



# Francesca Vidotto

[vidotto@cpt.univ-mrs.fr](mailto:vidotto@cpt.univ-mrs.fr)

## Gravitation quantique à boucles et cosmologie

Qu'est-ce que l'espace ? Aujourd'hui, la meilleure théorie disponible, confirmée par des expériences et des observations, qui décrit les propriétés de l'espace, est la Relativité Générale d'Einstein. La découverte de la Relativité Générale est que l'espace n'est pas une scène immobile dans laquelle les phénomènes physiques, électromagnétiques et nucléaires, se produisent. Ces phénomènes sont décrits par des champs de force, des objets dynamiques d'où proviennent toutes les interactions que nous observons dans la nature. Einstein a compris que l'espace est lui-même un champ de force, le champ de la force gravitationnelle, et en tant que tel il évolue, se courbe, interagit. Mais tous les champs ont des propriétés quantiques, sont soumis au principe d'incertitude et ont une nature intrinsèquement discrète. Lorsque ces propriétés sont attribuées à l'espace lui-même, que se passe-t-il ?

En mécanique quantique il y a une limite à la précision avec laquelle nous pouvons déterminer une position : pour être en mesure de dire qu'une particule est située dans une région petite, elle doit avoir une grande énergie. Mais on ne peut pas confiner une particule dans une région de plus en plus petite, en augmentant son énergie à l'infini : la théorie de la Relativité Générale nous dit qu'il y a une limite à l'énergie qu'on peut concentrer dans une région donnée, au-delà de laquelle se produit la formation d'un trou noir. Dans ce cas, la particule se cache à l'intérieur du trou noir et on ne peut rien dire de plus au sujet de sa position. Il y a donc d'une échelle au-delà de laquelle on ne peut pas aller : c'est l'échelle de Planck.

C'est à l'échelle de Planck que se manifeste la quantification du champ gravitationnel : l'espace est constitué d'atomes d'espace. En gravitation

quantique la configuration de ces atomes d'espace est décrite par un "réseau de spin", où les spins sont les nombres quantiques qui nous indiquent le volume de chaque atome d'espace et comment celui-ci interagit avec les atomes voisins ; le réseau nous dit comment ces atomes d'espace sont connectés entre eux.

Un réseau de spin peut donc être utilisé pour décrire ce qui se passe à l'échelle de Planck, mais aussi pour accéder à l'infiniment grand : il peut aussi décrire l'univers entier. La cosmologie est la science qui étudie l'univers : cela ne veut pas dire décrire tous les détails, au contraire, cela signifie faire une approximation pour comprendre comment l'univers se porte dans son ensemble. Pensons à un ballon rempli de gaz : si on fait varier la température, nous pouvons décrire le mouvement des molécules de gaz, ou bien nous pouvons décrire ce qui se passe globalement en étudiant seulement le changement de la valeur du rayon du ballon. De la même manière, nous pouvons donner une bonne description de l'évolution de l'univers en disant comment change son rayon.

Si on remonte dans l'histoire de l'univers, l'univers était chaud et dense : toute la matière que nous voyons dans l'univers aujourd'hui était condensée dans une très petite région. Nous avons tous entendu parler du Big Bang, où tout serait concentré dans un point. Les physiciens se sont trouvés en difficulté face au Big Bang, parce que les équations de la Relativité Générale qui décrivent l'univers perdent leur sens quand on arrive au point appelé Big Bang. C'est la façon par laquelle la théorie nous dit qu'on a oublié quelque chose dans nos équations. De quoi s'agit-il ?

Près du Big Bang ce que nous ne pouvons plus négliger sont les effets quantiques. En particulier, nous ne pouvons pas négliger le fait que l'espace est constitué d'atomes d'espace : il n'y a pas de points dans l'espace quantique, rien n'existe en dessous du volume minimal d'espace associée à un atome d'espace. Nous pouvons imaginer condenser toute la matière de l'univers dans une très petite région, mais pas dans un point. La nature quantique de l'espace nous apporte donc une surprise : en remontant dans l'histoire de l'univers, en condensant toute la matière dans une région de plus en plus petite, à un certain moment il semble que la nature quantique de l'espace fait que la matière, plutôt de s'attirer gravitationnellement, est sujette à une force répulsive, si bien que le Big Bang ne peut pas avoir lieu. Si le Big Bang n'est pas là, on peut se demander ce qui s'est passé avant. L'image qui émerge est celle d'un ballon qui se dégonfle et

puis se gonfle à nouveau, sans jamais disparaître. De même façon l'univers rétrécit et se dilate, mais ne se dissout jamais complètement. La transition entre une phase et l'autre, entre la contraction et l'expansion, n'est plus un événement singulier, mais un rebond. Bien sûr, il s'agit toujours d'un événement au cours duquel l'univers présente des caractéristiques extrêmes (avec des énergies que nous nous imaginons avec difficulté), on évoque donc un Grand Rebond !

Etudier les propriétés de l'univers à l'époque de ce grand rebond devient alors un problème difficile mais accessible, à condition de prendre dûment en considération la nature quantique de l'espace. Dans ma thèse, j'ai essayé pour la première fois d'utiliser les réseaux de spin pour décrire l'univers, et de construire des histoires quantiques de la façon dont ces réseaux de spin évoluent. L'évolution de cet univers quantique est décrite par un objet avec le nom évocateur de mousse de spin. Ce n'est qu'un début, mais l'espoir est que les équations qui régissent les réseaux de spin et les mousses de spin puissent nous fournir un indice important sur l'origine de toutes les structures que nous observons dans l'univers : étoiles, galaxies, amas de galaxies ... Aujourd'hui, nous sommes en mesure de reconstruire, avec des simulations numériques gigantesques, la naissance de toutes ces structures à partir des petites ondulations dans le tissu d'un espace continu. La mission de la cosmologie de mousse de spin serait alors d'expliquer ces ondulations à partir des atomes d'espace.

Image 1 : image de couverture de la thèse ( © Francesca Vidotto )



Image 2 : l'espace émerge des relations entre les atomes d'espace, représentés par des boucles d'où le nom de la théorie ( © Carlo Rovelli )

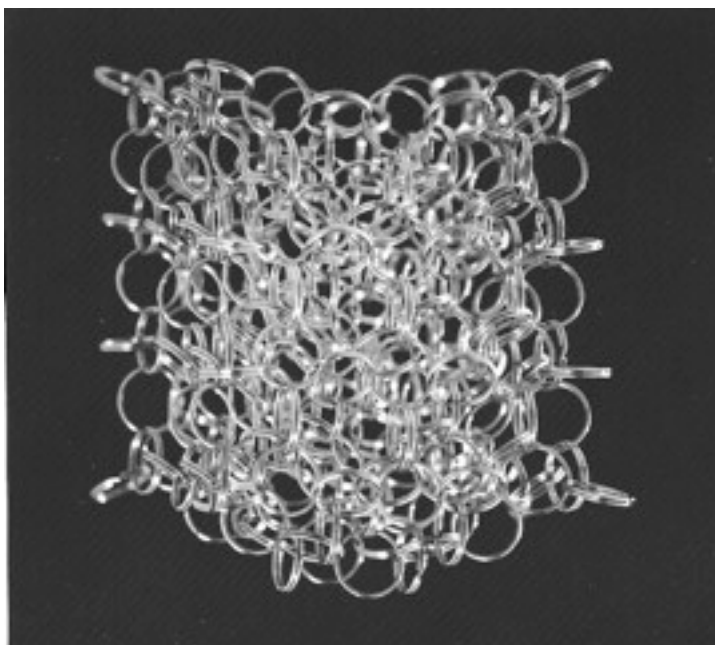


Image 3 : on représente les relations entre les atomes d'espace avec des graphes

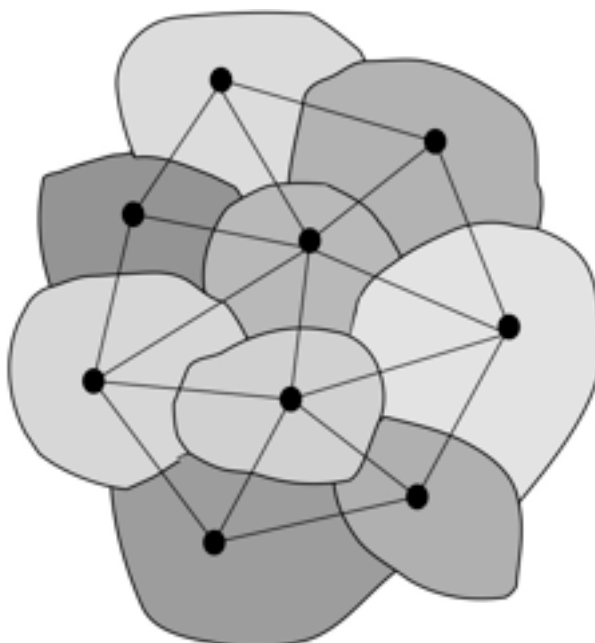


Image 4 : interprétation artistique du Grand Rebond ( © Francesca Vidotto )

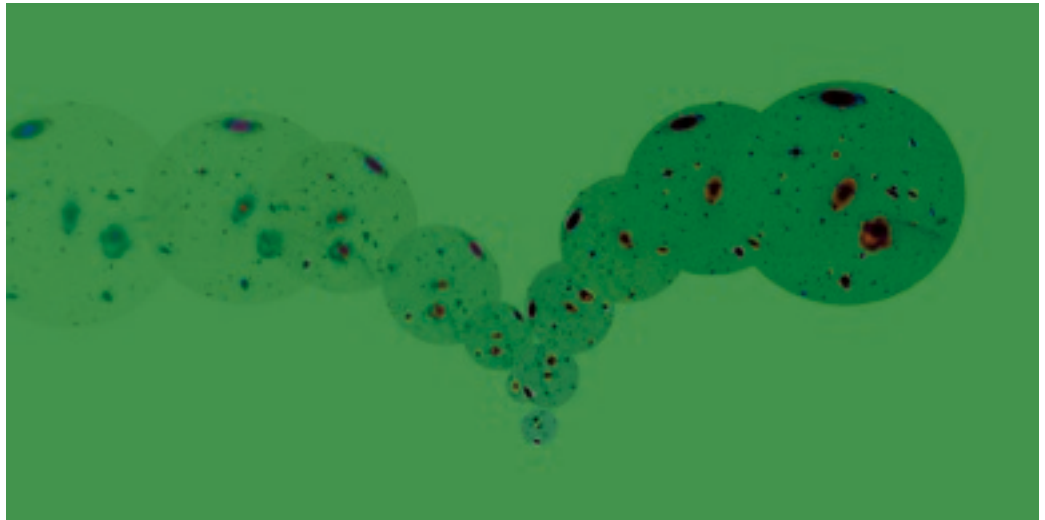


Image 5 : interprétation artistique du Grand Rebond ( © Luca Pozzi )

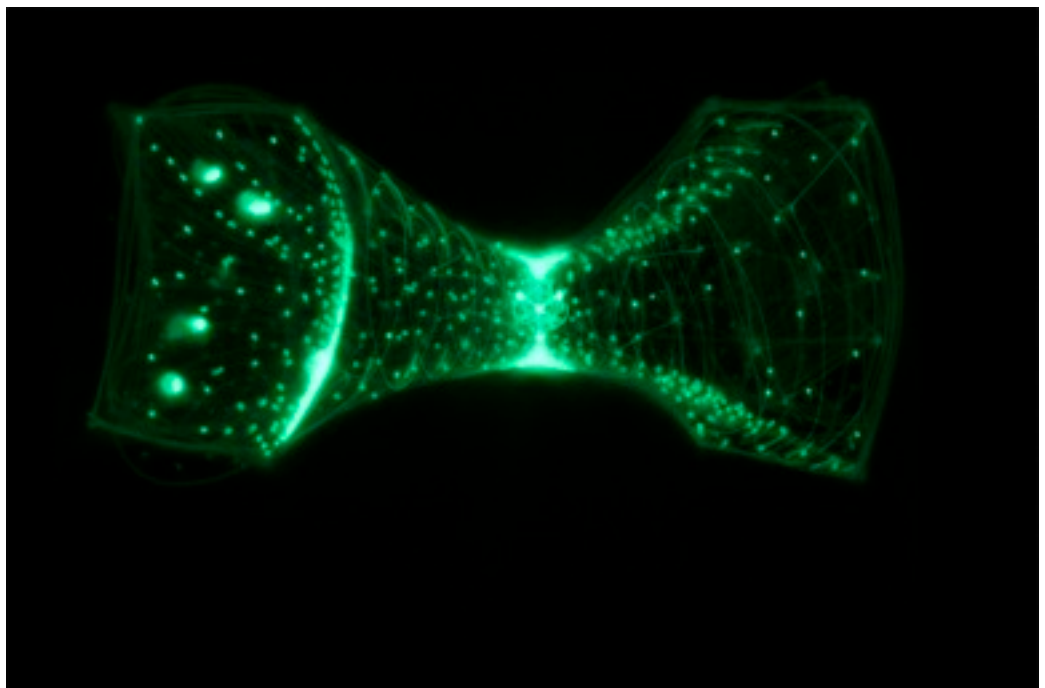




Image 6 : l'étude de la nature profonde de l'espace et de l'univers est passionnant, on s'immerge totalement... l'esprit et le corps !

