

Collège de physique et de philosophie Séance du 25 mars 2013

Bernard d'Espagnat. Nous accueillons aujourd'hui Carlo Rovelli qui a gentiment accepté de venir nous parler de son livre *Quantum Gravity*.

Inutile de présenter Carlo Rovelli, qui d'ailleurs est presque un habitué de nos séances. Je lui cède donc la parole sans plus tarder.

Section I – Exposé sur « La Gravité Quantique »

Carlo Rovelli Je vous remercie de me donner l'opportunité de parler de gravité quantique. Je ne pense pas que vous attendiez de ma part une somme de détails techniques et mathématiques sur le sujet. Je vais plutôt vous parler de la façon conceptuelle dont on peut élaborer une théorie quantique de l'espace-temps.

J'ai déjà eu l'occasion, avec Matteo Smerlak, de vous présenter l'interprétation relationnelle la mécanique quantique. L'interprétation relationnelle de la mécanique quantique et la théorie quantique de l'espace-temps sont deux sujets liés. Parler aujourd'hui de gravité quantique, me permet d'éclairer les relations multiples entre les deux thèmes.

En premier lieu, mes propos sur l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique étaient partiellement motivés par ce que nous avons compris sur le monde physique avec la relativité générale, à partir d'Einstein en 1915 et ensuite avec les travaux d'interprétation qui ont suivi. En deuxième lieu, plusieurs questions ont émergé lors de mon exposé sur la mécanique quantique relationnelle. Comment penser cette théorie dans l'espace-temps ? Comment la penser dans le cadre de la théorie quantique des champs, ou dans l'espace-temps quantique ? Mon intervention d'aujourd'hui sur la théorie quantique de l'espace-temps permettra d'y revenir, l'objectif étant de vous procurer une image physique et de vous montrer comment mécanique quantique relationnelle, relativité et quantification de l'espace-temps communiquent.

1. La mécanique quantique relationnelle

Après une longue période de gestation, avec les travaux de Planck et Einstein en 1905 (découverte de la "granularité" du champ électromagnétique) puis ceux de Copenhague, la mécanique quantique naît en 1927 avec les travaux de Heisenberg d'une part et ceux de Schrödinger d'autre part – deux démarches indépendantes à partir desquelles ensuite Dirac va construire la structure formelle générale de la théorie.

Or, pour Heisenberg, la mécanique quantique parle de "tables de nombres". Pour Schrödinger, d'une "onde dans l'espace", qui va rapidement devenir une onde dans l'espace de configuration. Dans un certain sens, ces deux façons d'envisager la mécanique quantique existent toujours. Leur différence ne vient pas d'une dichotomie entre une interprétation réaliste et une interprétation opérationnelle. Une interprétation réaliste est possible pour chacune d'entre elle, de même que l'est une interprétation opérationnelle.

Je souhaite dire ici quelques mots de Heisenberg, car c'est de lui qu'il faut partir pour comprendre les travaux relatifs à la gravité quantique et à l'interprétation relationnelle. Heisenberg raconte que son intuition sur la théorie lui est venue un soir quand il est sorti de nuit se promener dans un parc, à Copenhague. Tout est très sombre, sauf pour la présence de quelques lampadaires. Heisenberg note la présence d'un autre promeneur, qui disparaît et réapparaît selon qu'il s'éloigne ou passe à proximité d'un lampadaire. Heisenberg sait que ce

promeneur ne disparaît pas réellement quand il est dans la pénombre. Il peut d'ailleurs l'imaginer en train de marcher même quand il ne le voit pas. Pour autant, il se demande s'il peut avoir la certitude qu'il pourrait penser la même chose pour les très petits objets : est-il certain qu'un électron que l'on voit par intermittence quand il interagit avec d'autres systèmes physiques, continue à exister quand on ne le voit plus ? Les tables de nombres décrivent uniquement l'apparence de l'électron à certains endroits, quand il est en interaction avec quelque chose d'autre, par exemple la lumière.

D'où la suggestion que je formule, selon laquelle il est peut-être plus facile de décrire la réalité si l'on abandonne une partie du réalisme classique pour se concentrer sur la description des interactions possibles d'un système avec un autre. C'est l'idée centrale de la mécanique quantique relationnelle : on ne parle pas du monde dans l'espace, mais uniquement d'événements quantiques qui interviennent dans des interactions : « *the best description of reality is the way things can affect one another* ».

Mieux vaut décrire la réalité en termes d'interactions et non d'objets, donc en se concentrant sur un processus et non sur des entités. Les processus sont des faits, c'est-à-dire ce qui se passe. La réalité est l'ensemble des faits. Par ailleurs, chaque processus est délimité, avec des bords. Les états décrivent ce qui se passe aux bords des processus – c'est-à-dire comment ce qui s'y passe interagit avec l'extérieur. Pour citer Nelson Goodman (1951), « un objet est un processus monotone ».

Catherine Pépin. Pouvez-vous définir ce qu'est le bord d'un processus ?

Carlo Rovelli. J'y reviendrai de façon plus détaillée en parlant de gravité quantique. Mais pour anticiper un exemple, au Cern un processus c'est l'ensemble des particules qui entrent dans la collision et qui en sortent, plus la région de l'espace-temps dans laquelle la collision se passe. En mécanique quantique, c'est la transition entre l'état initial et l'état final. Ou encore la façon dont le processus interagit, affecte ou influence quelque chose d'autre à l'extérieur.

Par ailleurs, une caractéristique propre de la mécanique quantique est la *discreteness* – dont j'ignore la traduction en français.

Bernard d'Espagnat. Il n'y a pas d'équivalent de ce terme en français. Pris dans le sens qui est ici le nôtre, impliqué par exemple dans l'expression « spectre discret », l'adjectif « discret » n'a – hélas ! – pas de substantif associé.

Hervé Zwirn. Peut-être faudrait-il utiliser le terme « discrétitude » ?

Carlo Rovelli. J'ai parfois l'impression que lorsqu'on parle de mécanique quantique, on n'accorde pas toute son importance à cette notion de « discrétitude », qui en est pourtant un aspect central. En effet, la mécanique quantique décrit des spectres discrets, c'est-à-dire des choses qui arrivent de façon discrète. Certes, cela n'explique pas tout.

Bernard d'Espagnat. Les spectres discrets ne sont pas vraiment des choses qui arrivent.

Carlo Rovelli. En effet. Mais l'aspect discret est quand même universel, et concerne l'interaction, dans le sens suivant : ce qui est discret est l'action. L'action est la mesure du volume des régions de l'espace de phase. Ce qui caractérise la mécanique quantique, c'est que l'on ne peut pas localiser un système exactement dans l'espace de phase. Une interaction permet uniquement de distinguer un nombre fini d'états orthogonaux, d'états différents. Dans

la théorie classique, le nombre de possibilités est infini. En revanche, dans la théorie quantique, ce nombre est limité. L'espace de phase code ce que l'on sait sur le système. Si le système est dans une certaine région de l'espace de phase, on peut caractériser dans combien d'états différents il peut être. L'une des caractéristiques de la mécanique quantique est que cette information est toujours limitée, finie. Si l'information est entendue au sens du nombre d'états différents dans lesquels les choses peuvent être (Shannon), la mécanique quantique donne une structure discrète de l'information que les systèmes physiques peuvent avoir.

Cette structure discrète est fondamentale – et pourtant, on lui porte souvent peu d'attention. C'est une des raisons pour laquelle je considère qu'une lecture réaliste de la fonction d'onde nous met sur une fausse piste. Une particule quantique a *moins* d'information qu'une particule classique. On ne peut pas imaginer que la réalité soit caractérisée par plus de nombres que dans sa description classique, quand l'information est mineur. La fonction d'onde dit moins qu'un point dans l'espace de phase, et non pas plus.

2. La relativité générale

En 1915, Einstein a l'idée extraordinaire que le champ gravitationnel est la même chose que l'espace-temps de Newton. Il réinterprète donc cette étrange entité qu'est l'espace de Newton – qui deviendra par la suite l'espace-temps – comme la description d'un champ physique quand on néglige les aspects dynamiques. C'est une simplification dramatique du monde. Au lieu d'avoir un espace avec des champs (et des particules) dans cet espace, on a simplement des champs – le champ gravitationnel n'étant que l'un d'entre eux – qui, dans un certain sens, vivent les uns sur les autres. C'est, à mes yeux, le cœur de la physique d'Einstein. Tout en découle. Les équations d'Einstein sont les équations de ces champs.

Dès lors, la notion de localisation, c'est-à-dire la signification de la question « où ? », change complètement. Auparavant, une particule était localisée par rapport à l'espace. Après la théorie de la relativité générale, l'espace comme conteneur du monde n'existe plus et il n'y a que des champs. Les choses peuvent uniquement être localisées les unes par rapport aux autres. La relativité générale montre que les positions ne peuvent être exprimées que par rapport à un champ. La position est donc définie pour chaque entité dynamique seulement en relation aux autres. C'est l'aspect relationnel de la relativité générale : la localisation dans l'espace et dans le temps est relative aux choses les unes par rapport aux autres.

3. La théorie quantique des champs

Dans la théorie quantique des champs, les champs se comportent à petite échelle comme s'ils étaient des ensembles de particules (les photons, par exemple). Cette structure est décrite de façon mathématique par l'espace de Hilbert (espace de Fock), avec un ensemble (algèbre) d'opérateurs et des règles sur les probabilités de transition (règles de Feynman). Ces règles montrent comment les états évoluent dans le temps, avec des liens entre une interaction initiale et une interaction finale. Les états décrivent la position des particules (les quanta du champs) par rapport à l'espace (ou bien leurs impulsions).

4. La gravité quantique

Comment faire la théorie quantique non pas d'un champ dans un espace, mais de l'espace lui-même ? D'un point de vue mathématique, la granularité qui caractérise le champ

électromagnétique est la même que celle du champ gravitationnel. Dans l'espace de Hilbert qui caractérise les états quantiques du champ électromagnétique, les opérateurs ont un spectre discret. Il en est de même pour le champ gravitationnel : on peut construire un espace de Hilbert avec des opérateurs qui ont un spectre discret. Ces opérateurs sont ceux qui décrivent le champ gravitationnel – qui est, selon Einstein, la métrique de l'espace-temps, c'est-à-dire la quantité qui détermine les longueurs, les aires et les volumes. Dans la théorie quantique les opérateurs correspondent aux longueurs, aux aires et aux volumes. On peut les écrire, avec une algèbre opérateurs, et on peut donc en étudier le spectre. Il apparaît que le spectre des quantités, en particulier des volumes, est discret. Il y a donc un ensemble de volumes discrets, exactement comme pour l'énergie des photons. Le volume des morceaux d'espace est discret. L'image est donc celle d'un ensemble de quanta d'espace.

La théorie de la gravitation quantique à boucles définit un espace de Hilbert, une algèbres d'opérateurs et des amplitudes de transition. L'espace de Hilbert a des états, qui n'ont pas de position par rapport à un espace (ou d'impulsion). En effet, il n'existe aucune position par rapport à laquelle les quanta d'espace peuvent être localisés, car ils sont eux-mêmes des espaces. Cela étant, il existe un certain nombre de quanta d'espaces, des volumes associés et une information selon laquelle les quanta sont à proximité les uns des autres. L'espace d'états est un espace de quanta dans leur relation de continuité les uns avec les autres. Des opérateurs correspondent à la métrique (dimensions, aires, etc.) et il existe des amplitudes de transition.

Bernard d'Espagnat. Nous nous attendions à ce que vous nous disiez que, de même que les photons sont les quanta du champ électromagnétique, en quantifiant le champ gravitationnel on tombe sur des particules appelées gravitons. Or ce n'est pas cela que vous dites.

Carlo Rovelli. Non. Nous nous attendions à une structure discrète, mais dans un sens différent.

L'intuition de base remonte aux années 1930. Quand Heisenberg a écrit les relations d'indétermination, Landau a fait une erreur en en déduisant qu'à cause de la mécanique quantique on ne peut pas mesurer une composante du champ électrique en un point. Bohr s'est immédiatement aperçu que c'était une erreur. Il a publié un papier avec Rosenfeld, bien connu, sur la mesurabilité des champs, dans lequel il montre que les relations d'indétermination d'Heisenberg n'empêchent pas, en principe, de mesurer le champ électrique en un point d'espace-temps. Il semblait alors que la question était close. Eh bien non !

Un jeune collègue de Landau a refait l'analyse de Bohr, pour le champ gravitationnel. Il s'est alors aperçu qu'elle ne fonctionnait plus : il n'est pas possible de mesurer le champ gravitationnel dans un point d'espace-temps. Pour le dire de façon simple : mesurer une chose très petite nécessite de concentrer la position dans une région très petite – ce qui entraîne une importante fluctuation de l'impulsion, donc beaucoup d'énergie. Or s'il y a beaucoup d'énergie, il faut beaucoup de masse, donc l'espace-temps se courbe et un horizon se forme. C'est la relativité générale. Au moment où l'horizon devient plus grand que la dimension que l'on veut observer, on est perdu : la région à observer tombe dans son propre trou noir. Cela provoque une limite à la mesurabilité à petite échelle.

L'intuition de base derrière la gravité quantique est qu'il existe une longueur minimale au-delà de laquelle on ne peut pas aller. C'est cette longueur minimale que l'on retrouve dans la quantification des spectres discrets du volume. Cela n'a rien à voir avec les gravitons. En effet, dans les gravitons, on oublie tout cela. On oublie la structure non-linéaire de la relativité générale. Les gravitons sont une approximation à grande échelle, comme les phonons. Nous nous attendons à ce que les ondes de gravitation soient quantifiées comme les photons, mais l'approche des gravitons n'est pas bonne à petite distance, c'est-à-dire à très haute énergie ou à très petite longueur d'onde. Cette notion convient uniquement aux longues distances. A

petite longueur d'onde, à grande énergie, la structure discrète de l'espace à l'échelle de Planck n'est pas capturée par la notion de graviton.

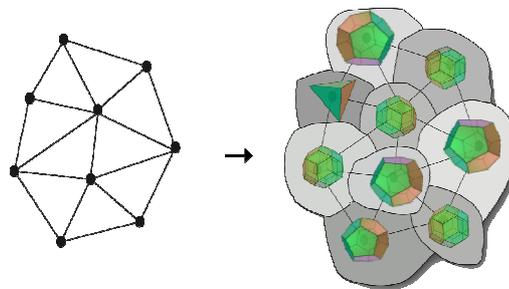
Hervé Zwirn. Quel serait l'équivalent ? Une masse de Planck dans un volume de Planck qui donne un trou noir, au-delà de l'horizon duquel on ne peut pas aller ?

Carlo Rovelli. Oui. C'est un problème d'algèbre. C'est le moment où l'horizon devient plus grand que le Δx de ce qu'on veut mesurer.

Jean Petitot. En plus, les gravitons sont conceptuellement contradictoires. En effet, ils sont associés à un champ défini sur l'espace-temps classique.

Carlo Rovelli. En effet. Pour pouvoir les introduire il faut oublier la relativité générale, c'est-à-dire le fait que le champ de gravité est la même chose que l'espace-temps

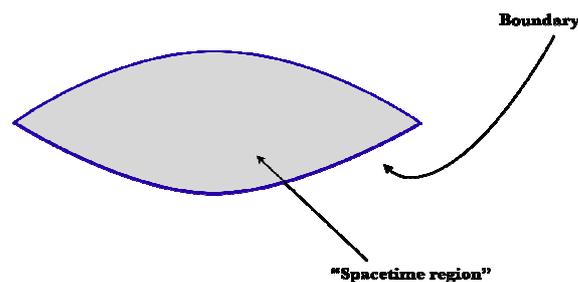
L'espace de Hilbert est déterminé par un graphe arbitraire. Des opérateurs sont définis dans l'espace de Hilbert, et donnent une interprétation géométrique au graphe.



Les états vivent donc sur un graphe arbitraire, chaque nœud étant un "quanta d'espace". La théorie de la gravité quantique montre de façon précise que bien que les opérateurs soient associés aux volumes, aux aires et aux angles, ils ne commutent pas entre eux. Toutes les quantités nécessaires pour définir la géométrie ne commutent pas entre elles, la géométrie reste donc floue. Les quanta d'espace ont des valeurs propres discrètes, mais restent flous. La chose primordiale à retenir est que ces quanta du champ gravitationnel ne sont pas *dans* un espace, mais forment *eux-mêmes* l'espace.

J'en viens aux amplitudes de transition. Les amplitudes de transition montrent comment passer d'un état initial à un état final.

On peut imaginer une région de l'espace-temps avec un bord, les états étant sur le bord de cette région de l'espace-temps.



Comment calculer les probabilités de transition ? Où est l'espace ? Où est le temps ? L'idée centrale est que pour décrire par exemple une collision de particules il faut inclure dans la description aussi la région même d'espace-temps où la collision se passe. Pour calculer ce qui se passe il faut connaître l'état du champ aux bords de cette région – y compris l'état du champ gravitationnel, qui est la géométrie du bord, et donc la métrique, donc les distances et le temps entre les particules entrantes et sortantes. Il n'est donc pas besoin de dire à quel moment et où la collision se passe, car la distance entre le passé et le futur est précisément l'état du bord du champ de gravité. Tout ce dont on a besoin, c'est de connaître les amplitudes de transition entre l'état initial et l'état final. Il n'est besoin d'aucune autre information spatiale ou temporelle.

Catherine Pépin. C'est cela, l'intuition selon laquelle les états sont sur les bords ?

Carlo Rovelli. Oui. C'est la raison pour laquelle les états ne sont pas localisés et la théorie ne précise ni de variable d'espace, ni de variable de temps. Tout ce que l'on a besoin de connaître, c'est le champ gravitationnel sur le bord. Le champ gravitationnel est lui-même l'information sur les distances et le temps passé.

Hervé Zwirn. Le bord est un état du champ gravitationnel, lequel incorpore en lui-même l'espace et le temps.

Carlo Rovelli. Exactement.

Hervé Zwirn. Une transition entre deux états est donc une transition entre deux états d'espace et de temps.

Carlo Rovelli. Oui.

Hervé Zwirn. Dès lors, comment interpréter une probabilité de transition dans le temps ? Comment cela se représente-t-il intuitivement ?

Carlo Rovelli. Deux interactions sont possibles, avec une amplitude (nombre complexe) associée. On peut donc comparer deux probabilités – une plus probable et une moins probable.

Hervé Zwirn. Il y a donc une probabilité de passer du temps T_0 au temps T_1 , mais aussi au temps T_2 ou au temps $-T_2$?

Carlo Rovelli. Oui, mais la comparaison des probabilités est possible uniquement pour des choses comparables. Par ailleurs, il est intéressant de noter que le temps est partie du champ, donc de la variable elle-même.

Hervé Zwirn. Que se passe-t-il si l'on considère uniquement la théorie du champ gravitationnel, sans rien d'autre dedans ?

Carlo Rovelli. C'est la même chose.

Hervé Zwirn. Imaginons qu'il n'y ait que le champ gravitationnel, sans particule ou quoi que ce soit d'autre. Quelle est l'interprétation intuitive de ces probabilités de transition d'état à état ?

Carlo Rovelli. C'est la même chose, car le champ gravitationnel est compliqué. Imaginez un état de bord, avec du temps qui se passe et le passage de deux ondelettes de

gravité qui interagissent. En principe, on n'a pas besoin de matière pour faire de la théorie. Même si, évidemment, c'est plus simple quand il y en a !

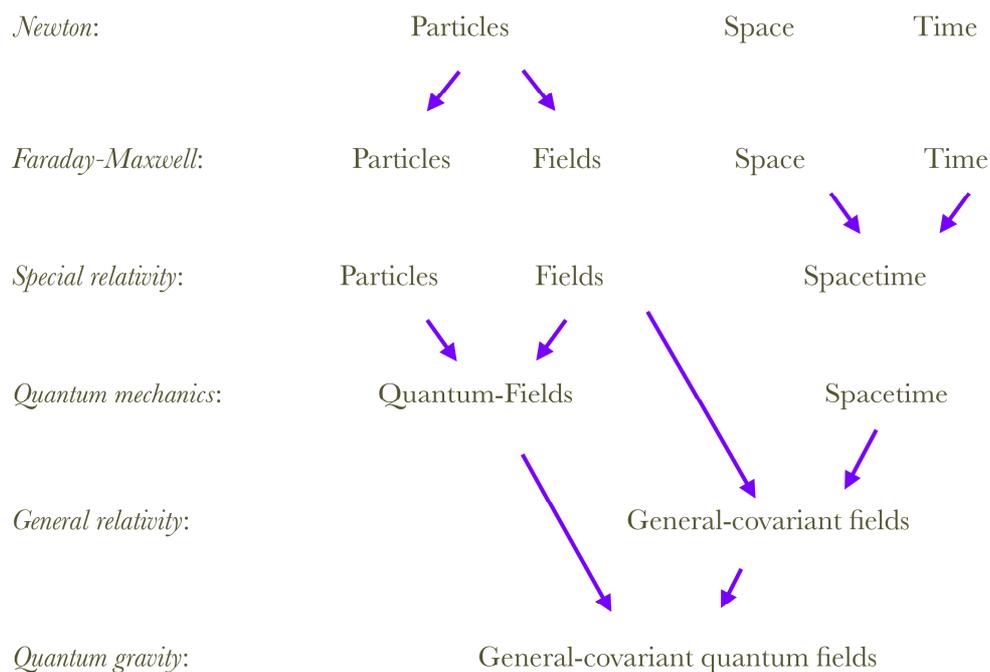
En résumé, la présence de structures discrètes se traduit dans l'existence de quanta d'espace. La probabilité se traduit dans les amplitudes de transition entre des configurations à l'intérieur du champ gravitationnel. Les processus eux-mêmes sont les régions spatiales. Les états sont sur les bords et sont des régions spatiales uniquement.

Un point reste encore peu clair, mais constitue à mes yeux l'aspect le plus intéressant. Je souhaite donc vous en parler ici. D'un côté, il y a l'idée que la mécanique quantique parle d'interactions. Elle montre la façon dont les systèmes s'influencent l'un l'autre, interagissent entre eux. De l'autre côté, il y a le relationnisme typique de la relativité générale, pour lequel la localisation des choses est relationnelle. Finalement, c'est du Descartes ou du Aristote : pour Descartes, il n'y a pas d'espace-temps, mais uniquement une position relative des choses. Et il existe clairement une relation entre les deux : entre l'aspect relationnel de la mécanique quantique et l'aspect relationnel de la relativité générale. En effet, les choses peuvent interagir si elles se touchent. Et, dans le même temps, que signifie se toucher sinon être en interaction ? Comment peut-on voir que deux choses sont à côté l'une de l'autre sinon en voyant qu'il existe une interaction entre elles ?

Finalement, être en interaction est la même chose qu'être à côté dans l'espace-temps. La structure de systèmes qui interagissent l'un l'autre est très étroitement liée à celle de l'espace-temps. Ces idées ne sont pas encore très claires !

5. En conclusion

La physique se simplifie, dans un certain sens.



Pour Newton, il y avait des particules qui bougent un certain temps dans l'espace. Faraday et Maxwell ont introduit les champs : la matière, ce ne sont pas seulement les particules, mais les particules et les champs. Faraday a écrit de très belles pages, dans lesquelles il montre que les champs sont des choses réelles. Ensuite, avec la relativité restreinte, il a fallu décrire l'espace et le temps de façon plus ramassée, en espace-temps. Plus tard, la mécanique quantique, en particulier celle des champs, montre qu'on peut décrire les particules comme des excitations de quanta de champs. On se retrouve donc avec des champs quantiques dans l'espace-temps. Mais avec la relativité générale, on se rend compte que l'espace-temps n'est finalement qu'un champ : le champ gravitationnel. Au final, avec la gravité quantique, on se retrouve donc avec une seule entité et rien d'autre : un champ quantique en covariance générale, qui ne vit donc pas dans l'espace mais sur lui-même.

La physique fondamentale contemporaine nous dit que la meilleure ontologie pour chercher à décrire la nature étant donné ce que l'on sait est de penser qu'un objet est un champ quantique en covariance générale, qui ne vit pas dans l'espace mais fait partie d'un ensemble de champs quantiques vivant sur eux-mêmes et que les quanta tissent la structure de l'espace même.

Voilà posé un cadre général, certes pas encore toujours très clair, dans lequel je pense qu'il convient de réfléchir pour tenter de rapprocher la mécanique quantique et la relativité générale. Pour finir, je rappelle qu'une théorie devient une vraie science une fois que ses prédictions sont vérifiées. En l'occurrence, nous n'en sommes pas encore là.

Bernard d'Espagnat. Merci infiniment.

Section II – Discussion

Catherine Pépin. Quelles sont les difficultés que rencontre cette théorie pour devenir prédictible ? Une des difficultés vient-elle du trop grand nombre de variables ? Ou bien s'agit-il simplement de difficultés techniques ?

Carlo Rovelli. J'identifie trois sources de difficulté. La première est que ces équations sont très belles, mais qu'il est très difficile de les utiliser pour effectuer des calculs. Il s'agit

donc d'une difficulté technique. Une deuxième source de difficulté, peut-être plus importante que la première, vient du peu d'accès à des mesures dans lesquelles la gravité quantique devient importante. Nous espérons beaucoup, à cet égard, de la cosmologie. Mais c'est un long parcours que de partir des équations fondamentales pour écrire la cosmologie primordiale. Beaucoup de gens y travaillent, dont Aurélien Barrau en France. Cette deuxième difficulté est donc technique ou de mesure. Enfin, la troisième source de difficulté vient d'un manque. Tout est fini, la limite classique étant celle de la relativité générale. Mais il manque un élément : les amplitudes de transition sont calculées ordre par ordre, dans une certaine expansion, mais nous sommes loin d'être sûrs que l'équation converge, au sens physique. C'est la difficulté la plus importante, car c'est une difficulté de définition de la théorie elle-même.

Hervé Zwirn. Pour reprendre ton schéma sur la simplification de la physique, nous arriverons progressivement à un état où il n'y a que des champs quantiques covariants. C'est vrai pour la gravité, mais pour toutes les autres interactions.

Carlo Rovelli. Absolument.

Hervé Zwirn. Cela donne une théorie très esthétique, avec une homogénéité des types de champs. Mais comment expliques-tu le fait que, d'une certaine manière, la gravité joue un rôle un peu spécial par rapport aux autres interactions, puisque c'est elle qui donne lieu à l'espace-temps dans lequel sont décrites toutes les autres interactions ? Pourquoi n'y a-t-il pas de symétrie complète entre tous les champs ? Est-ce dû à un spin différent ? Y a-t-il une explication ou bien ma question est-elle idiote ?

Carlo Rovelli. Ta question n'est pas idiote du tout, mais elle se pose en mécanique classique autant qu'en mécanique quantique. Une fois qu'on a la relativité générale, tout devient covariant. Il n'y a que des champs covariants. Ils sont tous au même niveau. Dès lors, la question se pose de savoir en quoi le champ de la gravité est différent des autres. Je n'ai pas de réponse convaincante. Cela étant, le monde que nous voyons est bien décrit par une certaine action, dans laquelle le champ gravitationnel interagit avec tout. La théorie reste cohérente si l'on retire certains éléments, à l'exception du champ de gravité. Dans l'action d'Einstein, il n'y a pas de champ électromagnétique. Mais dans l'action du champ de Maxwell, il y a la métrique. C'est cette interaction universelle avec tout qui diffère.

Hervé Zwirn. Le champ gravitationnel joue réellement un rôle un peu particulier.

Carlo Rovelli. Oui. Même si je suis tenté de ne pas exagérer ce rôle. Je pense que nous sommes loin d'avoir tout compris.

Bernard d'Espagnat. C'est passionnant. Dans la description que vous venez de faire de la physique, que faut-il penser de notre représentation classique ? Dans ma manière de comprendre la mécanique quantique, sans variables cachées etc., je considère que cette dernière ne me dit pas comment les choses sont, mais décrit comment nous les voyons. Pour vous, ce n'est pas tout à fait pareil puisque vous dites qu'elle décrit les « choses », les systèmes, comme que les autres systèmes les voient. Dans les deux cas, il y a du relatif. Mais dans ma vision des choses on peut se dire que puisque la vérité est la physique quantique, la classicalité n'est qu'une apparence, qui fonctionne très bien maintenant pour tout ce qui est banal mais important pour nous. Mais puisque ce n'est qu'une apparence, est-ce qu'elle fonctionnait aussi bien tout près du Big Bang ? Peut-être qu'à ce moment-là, l'état de

l'univers était quantique et que nous ne pouvons pas l'interpréter *maintenant* comme ayant été quasi classique *alors*. Cette question a été étudiée et je crois comprendre que certaines théories considèrent qu'il semble que nous puissions interpréter l'état de l'univers comme ayant été quasi classique, donc susceptible d'une description par concepts non-mathématiques, même en des temps très éloignés. Votre théorie dit-elle quelque chose là-dessus ?

Carlo Rovelli. Une réflexion est en cours sur ce point, dans la théorie de la gravité quantique en boucle. Dans l'espace de Hilbert de cette théorie, les états possibles sont nombreux. Certains ont des caractéristiques semi-classiques. Ce sont les états cohérents. Nous savons qu'ils décrivent bien les choses, comme en mécanique quantique. La structure formelle est d'ailleurs celle de la mécanique quantique. L'approximation semi-classique est-elle la bonne pour décrire ce qui se passe près du Big Bang ? Je pense que non. En effet, au moment où la densité d'énergie devient de l'ordre de la densité d'énergie de Planck, les fluctuations de la métrique sont telles qu'on ne peut plus parler d'une approximation semi-classique. En principe, on peut encore utiliser la théorie des états et des transitions, mais il n'y a pas de trajectoire. De nombreux calculs ont été effectués, qui ont donné lieu à des indications contraires : avec une certaine approximation (en prenant l'univers homogène et en observant l'évolution de son facteur d'échelle), on arrive à reconstruire une métrique presque classique. Pour ma part, je n'en suis pas convaincu par ces calculs et je pense qu'il reste encore beaucoup à comprendre.

En résumé, je ne sais pas vous répondre ! Dans mon intuition, l'espace-temps devient complètement non classique au Big Bang.

Bernard d'Espagnat. D'après votre intuition, on ne peut donc pas se représenter ce qui se passait plus ou moins près du Big Bang. Les images que nous essayons de nous en faire, et qui sont aujourd'hui publiées dans les journaux, ne tiennent pas.

Carlo Rovelli. En effet.

Alexis de Saint-Ours. Dans votre livre, vous expliquez que votre ouvrage porte autant sur la gravité quantique que sur le temps. En effet, une partie de votre recherche consiste à essayer de montrer comment dans un formalisme généralement covariant, on travaille avec cette physique qui, précisément, n'a pas de temps. Pourriez-vous rappeler pourquoi vous pensez qu'au niveau de l'échelle de Planck, il n'y a pas de bonnes horloges ? Est-ce toujours votre position aujourd'hui ?

Par ailleurs, cette vision d'une physique sans temps dans un formalisme généralement covariant est relativement bien acceptée par la communauté quantique, sauf par Lee Smolin qui ne cesse d'affirmer que le temps est réel. Quel est votre sentiment sur sa position et sur ce sujet ?

Carlo Rovelli. . Dans mon livre, j'ai réécrit la mécanique classique dans un langage où il n'est pas besoin d'aborder la notion de temps, avant de montrer que ce langage est nécessaire pour traiter de la relative générale et plus encore la gravité quantique. Dans les probabilités de transition, il n'y a pas de « T » ou d'équation de Schrödinger. Où est le temps ? Le temps est dans l'état du bord. L'affirmation selon laquelle « à l'échelle de Planck il n'y a pas de bonnes horloges » est de l'ordre de l'intuition, mais je pense qu'elle est exacte. Si on oublie la gravité, on peut décrire un système physique et, à côté, une horloge qui mesure le temps qui passe – sans interaction entre les deux. On peut donc utiliser l'horloge pour caractériser les différents moments. Dès lors qu'il y a de la gravité, les masses changent la

métrique, donc la façon dont passe le temps. Pour le dire autrement, l'horloge est influencée par la gravité. Il faut donc la décrire en même temps que le reste du champ gravitationnel. Si le champ gravitationnel est faible et classique, on peut l'oublier. Mais ce n'est pas possible s'il est fort et quantique. Mettre en place cette façon de voir la mécanique classique et quantique sans avoir besoin du temps est un long parcours. Finalement, j'ai fait du collage, en quelque sorte. En effet, Souriau avait déjà un formalisme qui le permettait. Les idées étaient là. J'ai repris des formules existantes. En tout cas, je pense que c'est sincère.

Quant à Lee Smolin, c'est un très bon ami et que j'estime beaucoup – mais je pense qu'il se trompe ! Il me semble qu'il confond plusieurs sujets. Tout d'abord, l'absence de temps ne veut pas dire qu'il n'y a pas un temps local. Cela veut simplement dire qu'on ne peut pas prendre une variable externe T pour tout l'univers. Je ne dis pas qu'il n'y a pas de temps, mais qu'il n'y a pas un temps avec toutes les caractéristiques. Ensuite, je pense que Lee Smolin est sous l'influence de Roberto Unger. Ce philosophe, qui enseigne à Harvard, promeut l'idée que tout évolue dans le temps. Pour lui, même les lois physiques n'existaient pas à un certain moment. Il considère par exemple que les lois de la chimie, qui sont des lois scientifiques, n'existaient pas avant que les atomes se forment, ou encore que les lois de la biologie n'existaient pas avant la naissance de la vie. Tout cela est très beau, mais n'a rien à voir avec la description de l'échelle de Planck. Bien sûr, nous vivons dans le temps. Notre connaissance est dans le temps. Notre savoir est limité. Mais cela n'a rien à voir avec ce que nous appréhendons dans la structure physique fondamentale. Je pense qu'il y a là un mélange des genres.

Alexei Grinbaum. En écoutant votre intervention, j'ai pensé que la théorie de la gravité quantique ressemblait dangereusement à la philosophie des processus de Whitehead. Il me semble qu'il serait peut-être judicieux de prendre quelques précautions pour se démarquer de cette vision, car à mon avis elle ne se situe pas au bon niveau d'abstraction. Il faudrait clairement distinguer votre usage de mots comme « processus », mot qui avait aussi très marqué Whitehead, ainsi que votre point de vue philosophique, des siens.

Bertrand Saint-Sernin. Ou du moins des héritiers de Whitehead, dirais-je. Einstein disait de l'ouvrage de Whitehead sur la théorie de la relativité générale était très juste mais d'une complication qui lui paraissait excessive.

Alexei Grinbaum. Ce livre n'est pas un chef-d'œuvre, c'est certain.

Alexis de Saint-Ours. Le terme de processus peut aussi faire penser à Simondon.

Alexei Grinbaum. Dans ce cas précis, je ne pense pas.

Jean Petitot. La mécanique quantique est très loin de Simondon !

Alexei Grinbaum. En tout cas, certains de vos termes sont dangereusement marqués comme whitheadiens.

Carlo Rovelli. Mes considérations initiales étaient vagues, mais je note votre remarque. Je n'ai pas de façon précise de les décrire. Je voulais simplement souligner que je ne parlais pas d'objets, mais de processus.

Alexei Grinbaum. Autant les mots « relation », « relationnel » ou « interaction » caractérisent plutôt la mécanique quantique relationnelle, autant les mots « process » ou « processus » sont un peu marqués.

Bertrand Saint-Sernin. Chez Whitehead, c'est le terme de relation qui prédomine. En effet, pour lui, le progrès dans les sciences consiste à substituer à des disciplines indépendantes des disciplines qui aient entre elles des relations.

Alexei Grinbaum. Certes. Cela étant, l'usage du mot « relation » dépasse largement Whitehead, tandis que le mot « processus » est assez whiteheadien.

Bertrand Saint-Sernin. Ou du moins il est marqué des héritiers de Whitehead.

Hervé Zwirn. Tu parles d'une théorie dans laquelle le temps n'est pas un paramètre de départ, mais émerge comme une trajectoire de la métrique. C'est une manière de définir le temps, qui n'est pas une variable initiale. Dans les théories des cordes, certaines manières de faire des brisures de symétrie aboutissent à des structures dans lesquelles il n'y a pas de temps. C'est du moins souvent présenté comme cela. Je n'ai jamais bien compris ce que cela voulait dire et je voudrais savoir comment tu fais le lien entre la théorie quantique à boucles et ce qui est l'équivalent, c'est à dire les brisures de symétrie dans les théories des supercordes, où les structures géométriques finales donnent des modèles d'univers dans lesquels le temps n'apparaît pas du tout. Y a-t-il un lien entre les deux ? Comment cette opposition se comprend-elle mathématiquement ? Que signifie un univers dans lequel il n'y a pas de temps du tout ?

Carlo Rovelli. La théorie des cordes est une théorie perturbatrice d'un espace-temps donné, qui a des choses à voir avec celle que je viens de présenter. Je pense notamment à la structure des dimensions, qui est la même. Il existe une structure fondamentale. Dans un cas comme dans l'autre, il ne s'agit pas d'une théorie des champs au sens usuel. En revanche la théorie que je vous ai présentée est une théorie totale, ce qui n'est pas le cas de la théorie des cordes. Mais je ne m'oriente pas encore bien dans ce grand monde des possibilités. C'est comme un poisson que l'on ne parvient jamais à attraper ! La théorie des cordes vit sur l'espoir qu'il existe un tout réuni. Mais personne n'est capable de l'écrire. Elle comporte plus de calculs mathématiques, mais moins de clarté quand à la structure conceptuelle sur laquelle elle se fonde.

Hervé Zwirn. Existe-t-il en théorie de la gravité quantique à boucle un équivalent des innombrables possibilités de types d'univers qui peuvent coexister en théorie des cordes ? Imaginons que la théorie des cordes soit vraie et que la multiplicité d'univers différents qu'elle est capable de décrire existe, comme certains le prétendent – dans un sens réaliste. Comment la gravité quantique à boucle s'adapte-t-elle à cette situation ?

Carlo Rovelli. Prenons la chrono-dynamique quantique. C'est une théorie cohérente des interactions fortes. C'est une très belle théorie. Mais c'est une théorie fermée. On peut faire de la théorie quantique des interactions fortes en oubliant qu'il y a des interactions à électrons faibles ou de la gravité, par exemple. Il n'est donc pas nécessaire, pour comprendre les interactions fortes, de faire une théorie unifiée de tout. De la même façon, je pense qu'il n'est pas nécessaire de faire une théorie unifiée de tout pour comprendre les interactions gravitationnelles. Loin de moi l'idée de dire que la théorie quantique de la gravité est la fin de notre connaissance du monde. Mais je pense que nous ne sommes pas capables de faire de

prédictions et que nous n'avons pas de structure conceptuelle capable de mettre ensemble ce qu'Einstein a découvert sur l'absence d'un espace-temps fixe et la mécanique quantique. Ce que je présente est une solution possible – peut-être partielle au sein d'un ensemble plus grand.

Par ailleurs, je pense que la théorie des cordes doit reconnaître qu'elle est une structure fondamentale.

Hervé Zwirn. Une théorie ultérieure pourrait donc très bien être une sorte de conjonction entre la théorie des cordes et la gravité quantique comme structure. Pourtant, on a souvent tendance à les opposer.

Carlo Rovelli. Elles le pourraient, en effet. Cela étant, je pense que la théorie des cordes part dans la mauvaise direction. C'est une conception intellectuelle très compliquée. Mais d'autres vous diront le contraire !

Mathieu Guillermin La remarque précédente concernant Lee Smolin m'inspire une question. Il dit qu'on ne peut pas aller plus loin que le temps vers une physique sans temps parce qu'on constate de façon pragmatique que la connaissance est insérée dans le temps. De même, on peut se demander comment accorder un degré de confiance ou même montrer qu'une hypothèse concernant des choses qui vont au-delà du cadre pragmatique de l'expérience peut être réelle ou crédible ? Des étapes le permettent-elles dans votre théorie ? Je pense aux mouvements que font Griffiths ou d'autres en essayant de considérer que le fait qu'il y ait décohérence n'est pas spécifiquement lié à l'observation d'un humain, mais à des interactions entre systèmes, ce qui nous autorise à accorder une existence indépendante à des entités décrites par la théorie, même si on ne peut pas le faire en partant seulement de l'expérience. Votre approche contient-elle ce type de phénomènes de décohérence qui permettraient de faire ce saut ? Ou bien ce genre de contraintes n'existe-t-il pas ?

Carlo Rovelli La découverte de la décohérence est très intéressante et éclairante. Elle est très utile pour expliquer pourquoi certaines choses n'ont pas lieu ou ne se voient pas. Pour autant, ce n'est pas l'explication du mystère de la mécanique quantique. Ce que l'interprétation relationnelle offre, c'est la possibilité de se libérer de l'idée qu'il faut un observateur particulier pour donner un sens à la mécanique quantique. Dans l'interprétation originale de Bohr, il y a bien quelque chose de spécial : l'observateur – « spécial » pouvant se décliner de différentes façons. La mécanique quantique relationnelle est une tentative de reformulation de l'interprétation de la mécanique quantique sans rien de spécial, le prix de cette démarche étant précisément l'aspect relationnel, l'interaction entre les systèmes.

Je considère que l'interprétation relationnelle est utile pour faire de la gravité quantique. Toutes les interprétations de la mécanique quantique sont aisément attaquables et difficilement défendables. En revanche, pour la théorie de la gravité quantique, le problème est net et clair : peut-on construire une théorie qui soit cohérente avec la mécanique quantique, c'est-à-dire pas contradictoire avec ce que nous savons du monde, qui ait pour limite classique la relativité générale et qui soit finie ? Ce problème est bien posé, mathématiquement. Il est différent de la question « est-ce la bonne description du monde ? ». Pour savoir si c'est la bonne description du monde, il convient d'effectuer des mesures pour voir si les prédictions sont vérifiées. C'est une étape préliminaire pour construire une théorie cohérente,

Après plus de 40 ans de recherche en gravité quantique, il existe très peu de théories cohérentes et finies. La théorie des cordes, par exemple, n'est pas capable de décrire notre monde en quatre dimensions. Nombre de questions restent ouvertes.

Jean Petitot. Vous n'avez que peu parlé des formalismes, mais vous avez quand même expliqué la position de principe qui consiste à dire qu'il faut quantifier la géométrie, qu'il faut descendre très profondément dans ce qu'est la géométrie et appliquer une approche quantique à ses concepts fondamentaux. Il faut quantifier l'espace et tous les concepts géométriques. Je pense que vous avez fondamentalement raison. Par exemple, vous expliquez comment des structures de type simplicial permettant de recoller des morceaux d'espace en un espace plus grand peuvent être quantifiées et vous insistez sur le fait que les opérateurs qui vont intervenir ne commutent pas. Où en êtes-vous, sans entrer dans les détails, dans ce projet de quantification des concepts de la géométrie riemannienne ? Avez-vous déjà réussi à plus ou moins effectuer une quantification, ou en êtes-vous encore assez loin ?

Carlo Rovelli. C'est pratiquement fait, même s'il est toujours possible d'aller plus loin. La structure est nette et claire : il y a un espace de Hilbert et une algèbre d'opérateurs, avec la géométrie riemannienne comme limite classique. Tout est bien défini.

Jean Petitot. Cela devrait quand même faire intervenir de la géométrie non commutative.

Carlo Rovelli. C'est le cas. On observe des structures non commutatives. De nombreux papiers abordent ce sujet.

Jean Petitot. Retrouvez-vous des choses genre du genre de la cohomologie cyclique, par exemple ?

Carlo Rovelli. Non. Pour tout ce qui est topologie, non. Comme je le disais, c'est un chapitre encore ouvert. Mais la structure est bien définie. C'est une structure de représentation d'un système d'algèbre, par laquelle on comprend comment des états cohérents représentent la géométrie riemannienne.

Bernard d'Espagnat. Je propose de prendre une dernière question.

Alexei Grinbaum. J'avais une remarque suite à l'intervention de Mathieu Guillermin. A mon avis, après plusieurs années de travail, je pense que la mécanique quantique relationnelle ouvre la porte à la reconstruction – pas au sens d'interprétation, mais au sens de possibilité de poser des questions auxquelles on répondra par une dérivation à partir d'autres axiomes (« D'où vient l'espace de Hilbert ? », par exemple). Tout ce programme de reconstruction repose sur les approches opérationnelles, dont la mécanique quantique relationnelle est un exemple éminent.

Bernard d'Espagnat. Merci encore, cher Carlo, pour cet exposé si instructif sur le plan des grandes idées directrices qui est celui qui nous importe.