

distance, l'équivalence entre changement de référentiel et champ gravitationnel est nécessairement locale dans l'espace-temps : les axes du système de référence ne peuvent pas être rigides et, comme le dit Einstein, le référentiel est « un mollusque de référence ». Les équations de la relativité générale sont effectivement invariantes par un changement général de référentiel ; elles s'expriment dans un espace-temps dont la métrique, variant de point en point, peut être représentée par un champ... le champ gravitationnel produit par la matière ! Il est tout à fait remarquable que cette dialectique de la symétrie et de la dynamique fonctionne aussi pour toutes les autres interactions fondamentales, dans le cadre de la théorie quantique des champs : dans le modèle standard en effet, l'interaction électromagnétique et l'interaction faible sont décrites par la théorie unifiée *électrofaible* et l'interaction forte des quarks par la *chromodynamique quantique*, des théories dites à *invariance de jauge*, ce qui signifie que les forces résultent de propriétés d'invariance par des transformations dépendant du point d'espace-temps où elles sont appliquées.

### La brisure de symétrie et la dialectique du virtuel et de l'actuel

Les propriétés de symétrie ont joué un rôle déterminant dans l'élaboration de la théorie quantique des champs et dans son utilisation en physique des particules. En l'absence d'interactions, les équations de la théorie quantique des champs se résolvent exactement, mais de grandes difficultés surgissent dès que des interactions couplent les divers champs quantiques en présence : une particule crée un champ mais ce champ peut rétroagir sur la particule, modifier sa masse ou sa charge. Or dans le monde réel, il n'y a pas de champs sans interactions ; les seules informations expérimentales que nous puissions avoir à propos de champs quantiques concernent les probabilités des événements d'interaction provoqués lors de collisions entre particules. Dans une réaction provoquée par exemple dans un collisionneur, l'interaction se produit dans une région microscopique de l'espace-temps alors que les particules incidentes peuvent être considérées comme libres (ce qui veut dire sans interactions) avant la collision, et que les

particules finales, celles qui sont enregistrées dans les détecteurs, à des distances macroscopiques du point de collision, peuvent aussi être considérées comme libres. Les informations accessibles expérimentalement en physique des particules, qui en déterminent l'horizon apparent, concernent donc l'ensemble des transitions entre les états de champs quantiques libres entrants et ceux de champs quantiques libres sortants. Rappelons que les états d'un champ quantique forment ce que nous avons appelé un espace de Fock qui est la superposition du vide, l'espace de Hilbert à zéro particule, de l'espace de Hilbert à une particule, de l'espace de Hilbert à deux particules, etc. L'horizon profond est celui du programme de l'intégrale de chemins de Feynman, que nous avons évoqué plus haut, et qui consiste à déterminer, pour chaque processus relevant d'une certaine interaction fondamentale, l'ensemble des voies indiscernables qu'il peut emprunter, à associer à chacune de ces voies son amplitude, et à resommer de façon cohérente toutes ces amplitudes pour obtenir l'amplitude de probabilité du processus.

Les propriétés de symétrie jouent un rôle essentiel dans ce programme, car elles contraignent la forme du *lagrangien* de la théorie dans lequel sont encodées toutes les règles de détermination des voies indiscernables et de leurs amplitudes associées. D'autre part il apparaît que c'est grâce aux propriétés de symétrie que peuvent être levées certaines des difficultés liées au fait que les champs quantiques ne peuvent pas être considérés indépendamment des interactions auxquelles ils participent. Mais la théorie quantique des champs ne peut pas être appliquée à la physique des particules sans que soient définis les espaces de Fock des champs quantiques libres entrants et sortants, et en particulier leur état à zéro particule, le vide. Pour que la théorie ne soit pas physiquement absurde, ce vide est soumis à la contrainte de représenter l'état, stable, d'énergie minimum des champs quantiques considérés (si le vide était instable, il serait possible d'extraire de l'énergie *ex nihilo*). Mais il peut arriver qu'il y ait un conflit entre une propriété de symétrie du lagrangien et la stabilité du vide : un vide symétrique serait instable, alors qu'un vide stable ne serait pas symétrique. On voit dans ce cas que l'on a affaire à une situation de *brisure spontanée de symétrie* : la symétrie ne s'actualise pas direc-