



Transport de qubits autour d'un trou noir & autres couplages entre information quantique et gravité

Les deux piliers de la physique moderne, la physique quantique et la théorie de la relativité générale, sont incompatibles l'une avec l'autre, essentiellement parce que la première est fondamentalement non-locale alors que la seconde est fondamentalement géométrique (et donc locale); et parce que la seconde est indépendante d'arrière-fond alors que la première nécessite la pré-existence d'un espace-temps plat indépendant du déroulement des interactions entre les différents champs. Les effets spécifiques de la physique quantique ne se manifestant que pour des actions très petites (de l'ordre de \hbar) et ceux de la relativité générale pour des densités linéiques de masse très fortes (de l'ordre de $\frac{c^2}{G}$), cette incompatibilité n'est en pratique gênante que pour des problèmes physiques très spécifiques mettant en jeu des énergies de l'ordre de l'énergie de Planck $\sqrt{\frac{c^5 \hbar}{G}}$ (trous noirs, Big-Bang, structure de l'espace-temps à l'échelle de Planck $10^{-35} m$). Pour ces problèmes, il est nécessaire de trouver une nouvelle théorie, dont l'alternative la plus populaire est la théorie de cordes (qui connaît de nombreuses variantes). Le paradigme de celle-ci est que les particules fondamentales ne sont pas ponctuelles mais en fait des cordes vibrantes à l'échelle de Planck dans un espace-temps de 11 dimensions. Nous nous intéressons à la théorie topologique des cordes, qui comme la théorie topologique des champs pour le modèle standard, est l'ossature de la théorie, dépouillée de toutes les propriétés présentant des paramètres physiques devant être ajustés à l'expérience (théorie pré quantification dont le Lagrangien est entièrement fixé par les symétries).

La théorie de l'information quantique s'intéresse à la caractérisation, la manipulation, le contrôle, le stockage et la transmission de l'information à l'échelle des atomes et des molécules. Elle s'intéresse principalement aux phénomènes d'intrication (corrélation non-locale de l'information) et de décohérence (perte des propriétés quantiques sous l'effet de l'environnement); et présente de nombreuses applications potentielles (téléportation quantique, ordinateurs quantiques, nano-machines, biophysique moléculaire). Nous nous intéressons au contrôle dynamique de l'information quantique, c'est à dire aux problèmes consistant à chercher comment moduler un champ extérieur (champ laser ou magnétique) agissant sur un système quantique (chaîne de spins ou ensemble d'atomes) pour réaliser un traitement de l'information supportée par les états quantiques du système.

Ces deux problèmes semblent de prime abord totalement disjoints et n'ayant que peu de rapport l'un avec l'autre. Mais de façon surprenante, de mêmes structures mathématiques peu usuelles surgissent dans les deux cadres. Le problème de classification des degrés d'intrication entre trois qubits (bits quantiques) est très proche de la description de l'entropie des trous noirs dans une certaine version de la théorie de cordes. Le contrôle adiabatique de la dynamique d'un système quantique soumis à un processus de décohérence fait apparaître des modèles semblables à ceux de la théorie topologique des cordes. Les ponts d'Einstein-Rosen (les trous de ver – les "portes des étoiles" des films de SF –) peuvent être interprétés comme des paires de trous noirs quantiques en intrication maximale. De plus, des phénomènes spécifiques aux effets quantiques en relativité générale (rayonnement Hawking des trous noirs, effet Unruh en référentiels non-Galiléens) peuvent être reformulés uniquement dans le formalisme dans la théorie de l'information quantique.

Le but de ce projet est l'étude d'un système à cheval sur ces deux problématiques et de le replacer dans ce contexte général. Ce système est un ensemble de qubits supportés par des spins, transportés autour d'un trou noir (ou sur un fond stochastique d'ondes gravitationnelles). Il s'agira, comme pour nos études précédentes concernant la modulation d'un champ électromagnétique extérieur, de mettre en évidence les phénomènes de décohérence induits par le "champ de gravité" et de rechercher des signatures de ce champ dans la dynamique quantique. L'étude se présentera comme un aller-retour entre des développements analytiques, des simulations numériques et des réflexions théoriques et épistémologiques. La modélisation des effets de l'espace-temps courbe sur les spins se fera à partir d'approximations semi-classiques sur la fonction d'onde (la longueur d'onde des particules supportant les spins étant très petite devant le "rayon de courbure" de l'espace-temps, les spins seront considérés comme localisés) solution de l'équation de Dirac-Einstein (équation quantique d'un fermion dans un espace-temps courbe). Ce qui conduit à une équation de Schrödinger "usuelle" d'un spin dans un champ magnétique mais dont celui-ci

est distordu par des effets gravitationnels. Ce projet fait suite à des articles très récents d'équipes anglo-saxones concernant des horloges-qubits embarquées dans des satellites opérant un transfert de temps par téléportation quantique, et la possibilité de tester les effets de la gravité par des protocoles d'information quantique dans des satellites orbitaux.

Ce travail nécessitera de la part de l'étudiant une familiarisation avec divers concepts de la théorie de l'information quantique (qubit, intrication, décohérence, entropie quantique) et de physique des hautes énergies (trous noirs, théories de jauge, effets Hawking et Unruh, équation de Dirac-Einstein, fondements de la théorie des cordes). Il devra par ailleurs mettre en œuvre ou étudier la bibliographie concernant certaines méthodes analytiques et numériques (approximation WKB, approximation adiabatique, méthode de l'opérateur fractionné (méthode symplectique) d'intégration de l'équation de Schrödinger). Le sujet ne demande pas de grandes connaissances en relativité générale, mais nécessite d'être à l'aise avec le formalisme tensoriel et la mécanique quantique.

Mots clés : physique mathématique, information quantique, relativité générale, simulations numériques

Responsable : David Viennot

Institut UTINAM, Observatoire de Besançon, Université de Franche-Comté
41 bis avenue de l'Observatoire - BP 1615 - 25010 BESANCON cedex
david.viennot@utinam.cnrs.fr
03.81.66.69.16