

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 *Il 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^e 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^e 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'inva-

riance 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.



Scivias Codex, Illuminatus, Monastère de Rudesheim

2. Dans ses *Divines harmonies*, Hildegarde de Bingen (1098-1179), abbesse du monastère des Bénédictines de Rudesheim, décrit sa musique comme un moyen de saisir la joie et la beauté originelle du paradis. Cette miniature extraite du *Scivias* (*Connaît le chemin*) illustre la conception de la mystique rhénane, selon laquelle l'homme est, dès sa naissance, en accord symphonique avec le ciel.



3. Dans *Harmonices Mundi*, œuvre majeure de Kepler, l'astronome expose sa troisième loi selon laquelle les carrés des temps des révolutions sidérales sont proportionnels aux cubes des grands axes de leurs orbites. Kepler associe à chaque planète non plus une seule note, comme c'était le cas avec des orbites circulaires, mais plusieurs notes, déterminées par la variation de la vitesse sur l'orbite elliptique. Pour mieux se convaincre de sa trouvaille, Kepler note que «La Terre chante mi, fa, mi afin que tu conjectures, à partir des syllabes, que la misère et la famine prévalent dans notre domicile».

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

4. Le médecin alchimiste Robert Fludd (1619) décrit l'Univers comme un instrument de musique à une corde dont les modes vibratoires représentent les astres. La corde cosmique embrasse deux octaves de sept notes chacune. Les deux octaves s'étendent du sol grave (Γ) associé à la Terre, jusqu'à un sol aigu associé à l'Empyrée (la demeure des dieux) (gg), en passant par le sol médian associé au Soleil (G).

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.

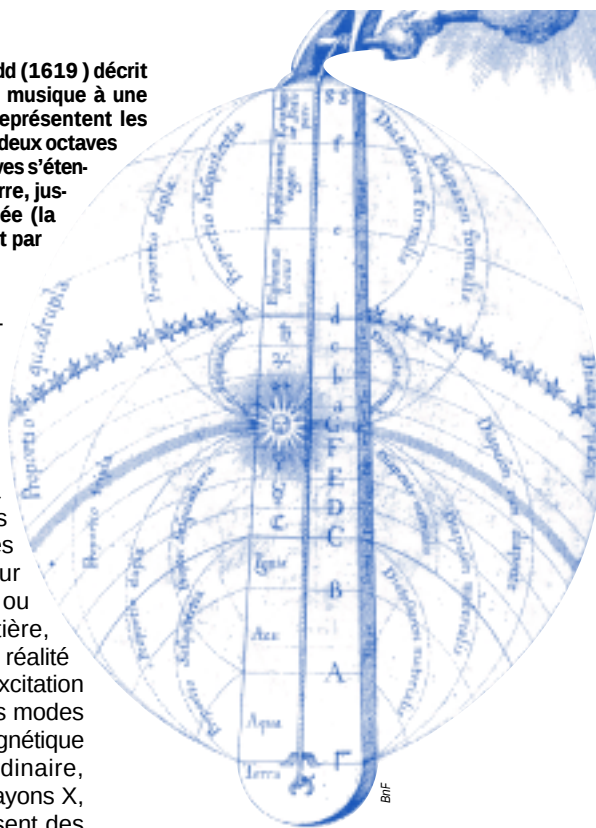
CORDES VIBRANTES

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



4. Certains théoriciens ont imaginé que les éléments constitutifs du monde pourraient être des cordes de diamètre infime et non des particules ponctuelles (sans dimension). Les interactions entre cordes seraient les fondements de la physique microscopique.