

# Gravité quantique à boucles: des atomes d'espace aux trous noirs

par Simone SPEZIALE

Groupe de Gravité quantique  
Centre de Physique Théorique (CPT), UMR 7332,  
CNRS-Luminy Case 907, 13288 Marseille Cedex 09-F

Transcription : Michel Gondran et Jean Pierre Treuil.

Résumé: La gravité quantique à boucles décrit une quantification de la relativité générale où l'espace-temps qu'on observe émerge de l'agrégation d'atomes d'espace, chacun de dimension typique de l'échelle de Planck,  $10^{-33}$  mètres. Ces atomes d'espace interagissent entre eux et avec la matière selon des lois probabilistes. Dans cet exposé destiné aux non-experts, je vais présenter les idées de base de la théorie, ses résultats majeurs et questions principales ouvertes, ainsi que des applications récentes à la physique des trous noirs, qui notamment soutiennent l'hypothèse que les trous noirs existant en nature ne possèdent pas de singularité centrale.

Simone SPEZIALE se propose de donner l'esprit qui anime l'équipe de recherche de Luminy, sur la Gravité Quantique générale et plus particulièrement sur la Gravité Quantique à boucles. Ils ont peu de données expérimentales car les signaux sont trop faibles. Ce peu de données entraîne que leur approche ne correspond pas à la méthode classique où l'on cherche à expliquer des données par des modèles. Leurs recherches sont donc motivées surtout par des considérations théoriques, des considérations de cohérence mathématique et par des expériences de pensée basées sur les limites des théories que l'on a actuellement.

## La démarche

On sait que les théories existantes, comme la physique des particules et la physique de la gravitation, ont des limites. Il y a des zones grises dans lesquelles ces théories ne marchent plus ou donnent des solutions qui n'ont pas de sens ou qui sont incohérentes au niveau mathématique. On pousse donc ces théories jusqu'à leur limites où elles ne marchent plus pour essayer de comprendre ce qui pourrait y avoir au delà, trouver des compléments à ces théories. Pour ces raisons, le domaine de l'équipe de notre recherche est très proche de la physique mathématique.

Simone SPEZIALE va, dans cet exposé, rester très proche de la physique expérimentale, des observations, et en particulier de la physique des trous noirs. Elle prend les trous noirs comme fil rouge pour étudier les limites de la relativité générale, et voir ce que la relativité quantique peut nous apprendre sur les trous noirs.

Notre conférencier commence par dire ce qui motive la recherche sur la gravité quantique, une question ouverte qui stimule fortement les chercheurs. Puis il décrit la physique des trous noirs classiques, la gravité quantique à boucles et son état de l'art, puis ce qu'elle peut nous apprendre aujourd'hui sur les trous noirs.

### **Les problèmes de la gravité quantique**

Le XXème siècle correspond à des avancées fondamentales sur l'infiniment petit et l'infiniment grand mais s'est révélé incapable de réunir ces deux types d'approche dans un cadre complet et homogène.

### **Relativité Générale**

Après ses trois papiers fondamentaux de 1905, Einstein propose en 1915 la relativité générale qui étend la relativité aux observateurs non inertiels, c'est-à-dire des observateurs liés l'un à l'autre par une accélération ou un mouvement de rotation; Einstein se rend compte que la force gravitationnelle peut être expliquée uniquement à l'aide d'une déformation de la structure métrique, c.-à-d. de la structure des distances entre les points et des angles entre les directions utilisée dans la physique classique newtonienne et cartésienne. On se donne une structure de fond avec des coordonnées d'espace et de temps pour décrire le problème, par exemple les équations de la dynamique. Et on peut faire des prédictions sur l'évolution du système physique. Pour les problèmes simples, comme les problèmes à deux corps, on peut résoudre exactement les équations. Or Einstein nous explique que si on se restreint à cette physique classique, on rate certains effets, en particulier la précession du périhélie de Mercure. L'existence de Neptune avait été prédite (avec sa position) à partir de la théorie classique en expliquant l'anomalie de la précession du périhélie d'Uranus. Mais cela n'avait pas fonctionné pour Mercure car on n'avait pas trouvé de planète Vulcain pour l'expliquer. La raison n'était pas

liée à l'existence d'une planète inconnue mais à ce que la théorie de Newton n'était pas bonne. La théorie de Newton, qui était bonne pour la terre, pour Saturne, ne l'était plus pour Mercure qui est plus proche du Soleil. Etant plus proche du soleil, le champ gravitationnel y est plus grand et les anomalies de la théorie de Newton commencent à se faire sentir. Il faut se mettre dans le cadre d'un champ gravitationnel fort pour sentir les effets de la gravitation d'Einstein comme il faut se mettre dans le cadre d'une vitesse importante par rapport à la vitesse de la lumière pour sentir les effets extraordinaires de la relativité restreinte d'Einstein comme l'effet Doppler extrême et le ralentissement du temps (qui s'arrête lorsque l'on approche de la vitesse de la lumière). Einstein va montrer que ce ralentissement du temps peut aussi être créé par un champ gravitationnel. Avec les horloges atomiques actuelles, on peut mesurer cet effet à des échelles du millimètre. Avec deux montres parfaitement synchronisées, si j'en mets une un mètre plus haut que l'autre, la différence dans l'attraction de la terre entre ces deux montres va être sensible. On peut donc maintenant utiliser ces montres précises à  $10^{-13}$  s pour mesurer les variations du champ gravitationnel. La vitesse d'écoulement du temps change donc et l'idée d'Einstein est de remplacer l'espace de Newton et de Descartes par un espace plus général, un espace temps à quatre dimensions qui est courbe, espace étudié auparavant par Riemann. Einstein arrive à la formulation de ses équations, pratiquement en même temps que le mathématicien David Hilbert ; on nomme actuellement ces équations les équations d'Einstein, mais l'action pour les obtenir est l'action d'Einstein-Hilbert. Les premiers effets de la courbure de l'espace sont de courber les trajectoires des objets. C'est Ellington en 1919 qui a fait les premières observations lors d'une éclipse en Nouvelle Zélande. Ainsi l'espace-temps est courbe et la matière suit une géodésique sur cet espace. Et la matière contribue à la courbure de l'espace-temps.

## Mécanique Quantique

Quelques années plus tard, c'est une nouvelle révolution avec la découverte de la mécanique quantique. La notion de trajectoire classique est seulement une approximation. La particule n'existe pas mais seulement une distribution de probabilité qui suit une évolution déterministe. Tout ce que l'on peut prédire c'est la probabilité d'un phénomène, mais on ne peut pas prédire la certitude d'un phénomène et on a des inéquations comme le principe d'incertitude d'Heisenberg

qui nous dit qu'on ne peut pas connaître avec une précision infinie la position et la vitesse d'une particule subatomique.

Une conséquence importante concerne l'explication de la stabilité des atomes. En effet, avec un potentiel de Coulomb en  $1/r$ , on pourrait avoir des orbites stables à n'importe quelle distance de l'atome. Or en mécanique classique une particule chargée subissant une accélération va rayonner et donc perdre de l'énergie, et petit à petit rejoindre le noyau ; d'où une impossibilité d'existence des atomes. Le problème a été résolu par la mécanique quantique : il n'y a plus d'évolution déterministe mais une évolution stochastique ; avec le principe d'indéterminisme, on ne parle plus de trajectoires précises mais de trajectoires floues ; enfin les quantités observables ne sont plus continues mais discrètes. Seuls des niveaux orbitaux discrets sont accessibles aux électrons. Et il existe un niveau d'énergie minimale où l'électron ne rayonne plus. Et l'atome est maintenant stable. L'image d'un électron comme une particule chargée tournant autour du noyau est fautive ; ce qui se passe, ce sont des distributions de probabilité que l'on peut même photographier.

### Les deux leçons:

Ce que l'on apprend de la relativité générale, c'est que l'espace-temps est quelque chose de dynamique. Ce que l'on apprend de la mécanique quantique, c'est que toutes ces quantités dynamiques sont aussi quantifiées. Elles ne sont pas déterministes, mais probabilistes. On en déduit que l'espace-temps doit aussi être quantique. Et depuis 1925, les recherches sur ce point n'ont pas encore abouties.

On peut cependant vivre tranquille sans avoir résolu ce problème car la relativité générale s'occupe des problèmes à très grande échelle et la mécanique quantique des problèmes à très petite échelle. Cela est dû à l'extrême faiblesse de la gravité : ainsi le rapport entre la charge gravitationnelle de l'électron (sa masse  $m_e$ ) et sa charge électrique ( $e$ ) est voisin de  $10^{-40}$ . D'où la possibilité de séparer les deux échelles et de traiter les problèmes séparément. L'échelle des phénomènes où la gravité quantique doit jouer un rôle est la longueur de Planck qui est de l'ordre du produit de la constante de Planck par la constante de gravitation  $G$  divisé par le cube de la vitesse de la lumière, ce qui donne une longueur en  $10^{-33}$  cm. Cette distance est ridiculement petite et très loin de ce que l'on mesure au LHC ( $10^{-16}$ )

et bientôt 10-17). On n'a donc pas accès à des expériences qui pourraient guider ce type de recherche.

### **Relativité Générale et trous noirs**

Or, on sait que la relativité générale d'Einstein n'est pas complète. Nous allons le voir sur le problème des trous noirs. Ils furent pendant longtemps considérés uniquement comme des artifices mathématiques ; ils étaient bizarres car ils décrivaient des univers avec des singularités, des univers complètement déconnectés du point de vue causal. Or leurs présences supposées rendent très bien compte d'un grand nombre d'observations, en particulier les observations liées aux jets d'énergie émis par les noyaux galactiques.

Dans l'image d'un espace-temps courbé bidimensionnel, un trou noir se représente comme un entonnoir où la courbure devient énorme avec une singularité au centre. Il contient une autre singularité mathématique qui s'appelle horizon des événements. Au niveau physique, on peut voir sur l' image de la galaxie M87, qui est une énorme galaxie elliptique, un jet énergétique qui fait 3 à 4 fois la taille de cette galaxie. La quantité d'énergie émise par ce jet est extraordinaire. On peut expliquer ce jet par les disques d'accrétion de la matière qui tombe sur le trou noir. Et grâce à cela, on peut faire des mesures de spectroscopie assez fines pour suivre la trajectoire de ces disques d'accrétion et, si on fait l'hypothèse que la solution des trous noirs d'Einstein est exacte, faire des mesures de la valeur des paramètres de cette solution, et on peut comparer avec d'autres théories. Cela nous a convaincu que les trous noirs sont bien réels et décrivent bien ce qui se passe au centre des galaxies mais aussi sur la fin de vie des étoiles. Du point de vue mathématique, on reconnaît qu'après la phase d'effondrement qui est très compliquée et très chaotique, l'état final d'un trou noir est caractérisé par trois nombres: sa masse, son moment angulaire et sa charge ; la charge, on peut toujours l'oublier, car elle est très petite et peut être importante pour décrire la phénoménologie. La masse et le moment angulaire sont cruciaux. Le moment angulaire est borné par une valeur liée à la masse en étant toujours très proche de sa limite.

## Les singularités du trou noir

Pour un trou noir, nous aurons donc une singularité centrale qui est la région où la courbure de l'espace-temps devient infinie. C'est donc un endroit où la description mathématique d'Einstein ne convient plus. Une autre caractéristique de ce trou noir est l'existence d'un horizon d'événement. En effet, bien avant la singularité centrale, il y a quelque chose d'extrême. A cet endroit où la courbure est forte, sans être extraordinaire ; le ralentissement du temps, vu par l'observateur qui reste loin, atteint sa limite infinie. Autrement dit, lorsqu'un astronome tombe dans un trou noir, la seconde vécue par cet astronome sera vue par un observateur extérieur à l'horizon des événements comme un temps qui devient infini. D'où l'irréversibilité d'un trou noir et l'impossibilité de revenir en arrière, la lumière ne pouvant plus sortir, et la raison de l'appellation de trou noir.

Tout ce que l'on observe est expliqué par la relativité générale jusqu'à l'horizon des événements et au delà. Mais l'existence de la singularité centrale montre que la théorie n'est pas complète car il faudrait la compléter avec quelque chose qui n'a pas de sens. La relativité générale produit donc d'une certaine manière sa propre mort. Il faut donc la remplacer par quelque chose. Il faut de plus la faire fonctionner avec la mécanique quantique.

Or, la relativité générale relie des champs classiques, le tenseur de courbure avec le tenseur d'énergie-impulsion. La matière y est donc décrite par des champs classiques. La mécanique quantique, quant à elle, ne décrit pas la matière par des champs classiques, mais par des opérateurs qui agissent sur des états quantiques.

### Comment rendre la théorie mathématiquement consistante ?

La première solution est de considérer cette théorie (la description relativiste des trous noirs) comme non fondamentale, et seulement valable aux échelles où on ne voit pas la nature quantique de la matière. On ne s'intéresse alors qu'aux valeurs moyennes, mais non aux valeurs quantiques.

Si l'on ne se satisfait pas de cette solution, il faut adapter la relativité à la mécanique quantique et rendre l'espace-temps quantique. On part de la solution particulière de la Relativité Générale que l'on connaît très bien, l'espace-temps plat et rigide de la Relativité Restreinte. Elle décrit très bien les basses énergies pour les

petites échelles. On étudie alors le comportement de petites perturbations autour de cette solution. Des résultats importants apparaissent alors, avec des corrections quantiques à la force de Newton, corrections à petites échelles et qui dépendent de l'échelle à laquelle on observe. Mais ces effets sont si petits que l'on ne peut pas actuellement les mesurer. Un autre phénomène concerne le rayonnement Hawking du trou noir. C'est un rayonnement qui provient de l'aspect quantique des particules. Il intervient à une température qui varie d'une manière inversement proportionnelle à la masse du trou noir. Là encore, l'expérimentation n'est pas possible car il faut des températures infiniment petites, de l'ordre de  $10^{-7}$  K pour un trou noir ayant la masse du soleil (à comparer au fond diffus cosmologique de 2,7K). D'autres recherches essaient de s'inspirer de phénomènes que l'on peut considérer comme des trous noirs analogiques. Les plus nombreuses se font autour de ces petites perturbations, par des analogies thermodynamiques. La Gravité quantique à Boucles se propose d'aller au-delà de ces petites perturbations quantifiées autour d'une solution classique.

### **La Gravité Quantique à Boucles**

Il s'agit de quantifier tout l'espace-temps et pas seulement les petites perturbations autour de la solution classique. Au lieu de quanta qui se propagent dans un espace-temps classique, on va étudier une quantification directe de l'espace-temps. C'est une approche différente de la théorie des cordes. Elle a été développée à la fin des années 80 par Carlo Rovelli et Lee Smolin. Par analogie avec la quantification de l'énergie pour l'atome d'hydrogène, on va quantifier la métrique de l'espace-temps où seules certaines valeurs sont possibles. Il y a de plus une valeur minimale pour chaque volume et pour chaque distance. On ne voit pas cette discrétisation car elle a lieu à des échelles très petites. Mathématiquement, cette approche non perturbatrice est très différente de celle de la théorie quantique des champs et du système standard. Ces dernières sont basées sur un certain nombre de particules (nombre de quanta) tandis que la gravité quantique à boucles est basée sur un nombre de quanta d'espace à partir desquels il faut construire l'espace-temps classique. Il faut des nombres extrêmement grand (beaucoup plus que le nombre d'Avogadro) pour retrouver la métrique lisse observée à notre échelle. Ces nombres ne représentent pas des énergies comme pour l'atome d'hydrogène, mais des

volumes, des distances, des aires. A l'échelle de Planck, l'espace-temps correspond à des polyèdres quantiques, c.-à-d. des petits atomes d'espace. Ce n'est que moyennées sur des grandes distances que l'on retrouve les équations d'Einstein. On peut faire l'analogie suivante: nous avons des atomes en très grand nombre, mais moyennés sur des grandes échelles le collectif qu'ils forment est un fluide lisse qui vérifie les équations de Navier-Stokes. Cependant le passage entre les atomes et les équations de Navier-Stokes est connu ; c'est seulement une hypothèse en gravité à boucles. On a des résultats partiels, des arguments dans ce sens, mais pas encore de théorie complète. Ce passage du microscopique au continu demande des mathématiques complexes, des simulations numériques et des calculs analytiques.

Mais même si on n'a pas encore la théorie finale, on peut regarder les conséquences que cette approche a déjà sur la physique des trous noirs. A cause de la discrétisation des objets, mais surtout grâce à l'existence de volumes minimaux, on évite la singularité et la concentration de la matière dans un point d'espace. Les quanta d'espace ont maintenant un volume fini. Cela coupe la divergence de la courbure exactement comme la mécanique quantique coupe la divergence du potentiel de l'atome d'hydrogène. La quantification des niveaux d'énergie est remplacée par la quantification de la courbure de l'espace-temps ; la courbure ne peut pas devenir infinie et reste bornée. Le phénomène est analogue à celui de la mécanique quantique, bien que la mathématique soit plus complexe.

Les conséquences pour la singularité du Big Bang sont intéressantes. La théorie actuelle correspond à un point de l'espace où la température et la densité sont infinis. Avec la théorie quantique à boucles et des hypothèses d'homogénéité et d'isotropie, on peut déduire des modèles simplifiés qui permettent de résoudre très simplement les équations d'Einstein et qui vont donner des prévisions très différentes sur l'évolution de l'univers, en particulier sur les variations de l'expansion de l'univers. Dans cette cosmologie quantique à boucles, développée en particulier par Aurélien Barrau à Grenoble, on trouve un univers cyclique avec des effondrements suivis de rebonds.

## **Conclusion**

Simone SPEZIALE nous a présenté un sujet de recherche riche, stimulant, plein de questions souvent techniques. C'est un sujet encore très proche de la physique

mathématique, mais qui est aussi motivé par des questions physiques, comme "que s'est-il passé au début de l'Univers?", "qu'est-ce qui se passe si les trous noirs s'évaporent vraiment?". Le problème de la gravité quantique est ouvert depuis 90 ans ; Même si le problème n'est toujours pas résolu, les recherches ont eu des retombées importantes comme les équations de Yang et Mills pour la résolution des forces pour les interactions fortes et faibles.

### La Discussion

Gilbert BELAUBRE: Le trou noir a une masse et un moment angulaire. Es-ce que son équilibre s'exprime uniquement par la force de gravité et la force centrifuge?

Simone SPEZIALE: C'est un état stationnaire d'une solution des équations d'Einstein. De plus, il ne change pas avec le temps, on peut donc dire que c'est un état d'équilibre. Mais ce n'est pas un équilibre au sens de l'étoile qu'il y avait avant.

Gilbert BELAUBRE: Comment peut-on parler de rotation à 1000 tours par seconde?

Simone SPEZIALE: On mesure la rotation à l'aide de l'effet Doppler. Il y a une vraie étoile qui tourne autour d'un trou noir. On mesure l'effet Doppler sur la spectroscopie de cette étoile ; on peut mesurer l'orbite, la forme de l'orbite et la vitesse aux différents points de cette orbite. Puis on fait une comparaison entre l'orbite mesurée et l'orbite prédite par la théorie de Newton et on montre que cela ne marche pas. En effet la gravité est très forte et la théorie de Newton n'est plus valable. On essaye avec la solution des trous noirs qui ne tournent pas et cela ne marche pas non plus. On essaye alors avec la théorie des trous noirs qui tournent et on découvre que cela marche si le moment angulaire atteint une certaine valeur.

On fait une hypothèse et on déduit la valeur compatible avec cette hypothèse. C'est une mesure très difficile qui n'a été réalisée que ces dernières années.

Claude ELBAZ: La masse du trou noir, c'est bien une donnée phénoménologique.

Simone SPEZIALE: oui.

Claude ELBAZ: Vous êtes parti des équations d'Einstein et vous avez montré que le terme situé à droite, c'est-à-dire la matière, était classique et vous l'avez complété en mettant des conditions quantiques. Pourquoi Einstein a-t-il été opposé à ce type de changement?

Simone SPEZIALE: Pour la première question, oui, la masse du trou noir est bien une donnée phénoménologique. Dans le cas des trous noirs au centre de notre galaxie, il n'y a pas de moments angulaires importants et la masse est le paramètre essentiel. Les orbites des étoiles près d'un trou noir sont paraboliques avec des parcours très rapides. Sur 10 à 15 ans, on a pu mesurer leurs trajectoires. On voit qu'elles tournent autour de quelque chose que l'on ne voit pas. On en déduit la masse à partir de la méthode précédente.

La réponse à la seconde question sur Einstein est plus complexe; En effet, il ne croyait pas trop à la mécanique quantique. Il recherchait le déterminisme et des arguments sur la cohérence et la complétude de la mécanique quantique. Il faut rappeler que c'est lui qui a proposé une première version du chat de Schrödinger.

Il recherchait autre chose, une unification de la force gravitationnelle avec la force électromagnétique. En particulier, en passant de 4 dimensions à une cinquième, on peut adjoindre l'électromagnétisme à la gravitation. Mathématiquement, c'est une connexion de jauge. Son intérêt pour les dimensions supplémentaires est cependant toujours d'actualité, par exemple dans la théorie des cordes.

Victor MASTRANGELO: Pour le trou noir, la singularité de la gravitation devient infinie? Que devient-elle dans la théorie quantique à boucles?

Simone SPEZIALE: On contrôle mieux les calculs dans le cas de la cosmologie que dans le cas des trous noirs. On a une correction par rapport à la relativité générale lorsque l'on s'approche de la longueur de Planck et que le rayon de courbure admet une valeur maximale non infinie.

Victor MASTRANGELO: Comment passe-t-on du niveau des volumes de Planck au niveau plus macroscopique? Est-ce similaire aux méthodes de physique statistique?

Simone SPEZIALE: On part d'un réseau d'atomes à une échelle typique, puis on passe à une échelle beaucoup plus grande que cette échelle typique jusqu'à une

échelle critique où l'échelle minimale ne joue aucun rôle. On parle alors de transition de phase comme en physique statistique. Il y a cependant une difficulté supplémentaire en théorie quantique à boucles car la taille fondamentale qui apparaît (la distance entre les objets) est dynamique.

Alain STAHL: Vous avez dit que la matière absorbée par un trou noir va ressortir. Je croyais que ce qui ressortait était un rayonnement.

Simone SPEZIALE: Vous avez raison; je suis allé un peu vite. Il y a trois niveaux. Le premier niveau est purement classique : la matière tombe à l'intérieur du trou noir et plus rien qui s'échappe. Le second niveau correspond à des petites perturbations quantiques autour de la solution classique : le trou devient un peu flou et il laisse échapper un rayonnement (rayonnement de Hawking). Le troisième niveau correspond à ajouter la mécanique quantique à toutes les échelles: dans l'hypothèse de la théorie quantique à boucles, l'horizon des événements va disparaître, il n'y a plus de singularités, mais l'étoile de Planck où il y a encore toute la matière qui reste accessible.

Alain STAHL: Lorsque vous parlez de polyèdres, ce sont des polyèdres dans un espace à 3 ou 4 dimensions ?

Simone SPEZIALE: Ce sont des polyèdres dans un espace à 3 dimensions.

Gilbert BELAUBRE: Peut-on parler du volume du polyèdre?

Simone SPEZIALE: Lorsque le polyèdre est plein, il existe une formule connue depuis longtemps. Lorsque le polyèdre est hyperbolique, il existe une très belle formule utilisant les di-logarithmes , qui sont une généralisation des logarithmes.