Recherche

Loop Quantum Gravity and black holes

- Le paradoxe de l'information des trous noirs
- Les modèles de gravité quantique sont-ils compatibles avec la théorie des champs effective ?

Le paradoxe de l'information des trous noirs

En 1976, Hawking comprit que sa théorie de la thermodynamique des trous noirs impliquait un phénomène curieux. Si un trou noir rétrécit en émettant un rayonnement thermique vers l'infini, qu'advient-il des informations qui sont tombées dans le trou noir une fois que celui-ci s'est complètement évaporé ? Selon la mécanique quantique, aucun processus réaliste ne peut détruire l'information. Cependant, les calculs de Hawking suggèrent que c'est le cas, car le rayonnement émis à l'infini par le trou noir ne contient aucune information sur ce qui est tombé dans le trou noir. C'est le problème de l'information, probablement le problème le plus ambitieux et le plus fondamental de la physique théorique moderne, car il confronte directement deux théories considérées comme incompatibles : la relativité générale et la théorie quantique des champs. Sa résolution pourrait élucider la gravité quantique, considérée comme le Saint Graal de la physique, nous apprenant comment résoudre le problème de la singularité à l’intérieur des trous noirs et celui de l’origine de l’univers.

Au cours de sa thèse de doctorat, Sami, en collaboration avec Alejandro Perez, a eu une idée audacieuse. L'information n'est pas détruite dans le trou noir, mais se disperse dans les degrés de liberté gravitationnels microscopiques proches de la singularité, où les effets quantiques ne peuvent plus être négligés. Par conséquent, l'information est conservée, conformément à la mécanique quantique, mais inaccessible à toutes fins pratiques. Imaginez que vous laissiez tomber un œuf. Lorsqu'il touche le sol, l'œuf se brise, et la plupart des informations concernant sa structure interne se perdent à cause des corrélations microscopiques entre les éléments constituant l’œuf et les atomes du sol. Bien sûr, on ne peut pas, en pratique, récupérer les informations sur l’état initial de l’œuf, mais cela tient uniquement à nos propres limites. En principe, on pourrait analyser les corrélations induites par l’impact et récupérer tout ce qu’il est possible de dire sur l’œuf.

Sami et Alejandro ont compris qu'un scénario similaire pouvait s'appliquer lors de l'effondrement d'un trou noir. Ici, le rôle joué par les corrélations modifiant l'état des atomes du sol est induit par un paramètre supplémentaire qu'ils ont introduit dans une description microscopique de la gravité, étiquetant les différents « micro-états » du champ gravitationnel quantique et s'inspirant de modèles de gravité quantique tels que la gravité quantique à boucles. Ils ont expliqué comment un tel paramètre pouvait stocker des parties de l'information initiale tombée dans un trou noir. Grâce à leurs travaux, ils ont ouvert la voie à une nouvelle piste de recherche qui pourrait mener à une description complète du sort des informations englouties par un trou noir. De plus, en soulignant la présence et l’importance de degrés de liberté microscopiques supplémentaires, les idées défendues par Sami et Alejandro ont apporté de nouvelles perspectives sur d’éventuelles nouvelles phénoménologies basées sur les transferts d’énergie et d’information du niveau macroscopique vers le monde microscopique.

Ces résultats ont été publiés dans Entropy 25 (2023) 11, 1479 : https://arxiv.org/pdf/2307.10254

Les modèles de gravité quantique sont-ils compatibles avec la théorie des champs effective ?

The modern understanding of our best theories of the fundamental interactions is that these theories are effective: they are a low-energy description of Selon l'interprétation moderne de nos meilleures théories sur les interactions fondamentales, ces théories sont dites « effectives » : elles constituent une description à basse énergie de degrés de liberté plus fondamentaux, mais inaccessibles expérimentalement. Par conséquent, tant que l'on mène des expériences sans tenir compte de ces échelles d'énergie élevées, les résultats devraient s'expliquer par une théorie impliquant uniquement des degrés de liberté à basse énergie. En effet, il n'est pas nécessaire de prendre en compte les interactions quark-gluon pour décrire la mécanique newtonienne ou la dynamique des fluides. De même, si aujourd'hui une description complète de la gravité à des échelles arbitrairement grandes est encore considérée comme hors de portée, certains effets de la gravité quantique pourraient néanmoins être observés à basse énergie.

Si la relativité générale, notre théorie classique de la gravité la plus puissante et la plus précise, ne peut être quantifiée en tant que théorie de champ complète à l'ultraviolet (c'est-à-dire à des échelles arbitrairement courtes ou à des énergies élevées), elle peut néanmoins être quantifiée en tant que théorie de champ effective ; cela signifie qu'il est possible d'obtenir une description utile de la gravité quantique tant que l'on n'explore pas les échelles d'énergie proches du régime de Planck. Il est donc très intéressant de comparer certains modèles de gravité quantique complets à l'ultraviolet, tels que la gravité quantique à boucles ou la théorie des cordes, à la gravité quantique au niveau effectif. Ces comparaisons peuvent constituer un outil puissant pour écarter certains de ces modèles, car la gravité quantique en tant que théorie de champ effective est une théorie très fiable ; si la description ultraviolette ne correspond pas aux prédictions de la théorie effective, les raisons de cette discordance doivent être soigneusement étudiées et peuvent même constituer une raison solide d'écarter la description ultraviolette choisie.

L'absence de tests expérimentaux sur la gravité quantique nous a conduits à un vaste panorama de théories spéculatives dont le lien avec des descriptions de la gravité mieux comprises et mieux établies reste à établir. Dans son article, Sami a comparé des modèles de gravité quantique utilisés pour expliquer les transitions quantiques entre un trou noir et un trou blanc aux prédictions de la théorie des champs effective en matière de gravité quantique. Ses résultats ont montré que de nombreuses métriques spatio-temporelles utilisées pour ces modèles sont en fait incompatibles avec cette description effective de la gravité quantique, ce qui suggère fortement que ces modèles ne peuvent constituer une description fondamentale de la nature. De plus, il a calculé les paramètres de ces modèles à symétrie réduite utilisés dans ce type d'analyse, en s'assurant de

leur compatibilité avec la description effective. Ces résultats établissent un lien explicite entre une description de la gravité quantique à basse énergie et des compléments plus spéculatifs à haute énergie.