

La gravitation quantique par boucles

David Viennot – Maître de Conférences

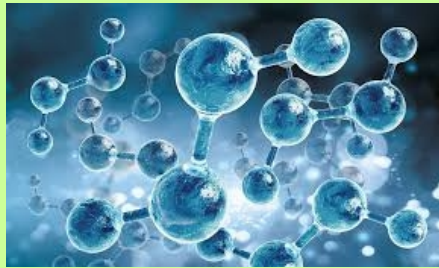
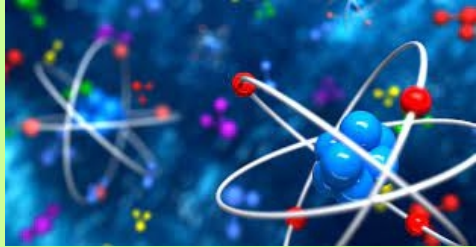
Institut UTINAM (CNRS) / Observatoire de Besançon / UFC





Le modèle standard de la physique

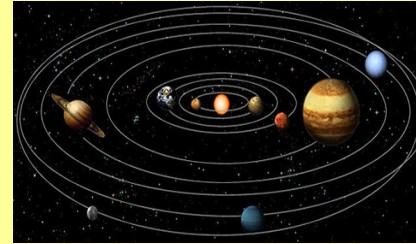
Physique quantique



approximation
pour les objets de
grandes
dimensions



Relativité générale



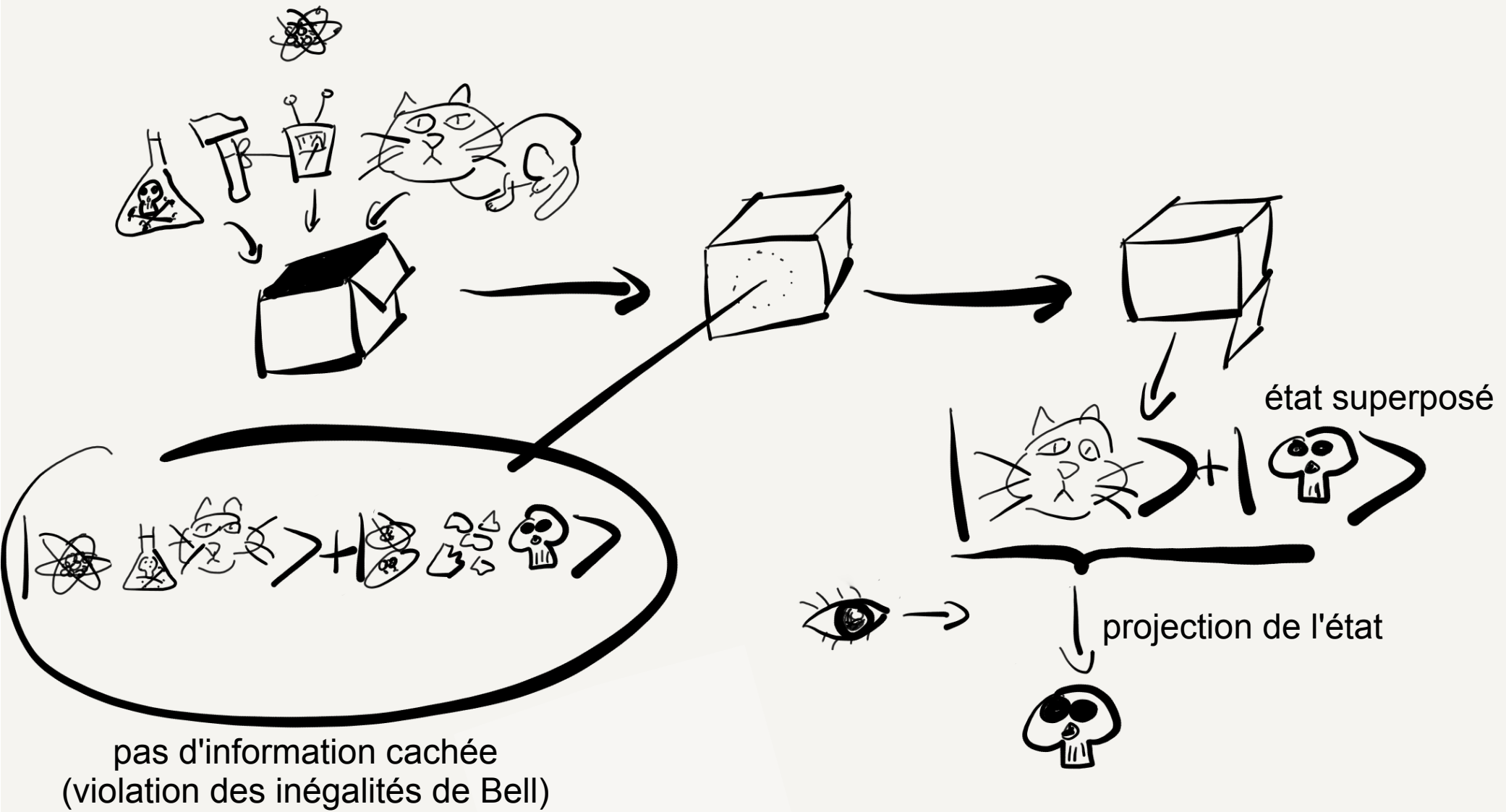
approximation
pour les objets de
faibles densités



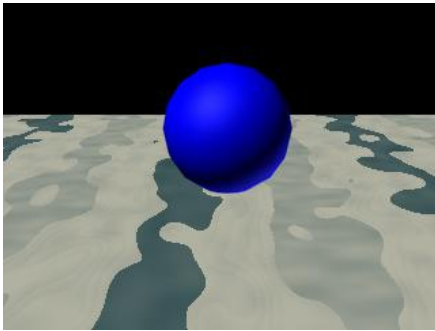
Physique classique (Newton + Maxwell)



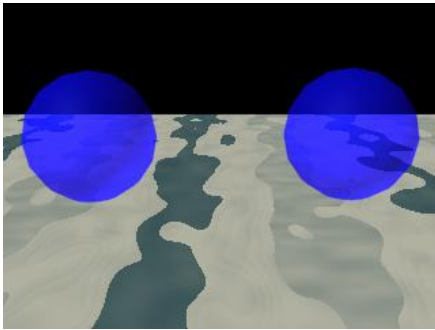
Physique quantique : parabole du chat de Schrödinger



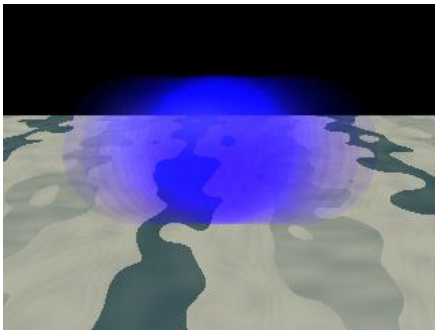
De la même façon que le chat peut être à la fois vivant et mort, une particule quantique peut se trouver en plusieurs lieux.



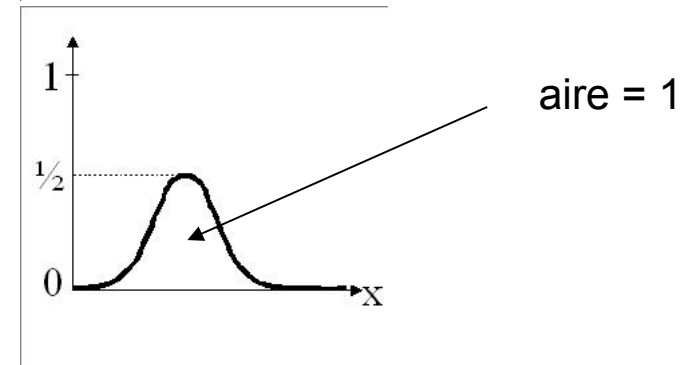
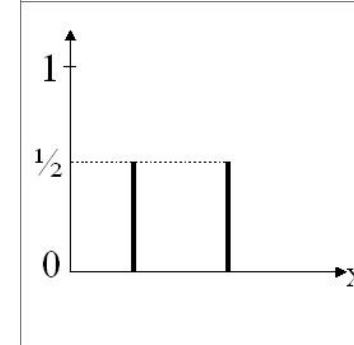
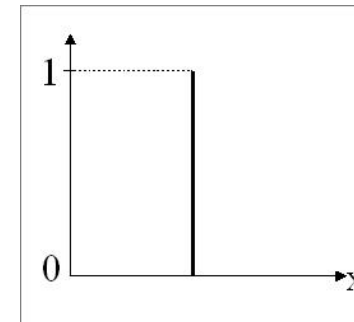
particule localisée
(mécanique classique)



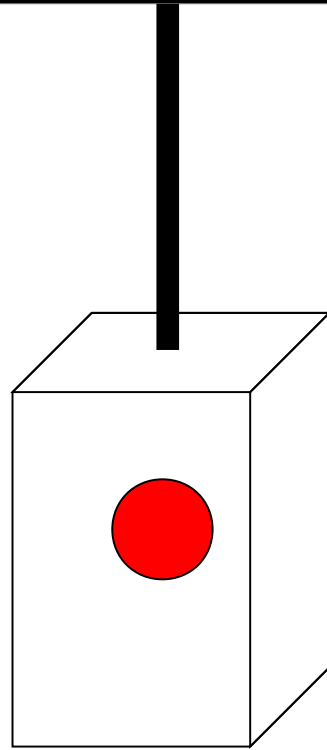
particule 'localisée'
en deux sites avec une
superposition
à 50%-50%



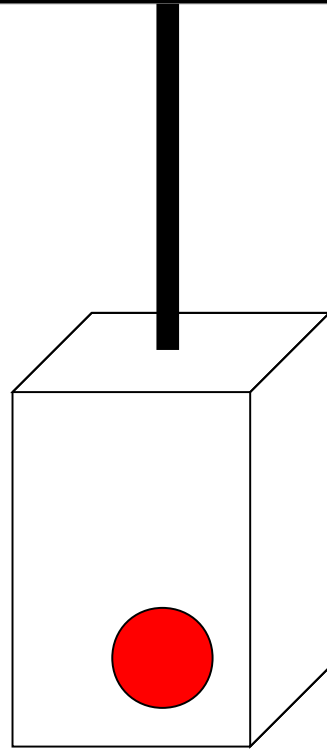
particule quantique
qui se trouve 'partout
à la fois'



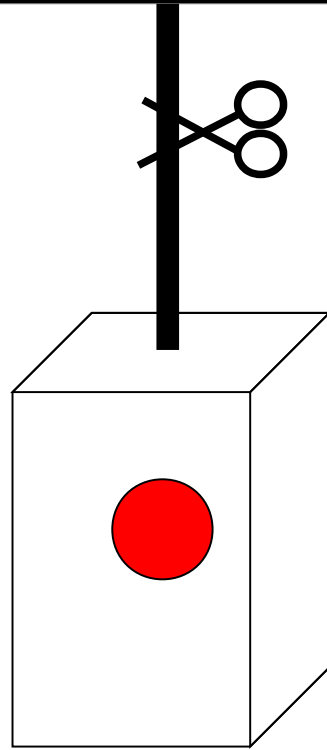
Relativité générale : l'expérience de l'ascenseur



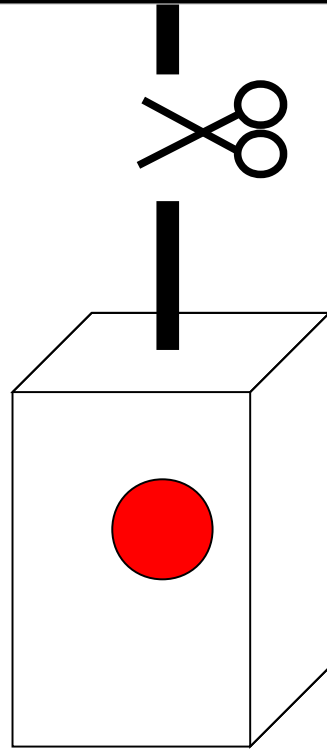
Relativité générale : l'expérience de l'ascenseur



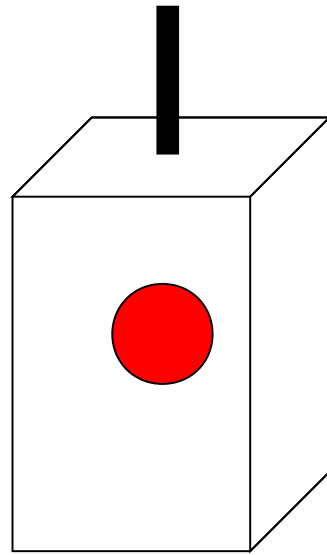
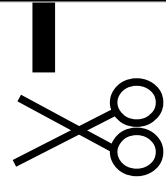
Relativité générale : l'expérience de l'ascenseur

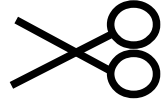


Relativité générale : l'expérience de l'ascenseur

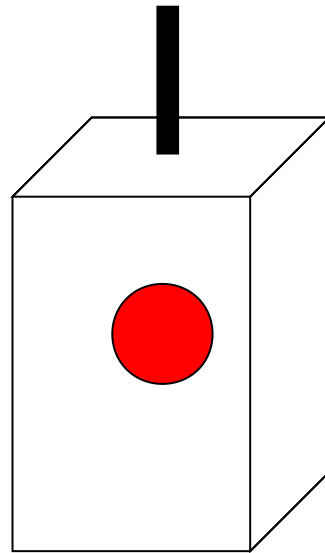


Relativité générale : l'expérience de l'ascenseur

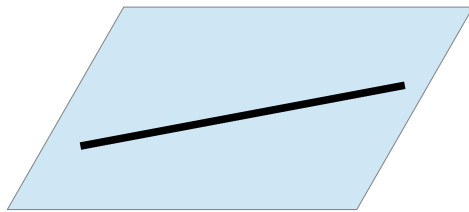




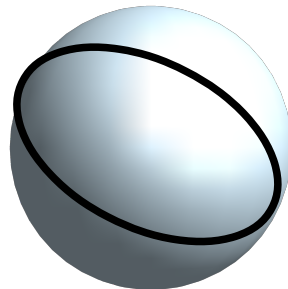
→ La force gravitationnelle peut être effacée dans les référentiels en chute libre.



- La gravité est une force fictive.
- Les trajectoires de chute libre sont donc des trajectoires sans force extérieure.
- Les trajectoires de chute libre minimisent donc « l'action » de la Nature (principe de moindre action).
- Les trajectoires du chute libre sont donc minimisantes, or elles sont courbes (coniques) donc la géométrie est courbe.

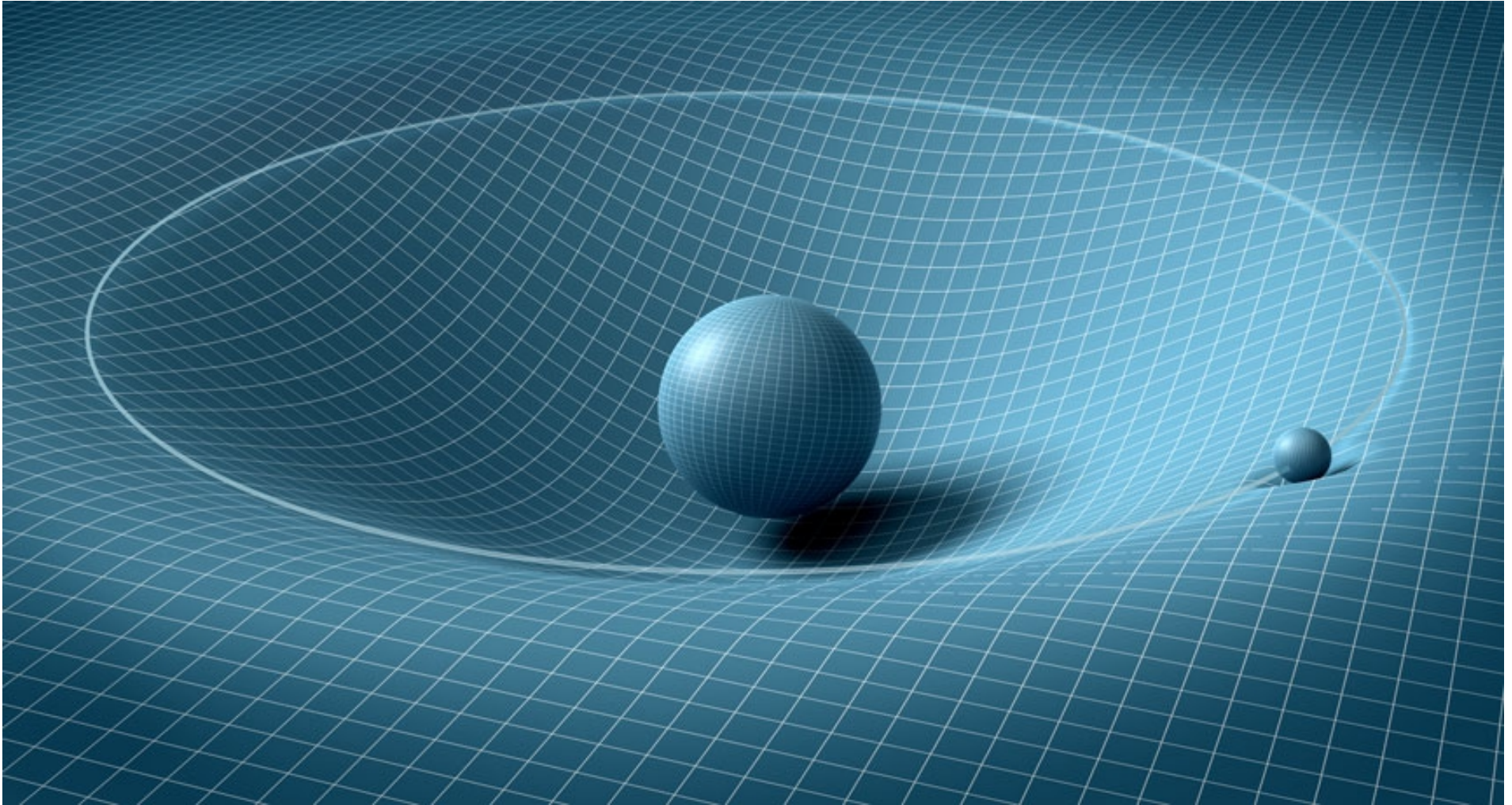


chemin minimisant
sur un plan (droite)



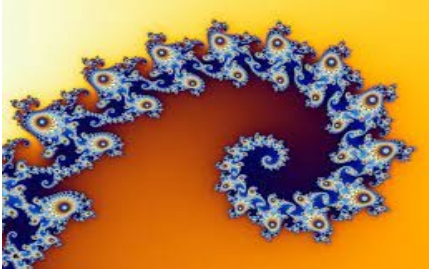
chemin minimisant
sur une sphère
(grand cercle)

La gravité n'est pas une force mais une manifestation de la courbure de l'espace-temps.

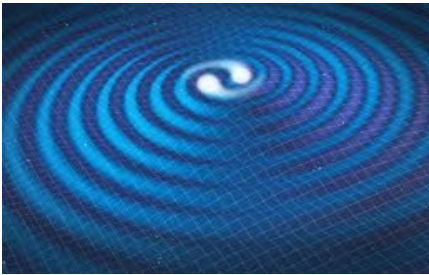


Attention, la géométrie observée est relative à l'observateur !

Les problèmes du modèle standard



- Problème de la règle de projection induite par la mesure (transition entre le domaine quantique et le domaine classique).
- Problème de définition du chaos quantique.



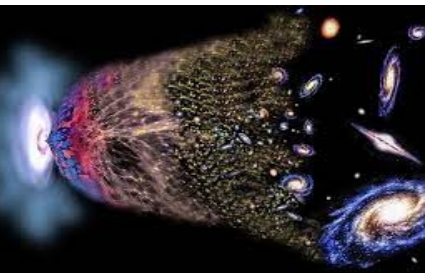
- Problème de l'interaction gravitationnelle entre particules fondamentales.
- Problème des fluctuations du vide à l'échelle de Planck (10^{-35}m).



- Problème de la matière noire (26.8% de l'Univers).
- Problème de l'énergie noire (68.3% de l'Univers).



- Problème de l'origine microscopique du rayonnement Hawking des trous noirs.
- Paradoxe de l'information des trous noirs.

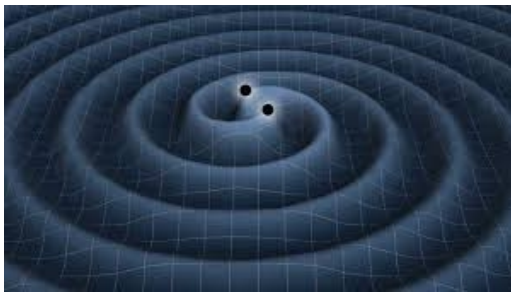


- Problème de la singularité du Big-Bang.
- Problème de l'origine de l'inflation.

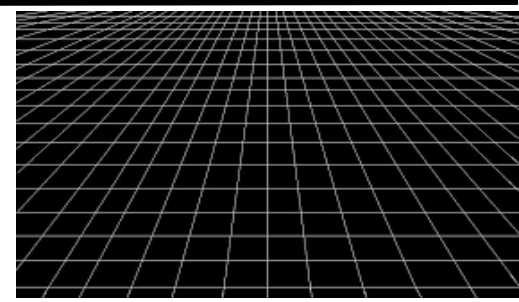
Relativité Générale

Mécanique Quantique

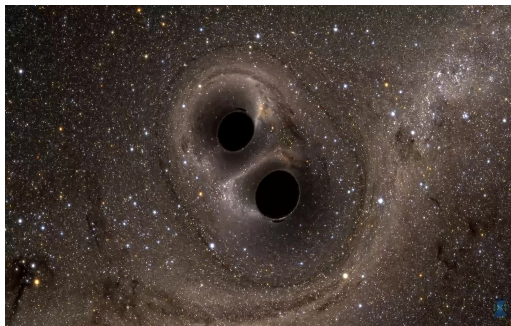
Indépendante d'arrière-fond (espace-temps dynamique)



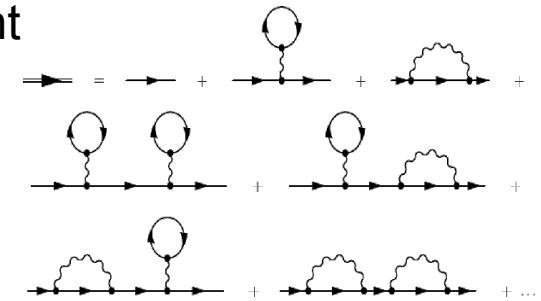
Dépendante d'un espace-temps plat en arrière-fond



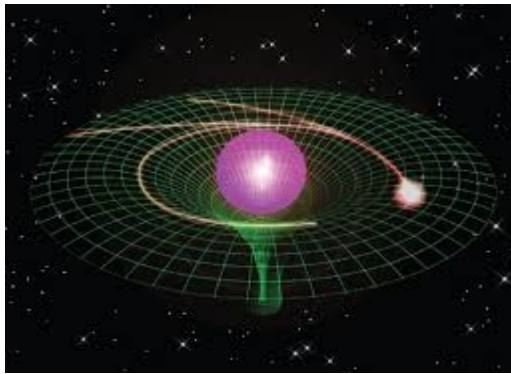
Fortement non-perturbative



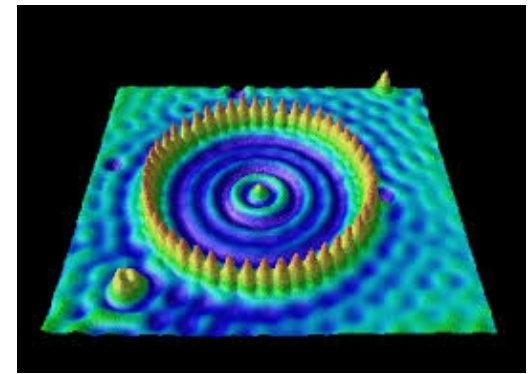
Fondamentalement perturbative renormalisable



Géométrie



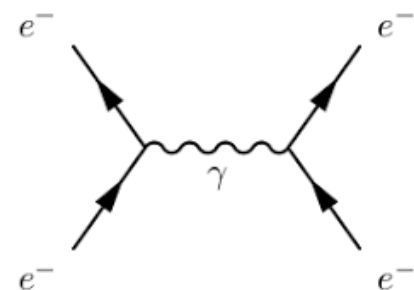
Non-locale (ondulatoire)



Admet un principe d'équivalence :
Gravité \Leftrightarrow Inertie
 \Leftrightarrow Géométrie



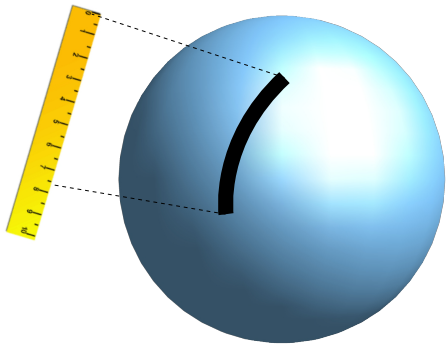
Les interactions sont des théories de jauge : Forces = échanges de particules



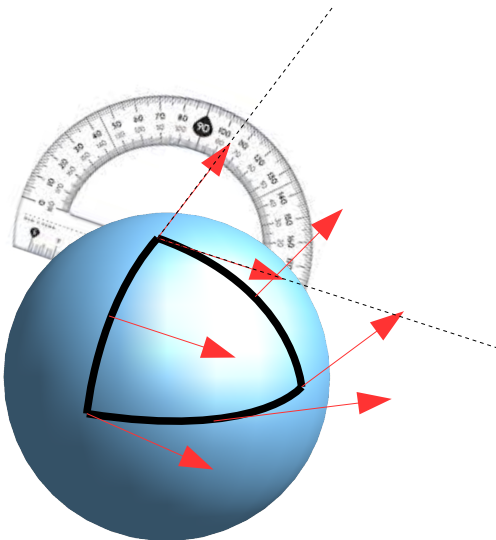
The background of the slide is a complex, blue-toned grid of curved lines. These lines represent the curvature of spacetime, with a central point where the lines converge and curve most sharply, creating a tunnel-like effect. The lines are more densely packed and curved near the center, becoming more regular and less curved towards the edges. A semi-transparent white rectangular box is centered horizontally and vertically, containing the title text in a bold, black, sans-serif font.

Le relationnisme en relativité générale

La géométrie courbe
(Riemann)

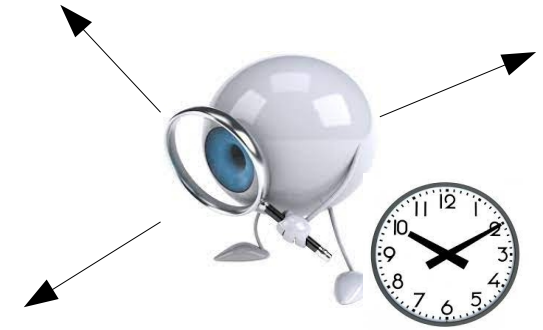


une « métrique »



*un «symbole
de Christoffel»*

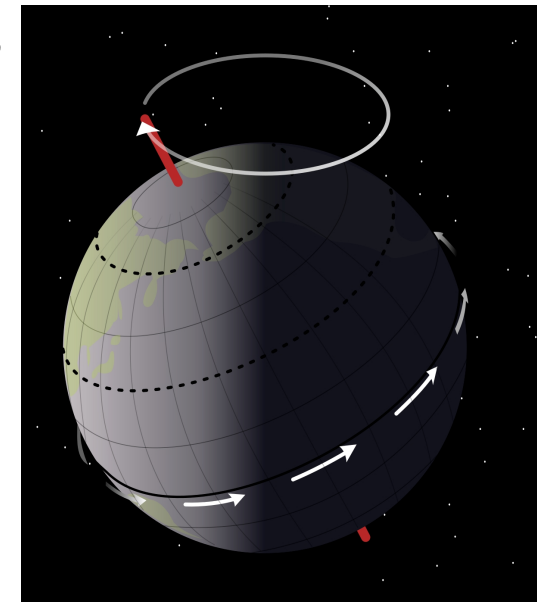
La phénoménologie dynamique
(Cartan)



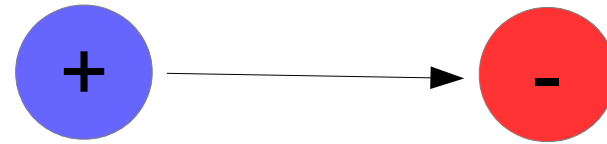
*une « tétrade »
(« vierbein »)*



*une « connexion
de Lorentz »*



élément d'une tétrade
(direction de chute libre)



champ électrique
(direction de l'attraction
électrostatique)

connexion de Lorentz
(axe de précession des
moments angulaires)



champ magnétique
(axe de précession des
moments magnétiques)

Comparaison des versions de la gravitation

	Espace-temps	Force de gravité
Physique newtonienne	Plat Absolu (pour les vitesses)	Un champ de type « électrique ».
Relativité générale (Einstein)	Courbe Relatif	
Relativité générale (Cartan)		Deux champs de types « électrique » et « magnétique »

Substantialisme (selon Einstein) : pas de gravité, force fictive manifestation de la courbure de l'espace-temps.

Relationnisme (selon Cartan) : deux forces gravitationnelles, pas besoin d'espace-temps (fiction ontologique, manifestation de l'interaction de la matière avec les champs de gravité).

Pas d'espace-temps ? Alors quoi ?

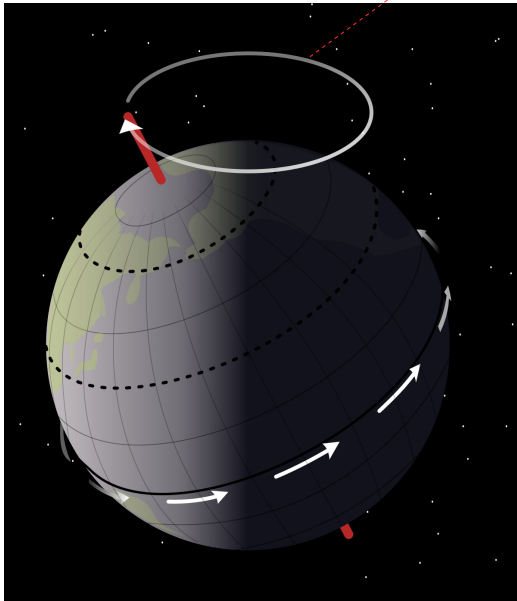
Relationnisme (selon Penrose) : pas d'espace-temps mais une structure causale (« réseau orienté de causes et conséquences dont les champs de gravité (causes) et les attractions-précessions (conséquences)).

L'espace-temps n'est qu'une image mentale nous permettant de nous représenter la structure causale comme des événements positionnés dans l'espace à des dates dans le temps.

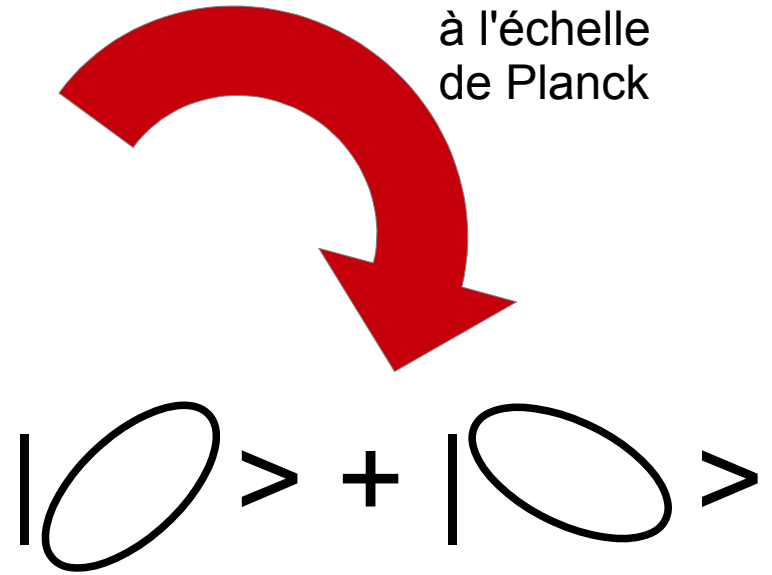


La gravité quantique par boucles

boucle de précession
(effet intégré de la
connexion de Lorentz)



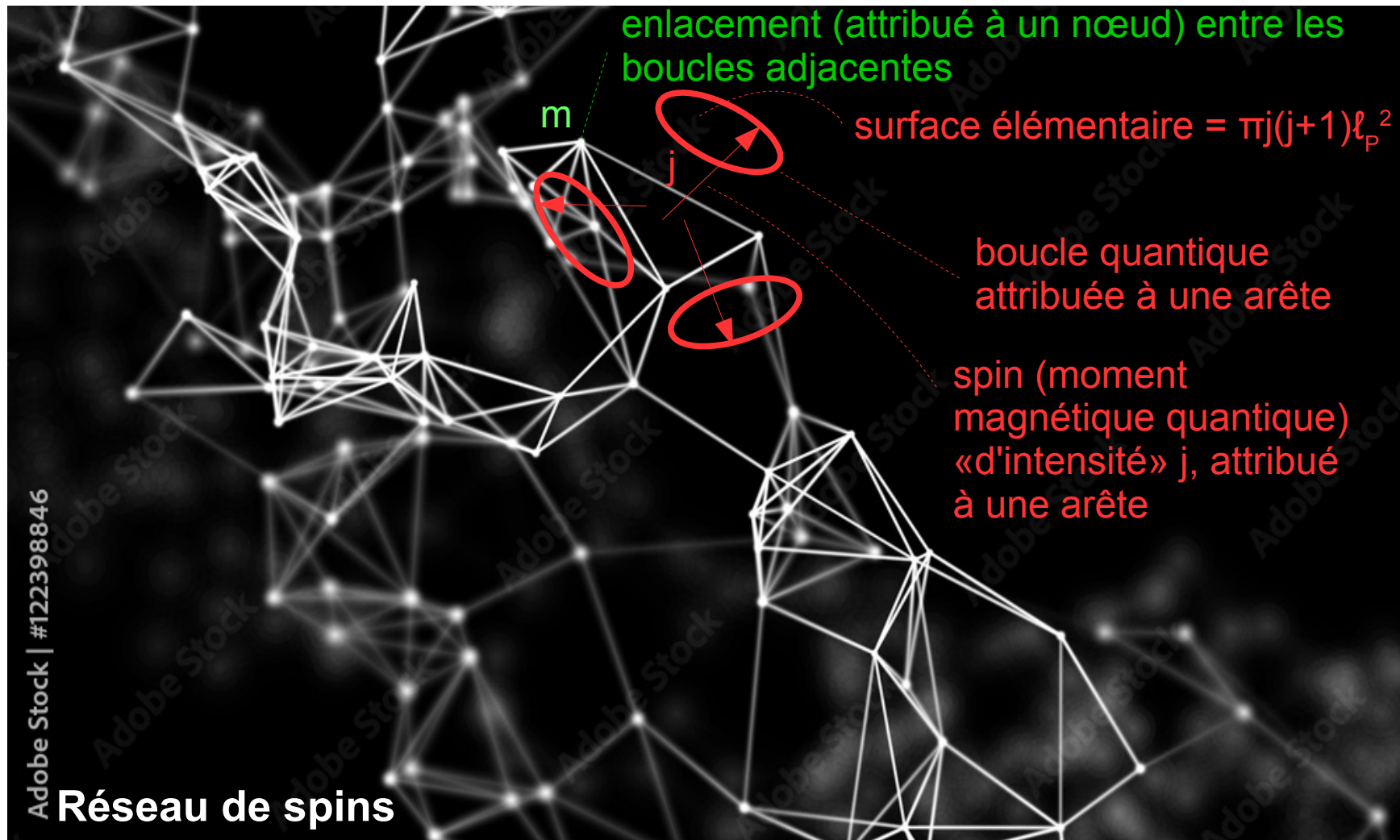
à l'échelle
de Planck



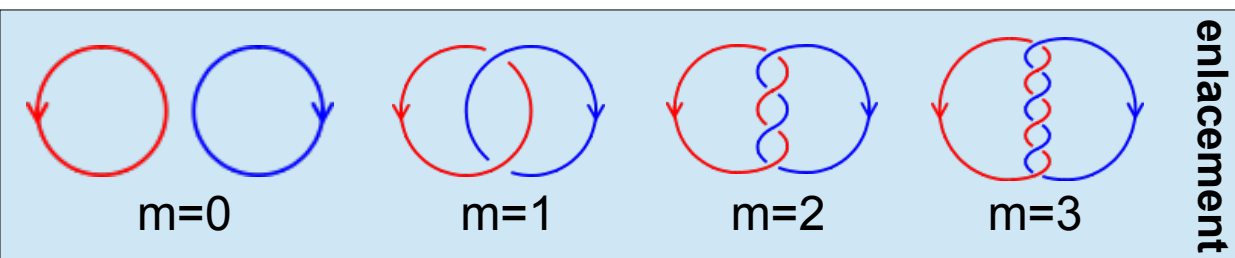
chat de Schrödinger entre
états de boucles

Reconstruction d'une géométrie : les mousses de spins

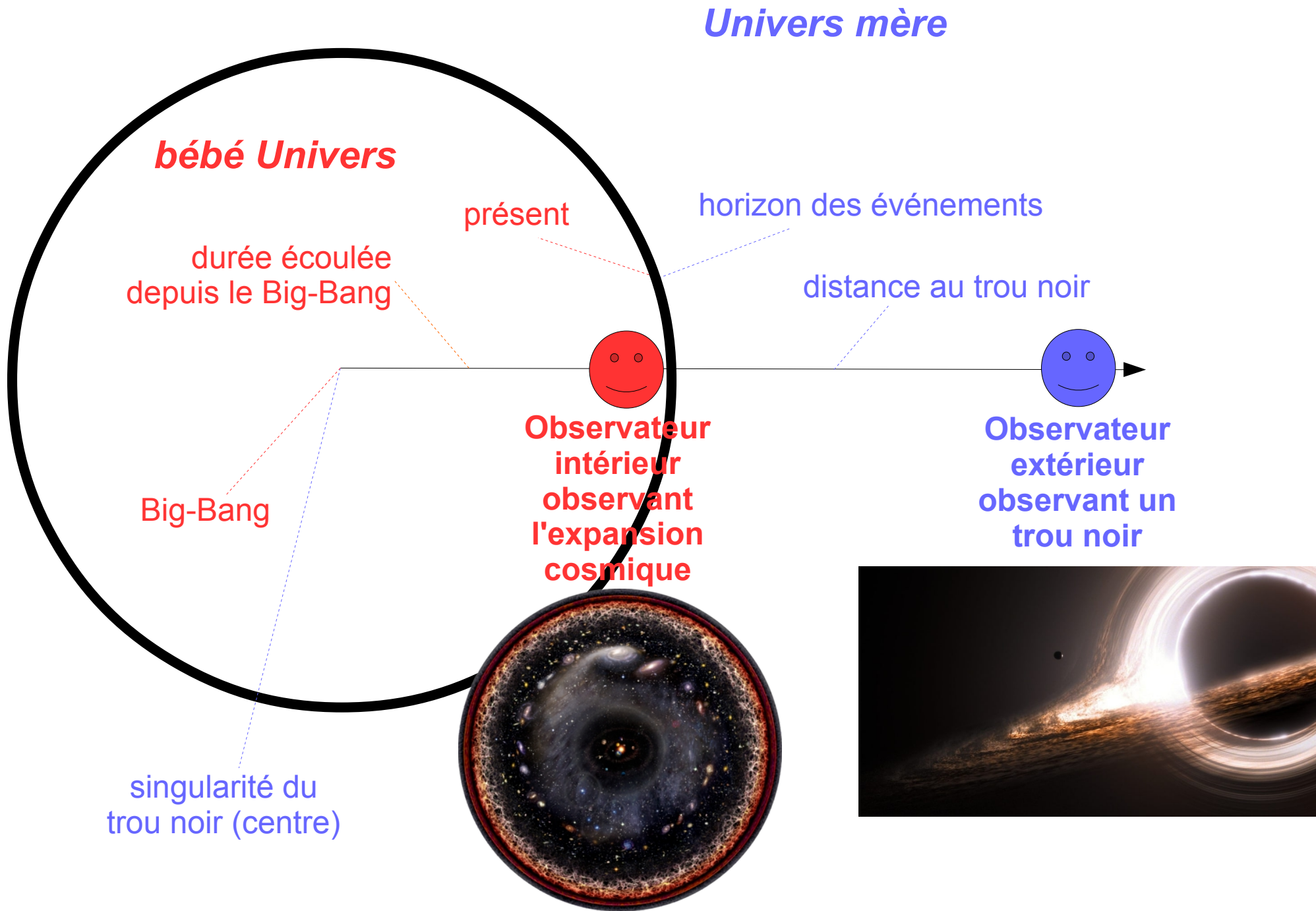
($\ell_p = 10^{-35}$ m longueur de Planck)



Mousse de spins : le réseau se reconfigure tous les $t_p = 10^{-43}$ s (temps de Planck)

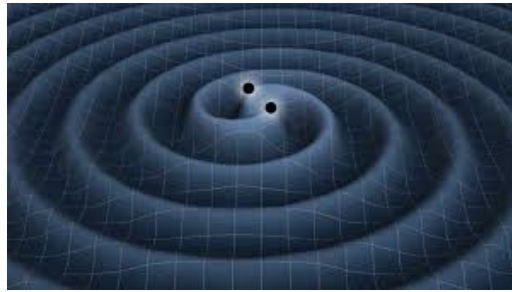


On ne sait pas définir les longueurs quantiques !

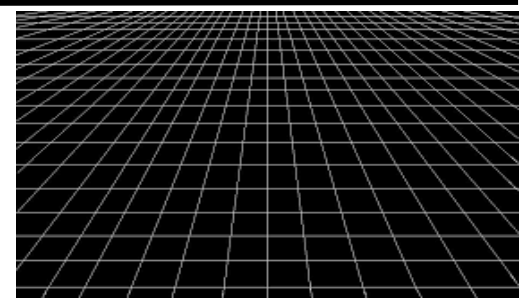


Gravitation Quantique par Boucles

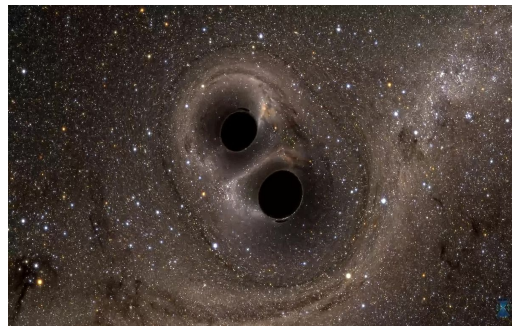
Indépendante d'arrière-fond (espace-temps dynamique)



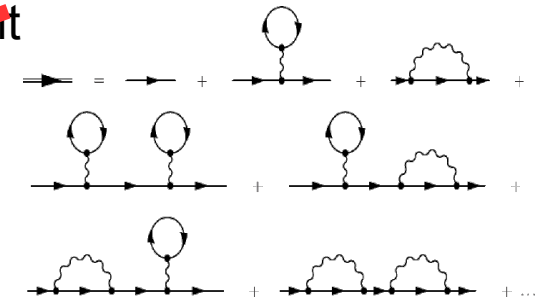
~~Dépendante d'un espace-temps plat en arrière-fond~~



Fortement non-perturbative

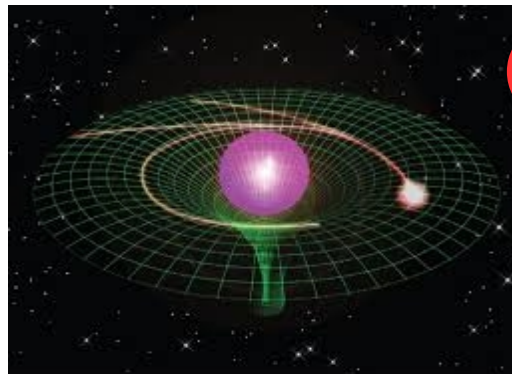


~~Fondamentalement perturbative renormalisable~~

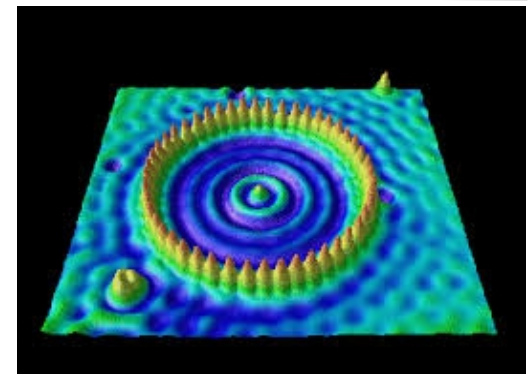


Géométrique

(néanmoins aires et volumes sont définissables, mais pas les longueurs)



Non-locale (ondulatoire)

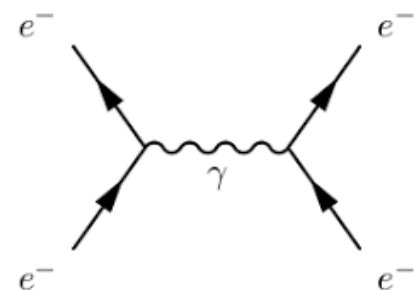


Admet un principe d'équivalence :
Gravité \Leftrightarrow Inertie
 ~~\Leftrightarrow Géométrie~~

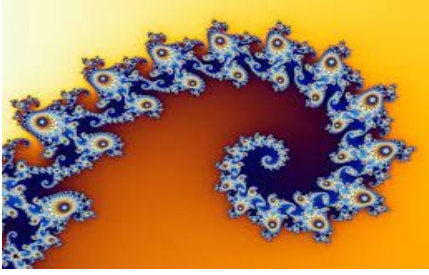


Les interactions sont des théories de jauge :

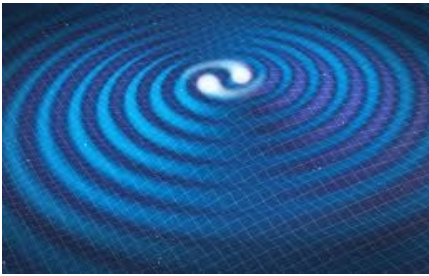
~~Forces = échanges de particules~~



Résolutions des problèmes



- Problème de la règle de projection induite par la mesure (transition entre le domaine quantique et le domaine classique). ✗
- Problème de définition du chaos quantique. ✗



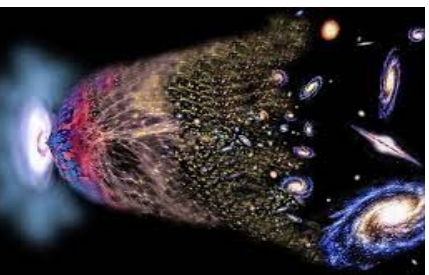
- Problème de l'interaction gravitationnelle entre particules fondamentales. ✓
- Problème des fluctuations du vide à l'échelle de Planck (10^{-35}m). ✓



- Problème de la matière noire (26.8% de l'Univers). ✗
- Problème de l'énergie noire (68.3% de l'Univers). ✗



- Problème de l'origine microscopique du rayonnement Hawking des trous noirs. ✓
- Paradoxe de l'information des trous noirs. ✓



- Problème de la singularité du Big-Bang. ✓
- Problème de l'origine de l'inflation. ✗ (mais est-elle nécessaire ?)