

LA GRAVITÉ QUANTIQUE

PHI 6346

Séance 13

Jonathan Simon

PROGRAMME

- 1) L'incompatibilité de la théorie quantique des champs et de la relativité générale
- 2) Cordes dans l'espace ou boucles d'espace ?
- 3) Comment trouver l'espace?
- 4) Comment trouver le temps?
- 5) Le fonctionnalisme sur l'espace-temps: une crise de conscience ?

L'INCOMPATIBILITÉ DE LA THÉORIE
QUANTIQUE DES CHAMPS ET DE LA
RELATIVITÉ GÉNÉRALE

L'INCOMPATIBILITÉ DE TQC ET RG

- Dans la théorie quantique des champs : un espace-temps fixe sur lequel sont définis les champs.
- En relativité générale : un espace-temps indépendant du fond (background independent) sur lequel la matière (les champs) affecte dynamiquement l'espace-temps.

L'INCOMPATIBILITÉ DE TQC ET RG

- Il ne s'agit pas seulement d'une tension conceptuelle.
- Lorsque vous essayez de quantifier le champ gravitationnel tout en respectant la RG, vous obtenez beaucoup d'infinis.

L'INCOMPATIBILITÉ DE TQC ET RG

- En général, les particules dans les champs d'énergie ressentent des effets d'auto-action (pensez à la rétroaction du microphone / réverbération dans la musique).
- La particule modifie le champ, qui à son tour affecte la particule, qui à son tour...

L'INCOMPATIBILITÉ DE TQC ET RG

- Dans le cas d'autres champs (le champ EM et les champs nucléaires), il existe des méthodes appelées méthodes du groupe de renormalisation, qui permettent de gérer ces effets de retroaction (Pensez : les séries infinies qui convergent : $1/2 + 1/4 + 1/8\dots$).

L'INCOMPATIBILITÉ DE TQC ET RG

- Cependant, en raison de la tension inhérente entre la nature de l'espace-temps dans la QFT et dans la GR, ces méthodes ne fonctionnent pas lorsque nous essayons de quantifier la gravité de la manière habituelle : les infinis (et les trous noirs) apparaissent là où ils ne devraient pas, ce qui crée un désordre total...

L'INCOMPATIBILITÉ DE TQC ET RG

- Mais les problèmes ne commencent réellement que lorsque l'on considère les interactions de la GR et de la QFT à des échelles inférieures à la longueur de Planck.

L'INCOMPATIBILITÉ DE TQC ET RG

- Les principales stratégies de résolution du problème suggèrent essentiellement que la réalité est pixellisée en dessous de cette longueur : soit parce que tout est fait de cordes (qui ne deviennent pas plus petites que la longueur de Planck), soit parce que l'espace est fait de boucles (qui ne deviennent pas plus petites que la longueur de Planck).

L'INCOMPATIBILITÉ DE TQC ET RG

Cependant, ces deux théories (et leurs rivales) soulèvent de nombreuses autres questions.

Aussi, le silence assourdissant de Dieu : chaque tentative de confirmation empirique d'une théorie candidate semble échouer.

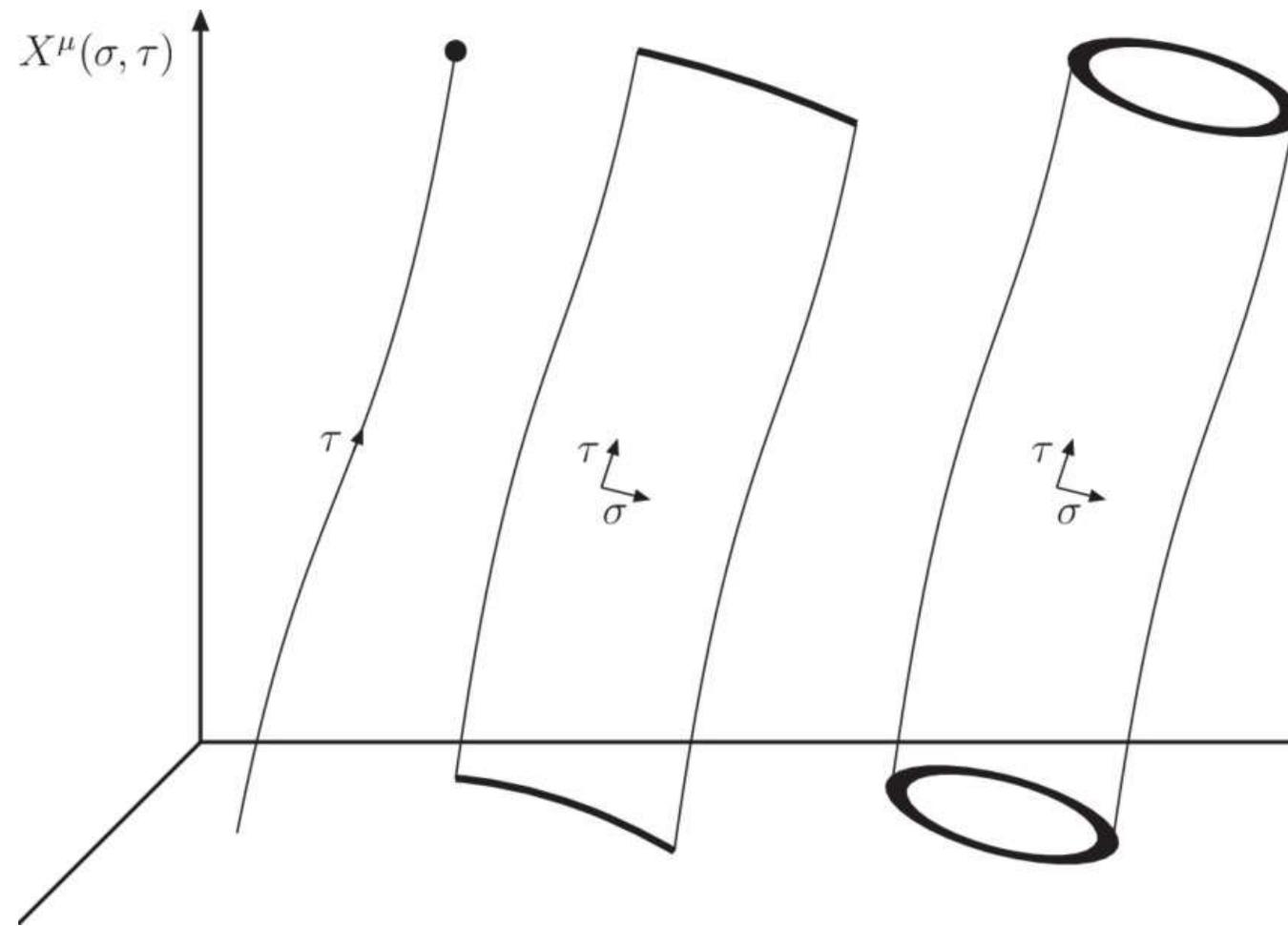
CORDES OU BOUCLES ?

LA VENGEANCE DES PRÉSOCRATIQUES

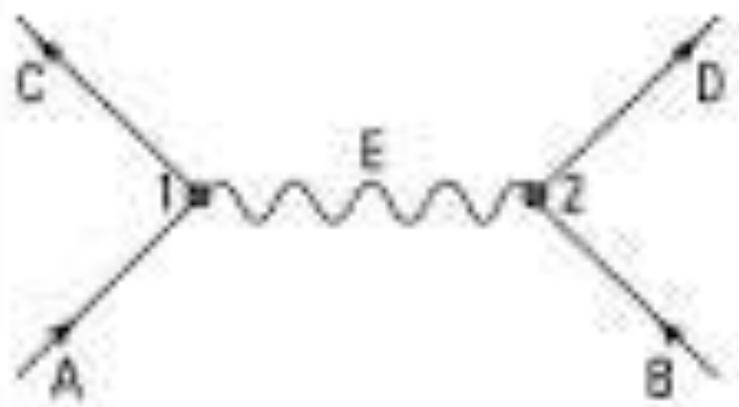
- Après avoir traité les présocratiques comme des simplets pendant des millénaires, on peut noter qu'à la fin de tout cela, nous semblons à nouveau nous battre pour un seul et unique principe unificateur. (Si, dans 2000 ans, ils ne retrouvent que quelques fragments de nos discussions d'aujourd'hui, auront-ils une meilleure opinion de nous ?)

CORDES

- L'image fondamentale : Des cordes unidimensionnelles qui vivent dans un espace de très haute dimension (9 ou $10+t$ si supersymétrie, 26 si pas de supersymétrie).
- Au lieu de lignes de monde de particules, nous parlons de «world-sheets» de cordes (feuilles de monde?)



Time ↑

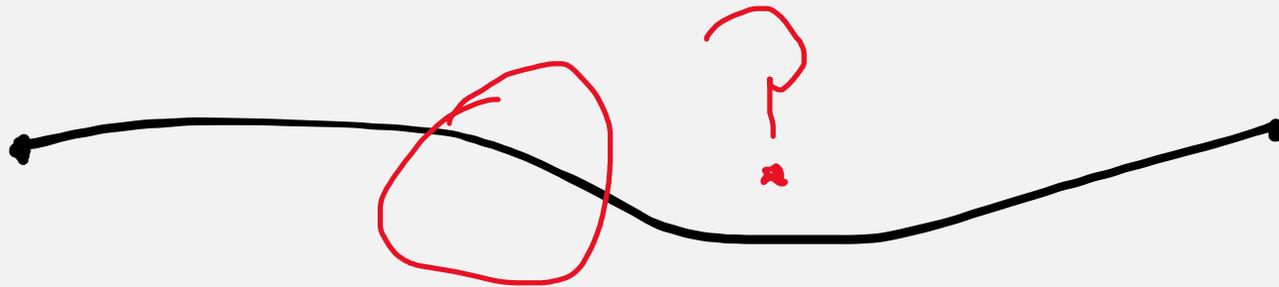


CORDES

- Notez qu'une corde connectée n'est pas la même chose qu'une boucle de LQG - la première est la matière, la seconde l'espace

CORDES

- Les cordes ont-elles des parties ? Peut-être, mais si c'est le cas, la chaîne entière est antérieure à ses parties, aucune théorie indépendante des parties de chaîne plus petites que la longueur de planck...

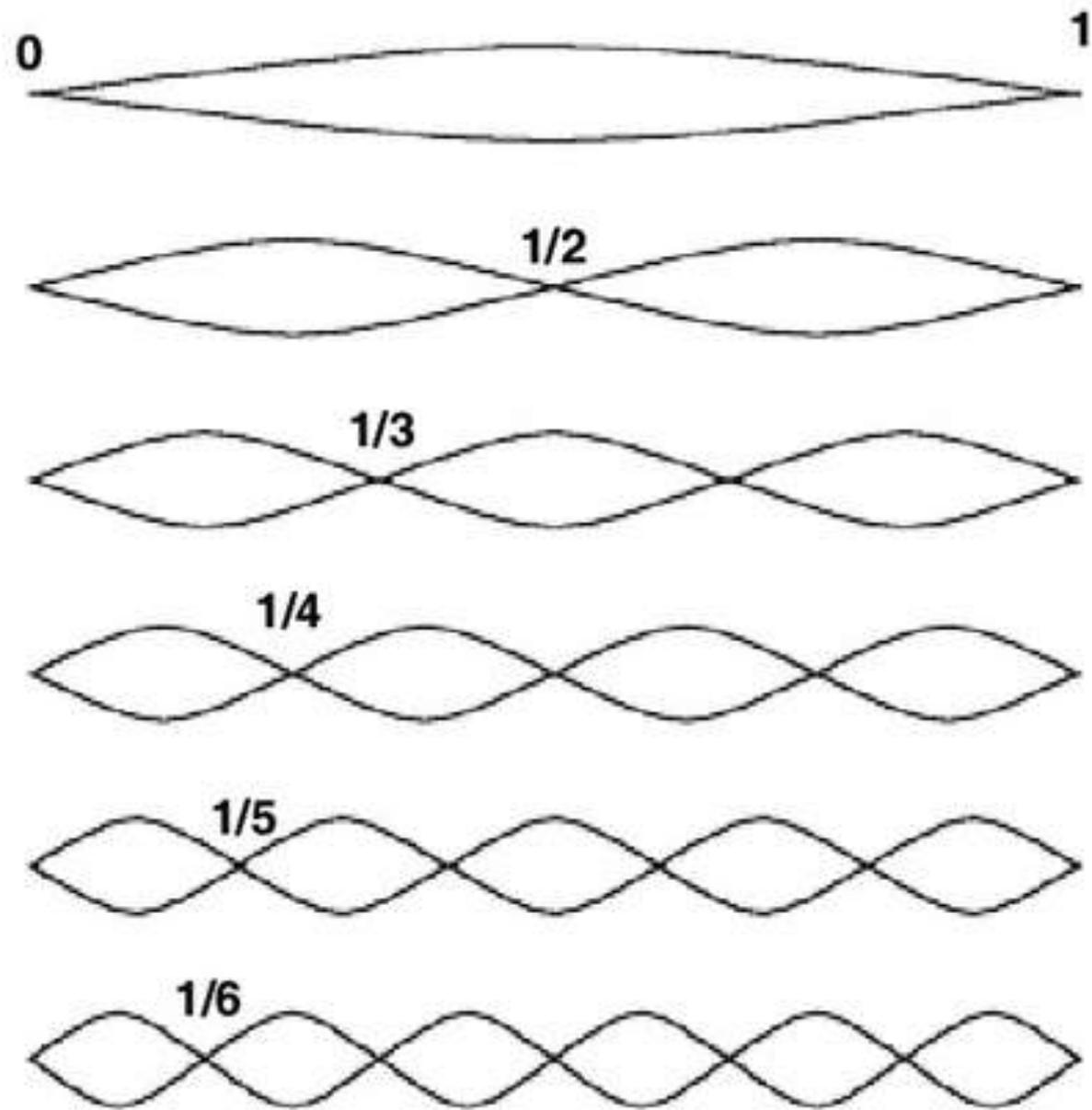


CORDES

- Deux raisons pour lesquelles la théorie des cordes est attrayante :
 - 1) les modes vibrationnels expliquent les modes quantiques en général.
 - 2) L'imposition de symétries sur les feuilles de monde conduit à la gravité.

CORDES

- 1) la structure des modes vibrationnels semble expliquer pourquoi tout dans le monde quantique se présente sous forme de modes discrets (c'est-à-dire pourquoi les champs quantiques ont des niveaux d'excitation discrets, plutôt qu'un spectre continu)



Fundamental

$2l$

λ

v_0

v

2nd Harmonic

l

$2v_0$

3rd Harmonic

$(2/3)l$

$3v_0$

4th Harmonic

$l/2$

$4v_0$

5th Harmonic

$(2/5)l$

$5v_0$

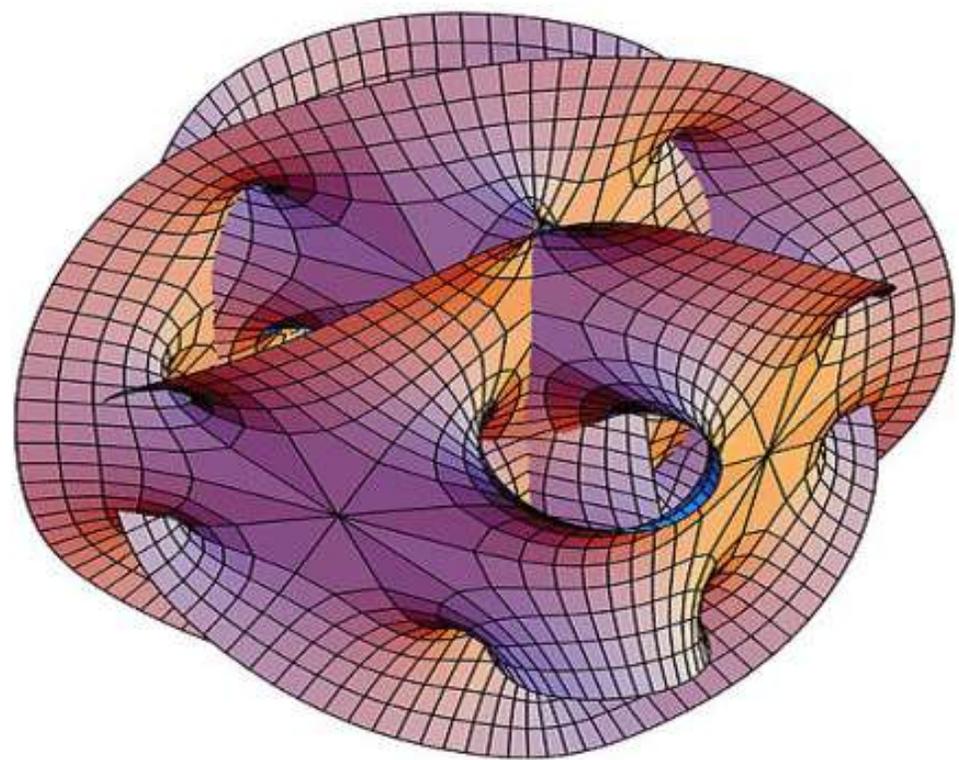
6th Harmonic

$l/3$

$6v_0$

CORDES

- On peut en fait retrouver les modes quantiques spécifiques des particules quantiques, mais il faut donner aux cordes des dimensions supplémentaires (wiggle room) pour vibrer : 9 ou 10, si la supersymétrie est vraie (ce qui relie les fermions et les bosons d'une manière agréable), 26 si la supersymétrie n'est pas vraie (ce qui signifie moins de points communs entre les fermions et les bosons, donc on a besoin de plus de marge de manœuvre).



CORDES

- Comment peut-il y avoir autant de dimensions ? Réponse : ce sont des dimensions petites et recroquevillées.

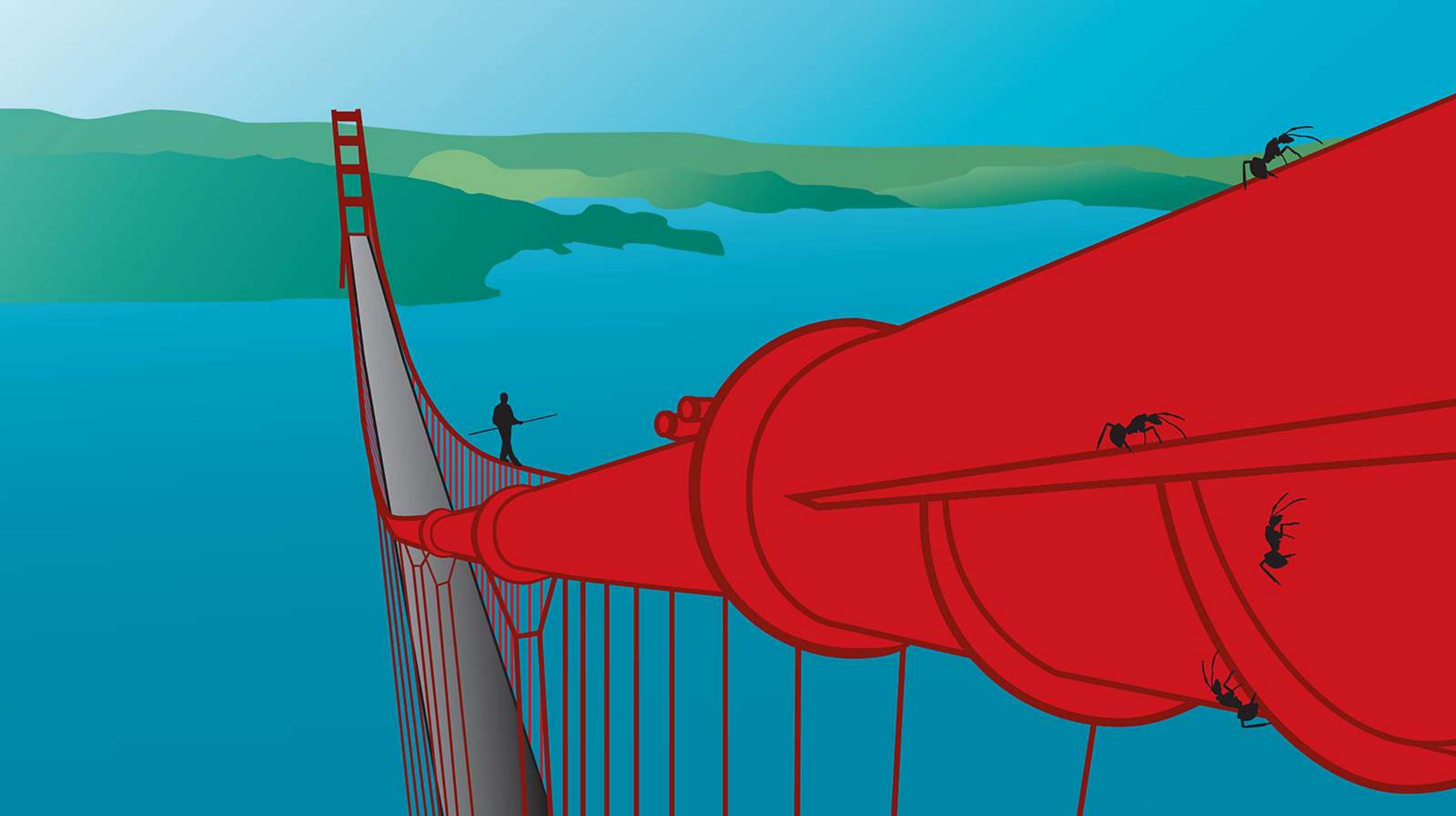


Figure 1

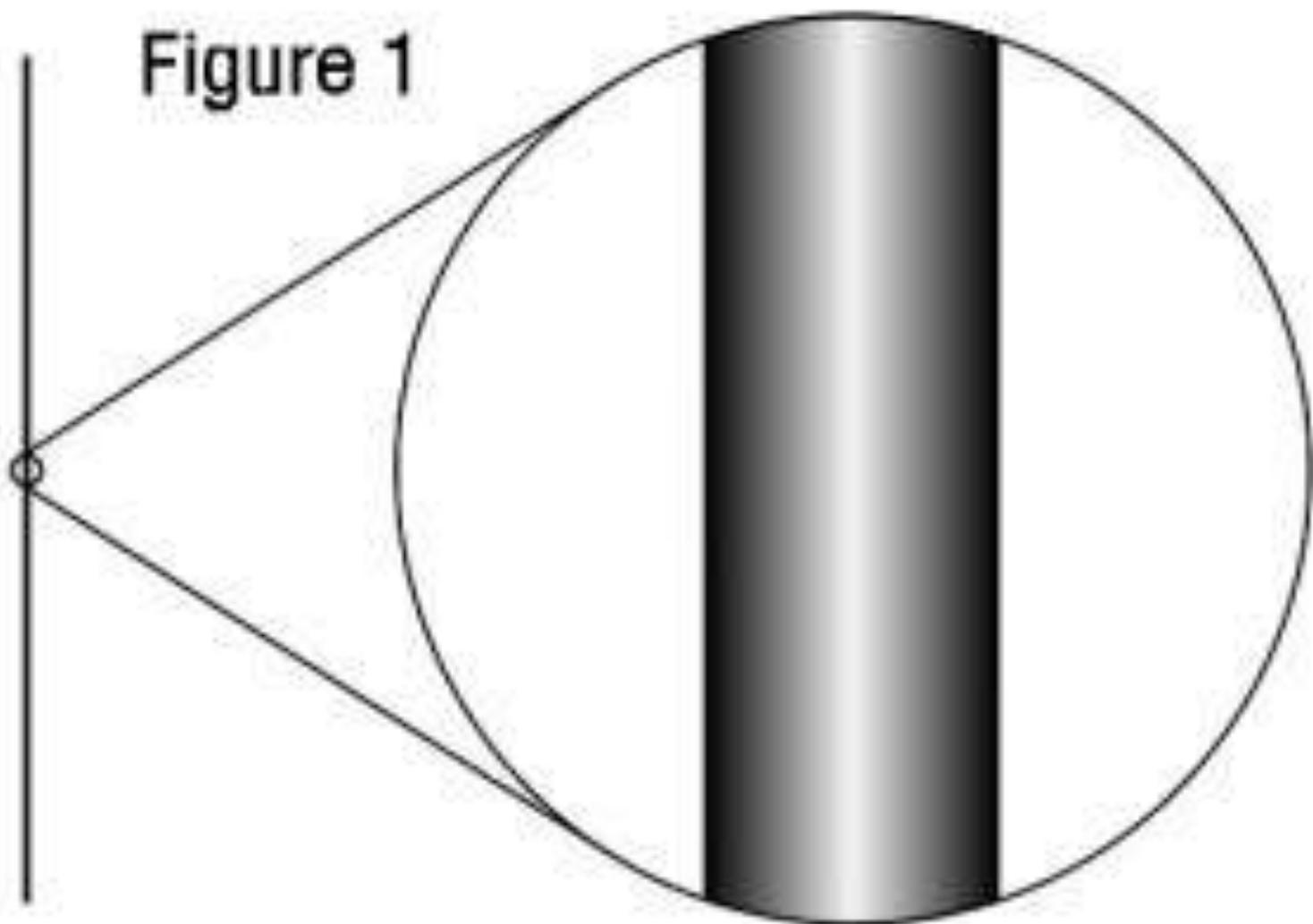


Image credit: wikipedia.org

CORDES

- 2) L'imposition de symétries sur les feuilles de monde conduit à la gravité (tout comme l'imposition de symétries de jauge sur les champs de particules conduit aux autres champs de force).
- (au moins, c'est ce qu'on me dit)

BOUCLES

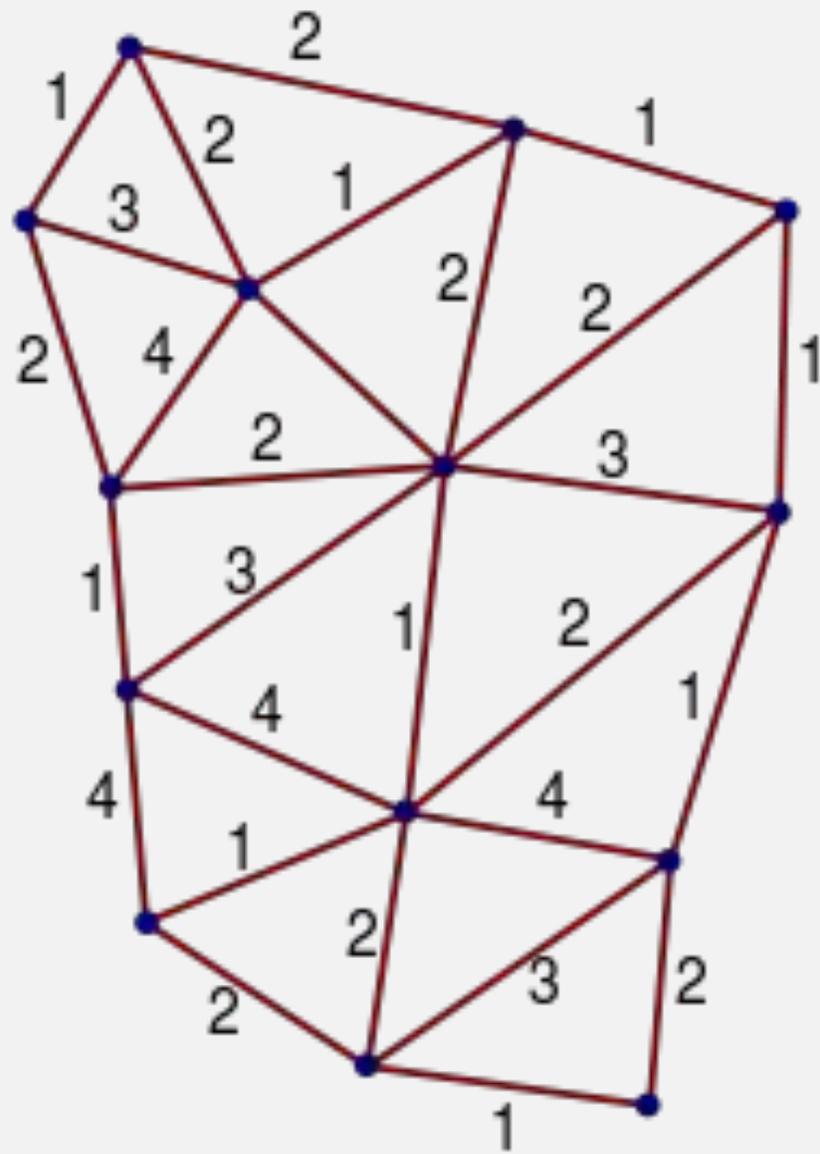
- Notez que la théorie des cordes n'est pas seulement une théorie de la gravité quantique, mais aussi une théorie de tout - nous obtenons une théorie de toutes les particules, ainsi que de la gravité.
- (bien que nous n'obtenions aucune nouvelle explication de l'intrication, de la superposition ou de la mesure quantique : la théorie des cordes les utilise, et ne les explique pas).

BOUCLES

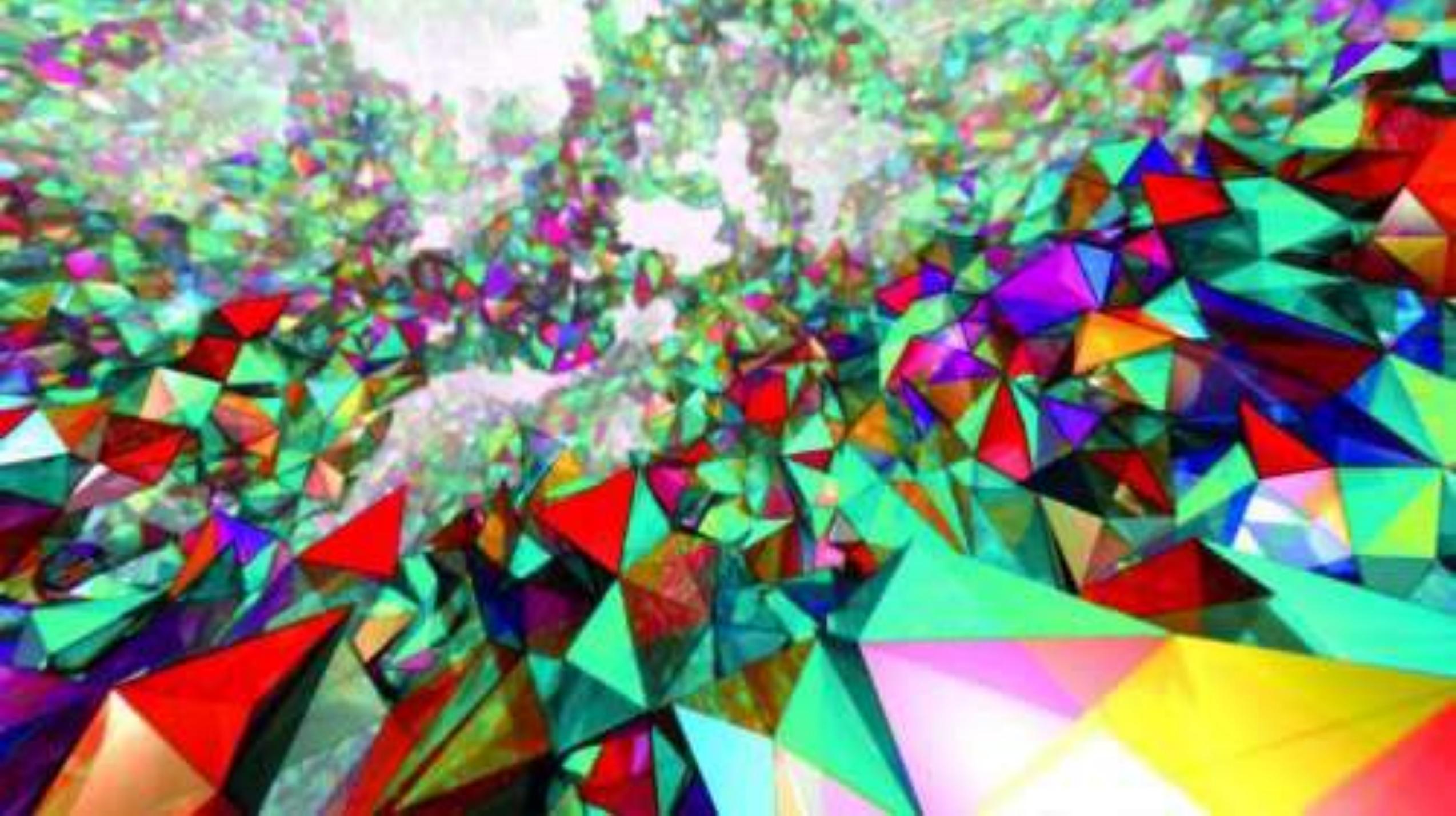
- La gravité quantique à boucles (la théorie des boucles) est strictement une théorie de la gravité (et de l'espace-temps) - ses boucles sont ce dont l'espace est fait (vous ajoutez une théorie des particules quantiques comme choses *définies sur* des boucles).

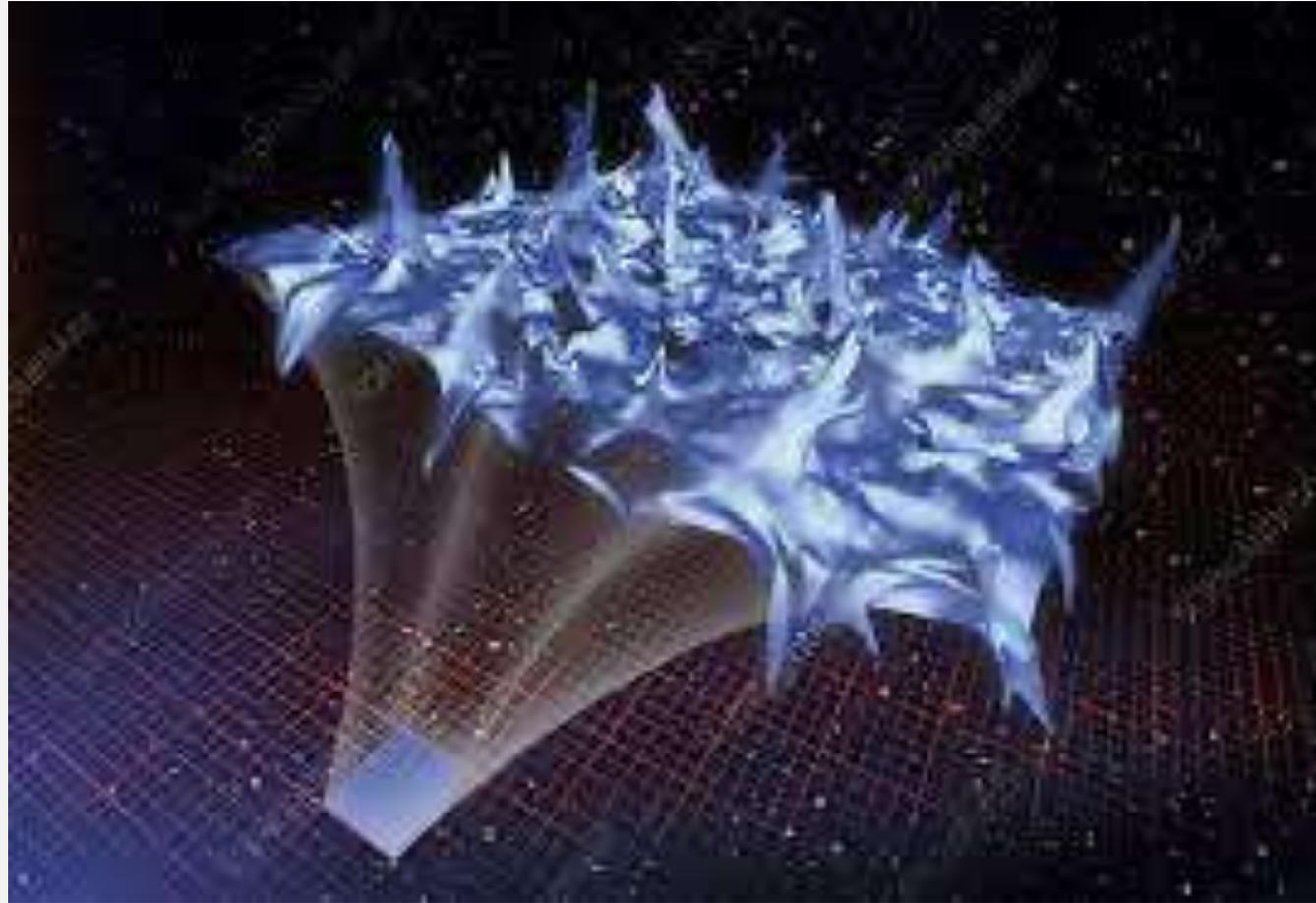
BOUCLES

- L'espace est constitué de « réseaux de spin », une structure graphique composée d'arêtes et de sommets (nœuds atomiques et relations entre eux).
- L'espace-temps est composé de « mousses de spin » qui sont des réseaux de spin évoluant dans le temps de manière quantique (analogue à l'évolution de Schroedinger ou de Dirac).



Reseau de spin





Spin Foam

BOUCLES

- Les arêtes véhiculent une notion d'adjacence. Boucles = chemins fermés dans cet espace
- Que se passe-t-il « entre » les nœuds ? Rien : la relation d'adjacence n'est pas vraiment une expression des distances spatiales, c'est une quantité propre, intrinsèquement discrete (plus sur cela plus tard)

BOUCLES

- Avantages : on peut quantifier ces structures pour obtenir une théorie de la gravité quantique, sans faire appel à un espace de haute dimension (les réseaux de spins sont en 3D, les mousses de spins en 4D) et sans dépendre de la supersymétrie pour faire bonne figure.

À LA RECHERCHE DE L'ESPACE
PERDU

À LA RECHERCHE DE L'ESPACE PERDU

- Rappelez-vous la situation difficile du réaliste de la fonction d'onde : même si l'ontologie du niveau fondamental est claire, il est difficile de retrouver les apparences d'un monde spatial 3D dans l'espace fondamental 3ND.
- La théorie des cordes et la GQB sont toutes deux confrontées à des problèmes similaires.

BOUCLES

- La principale façon de dériver l'espace-temps des mousses de spin consiste à faire appel aux « états de tissage » (weave states), une classe spéciale de réseaux de spin qui se comportent bien. Cependant, inévitablement (et de manière prouvable), certains réseaux de spins qui sont adjacents au sens fondamental se retrouvent arbitrairement éloignés les uns des autres au sens émergent pertinent.

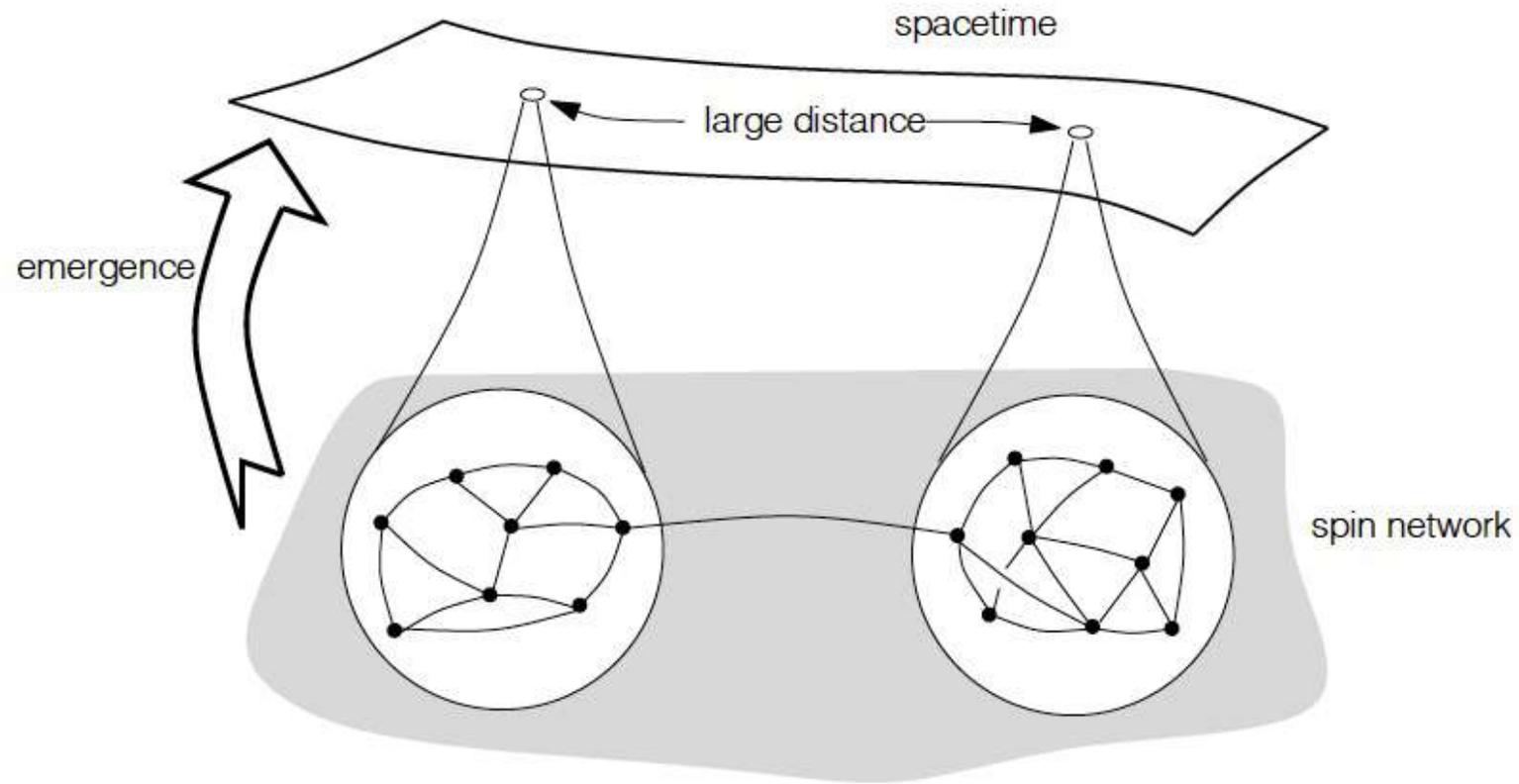


Figure 1: A spin network (shown as shaded) with two regions (shown enlarged) connected by an adjacency relation and how they are embedded in an emerging spacetime.

CORDES

- Pour la théorie des cordes,
- 1) l'embaras du choix
- 2) les dualités

CORDES

- 1) l'embaras du choix
- L'espace émerge-t-il de l'espace $10d$, ou de l'espace $2d$ (intégré dans l'espace $10d$) des feuilles de monde ? (Plus à ce sujet ci-dessous)

CORDES

- 2) les dualités
- T-dualité
- AdS/CfT dualité

CORDES

- Les dualités sont une forme de symétrie (bizarre) de haut niveau entre les formulations mathématiques.

CORDES

- Contrairement aux simples « changements de coordonnées », les dualités montrent l'équivalence ou la correspondance entre des théories qui semblent parler de choses très différentes.

CORDES

- Les dualités T sont des équivalences (*très surprenantes*) entre des théories qui ne sont pas d'accord, par exemple, sur quelles dimensions (dans l'espace 10d) sont grandes et quelles sont petites.

CORDES

- La dualité AdS/CFT est une forme d'équivalence entre une théorie sur un espace à n dimensions (frontière), et un espace à $n+1$ dimensions (surface).
- (le principe holographique)

CORDES

- Si nous poursuivons la stratégie habituelle des symmetries (voir Dasgupta, Baker, etc) et donc si nous considérons que seul ce qui est invariant sous ces symétries est fondamentalement réel, les faits concernant la taille ou même le nombre de dimensions de l'espace ne sont pas réels....

CORDES

- Cependant, on peut soutenir que nous pouvons toujours trouver nos propres perspectives dans une partie de la structure de la variante ... bien qu'il y ait une question de ce que cela signifierait

CORDES

- Si nous disons que l'espace fondamental est l'espace 2D de la feuille du monde, nous évitons certains de ces problèmes, mais la structure spatiale que nous obtenons est appauvrie (encore plus que celle de la RG).

À LA RECHERCHE DE TEMPS PERDU

À LA RECHERCHE DE TEMPS PERDU

- Boucles:
- Prendre le temps comme primitif ? (Smolin)
- certains réseaux de spins qui sont adjacents au sens fondamental se retrouvent arbitrairement *temporellement* éloignés les uns des autres au sens émergent pertinent

À LA RECHERCHE DE TEMPS PERDU

- Cordes:
- **$10d + t$, ou champs de feuilles de monde $2d$?**
- **$10d + t$?** Voir ci-dessus (mais le temps semble être invariant dans les dualités, donc peut-être moins de problème ici.)
- **$2d$?** pas de distances temporelles définies (potentiellement plus un problème ici que le problème analogue pour l'espace ? Structure manquante même par rapport à un cadre de référence ?)

À LA RECHERCHE DE TEMPS PERDU

- Le présentisme ? (Monton, Smolin)
- Certains affirment que la difficulté de trouver le temps, notamment dans la théorie de la boucle, justifie de privilégier un cadre de référence :
- la foliation à courbure moyenne constante (temps cosmologique)

À LA RECHERCHE DE TEMPS PERDU

- Cependant, ailleurs, Wüthrich fait remarquer que cela serait assez arbitraire... bien que Smolin semble aimer l'idée...

UNE CRISE DE CONSCIENCE?

FONCTIONNALISME SUR L'ESPACE (ET LE TEMPS)

- Chalmers : une théorie de l'espace et du temps dépendante de la réponse (comme pour la couleur, etc.) : l'espace et le temps sont les structures qui provoquent l'expérience spatiale et temporelle en nous.
- (Comparez: Kant)