

BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE ET UNITÉ DES LOIS DE LA NATURE

François Englert*

1. INTRODUCTION

La physique tente d'interpréter la diversité apparente des phénomènes observés en tant que manifestations particulières des lois générales. Ainsi, la chute d'un corps, le déroulement des marées, la révolution des planètes s'expliquent par la même loi de l'attraction universelle des masses, c'est-à-dire par l'existence d'une force proportionnelle au produit des masses en présence et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

Cette tentative d'intelligibilité du monde où tous les phénomènes seraient régis par des lois universelles quantitativement vérifiables est relativement récente : elle ne débute essentiellement qu'à la Renaissance. Elle obtint, du 17^e siècle à nos jours, un succès extraordinaire : tous les objets connus, du

* Laboratoire de physique théorique, Université Libre de Bruxelles.

niveau subnucléaire aux galaxies, paraissent obéir aux lois physiques connues. Cet état de la connaissance, sans précédent dans toute l'histoire de l'humanité, repose sur la notion de brisure spontanée de symétrie.

Les lois universelles mettent en jeu des particules dites « élémentaires », éléments constitutifs de la matière, et leurs interactions. Les interactions observées se répartissent en quatre classes : les interactions gravitationnelles qui décrivent l'attraction universelle des corps, les interactions électromagnétiques qui caractérisent les phénomènes électriques, magnétiques et lumineux, les interactions « fortes » qui assurent la cohésion des noyaux atomiques et les interactions « faibles » qui provoquent leur désintégration. Les deux premières se transmettent par des forces, dites forces à longue portée, qui agissent entre objets quelle que soit la distance qui les séparent ; elles se manifestent donc tant à notre échelle macroscopique qu'à l'échelle microscopique atomique, nucléaire et subnucléaire. Les deux dernières, au contraire, sont transmises par des forces, dites forces à courte portée, qui agissent uniquement entre objets séparés par des distances n'excédant pas la dimension des noyaux d'atomes. Au niveau macroscopique, les forces à longue portée, électromagnétiques et gravitationnelles, obéissent aux lois de Maxwell et de la relativité générale d'Einstein, établies sous leur forme actuelle durant les deux premières décennies du vingtième siècle. En revanche, en 1960, les forces à courte portée apparaissaient encore très différentes de celle qui se manifestent à notre échelle et leur analyse théorique soulevait des difficultés qui, à l'époque, paraissaient insurmontables.

En 1964, Brout et Englert et, peu après, Higgs, découvrent un mécanisme par lequel les forces à courte portée peuvent être engendrées à partir de forces à longue portée. Le mécanisme de Brout, Englert et Higgs (BEH), basé sur la notion de brisure spontanée de symétrie, a permis l'étude des forces à courte portée et l'unification dans un même schème théorique des deux types de forces.

Je vais maintenant tenter d'expliquer cette notion et ce mécanisme, et esquisser leurs implications en ce qui concerne la conception scientifique du monde.

2. PORTÉE ET MASSE

Les particules élémentaires, constituants de la matière macroscopique ordinaire au niveau microscopique, interagissent par l'intermédiaire de forces à courte et à longue portée.

Mais celles-ci peuvent à leur tour être interprétées comme un échange de particules qui interagissent localement avec les particules élémentaires qui les émettent. Pour apprécier ce fait, il faut faire appel à deux découvertes qui ont révolutionné la physique au début du vingtième siècle : la relativité restreinte et la mécanique quantique.

La relativité restreinte, découverte par Einstein en 1905, fixe une limite à toute propagation d'un effet causal. Cette limite est la vitesse de la lumière qui devient une constante universelle c . Par conséquent les forces fondamentales agissant sur les particules élémentaires ne peuvent se propager plus rapidement que la lumière. On dit qu'elles se propagent par ondes. D'autre part, la relativité restreinte apporte une distinction très stricte entre particules sans masse et particules massives. Celles-ci ont au repos une énergie E donné par la célèbre formule d'Einstein $E = m_0 c^2$, où m_0 est la masse de la particule au repos alors que les particules sans masse ne sont jamais au repos mais se déplacent toujours à la vitesse c .

La mécanique quantique est le cadre général de la physique contemporaine, achevé durant la troisième décennie de ce siècle. Ce cadre est nécessaire à l'application d'une théorie physique au niveau microscopique. Ainsi c'est la formulation de la théorie électromagnétique de Maxwell dans le cadre de la mécanique quantique, appliquée à l'échelle atomique, qui a rendu possible l'interprétation par la physique des phénomènes chimiques. La mécanique quantique associe à toute particule une onde et *vice versa*. Cette association implique que la localisation de la particule est limitée par l'extension spatiale de l'onde qui la porte. La délocalisation de la particule induit une indétermination sur son temps de parcours entre deux objets que nous dénoterons par le symbole Δt . Son énergie E peut également être entachée d'une indétermination ΔE et on démontre que la particule n'est détectable que si le produit des indéterminations sur le temps de

parcours et sur l'énergie est au moins égal à une constante universelle h dite constante de Planck. Cette relation exprime les célèbres incertitudes d'Heisenberg.

La force entre deux objets ne peut résulter de l'échange de particules que si les particules échangées ne sont pas détectables parce qu'une détection interromprait la transmission de la force. Les incertitudes d'Heisenberg doivent donc être violées, c'est-à-dire que le produit des indéterminations sur le temps de parcours et sur l'énergie de la particule ne peut excéder la constante de Planck. Cette borne reste valable pour le produit du temps de parcours t et de l'énergie E eux-mêmes puisque ces caractéristiques de la particule échangée ne peuvent être déterminées et doivent donc être inférieures à leurs indéterminations respectives. Comme la particule ne peut parcourir au maximum qu'une distance d égale au temps de parcours t multiplié par la vitesse c de la lumière, et que d'autre part la relativité restreinte implique pour toute particule massive une énergie E au moins égale à m_0c^2 , on voit que le produit de la distance d séparant les deux objets par la masse m_0 de la particule est également bornée par une constante universelle.

La portée de la force transmise par l'onde est mesurée par d . Les ondes transportant des particules massives (ou plus simplement ondes massives) transmettent donc une force dont la portée est d'autant plus petite que la masse m_0 de ces particules est grande puisque leur produit est borné, alors que la portée des forces transmises par des ondes sans masse n'est pas limitée. Les premières transmettent des forces à courte portée et les secondes des forces à longue portée.

Les ondes qui transmettent des forces par échange de particules peuvent aussi transporter des particules décelables. Leur énergie est alors mesurée par la fréquence de l'onde et celle-ci décroît lorsque la longueur d'onde augmente. Comme l'énergie d'une particule massive est au minimum égale m_0c^2 , les ondes massives auront donc une énergie finie à longueur d'onde infinie. Par contre les ondes associées aux particules sans masse, tels les photons, verront leur énergie décroître graduellement à zéro lorsque la longueur d'onde croît indéfiniment.

Les forces à courte portée diffèrent donc des forces à longue portée par le caractère massif des particules échangées. Les ondes massives qui transportent ces particules sont caractérisés, contrairement aux ondes sans masse, par une énergie non nulle à longueur d'onde infinie. Cette caractérisation de la masse va nous permettre de comprendre comment une brisure spontanée de symétrie permet aux ondes sans masse d'en acquérir une et par conséquent comment les forces à longue portée peuvent engendrer des forces à courte portée.

3. LA BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE

Je vais d'abord expliquer ce qu'on entend par une brisure spontanée de symétrie. Commençons par une image intuitive de ce phénomène due à Abdus Salam. Des convives attablés autour d'une table ronde ont devant eux une assiette et des couverts mais les verres sont placés symétriquement entre les assiettes. Rien ne favorise l'attribution du verre à un convive plutôt qu'à son voisin. Toutefois dès qu'un seul convive choisit entre les deux possibilités le choix des autres convives est fixé. La symétrie gauche-droite du système a été brisée sans que le choix soit fixé par une considération énergétique.

C'est un phénomène analogue qui est responsable de l'aimantation d'un corps. Cette aimantation d'un corps est due à l'existence de petits aimants, ou spins, au niveau des atomes constituant le corps et leurs interactions tendent à les aligner parallèlement les uns aux autres. Une telle interaction ne favorise ni direction ni sens particuliers et on dira que le système a une symétrie de rotation. À haute température les spins fluctuent dans toutes les directions sous l'effet de l'agitation thermique et la symétrie de rotation est réalisée. Mais quand la température s'abaisse au dessous d'une certaine valeur, il y a une transition de phase : l'agitation thermique est devenue suffisamment faible pour que l'orientation d'un spin suffise à déterminer celui de tous les autres. L'ensemble des spins s'oriente dans une même direction et le corps devient aimanté. La direction de l'aimantation sera fixée par des considérations extérieures au système, par exemple par la forme de l'aimant ou par le champ magnétique terrestre. À la limite d'un

échantillon infini et isolé, cette direction est indéterminée en principe mais néanmoins une aimantation orientée apparaît nécessairement sous l'effet des interactions entre aimants microscopiques. Il y a brisure spontanée de symétrie.

Cette brisure spontanée de symétrie s'accompagne d'un phénomène très particulier. Considérons l'axe selon lequel l'aimant s'est spontanément orienté. Cet axe est énergétiquement équivalent à tout autre et par conséquent une rotation d'ensemble des aimants microscopiques ne coûte aucune énergie. Si maintenant, on imagine que l'axe d'aimantation tourne graduellement dans l'espace, l'énergie requise sera d'autant plus faible que la rotation sera plus progressive. Nous voyons ainsi qu'une onde d'excitation a une énergie qui tend graduellement vers zéro lorsque la longueur d'onde tend vers l'infini. Utilisant le langage de la théorie quantique relativiste, on dira que l'onde de spin est une onde de masse nulle (voir le paragraphe « excitations élémentaires » du chapitre *Les états de la matière et leurs symétries*).

Pouvons-nous transposer la notion de brisure spontanée de symétrie au niveau des forces fondamentales ? Celles-ci préservent certaines symétries qui garantissent l'existence de lois de conservation (de même que l'invariance par rotation assure la conservation de la « quantité de rotation » ou moment cinétique). Ces forces opèrent non pas dans un milieu matériel macroscopique mais entre constituants élémentaires dans l'espace vide de matière. Le vide de la physique quantique relativiste est toutefois distinct du néant : il est le lieu de fluctuations de champs qui ne sont pas sans analogie avec les fluctuations thermiques de notre système de spin. Rien n'empêche alors les interactions entre champs fondamentaux de provoquer une brisure spontanée de symétrie. Cette brisure se manifestera par une structuration du vide analogue à celle induite par l'aimantation : il y aura une infinité de vides équivalents qui se transformeront l'un dans l'autre sous l'effet d'une opération de la symétrie. Ce concept révolutionnaire, introduit par Nambu en 1960, est la clef des développements ultérieurs de la physique contemporaine.

Une conséquence immédiate de ce concept est que toute symétrie continue spontanément brisée en physique quantique relativiste donne

naissance à des particules de masse nulle, les bosons de Nambu-Goldstone (NG). La terminologie de la physique quantique relativiste utilisée plus haut traduit maintenant directement une réalité.

Mais le boson NG peut se trouver confronté à un nouveau phénomène qui aboutira à une synthèse des forces à courte et à longue portée : c'est ce que je vais expliquer maintenant.

4. LE MÉCANISME BEH

Notre analyse a comme point de départ le cadre général des théories dites de jauge qui généralise la théorie de l'électromagnétisme. Pour comprendre ce dont il s'agit, reprenons encore une fois notre système de spins.

Le système de spins considéré n'est invariant que si une rotation est effectuée sur tous les spins simultanément ; on dit que la symétrie de rotation est globale. Peut-on concevoir un système qui serait invariant pour une symétrie continue locale, tel un système de spins où des rotations de différents groupes de spins se feraient sans coût d'énergie. Cela paraît impossible ; sauf si nous inventons un nouveau champ qui se transformerait précisément sous l'effet des rotations locales de manière à compenser l'énergie que coûteraient ces rotations en son absence. Un tel champ s'appelle « champ de jauge » associé au groupe des rotations.

De tels champs seraient nécessairement de masse nulle. Il n'était en effet pas nécessaire de les introduire lorsque la symétrie continue était globale. Or on obtient une symétrie globale à partir d'une symétrie locale lorsque la longueur d'onde du champ de jauge devient infinie. L'énergie transportée par l'onde dans cette limite doit donc être nulle, ce qui établit le caractère non massif des champs de jauge.

Il est remarquable, qu'au niveau des forces fondamentales, ce sont précisément des champs de jauge qui transportent les forces fondamentales à longue portée, gravitation et électromagnétisme.

Une symétrie étendue localement par l'intermédiaire de champs de jauge peut-elle être brisée sous l'effet des interactions entre les objets qui

y sont soumis ? La réponse est oui mais le boson NG se trouve maintenant confronté aux forces à longue portée des champs de jauge. Et il va se produire un nouveau phénomène.

Il y avait en effet une hypothèse cachée dans l'analyse que nous avons faite du système de spins. En disant qu'une oscillation de grande longueur d'onde ne requiert qu'une énergie très faible, nous avons implicitement supposé que les forces entre spins n'agissaient qu'entre spins voisins. Que se passerait-il si les forces entre spins recouvraient tous les spins, bref si c'étaient des forces à longue portée ? Dans ce cas, une rotation périodique dans l'espace de la moitié des spins par rapport à l'autre ne met plus seulement en jeu l'énergie d'interaction entre des spins voisins : chaque spin subit maintenant l'effet d'une infinité de spins, en fait celui de la moitié des spins du système. Il faudra donc fournir une énergie importante pour tourner la moitié des spins indépendamment de la longueur d'onde considérée, et ce, même lorsque cette longueur d'onde devient très grande. Dans cette limite, l'énergie ne tend donc plus vers zéro : l'onde de spin n'est plus de masse nulle. Bref on voit que le mode de NG, confronté à des forces à longue portée, devient dans le langage de la physique quantique relativiste un mode massif.

Effectivement, comme cette analyse du système de spin le laisse prévoir, les forces à longue portée associées aux champs de jauge rendent le boson de NG massif. Mais ce n'est pas tout. L'acquisition de la masse du boson de NG est due à l'effet de forces à longue portée, et donc à l'effet d'autres particules sans masse. Pourquoi les champs de jauge ne deviendraient-ils pas également massifs ?

La réponse à cette question est merveilleuse. À la différence des ondes de NG les ondes de champs de jauge sont polarisées dans les deux directions perpendiculaires à celle de leur propagation. Cette propriété, qui caractérise toutes les ondes transportant des particules sans masse, est une conséquence générale de la relativité restreinte. Pour que l'onde d'un champ de jauge devienne massive elle doit acquérir un troisième degré de polarisation : la polarisation longitudinale. La polarisation longitudinale manquante est fournie par le boson de NG qui devient ainsi partie intégrante d'un champ de jauge massif transportant des forces à courte portée.

Ainsi les forces à longue portée peuvent se transformer en forces à courte portée en brisant spontanément la symétrie dont elle assuraient l'extension locale. Il devient ainsi possible d'unifier dans un même cadre théorique, celle des champs de jauge, les forces à longue et à courte portée. C'est le mécanisme BEH qui résulte de l'impossibilité d'une coexistence de deux ondes de masse nulle : celle du champ de jauge qui étend localement une symétrie globale et celle résultant de la brisure spontanée de symétrie.

5. LES CONSÉQUENCES ET LES PERSPECTIVES

L'application la plus impressionnante du mécanisme BEH est la théorie unifiée des interactions électromagnétiques et des interactions faibles à courte portée responsables des désintégrations radioactives, formulée par Weinberg en 1967. Les forces fondamentales y sont des champs de jauge généralisant le champ électromagnétique de Maxwell. Une interaction très simple entre les sources matérielles provoque la brisure de symétrie dans le secteur des interactions faibles mais conserve le caractère à longue portée des forces électromagnétiques. Dans les années 70, la vérification expérimentale de cette théorie est éclatante. En 1984, ce sont les bosons de jauge massifs eux-mêmes qui sont découverts. Il reste en fait une particule massive à découvrir pour compléter la vérification expérimentale du mécanisme. C'est une particule associée aux ondes modifiant la grandeur de « l'aimantation ». Sa recherche est un des principaux buts de la physique au tournant du millénaire.

Mais, dans sa généralité, le mécanisme BEH dépasse cette réalisation particulière. Il permet de concevoir une unification, à partir d'une symétrie englobant toutes les interactions, de toutes les lois de la nature. D'ailleurs, depuis cette découverte, beaucoup de théoriciens qui étudient les interactions fondamentales recherchent une théorie unifiée de toutes les interactions en s'appuyant, d'une manière ou d'une autre, sur ce mécanisme.

Je ne sais pas si les recherches actuelles aboutiront effectivement à une théorie unifiée qui fournirait un schème explicatif de tous les phénomènes imaginables, mais cette perspective soulève de nouvelles interrogations. L'ampleur des succès de la physique théorique rend plus lancinante la

question : mais quelle est donc la raison d'être des lois que l'on découvre ? Jusqu'ici le physicien pouvait se contenter d'éluder la question en cherchant une explication aux lois connues dans des lois plus générales encore qui restaient à découvrir. Mais si ces succès devaient aboutir à la formulation d'une loi unifiée qui régirait tous les phénomènes sans remettre en cause la manière de les décrire, on ne pourrait éviter la question qu'au prix de l'acceptation d'une inintelligibilité définitive.

Que peut-on imaginer ? Que le champ des lois scientifiques s'ouvre à des univers insoupçonnés, dont l'analyse renverrait sans cesse à des lois plus générales ? Ou faut-il s'attendre à une transcendance du cadre conceptuel de la physique actuelle ? La mise en objectivité du monde, qui a permis à la science d'échapper aux identifications mystiques et stériles pour enfin ouvrir la voie à une démarche vers une intelligibilité vérifiable, n'est-elle qu'une étape sur le chemin du savoir ? Quoi qu'il en soit, si la compréhension du monde qu'apporte l'approche scientifique doit s'avérer limitée, on peut au moins espérer découvrir dans la science elle-même la nature de ces limites.