie noire, Matière noire*, coll. « Sciences », Paris, Odile Jacob, 2002.
- Etienne Klein, *Discours sur l'origine de l'univers*, Paris, Flammarion, 2010.
- Alexandre Koyré, *Études galiléennes* [1936], Paris, Hermann, 1986.
- Alexandre Koyré, *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris, PUF, 1966.
- Roland Lehoucq, *L'univers a-t-il une forme ?*, Paris, Flammarion, 2004.
- Jean-Pierre Luminet, *Le destin de l'univers, trous noirs et énergie sombre*, coll. « Le temps des sciences », Fayard, Paris, 2006.
- Daniel Parrochia, Aurélien Barrau (dir.), *Forme et origine de l'univers*, Paris, Dunod, 2010.
- Patrick Peter, Jean Philippe Uzan, *Cosmologie primordiale*, Paris, Belin, 2005.