

Avant-propos

La théorie quantique des champs vise à décrire les interactions fondamentales dans un cadre unique conciliant les principes de la mécanique quantique et les invariances géométriques et cinématiques. Cette discipline s'est enrichie, au cours des deux dernières décennies, d'applications insoupçonnées, qui tiennent à la parenté de ses méthodes avec celles de la physique statistique, à travers l'étude des phénomènes critiques ou des modèles de physique du solide. Certains développements ont permis de s'affranchir en partie des techniques perturbatives, qui sont à la source de succès considérables dans le domaine des interactions électromagnétiques et faibles. En jetant un jour nouveau sur le rôle du groupe de renormalisation, en permettant d'aborder des questions comme le confinement des constituants dans la chromodynamique, en s'ouvrant aux possibilités de simulation numérique, en découvrant des problèmes nouveaux comme ceux posés par la théorie des cordes quantiques, la théorie des champs s'est entièrement renouvelée.

Nous nous sommes attachés à en donner un panorama complétant un texte précédent sur la théorie quantique des champs écrit par l'un des auteurs en collaboration avec J.-B. Zuber. Bien qu'on suppose du lecteur qu'il possède quelques rudiments de cette théorie, le présent ouvrage veut éviter de faire de trop nombreux appels à des connaissances extérieures et s'inscrit dans le cadre d'un enseignement destiné à de jeunes chercheurs et, plus généralement, à des scientifiques intéressés par les progrès de cette discipline. L'abondance des matières, le rythme rapide des nouvelles contributions et les compétences limitées des auteurs ont cependant posé des bornes à l'ensemble des sujets traités.

Si l'on veut bien admettre ces limites, nous avons cependant tenté de décrire les fondements de la théorie euclidienne des champs, reposant sur l'usage des intégrales de chemins de Feynman et concrètement réalisée à travers les modèles statistiques qui utilisent un réseau discret, dont le paradigme est le modèle d'Ising. Ce point de vue permet d'attribuer un sens global aux quantités physiques, d'étudier des régimes de couplage fort, suggère l'existence de transitions de phases et montre le rôle du groupe de renormalisation agissant comme filtre des propriétés universelles au voisinage des théories critiques continues.

Le premier volume est consacré pour l'essentiel à l'illustration de ces thèmes. Il s'ouvre par une étude des chemins aléatoires et leur relation avec les champs bosoniques, et introduit les intégrales fermioniques sur l'exemple du modèle d'Ising bidimensionnel. Il expose la méthode du champ moyen, les propriétés relatives à l'invariance d'échelle, et illustre les idées de la renormalisation dans le cadre de la transition de Kosterlitz et Thouless du modèle des rotateurs. Un long chapitre est consacré à la théorie des transitions de phases continues à partir des idées de Wilson, où nous nous sommes appuyés sur les contributions de nos collègues E. Brézin, J.-C. Le Guillou et J. Zinn-Justin. C'est encore à Wilson qu'on doit la formulation des théories de champs de jauge sur réseau et leurs applications à la chromodynamique et au confinement dont la présentation clôt la première partie.

Le second volume est plus éclectique. On y trouve d'abord des indications sur les développements de haute ou basse température et les applications des simulations numériques de Monte Carlo, en particulier à la chromodynamique. Un copieux chapitre décrit les résultats récents concernant les systèmes critiques bidimensionnels, dans le cadre des théories conformes, qui servent aussi d'outil à la théorie des cordes quantiques. Nous discutons ensuite les applications de l'intégration fermionique à des systèmes désordonnés simples. Enfin le dernier chapitre expose quelques résultats de géométrie aléatoire et introduit l'étude des surfaces fluctuantes.

Dans la première partie, au risque de répétitions, nous nous sommes efforcés de présenter le sujet de manière aussi élémentaire que possible. Nous ne supposons du lecteur qu'une certaine familiarité avec la notion de poids statistique de Gibbs, ainsi qu'avec la représentation des amplitudes de transition quantiques comme superpositions relatives à toutes les évolutions possibles, affectées d'un poids exponentiel dans l'action. C'est précisément ce parallélisme qui est à la source des convergences évoquées précédemment.

Le choix des sujets traités et les nombreuses omissions reflètent les intérêts des auteurs et leurs préoccupations. Nous ne sommes que trop conscients de nombreuses lacunes dont la liste serait à l'origine d'un texte encore plus volumineux. Il est quelque peu dangereux de vouloir systématiser ce que l'on a cru comprendre sans laisser percer de-ci de-là des ignorances. Il est bon de comprendre à quel point la recherche débouche sur des problèmes ouverts, des questions en suspens, des interrogations. Comprendre nécessite le plus souvent que l'on reprenne la plume, que l'on retrace les étapes d'un raisonnement, que l'on refasse un calcul, que d'une façon générale on ne se satisfasse jamais de ce que l'on trouve écrit ou dit ici et là.

Malgré tous nos efforts, et ils s'étaient hélas sur une trop longue période, il nous a été difficile, voire impossible, de polir suffisamment notre texte pour éviter les notations conflictuelles, fruit de l'usage, les erreurs matérielles, voire les erreurs tout court. Comme il est rituel, nous invitons le lecteur patient à les redresser et à nous en faire part. Nous espérons cependant que ces défauts inévitables ne nuisent pas trop à la compréhension de

l'ouvrage, même si une quantité change parfois de symbole de chapitre en chapitre, ou si la même lettre désigne dans des paragraphes voisins deux entités distinctes.

Nous avons inclus des passages en petits caractères, concernant des compléments, des explications et quelquefois des exercices, le plus souvent résolus. En outre, quelques appendices constituent de (trop) brefs résumés de sujets qu'il n'était pas possible de présenter en détail. Enfin des notes bibliographiques complètent chacun des chapitres et sont destinées à indiquer nos sources, fournir des jalons, et surtout à encourager le lecteur à poursuivre son étude dans les articles originaux ou de revue. Ces notes sont évidemment très incomplètes.

Parmi les textes qui servent de références, figurent bien entendu ceux de la série publiée par C. Domb et M.S. Green, et maintenant J. Lebowitz, intitulée *Phase Transitions and Critical Phenomena*, publiée par Academic Press (New York). En ce qui concerne la mécanique statistique, citons K. Huang, *Statistical Mechanics*, J. Wiley and Sons, New York (1963), H.E. Stanley *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena*, Oxford University Press (1971), S.K. Ma *Modern Theory of Critical Phenomena*, Benjamin New York (1976) et *Statistical Mechanics*, World Scientific, Singapour (1985), D.J. Amit *Field Theory, the Renormalization Group and Critical Phenomena*, World Scientific, Singapour (1984).

Tandis que nous préparions cette édition sont venus s'ajouter plusieurs ouvrages traitant des mêmes sujets. Il s'agit tout d'abord du livre de M. Le Bellac *Des phénomènes critiques aux champs de jauge, une introduction aux méthodes et aux applications de la théorie quantique des champs*, publié dans la même collection par InterEditions, Editions du CNRS Paris (1988) et de ceux de G. Parisi *Statistical Field Theory*, Addison Wesley, New York (1988) et S. Polyakov *Gauge Fields and Strings*, Harwood (1988). Enfin un traité de J. Zinn-Justin devrait paraître sous peu.

La référence classique où l'on trouve un traitement des intégrales de chemins est R.P. Feynman et A.R. Hibbs *Quantum Mechanics and Path Integrals*, Mc Graw Hill, New York (1965). Des aspects variés sont discutés dans C. Itzykson et J.-B. Zuber *Quantum Field Theory*, Mc Graw Hill, New York (1980), P. Ramond *Field Theory, A Modern Primer*, Benjamin, Cummings, Reading, Mass. (1981), J. Glimm et A. Jaffe *Quantum Physics*, Springer, New York (1981). De nombreux progrès récents de la théorie des champs qui n'ont pas trouvé place dans notre traitement sont présentés dans S. Coleman *Aspects of Symmetry*, Cambridge University Press (1985), S. Treiman, R. Jackiw, B. Zumino et E. Witten *Current Algebra and Anomalies*, World Scientific, Singapour (1985). Pour s'initier aux systèmes intégrables, on consultera R. Baxter *Exactly Solved Models in Statistical Mechanics*, Academic Press, New York (1982) et M. Gaudin *La Fonction d'Onde de Bethe*, Masson, Paris (1983). Bien entendu cette liste n'est qu'indicative et l'on trouve de nombreuses autres références dans les notes.

L'un des auteurs (C.I.) remercie ses collègues qui lui ont fourni l'occasion d'enseigner des parties de cet ouvrage dans le cadre du Troisième cycle de Suisse Romande à Lausanne, du Département de Physique de l'Université de Louvain la Neuve, du Troisième cycle de Physique Théorique à Marseille et à Paris, où les deux auteurs ont eu l'opportunité de participer à l'enseignement. Nos remerciements vont aux secrétaires de ces institutions qui ont pris part à la frappe des divers textes préliminaires, ainsi qu'à toutes celles et tous ceux qui ont permis la réalisation finale, à Dany Bunel et Sylvie Zaffanella qui ont eu la lourde charge de mettre au point le manuscrit, à M. Leduc qui a accueilli ce livre dans sa collection.

Nous remercions chaleureusement les chercheurs et amis du Service de Physique Théorique à Saclay qui au cours des années ont été nos interlocuteurs et collaborateurs et qui sont trop nombreux pour être tous cités ici.

Enfin le Commissariat à l'Energie Atomique et son Institut de Recherche Fondamentale nous ont toujours offert des conditions de travail d'une qualité difficile à égaler. C'est en quelque sorte témoigner de notre gratitude que de dédier ce livre aux futurs chercheurs. C'est aussi la raison pour laquelle nous sommes heureux de bénéficier d'une édition française grâce au concours du Centre National de la Recherche Scientifique. Bien souvent il nous est arrivé d'hésiter sur une formulation, simplement parce que nous avons perdu l'habitude de nous exprimer dans notre langue et que nous cherchions un précédent impossible à trouver, tant la langue anglaise a fini par envahir toutes les publications dans notre domaine. S'il n'est pas souhaitable de retourner à l'époque de la tour de Babel et si l'on ne peut espérer revenir aux siècles où le français était une langue scientifique universelle, du moins peut-on souhaiter maintenir un vocabulaire et une capacité d'exprimer les idées contemporaines dans sa propre langue. Sans prétendre aux effets de style, nous nous sommes attachés à trouver une terminologie simple qui puisse rendre compte de concepts nouveaux et nous nous associons à tous les efforts, heureusement de plus en plus nombreux, pour maintenir une langue scientifique vivante.

Saclay, Février 1989

Avertissement

Dans cet ouvrage, nous avons utilisé les notations internationales. Ainsi, les nombres décimaux ont un point décimal plutôt qu'une virgule, \ln représente le logarithme népérien, \tan la tangente, \sinh , \cosh , \tanh les lignes hyperboliques, etc.