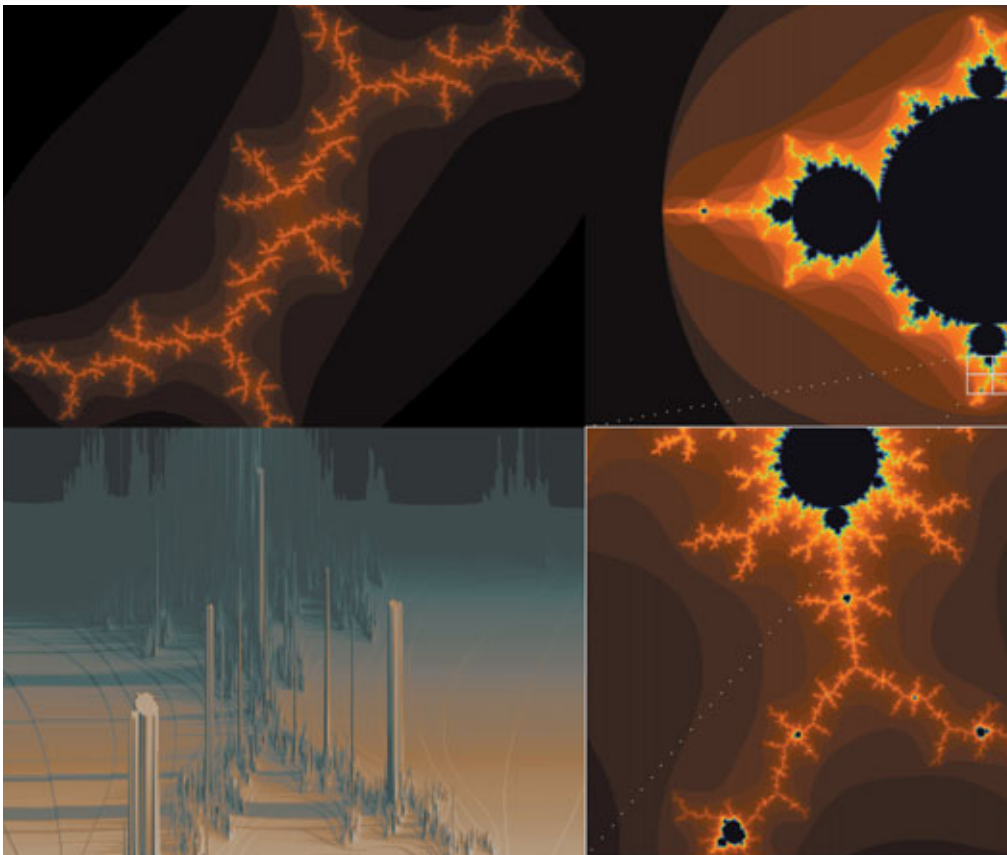


LES AVATARS DE LA THÉORIE POUR UNE PHYSIQUE PRÉDICTIVE

Qu'elle précède ou suive l'expérience, la théorie doit, dans le domaine de la physique, procéder de manière plus ou moins provisoire à certaines simplifications. C'est à ce prix qu'elle s'avère prédictive pratiquement à un moment donné. En particulier, elle doit identifier tous les paramètres importants qui permettent de décrire les phénomènes à une échelle donnée. Ce sont les avatars nouveaux de cette idée qu'illustre par exemple, en physique des particules, la théorie quantique des champs et qui conduit à la notion de théorie effective.



Jean-Francois Colonna (CMAP/Ecole polytechnique, FT R&D).

Illustration des effets du découplage des échelles. Si l'agrandissement itératif d'un segment de droite imprimé ne fait apparaître des détails supplémentaires que si les défauts de l'impression deviennent apparents, une image géométrique fractale (intitulée ici Le long de la frontière de l'ensemble de Mandelbrot), sans découplage des échelles, construite itérativement, apparaît différente à chaque grossissement, avec toujours plus de détails (reprenant en l'occurrence le même motif, comme indiqué à droite). Il y a là l'équivalent du groupe de renormalisation. L'algorithme dit comment passer d'une échelle à la suivante : à un grossissement donné, on peut parler d'image effective. L'image en bas à gauche est une vue 3D du même motif.



Au xx^e siècle, dans deux domaines distincts de la physique, la théorie des interactions fondamentales⁽¹⁾ et la mécanique statistique des transitions de phase, une des idées fondamentales de la physique a été remise en cause : le *découplage des échelles*. Prenons deux exemples pour illustrer cette idée. Une simple analyse dimensionnelle montre que la période d'un pendule varie comme la racine carrée de sa longueur. Ce résultat repose en fait sur l'hypothèse que d'autres longueurs, comme la taille des atomes qui composent le pendule ou le rayon de la Terre, n'interviennent pas, car respectivement beaucoup trop petite ou trop grande. De même pouvons-nous calculer les trajectoires des planètes, avec une très bonne approximation, en supposant que les planètes et le Soleil sont des points matériels, car leurs rayons sont beaucoup plus petits que les tailles des orbites.

Il est bien clair que si cette propriété de découplage n'était pas généralement vraie, une physique prédictive serait pratiquement impossible.

La théorie des interactions fondamentales

Dans les années trente, les premiers calculs d'électrodynamique quantique⁽¹⁾ se heurtèrent à des problèmes apparemment insurmontables : beaucoup de résultats étaient infinis et ces infinis étaient directement liés à la nature ponctuelle de l'électron. Il apparut rapidement que ces infinis avaient un caractère fondamental, paraissant une conséquence inévitable du caractère ponctuel des particules et de la conservation des probabilités.

Une solution empirique à ce problème, appelée *renormalisation*, fut cependant trouvée. Elle consistait à exprimer les quantités mesurables non pas en termes des paramètres initiaux de la théorie, comme la charge de l'électron en l'absence d'interactions, mais en termes de quantités renormalisées comme la charge de l'électron observée. Les résultats obtenus par cette méthode furent ensuite confirmés, de façon spectaculaire, par l'expérience.

A priori, cette méthode apparaît comme une application du principe habituel : utiliser des paramètres adaptés à l'échelle d'observation. Toutefois, dans ce cadre, trois bizarreries apparaissaient : la relation infinie entre paramètres initiaux et paramètres observés, la nécessité, pour que la méthode de renormalisation marche, d'introduire parfois des interactions supplémentaires non anticipées et enfin la propriété que l'intensité des interactions dépendait de l'échelle

(1) Voir à ce sujet *Clefs CEA* n° 36 p. 24.

Le pendule de Foucault au Panthéon. Pour aboutir au résultat que la période d'un pendule varie comme la racine carrée de sa longueur, il a fallu faire l'hypothèse que d'autres longueurs, comme la taille des atomes qui composent le pendule ou le rayon de la Terre, n'interviennent pas car, respectivement, beaucoup trop petite ou trop grande.



Palais de la Découverte

d'observation. Par exemple, pour des distances plus petites que la longueur d'onde de l'électron, la théorie prédit un phénomène "d'anti-écranage". Ce phénomène a été vérifié plus tard de façon très directe à haute énergie, c'est-à-dire à courte distance : la charge de l'électron observée à une énergie de 100 GeV, qui correspond à la masse de la particule Z, est augmentée de 4 % par rapport à sa valeur "habituelle", qui est la charge coulombienne.

Phénomènes critiques et théorie gaussienne

La théorie des phénomènes critiques a comme objet la description des transitions de phase continues ou du second ordre dans les systèmes macroscopiques, comme la transition liquide-vapeur, les transitions dans les mélanges binaires, l'hélium superfluide, les systèmes magnétiques. Ces transitions sont

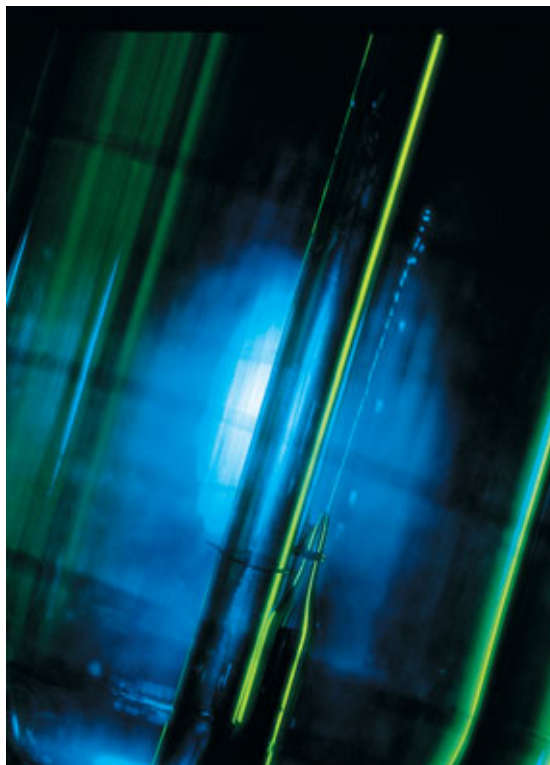
caractérisées par des comportements collectifs à grande échelle près de la température de transition (la température critique T_c). On s'attend alors à ce que ces comportements puissent faire l'objet d'une description macroscopique, ne faisant intervenir qu'un petit nombre de paramètres adaptés à cette échelle, sans référence explicite aux paramètres microscopiques initiaux ou à l'échelle microscopique initiale comme la taille des atomes, la maille des cristaux ou la portée des forces. Cette idée conduit à une théorie gaussienne (pour des raisons analogues au théorème de la limite centrale de la théorie des probabilités).

Aussi les physiciens furent-ils très surpris du désaccord de cette théorie aussi bien avec l'expérience qu'avec des calculs de modèles de mécanique statistique sur réseau. L'échec de la théorie gaussienne démontrait que les propriétés macroscopiques ne pouvaient pas être calculées en ignorant complètement l'échelle microscopique. En fait, un calcul des corrections à la théorie gaussienne fait apparaître des infinis à la température critique. Les divergences rencontrées dans la théorie des champs de la physique des particules et la théorie des phénomènes critiques ont en fait une origine commune : le non-découplage des différentes échelles de physique. Les infinis apparaissent quand on essaie d'ignorer, comme on en a l'habitude, et comme il est généralement justifié, l'existence d'une échelle de physique microscopique sous-jacente.

Universalité et groupe de renormalisation

On aurait pu craindre dans ces conditions que la physique macroscopique soit sensible à toute la structure de courte distance, que les phénomènes à grande distance dépendent de la dynamique microscopique détaillée, et donc soient essentiellement imprédictibles. En fait il fut découvert empiriquement que seule l'échelle de distance associée aux interactions microscopiques et certaines de leurs caractéristiques générales étaient importantes, une propriété appelée *universalité*. La survivance d'une universalité, même réduite par rapport à la théorie gaussienne, était encore plus surprenante.

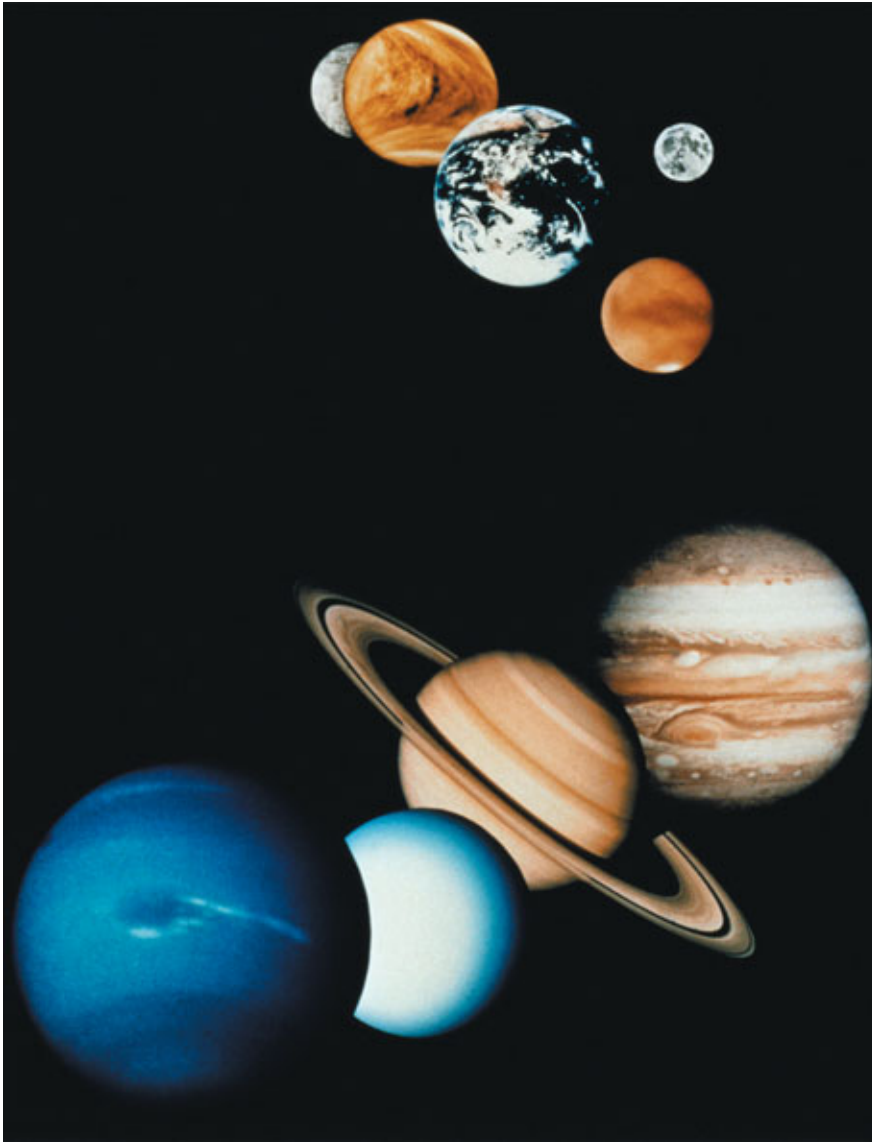
Pour comprendre toutes ces observations, un nouveau cadre conceptuel fut inventé : le *groupe de renormalisation*. Il est difficile de le décrire ici précisément, mais l'idée essentielle est la suivante : on construit une équation d'évolution pour la variation des interactions en fonction de l'échelle d'observation. On se donne comme condition initiale les interactions microscopiques et on recherche les interactions *effectives* à plus grande distance. Si l'équation d'évolution a des propriétés de point fixe, c'est-à-dire que pour



CEA/Oasis/D. Chaslerie

Effet fontaine de l'hélium superfluide. C'est l'exemple d'un phénomène dont les propriétés à l'échelle macroscopique ne peuvent pas être calculées en ignorant complètement l'échelle microscopique.





PhotoDisc/StockTrek

Les planètes du système solaire regroupées. Leurs trajectoires ont été calculées en supposant qu'il s'agissait de points matériels car leurs rayons sont minuscules par rapport à la taille de leurs orbites.



toute une classe d'interactions initiales on obtient les mêmes interactions effectives à grande distance, alors la propriété d'universalité peut être expliquée.

Cette stratégie a permis alors d'expliquer toutes les propriétés des transitions de phase simples. Mais elle a établi de façon remarquable une relation entre théorie des interactions fondamentales et transitions de phase : la théorie effective qui décrit les phénomènes critiques à grande distance est une *théorie quantique des champs* du genre de celle qui décrit la physique des particules.

Il devient alors difficile de résister à la tentation d'appliquer les mêmes idées à la théorie des interactions fondamentales.

Théories quantiques des champs effectives

On peut maintenant imaginer que les interactions fondamentales sont décrites à l'échelle microscopique (bien sûr microscopique, comme la longueur de Planck⁽²⁾, par rapport aux échelles de distance actuelle-

ment expérimentalement accessibles), c'est-à-dire à très grande énergie, par une théorie finie de nature inconnue (la *théorie des cordes* ?). Pour des raisons qui restent à comprendre, elle engendre, par l'effet coopératif d'un grand nombre de degrés de liberté, une physique de grande distance avec des particules de très faible masse (par rapport à la masse de Planck⁽²⁾, 10^{19} GeV).

À des distances un peu supérieures à l'échelle microscopique, la physique est décrite par une théorie des champs très compliquée avec un nombre infini d'interactions, dont les intensités évoluent avec la distance. Conséquence de l'existence d'un point fixe de longue distance, la plupart des interactions, décroissent alors rapidement et deviennent négligeables à grande distance (une seule conduit néanmoins à des effets importants, la gravité, à cause de son caractère cumulatif et attractif). Des interactions en nombre fini

(2) Dimensions limites inférieures de la Nature selon la physique quantique.

évoluent lentement (de façon logarithmique) et survivent à longue distance. Elles conduisent au *modèle standard* qui décrit presque toute la physique des particules accessible⁽¹⁾. Enfin, certains paramètres peuvent croître avec la distance. Par exemple, on s'attendrait dans le modèle standard à ce que la masse de la particule de Higgs⁽¹⁾ soit voisine de la masse de Planck, une masse incompatible avec la physique observée. Il s'agit là d'un problème non résolu appelé problème de l'*ajustage fin*⁽¹⁾. Une hypothétique supersymétrie⁽¹⁾ est une des solutions proposées. Ce point de vue moderne, profondément basé sur le groupe de renormalisation et la notion d'interactions dépendant de l'échelle d'observation, non seulement procure une image plus cohérente de la théorie quantique des champs, mais donne également un cadre dans lequel de nouveaux phénomènes peuvent être discutés.

Il implique aussi que la théorie quantique des champs est une description temporaire, qui n'est pas nécessairement cohérente à toutes les échelles, et destinée à être finalement remplacée par une théorie plus fondamentale de nature radicalement différente. Il faut néanmoins souligner que la théorie quantique des champs reste, pour l'instant, le cadre le plus fécond pour l'étude de beaucoup de problèmes en physique où un nombre très grand de degrés de liberté interagissent fortement. ●

Jean Zinn-Justin

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay