

Introduction

Thibault DAMOUR
Institut des Hautes Études Scientifiques
35, route de Chartres
91440 Bures-sur-Yvette, France

Ce document rassemble les contributions écrites des conférenciers du premier Séminaire Poincaré de physique théorique (Paris, 9 mars 2002). Cette nouvelle série de séminaires a l'ambition de jouer, pour la physique théorique, un rôle analogue au rôle joué par les séminaires Bourbaki en mathématique : à la fois introduire à, et faire le point sur, un problème important sur lequel beaucoup est déjà connu, mais qui est encore en plein développement.

Le problème retenu pour ce premier séminaire “Bourbaphy” est l'*énergie du vide*. Il s'agit là d'une des questions centrales de la physique, qui est intimement liée à deux des grandes révolutions scientifiques du vingtième siècle : la Théorie Quantique (née des méditations de Planck concernant l'énergie qu'il faut attribuer à l'infinité des modes d'oscillations du champ électromagnétique dans une cavité dont les parois sont maintenues à une certaine température), et la Théorie de la Relativité Générale (dont l'application à la Cosmologie conduisit Einstein à proposer l'existence possible d'une “constante cosmologique”, équivalente à attribuer une densité d'énergie et une pression au “vide”). Ces deux aspects de ce que l'on rassemble aujourd'hui sous le vocable “énergie du vide” sont longtemps restés conceptuellement séparés l'un de l'autre. De plus, pendant de longues années, tous deux sont restés très loin de toute vérification expérimentale. La situation actuelle est radicalement différente. Le “problème de la constante cosmologique” est aujourd'hui conceptuellement identifié au problème de la définition de l'énergie moyenne, dans le vide, de l'infinité d'oscillateurs quantiques associés à tous les champs physiques.

Sur le front expérimental, après l'importante réalisation de Casimir (que l'énergie quantique du vide en présence d'une cavité dépendait de la taille et de la forme de cette cavité et conduisait, en particulier, à une force attractive entre deux plaques conductrices), de nombreux expérimentateurs ont cherché à mettre en évidence cet “effet Casimir”. Le succès avec lequel ils ont finalement réussi est discuté en détail dans ce document. Quant à la mesure expérimentale de la “constante cosmologique”, c'est-à-dire de la densité moyenne de l'énergie du vide à l'échelle cosmologique, elle est longtemps restée le Monstre du Loch Ness de la cosmologie : elle ressortait de temps en temps comme une possibilité que l'on ne pouvait pas exclure, mais le “consensus” tendait bientôt à “sauver les phénomènes” sans introduire une telle constante supplémentaire dont rien ne motivait la présence (au niveau $\rho_{\text{vide}} \sim 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$ pertinent pour jouer un rôle dans l'univers cosmologique actuel). La situation a complètement changé il y a très peu d'années, et le consensus actuel est que les deux tiers de l'énergie moyenne remplissant l'espace cosmologique doit être attribué à une sorte d'“énergie du vide” (appelée, dans ce contexte, l'“énergie sombre”, et qu'il faut distinguer de la “matière sombre”, maintenant reléguée à ne rendre compte que du tiers de la densité cosmologique moyenne). L'expérience nous oblige donc à prendre au sérieux les prédictions combinées des scientifiques qui, après Planck et Einstein, suivis de Casimir, Pauli, Zel'dovich et beaucoup d'autres, ont conçu le Vide Quantique comme un milieu complexe, fourmillant d'une incessante activité interne donnant lieu à une densité moyenne d'énergie et de pression. Mais ceci nous conduit à l'un

des plus profonds paradoxes de la physique fondamentale actuelle : pourquoi la valeur “résiduelle” de l’énergie du vide ρ_{vide} est d’ordre $10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$, c’est-à-dire, en unités $\hbar = c = 1$, de l’ordre de 10^{-46} GeV^4 ? Une telle valeur est si éloignée des échelles de densité d’énergie associées à la physique que l’on connaît (échelles du vide de la chromodynamique quantique $\sim (0.1 \text{ GeV})^4$, du secteur électrofaible $\sim (100 \text{ GeV})^4$, ou bien échelle “de Planck” $\sim (10^{19} \text{ GeV})^4$) qu’il s’est révélé, jusqu’à présent, impossible d’inventer un mécanisme pouvant naturellement l’“expliquer”.

L’ensemble des contributions rassemblées dans ce document constitue une introduction quasi exhaustive aux aspects essentiels du problème de l’énergie du vide. Le texte de Norbert Straumann ouvre la discussion et brosse un tableau très complet de la position conceptuelle du problème, nourrie par une grande connaissance de son histoire, tout en donnant aussi un exposé très détaillé (et d’une clarté rare) de la physique des données cosmologiques suggérant l’existence d’une valeur non nulle de $\rho_{\text{vide}} \sim 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$ (c’est-à-dire $\Omega_\Lambda \sim 2/3$). La théorie de l’effet Casimir est ensuite discutée en détail par deux des théoriciens dont les travaux ont fait progresser de manière significative cette théorie : Bertrand Duplantier, ayant à l’esprit la vocation didactique des séminaires Bourbaki, présente d’abord une introduction relativement élémentaire (mais assez complète) des aspects essentiels de l’effet Casimir dans les cas géométriques les plus simples, qui correspondent par ailleurs à la situation expérimentale. Roger Balian attaque ensuite des aspects plus généraux et plus fins de l’effet Casimir : comment l’énergie Casimir dépend-elle de la forme des parois et de la température? Dans quelle condition les diverses limites que l’on doit prendre conduisent-elles à un résultat final bien défini? Les vérifications expérimentales, en laboratoire, de l’effet Casimir sont ensuite discutées en grand détail dans les contributions suivantes. D’abord, Alain Aspect (qui fit l’exposé oral) et Jean Dalibard discutent les aspects théoriques et expérimentaux de l’interaction entre un atome et une paroi. Les effets dus au temps de retard dans cette interaction sont (théoriquement et expérimentalement) très importants. Ils donnent ensuite une discussion détaillée des résultats expérimentaux actuels pour l’interaction atome-paroi (effet Casimir-Polder). Ensuite, Astrid Lambrecht et Serge Reynaud (qui fit l’exposé oral) nous présentent une discussion détaillée des expériences récentes sur l’effet Casimir original (interaction paroi-paroi), et du cadre théorique nécessaire à leur interprétation. Il est fascinant de voir comment la précision des expériences les plus récentes (de l’ordre de 1 %) a permis non seulement de confirmer la réalité de la prédiction originale de Casimir, mais a aussi mis en évidence les effets auxiliaires liés à la réflectivité imparfaite des parois. La journée, et ce document, se terminent par le brillant exposé de Michael Turner qui tire sept leçons profondes de l’existence d’une “énergie sombre” cosmologique. Ce dernier exposé montre encore, s’il en était besoin, la place exceptionnelle que joue la problématique de l’énergie du vide dans la physique (et l’astrophysique) actuelle.

Mais il est temps de laisser au lecteur le plaisir de découvrir la richesse de ce problème. Remercions les auteurs des textes ici rassemblés d’avoir pris le temps de préparer des contributions claires, nourries par l’histoire, mises à jour et donnant accès à la littérature essentielle d’une des questions clés de la physique actuelle.