Les symétries au fondement de la physique moderne

Rédigé par: Jordan François, chercheur au service *Physique de l'Univers, Champs et Gravitation* du département de Physique Théorique de l'UMONS, bénéficiaire d'une bourse postdoctorale de l'Institut Complexys.

S'il était demandé aux lecteurs assidus de vulgarisation scientifique quelle est l'idée essentielle qui caractérise les progrès de la physique fondamentale au XXème siècle, il est vraisemblable qu'en tête du sondage seraient mentionnées des notions clés des théories de relativité (la constance de la vitesse de la lumière, la relativité de l'espace et du temps, l'équivalence entre masse et énergie...) ou de la théorie quantique (les inégalités d'Heisenberg, la quantification de l'énergie, le caractère probabiliste des processus atomiques et subatomiques...) Et pourtant si le même sondage était mené au sein de la communauté des physiciens théoriciens, je suis raisonnablement confiant que la première place reviendrait de loin à la notion de *principe de symétrie*.

Une symétrie est une transformation opérée sur objet laissant les propriétés caractéristiques de cet objet inchangées, invariantes. Prenons la boule blanche du billard. Toute rotation autour de son centre, d'angle et d'axe arbitraires, laisse l'apparence de la boule inchangée. Les rotations dans l'espace tridimensionnel constituent les symétries de la boule.

Les symétries jouent divers rôles en physique. Un rôle pratique pour commencer. Un physicien disposant d'une théorie générale souhaitera l'appliquer à la description de systèmes particuliers. Si un tel système possède des symétries, celles-ci pourront être mises à profit pour simplifier les équations de la théorie et faciliter la description dudit système. Ainsi, disposant de la théorie de la gravitation de Newton, il est plus facile de déterminer le champ de gravitation de la terre qui est (presque) sphérique, que d'un astéroïde n'ayant aucune symétrie particulière. Un rôle classifiant ensuite. Un des grands succès du XIXème siècle a été la classification complète des types de cristaux en fonction de leurs symétries admissibles. Dans la première moitié du XXème siècle on a découvert que les symétries de l'espace-temps permettent de classifier les particules élémentaires qui le peuplent.

Pour le physicien théoricien, les entités physiques (plus ou moins) concrètes, leur comportement, et en dernier ressort les théories elles-même, sont décrits par des objets de nature mathématique, telles que des équations. Les propriétés caractéristiques de ces objets sont plus abstraites, ainsi donc que les transformations préservant ces propriétés. On pourra donc là encore parler des symétries d'une équation ou d'une théorie. Ainsi, le théorème d'Emmy Noether (1882-1935), l'un des plus beaux résultats de physique mathématique, énonce qu'à toute symétrie abstraite d'une théorie physique correspond une quantité physique conservée dans les processus que décrit cette théorie. Par exemple, la symétrie temporelle de la mécanique de Newton implique la conservation de l'énergie dans les processus mécaniques, et la symétrie dite de "transformation de phase globale" dans la théorie électromagnétique de Maxwell (couplée à la mécanique quantique) implique la conservation de la charge électrique dans les processus électromagnétiques.

Tout ceci eut suffit à garantir à la notion de symétrie une place de choix dans le paysage conceptuel des physiciens. Mais ce qui précède relève de ce qu'on nommera des *arguments de symétrie*: on dispose d'une théorie qui est appliquée à des systèmes symétriques, ou dont on exploite les symétries pour décrire des systèmes spécifiques. La vraie puissance conceptuelle des symétries, ce qui les place au panthéon des idées clés de la physique du XXème siècle, se révèle lorsqu'elles sont élevées au rang de *principe*.

Il s'agit là d'opérer un renversement de logique. Le théoricien à la recherche d'une nouvelle théorie va, pour se guider, postuler sur des bases physiques raisonnables des symétries que la théorie devra respecter par décret, *par principe*. Einstein (1879-1955) est celui qui a ouvert cette voie. Postulant les principes de relativité restreinte (1905) puis générale (1915), lesquels requièrent que les lois physiques obéissent à des symétries spécifiques, il pu découvrir les théories éponymes. La seconde, la théorie de la Relativité Générale, donne en prime la clé de la description d'une des quatre interactions fondamentales: la gravitation.

Notre compréhension des trois autres interactions fondamentales (électromagnétique, nucléaires faible et forte), lesquelles déterminent le comportement des particules élémentaires, repose elle aussi sur un principe de symétrie associé aux noms de H. Weyl (1885-1955), C. N. Yang (n. 1922) et R. Mills (1927-1999) : le *principe de jauge*. Il se trouve qu'imposer à une théorie décrivant des particules libres (sans interactions) des symétries abstraites dites *symétries de jauge locales*, engendre l'apparition des champs d'interactions fondamentales et prescrit même la façon dont ils se couplent aux particules élémentaires et médient leurs interactions. Une théorie ayant cette structure, i.e. munie de symétries de jauge, est tout simplement appelée *théorie de jauge*.

Partant par exemple d'une théorie d'électrons libres, imposer la symétrie de jauge nommée $U(1)$ (ou "transformation de phase locale") engendre l'apparition du champ électromagnétique et prescrit son couplage aux électrons et la façon dont ils interagissent. La théorie électromagnétique est donc une théorie de jauge. Il en va de même pour les deux interactions nucléaires qui proviennent respectivement des symétries de jauge nommées $SU(2)$ et $SU(3)$. Si bien que le couronnement de la physique des particules, le Modèle Standard achevé dans les années 70 et 80, qui décrit toutes les particules connues et leurs interactions via trois des interactions fondamentales, est une théorie de jauge basée sur les symétries $U(1)\times SU(2)\times SU(3)$. On réalisa par ailleurs que la Relativité Générale est également un théorie de jauge, basée sur la "symétrie de Lorentz locale", laquelle est pour ainsi dire responsable de l'apparition du champ de gravitation et de son couplage à la matière et l'énergie.

Ainsi les plus grands succès théoriques du siècle dernier, la compréhension de la nature de la gravitation, de l'espace-temps, des particules élémentaires et des forces les animant, reposent dans une large mesure sur la notion de symétrie de jauge. Cependant, il semble aujourd'hui clair que l'étendue de notre ignorance reste considérable. Nous savons que le Modèle Standard n'est pas un théorie complète et définitive. Sur le plan expérimental et observationnel, l'astrophysique et la cosmologie nous apprennent que la matière ordinaire, qu'il décrit si précisément, ne représente que 5% du contenu de l'Univers. Une matière inconnue et invisible, ne se manifestant que par l'influence gravitationnelle qu'elle exerce sur les étoiles au sein des galaxies et nommée très à propos "matière noire", serait cinq fois plus abondante. Une énergie diffuse de nature inconnue, dite "énergie sombre" et responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers constatée en 1998, constituerait les 70% restants. Sur le plan théorique, le Modèle Standard n'est pas non plus exempt de difficultés, au premier rang desquelles le fait qu'il contient nombre de paramètres dits "libres" (telles les masses des particules de matière) dont les valeurs restent sans explications, et le fait qu'il ne semble pas aisé à unifier à la Relativité Générale.

Toutes les tentatives visant à dépasser le Modèle Standard et/ou la Relativité Générale afin d'éclairer la part "sombre" de notre Univers et de notre compréhension théorique, toutes les théories fondamentales candidates proposées, sont des théories de jauge. Que l'on parle de théories des cordes ou de branes, de supersymétrie, de supergravité, de théories de spins élevés, de gravité quantique à boucles, de théories de grande unification... les symétries de jauge sont omniprésentes. Elles sont une composante essentielle du cadre conceptuel qui continue de structurer les efforts visant à repousser les frontières de notre connaissance.

Comme pour beaucoup de physiciens théoriciens, c'est dans donc dans ce cadre que mon travail s'inscrit. Au sein du service "Physique de l'Univers, Champs et Gravitation" de l'UMons dirigé par N. Boulanger, et en collaboration étroite avec ses membres, je cherche à mieux comprendre ces symétries cruciales. J'étudie d'une part leur structure mathématique et tente de la généraliser pour en étendre la portée, et je tâche d'autre part d'élucider leur statut épistémique et philosophique afin de saisir ce qu'elles nous disent sur la Nature. Ces questions sont aussi complexes que passionnantes.