



La musique des sphères

Marc Lachièze-Rey - est directeur de recherches, au CNRS, au Service d'astrophysique du Centre d'études de Saclay.

Jean-Pierre Luminet - Directeur de recherches au CNRS, à l'Observatoire de Meudon.

Des Pythagoriciens à la physique moderne, les démarches intellectuelles qui cherchent à appréhender le monde utilisent la notion d'harmonie.

En physique, l'une des plus intéressantes théories d'unification des interactions tente de décrire les particules non pas comme des corpuscules ponctuels, mais comme des vibrations de minuscules «cordes», entités géométriques à une dimension. Ce type de modélisation, fondé sur des symétries mathématiques particulières, constitue l'un des derniers développements d'une tradition qui remonte aux Pythagoriciens. Pour ces derniers en effet, l'Univers devait nécessairement se manifester par des proportions «justes», par des rythmes, par des nombres : le monde chantait et vibrait harmonieusement! Dès le VI^{ème} siècle avant notre ère, ils avaient remarqué que les intervalles musicaux tels que l'octave, la quinte, la tierce, etc., s'obtiennent en faisant vibrer des cordes dont les longueurs sont des fractions entières de la longueur qui engendre la note fondamentale, comme 1/2, 2/3, 3/4, etc. Considérant le cosmos dans son ensemble comme un système harmonieux, ils en avaient déduit que les sept notes naturelles de la gamme étaient en correspondance avec les sept corps célestes connus (le Soleil, la Lune et les cinq planètes visibles), auxquels s'ajoutaient trois sphères supplémentaires pour atteindre le nombre dix, parfait entre tous (car c'est notamment la somme des quatre premiers entiers). Un peu plus tard, au IV^{ème} siècle, Platon décrit, dans l'Épinomis, cette harmonie céleste, en déclarant notamment que les astres exécutent «le plus magnifique de tous les chœurs». Cicéron évoque dans le Songe de Scipion ce son «si intense et si agréable» qui remplit les oreilles de son héros : «l'impulsion et le mouvement de ces orbes [célestes] sont réglés selon certains intervalles inégaux, obéissant à des rapports de proportion très exacts. Les plus aigus sont tempérés par les plus graves, et leur équilibre donne différentes harmonies.» Cette tradition, assimilant le cosmos à un instrument de musique, se perpétue pendant le Moyen Âge et jusqu'à la renaissance scientifique. Au XVII^{ème} siècle, le jésuite encyclopédiste Athanasius Kircher évoque, dans l'Oeuvre universelle des muses (Musurgia universalis), «la grande musique du monde, cette merveilleuse correspondance des cieux, des éléments et des créatures» (voir la figure 4), tandis que le médecin londonien Robert Fludd décrit, dans Des deux mondes (Utriusque Cosmi), l'Univers comme un luth monocorde conçu par Dieu, dont les dix registres (les dix sphères célestes pythagoriciennes) traduisent l'harmonie de la Création. Pour le Français Marin Mersenne, tout ce qui s'exprime par des proportions peut être traité en termes d'harmonie et donc, en particulier, la disposition des orbes célestes. À la même époque, l'astronome allemand Johannes Kepler reprend l'idée qu'un astre émet un son d'autant plus aigu que son mouvement est rapide, et l'adapte à sa découverte de la nature elliptique des orbites planétaires : des intervalles musicaux bien définis sont associés aux planètes (voir la figure 3). Kepler voit dans cet enrichissement de la symphonie céleste la confirmation de sa découverte : la «beauté harmonique» du monde, qui selon lui émane d'une volonté divine explicite et s'adresse directement à notre âme. Près d'un siècle plus tard, l'oeuvre d'Isaac Newton englobe deux visions du monde apparemment antagonistes : d'une part une conception mécaniste (le monde s'explique comme une grande horloge réglée par des lois universelles) ; d'autre part, l'idée que la nature reste soumise à une harmonie d'ordre supérieur - d'où son intérêt profond pour l'alchimie, la théologie, voire l'astrologie. En réalité, les immenses succès de sa mécanique (prédiction du retour des comètes périodiques, découverte de la planète Neptune par le calcul) seront en partie dus à la mise en oeuvre de nouvelles et puissantes constructions mathématiques, dont l'accord avec le monde observable exprime l'harmonie de ce dernier. Newton accomplit ainsi le rêve de Kepler : «Cet arrangement aussi extraordinaire du Soleil, des planètes et des comètes n'a pu avoir pour source que le dessein et la Seigneurie d'un être intelligent et puissant» (Principes de la Philosophie Naturelle, 1687) L'harmonie dans la physique moderne Après Newton, l'harmonie sera toujours invoquée par les physiciens pour décrire et pour comprendre le monde, mais sous des formes nouvelles. «Quand, à une certaine occasion, j'ai demandé au professeur Einstein comment il avait trouvé la théorie de la relativité, il me répondit qu'il l'avait trouvée parce qu'il était tout à fait convaincu de l'harmonie de

l'Univers» rapporte l'épistémologue Hans Reichenbach. Métaphysique, philosophie, religion, ésotérisme, références musicales et artistiques disparaissent du discours explicite de la science. Physique et astrophysique parlent pourtant de spectres, de fréquences, de résonances, de vibrations, d'analyse harmonique. Grâce à cette dernière notamment, n'importe quel signal variable dans le temps peut se décrire par une composition de fonctions trigonométriques. Cette harmonie est exprimée sous une forme mathématique, plus souvent géométrique que musicale conformément au programme que Galilée propose dès 1623 dans *II Saggiatore* (L'Essayeur). «Or [l'Univers] est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont les triangles, les cercles et autres figures géométriques, sans lesquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot, sans lesquels on erre vraiment en un labyrinthe obscur». La physique post-newtonienne oscille en fait entre une conception purement mécaniste et une vision plus harmonique. Cette hésitation rappelle un antagonisme évoqué par Héraclite, selon lequel l'harmonie émise par la lyre résultait d'une lutte entre la tension des cordes et le bois. La vision harmonique possède à son actif quelques-unes des synthèses fondatrices de la physique : après les tentatives géométriques et musicales de Kepler, il y eut la formule empirique de Titius-Bode, établie à la fin du XVIII^{ème} siècle, qui décrivait la distance des planètes au Soleil par une suite harmonique : la Terre est à $0,4 + 0,3 \times 2^1$, soit une unité astronomique du Soleil, Mars en est à $0,4 + 0,3 \times 2^2$ unités astronomiques, etc. Autre exemple, au XIX^{ème} siècle, la classification des raies spectrales de l'atome d'hydrogène en fonction de ses fréquences vibratoires fut initialement proposée par le Suisse Johan Balmer, puis reprise par le Suédois Johannes Rydberg. Ils découvrirent que les fréquences des raies d'émissions (qui résultent d'une désexcitation de l'atome) s'expriment par une formule unique qui faisait intervenir des nombres entiers, à la manière des intervalles musicaux. Aujourd'hui, cette «harmonie» spectrale s'explique bien dans le cadre de la mécanique quantique : les niveaux d'énergie des électrons d'un atome étant discrets et non continus, ils peuvent être mis en correspondance avec des nombres entiers. L'harmonie secrète du monde prend aujourd'hui le nom de symétrie. La physique contemporaine utilise en effet les symétries de la géométrie moderne, c'est-à-dire l'invariance de certaines figures ou objets mathématiques par des transformations mathématiques (des groupes de symétries), pour décrire, classifier, unifier les particules élémentaires et leurs interactions, ainsi que les modèles d'Univers dans son ensemble. Platon ou Kepler ne faisaient rien d'autre. La théorie des groupes, l'outil mathématique moderne qui permet d'exprimer les symétries, a seulement élargi la palette des symétries utilisables : au lieu d'utiliser les symétries simples de la sphère ou des polyèdres réguliers (invariance par des rotations continues ou discontinues), les physiciens utilisent des symétries plus complexes (groupe d'invariance de matrices, groupes cristallographiques, etc.), mais qui ouvrent de nouvelles perspectives. C'est avec ces groupes que sont décrits les comportements des particules, que sont développées la théorie quantique des champs, les théories de jauge ou la théorie des supercordes. Le chant quantique Une longue controverse, prolongée jusqu'au début de notre siècle, a opposé les visions corpusculaire et ondulatoire de la lumière. Selon Newton, les rayons lumineux étaient constitués de petits grains de lumière, mais cette conception ne pouvait rendre compte des phénomènes d'interférences ni de diffraction. Dans l'expérience de Young, par exemple, un pinceau de lumière traverse deux trous situés devant un écran. Or, sur l'écran, n'apparaissent pas des impacts de corpuscules, mais une alternance de zones sombres et de zones claires ; ces «franges d'interférences» résultent de la composition de l'onde lumineuse avec elle-même, tantôt s'annulant (zones sombres), tantôt se renforçant (zones claires). L'hypothèse ondulatoire, quant à elle, est incompatible avec l'effet photoélectrique : des électrons peuvent être arrachés à un métal soumis à une irradiation lumineuse. Pour expliquer cet effet, Einstein avait supposé en 1905 que la lumière est constituée d'un ensemble de corpuscules, les photons. Le corpuscule, objet quasi-ponctuel précisément localisable, et l'onde, structure délocalisée, «étalée» dans tout l'espace, sont apparemment antagonistes. La nature vibratoire des ondes lumineuses, l'analogie avec les ondes sonores qui en constituent le modèle, leur confère explicitement une connotation harmonique, insistant notamment sur ce qui réunit les objets physiques, tandis que la vision purement corpusculaire considère le monde comme un assemblage de particules individuelles. Chacune de ces conceptions - mécaniste et particulière d'un côté, harmonique et ondulatoire de l'autre -, est insuffisante si elle est prise séparément. La révolution de la physique quantique a consisté à résoudre la contradiction, en introduisant une vision «dualiste» : ni particulière, ni ondulatoire dans le sens classique, le «champ quantique» incarne une synthèse des aspects mécaniste et harmonique. Non seulement la lumière, mais aussi la matière, sont des champs quantiques. Un champ quantique remplit l'espace entier, comme une immense membrane prête à vibrer. Ses vibrations (analogues à celles d'un tambour qui émet des sons) se manifestent, selon leur nature, sous forme de lumière, ou sous forme de particules : matière, lumière, rayonnements, toute la réalité observable du monde n'est qu'excitation de champs quantiques. Certains modes de vibration du champ électromagnétique correspondent à la lumière ordinaire, d'autres aux ondes radio, aux rayons X, etc. D'autres champs matérialisent des quarks (les constituants élémentaires du neutron et du proton) et des électrons. Tous ces champs constituent le monde. Les lois de la physique quantique ne sont autres que les règles harmoniques qui

gouvernent les vibrations des champs. Cordes vibrantes Malgré son expression en termes de champs, la physique quantique est encore sous-tendue par une représentation de certaines particules élémentaires, comme l'électron ou le photon, en termes de points de dimension nulle. Cela pose plusieurs problèmes conceptuels. Par exemple, des infiniment grands apparaissent dans les calculs lorsque des infiniment petits, dus aux dimensions nulles des particules, se retrouvent au dénominateur. Ces «singularités» sont indésirables, car, en physique, toute quantité mesurable doit être finie. La présence de telles singularités était déjà gênante en physique classique. De surcroît, en physique quantique, l'idée de particule de dimension nulle s'accorde mal avec les relations d'incertitude - selon lesquelles il est impossible, par exemple, de localiser en un point infiniment précis la position d'une particule. Mais surtout, comment attribuer à une particule sans dimension les degrés de liberté correspondant aux différents nombres quantiques, tels que la charge électrique, le spin (ou moment cinétique élémentaire)? La théorie des cordes résout en partie ces difficultés en identifiant les entités élémentaires - les particules - à des lignes ou à des boucles extrêmement petites, et non à des points. Toutes les propriétés des particules résultent alors des différents modes de vibrations de ces cordes ouvertes ou fermées. Introduit dans les années 1960, le concept de corde fut abandonné, puis réintroduit 20 ans plus tard en vue d'une unification des lois de la physique : certains physiciens espèrent aujourd'hui que cette théorie rendra compte des quatre interactions fondamentales connues - la gravitation, l'électromagnétisme, les interactions nucléaires forte et faible - en termes d'une «superinteraction» unique. Enrichie d'une symétrie supplémentaire, la «supersymétrie» (selon laquelle toute particule de spin entier a un partenaire supersymétrique de spin demi-entier), la théorie des cordes a été renommée «théorie des supercordes». Toutefois, les physiciens ne peuvent la formuler de façon cohérente que dans un espace muni d'un grand nombre de dimensions. Le monde serait ainsi fait d'entités à une dimension (les cordes) vibrant dans un espace à n dimensions ($n = 10$ ou 26 , selon les modèles) (voir la figure 4). Premier problème, comment retrouver les trois dimensions usuelles de l'espace (les supercordes ne prévoient pas de dimension supplémentaire du genre «temps»)? Le plus simple est de considérer que les dimensions supplémentaires sont fortement enroulées sur elles-mêmes, selon un rayon de courbure infime. À notre échelle de résolution, l'espace semblerait posséder trois dimensions, pour les mêmes raisons qu'une ficelle, objet à trois dimensions, semble ne posséder qu'une dimension lorsqu'elle est vue de loin, du fait de sa faible épaisseur. Ce n'est qu'à des échelles microscopiques (de l'ordre de 10^{-35} mètre, la longueur de Planck) que les dimensions supplémentaires de l'espace seraient manifestes. Ces théories, mathématiquement si complexes que personne ne parvient aujourd'hui à les maîtriser vraiment, ont de nombreux aspects séduisants. En particulier, la gravitation, qui paraît si différente des autres interactions (elle n'est pas quantifiable au sens habituel du terme) y est décrite de manière naturelle. Si ces théories se révèlent pertinentes, il restera à interpréter la nature intime du monde, dont les propriétés résulteraient des modes vibratoires de cordes à jamais inaccessibles à nos sens. On retrouve ainsi, par un biais inattendu, la musique secrète des Pythagoriciens, qui n'est perceptible qu'aux «oreilles» adaptées à leur écoute. Dans le Songe de Scipion, Cicéron disait que la musique des astres ne pouvait s'entendre qu'en quittant la Terre pour rejoindre les orbites gigantesques du ciel. La théorie des supercordes nous suggère que la musique des particules microscopiques ne pourrait s'appréhender qu'en plongeant au cœur de l'infiniment petit.

[haut de la page](#)[fermez cette fenêtre](#) 