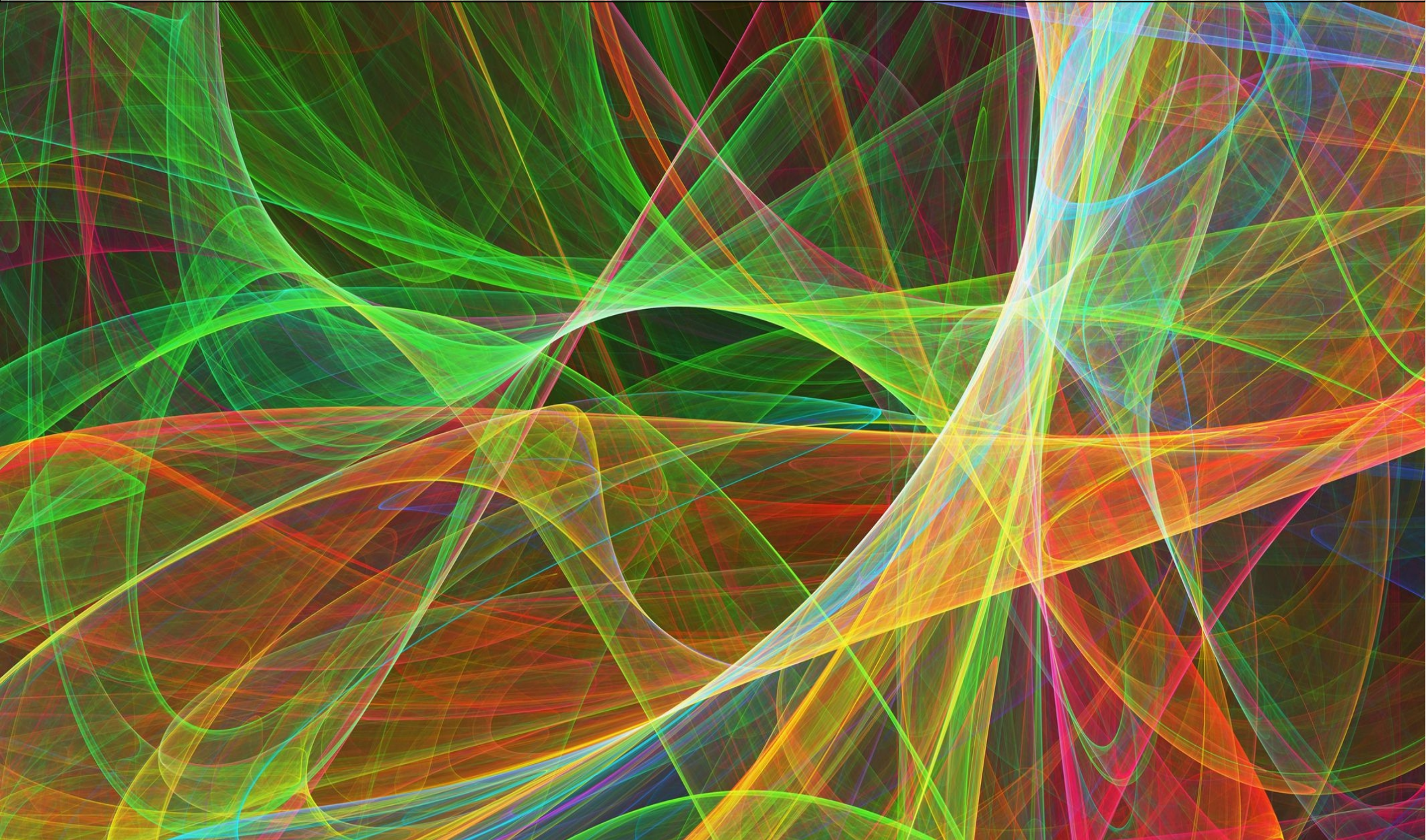


Gravité émergente et théorie M

David Viennot – Maître de Conférences

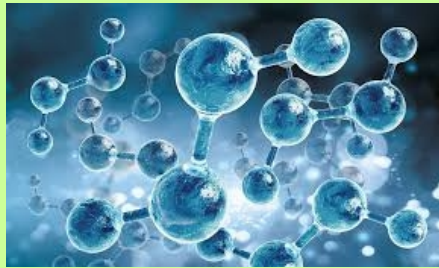
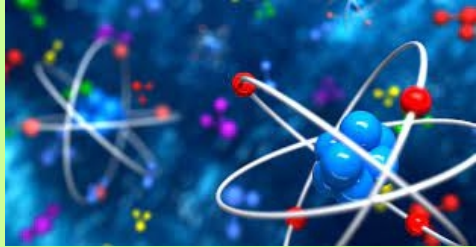
Institut UTINAM (CNRS) / Observatoire de Besançon / UFC





Le modèle standard de la physique

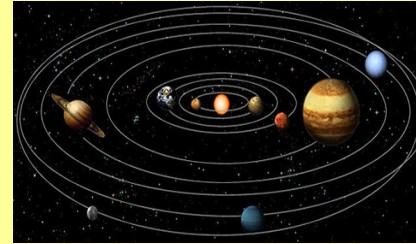
Physique quantique



approximation
pour les objets de
grandes
dimensions



Relativité générale



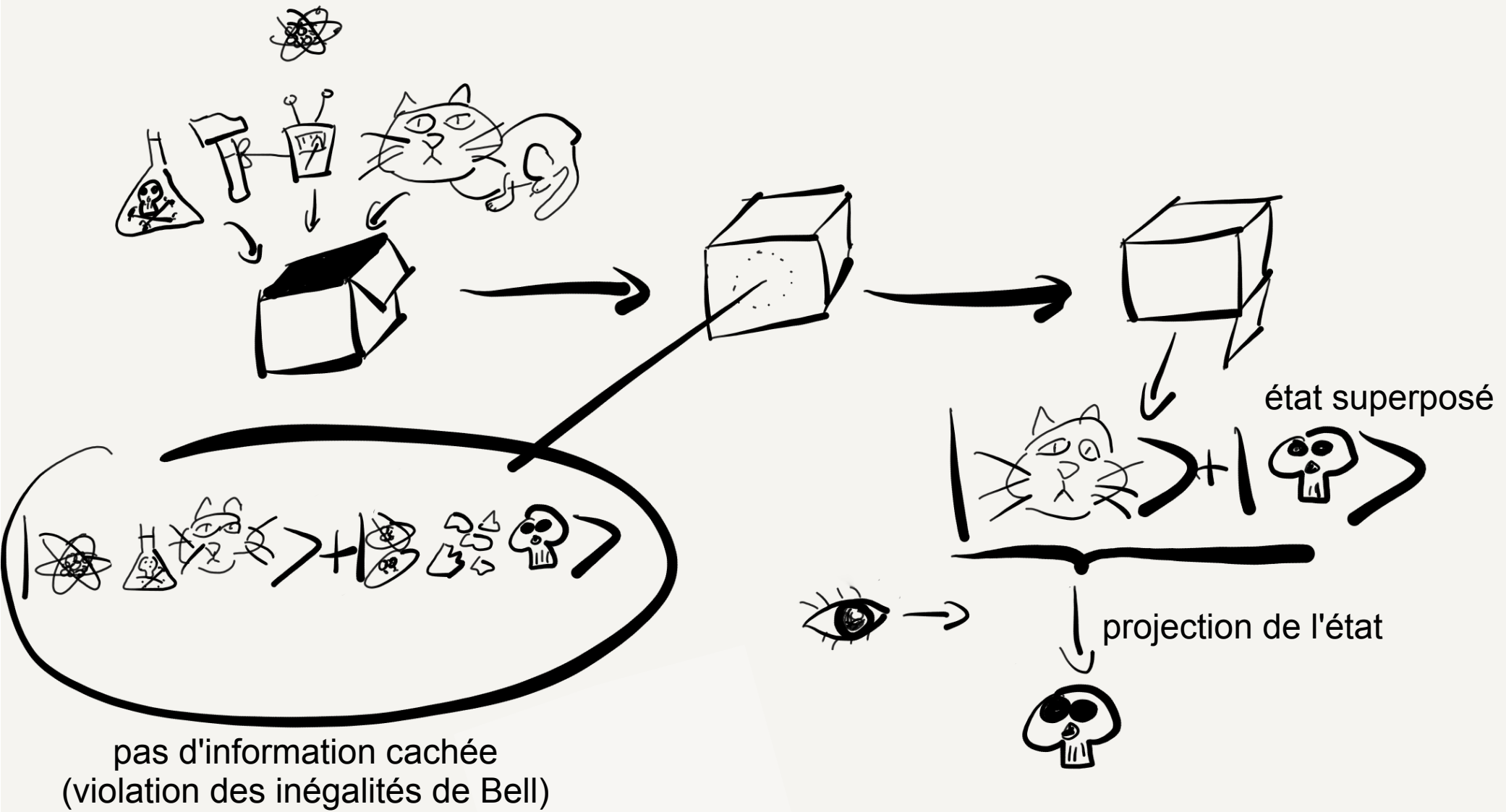
approximation
pour les objets de
faibles densités



Physique classique (Newton + Maxwell)



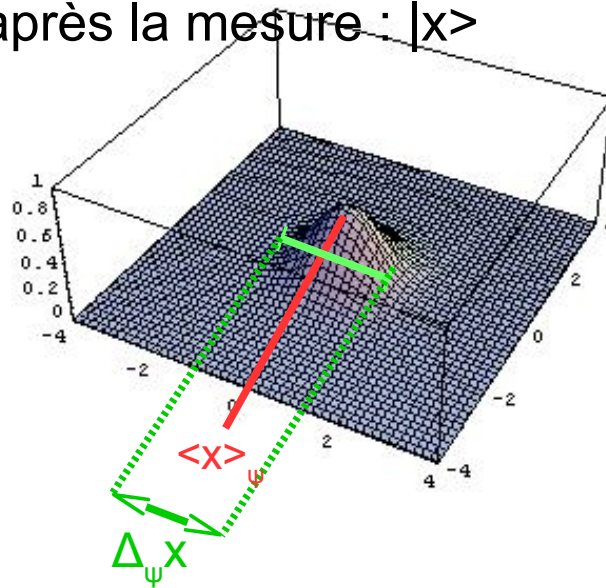
La mécanique quantique : la parabole du chat de Schrödinger



État d'une particule en mécanique classique : x [position], v [vitesse]

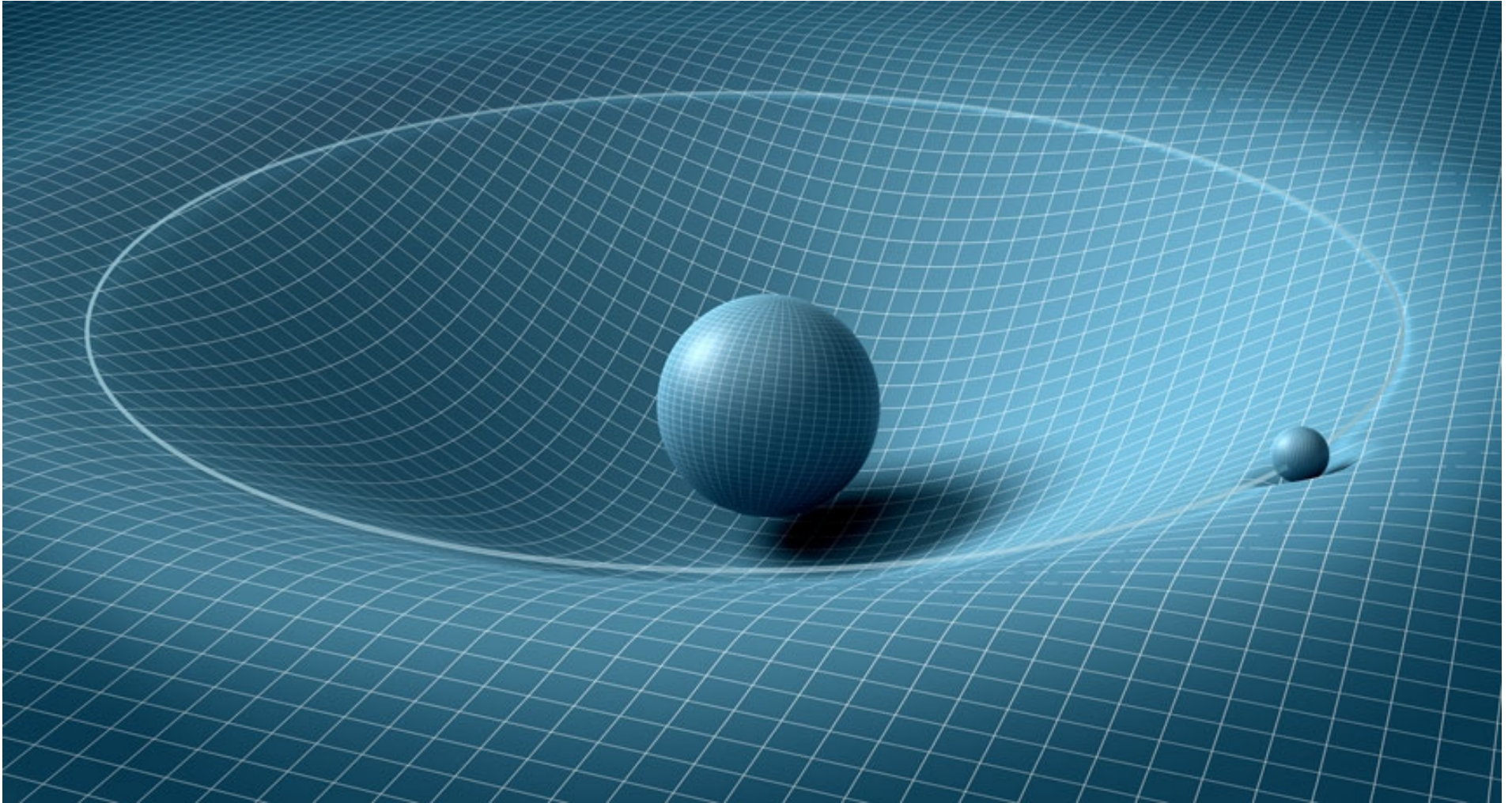
État quantique $|\psi\rangle$:

- mesure de position : probabilité de trouver x : $p_\psi(x)$, valeur moyenne : $\langle x \rangle_\psi$
avec incertitude : $\Delta_\psi x$, état après la mesure : $|x\rangle$



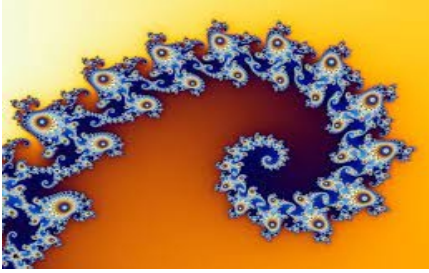
- mesure de vitesse: probabilité de trouver v : $p_\psi(v)$, valeur moyenne : $\langle v \rangle_\psi$
avec incertitude : $\Delta_\psi v$, état après la mesure : $|v\rangle$
- mesure de vitesse après avoir trouvé la position en x : $p_x(v)$, $\langle v \rangle_x$, $\Delta_x v$
- mesure de position après avoir trouvé la vitesse à v : $p_v(x)$, $\langle x \rangle_v$, $\Delta_v x$
- $\rightarrow X \cdot V \neq V \cdot X$ [non-commutativité des observables]
 $\Leftrightarrow \Delta_\psi x \Delta_\psi v \geq \hbar/(2m)$ [Principe d'incertitude de Heisenberg]

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

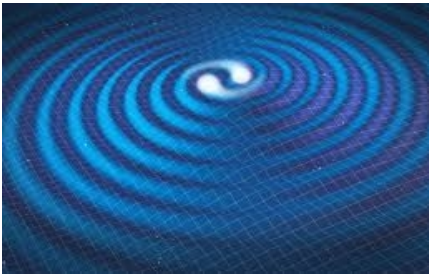


Attention, la géométrie observée est relative à l'observateur !

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.



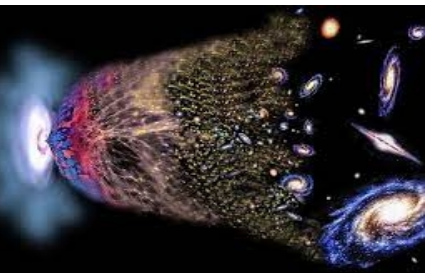
- Problème de l'interaction gravitationnelle entre particules fondamentales.
- Problème des fluctuations du vide à l'échelle de Planck (10^{-35}m).



- 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.

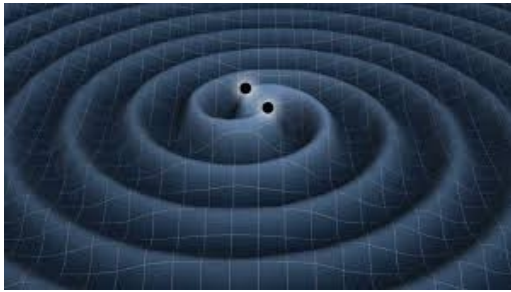


- Problème de la singularité du Big-Bang.
- Problème de l'origine de l'inflation.

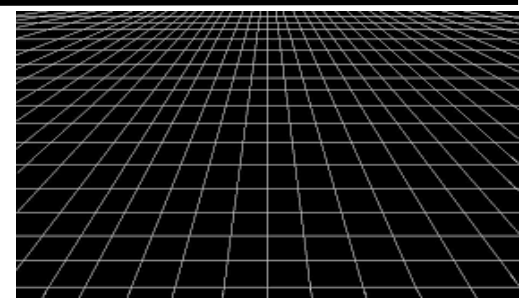
Relativité Générale

Mécanique Quantique

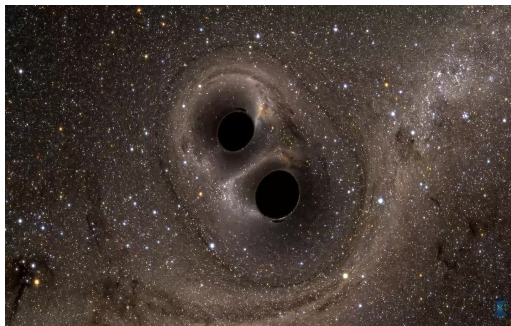
Indépendante d'arrière-fond (espace-temps dynamique)



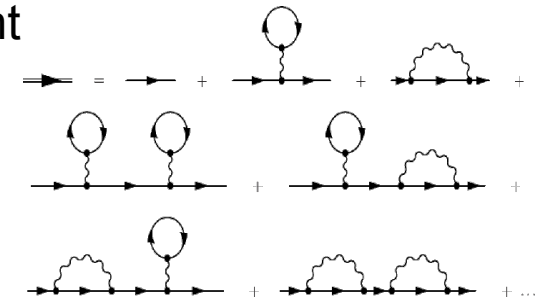
Dépendante d'un espace-temps plat en arrière-fond



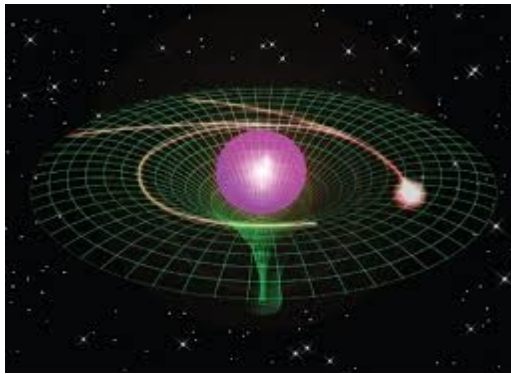
Fortement non-perturbative



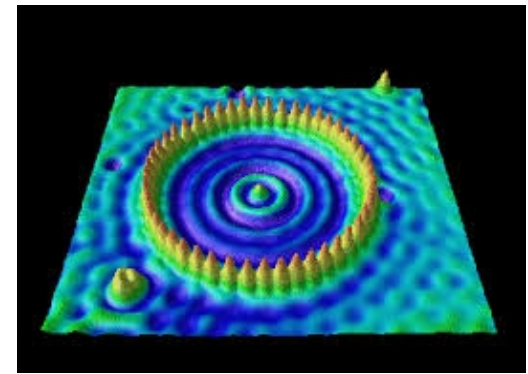
Fondamentalement perturbative renormalisable



Géométrique



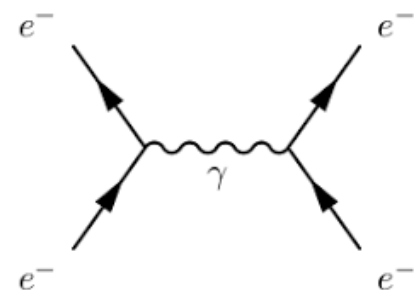
Non-locale (ondulatoire)



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



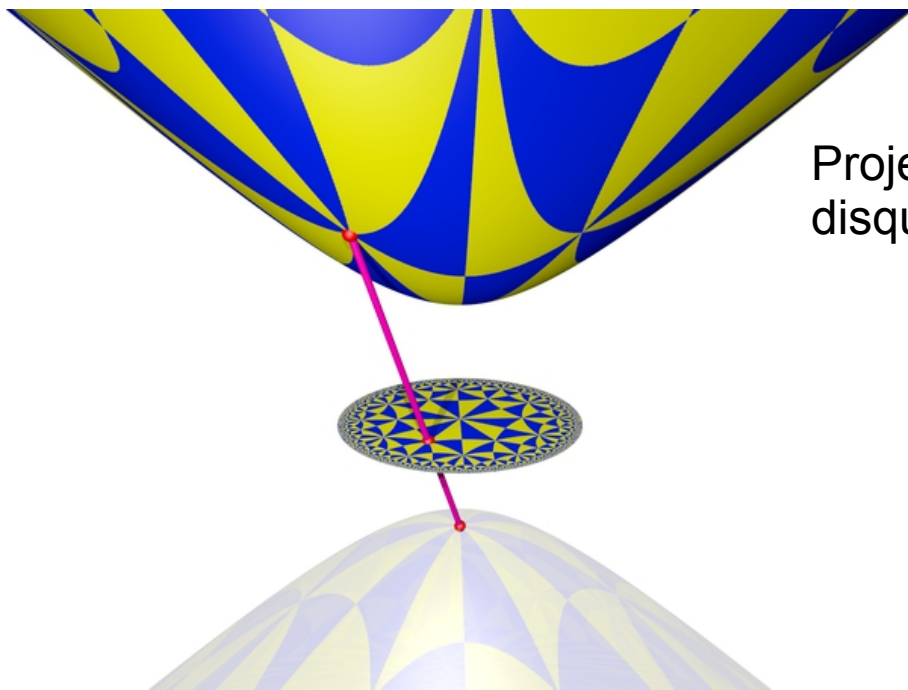
Les interactions sont des théories de jauge : Forces = échanges de particules





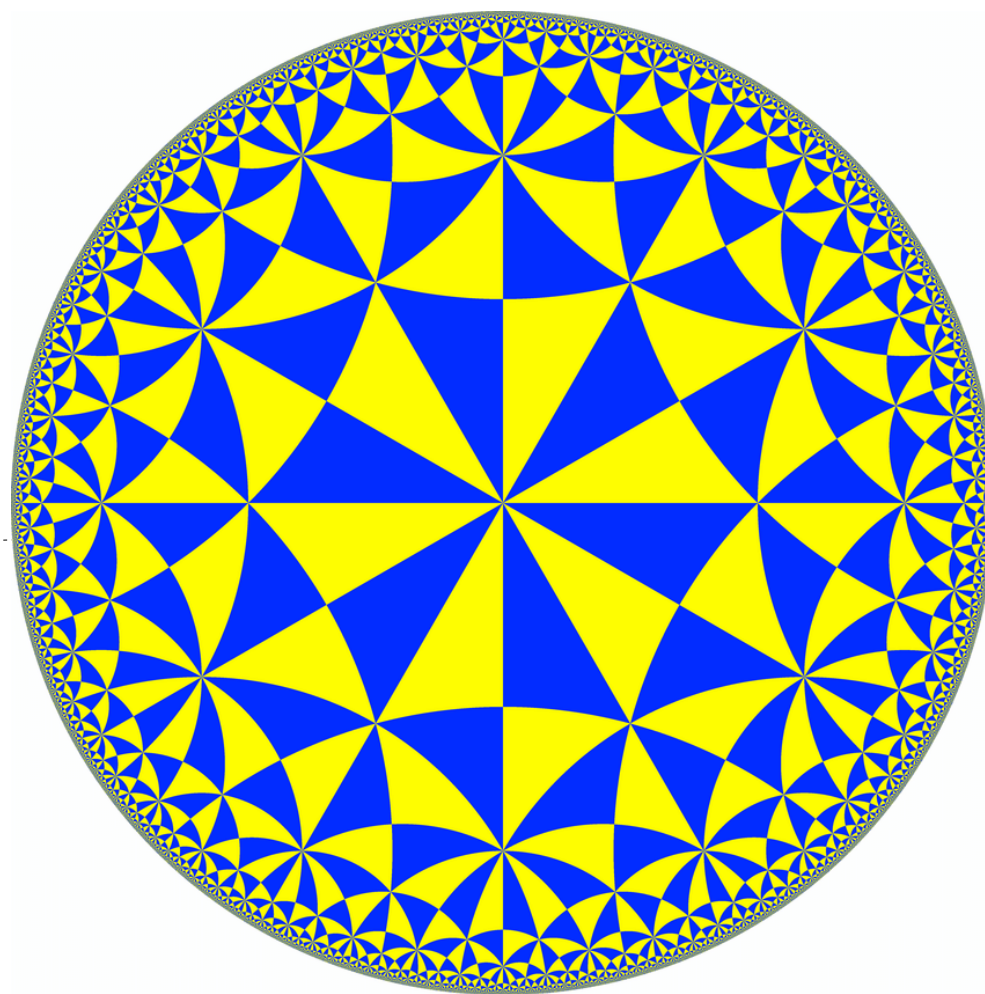
**Le principe holographique
et la gravitation émergente**

Le disque de Poincaré

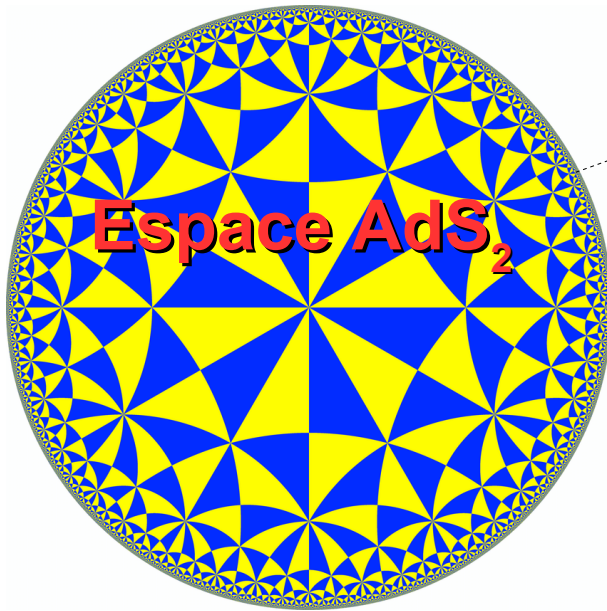


Projection stéréographique de l'hyperboloïde sur le disque de Poincaré

Disque de Poincaré



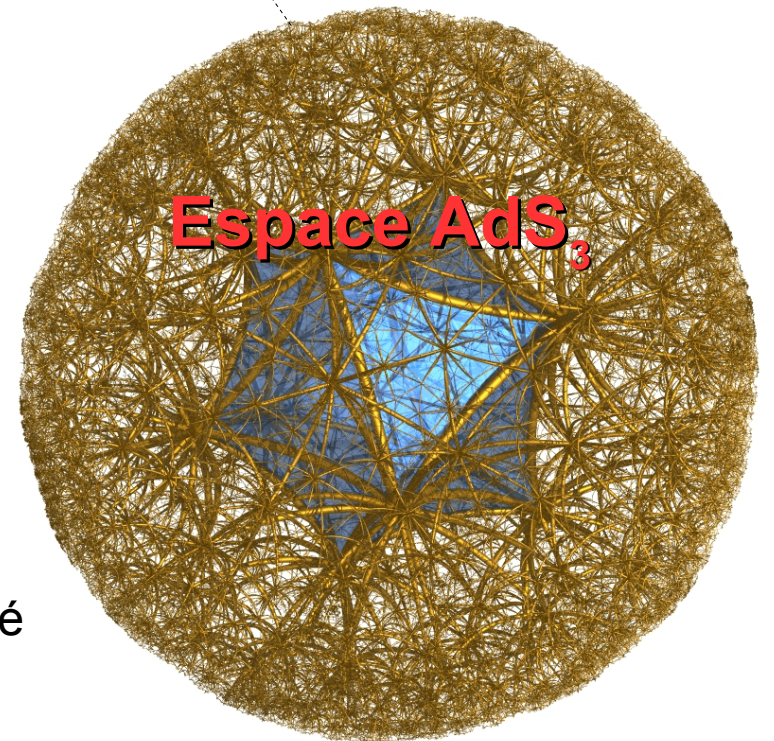
Cercle limite
(à l'infini sur l'hyperboloïde)



Théorie de l'information CFT₁

Disque de Poincaré

Théorie de l'information CFT₂



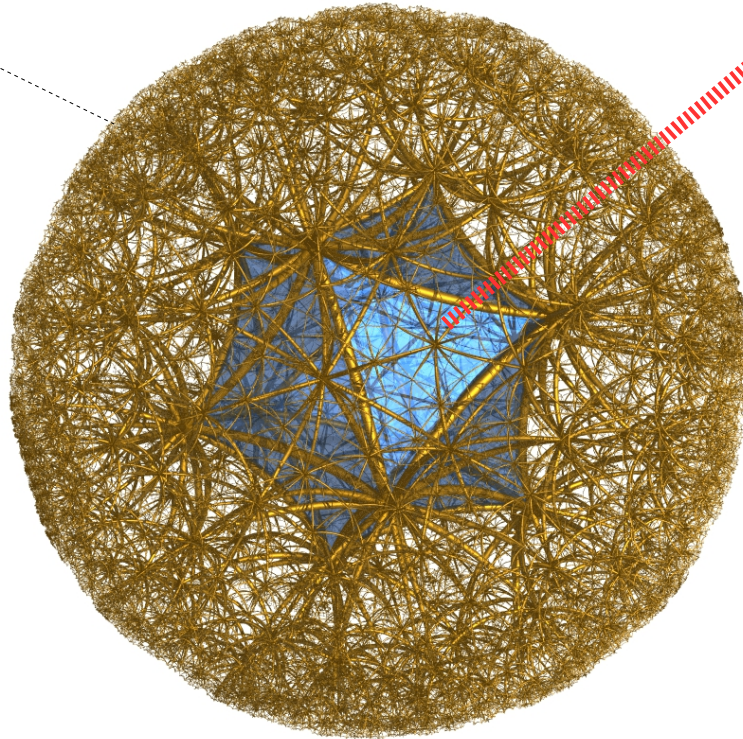
Boule de Poincaré

AdS : Anti de Sitter (cosmologie hyperbolique)

CFT : théorie de champ conforme (exemple : théorie des champs électromagnétiques)

Le principe holographique

horizon des événements
du trou noir encodant
l'information dans une
théorie CFT_2



hologramme de l'information
3D dans un espace anti de
Sitter (**pas l'intérieur du
trou noir!!!**)

Correspondance AdS/CFT :

géométrie 3D \Leftrightarrow théorie (quantique) de l'information

→ pas de gravité à l'échelle de Planck ($\ell_p = 10^{-35} \text{m}$), seulement de l'information quantique (\sim hypothèse de von Neumann : « *It for qubit* »).

→ Nombre de qubits formant l'horizon : $N = A/\ell_p^2$

→ Température du système de qubits : $\frac{1}{2} N k_B T = M c^2$ ($T = 2 M c^2 / (N k_B)$)

→ Gravité émerge des effets thermodynamiques collectifs des qubits à grande échelle :

$$F = m \times 2\pi \hbar^{-1} c k_B T = m \times 4\pi \hbar^{-1} c^3 M / N = m \times 4\pi G M / A = G m M / r^2$$

comme la pression d'un gaz qui résulte des collisions des atomes agités par les fluctuations thermiques $P = m \times N / V \times \langle v \rangle^2$ avec $\frac{1}{2} m \langle v \rangle^2 = \frac{3}{2} N k_B T$

Remarque : à l'échelle de Planck, ni espace-temps ni force gravitationnelle, mais seulement la structure causale des « calculs » entre qubits.

Unité d'information : le qubit (quantum bit)

bit classique : états possibles 0 ou 1

qubit : $a|0\rangle + b|1\rangle$ (avec $|a|^2 + |b|^2 = 1$, $|a|^2$ poids de l'état 0 dans la superposition)

violation du principe du tiers exclu en physique quantique

Parabole du chat de Schrödinger

Interprétation de l'École de Copenhague

Tant qu'on ne le mesure pas, le qubit est à la fois dans l'état 0 et l'état 1.

Tant que l'on n'ouvre pas la boîte, le chat est à la fois mort et vivant.

Interprétation des mondes multiples d'Everett

Il existe plusieurs réalités parallèles, certaines dans lesquelles le qubit est dans l'état 0 et d'autres dans lesquelles il est dans l'état 1, qui interfèrent tant qu'elles ne sont pas séparées par la mesure.

Il existe plusieurs réalités parallèles, certaines dans lesquelles le chat est vivant et d'autres dans lesquelles il est mort, qui interfèrent tant qu'elles ne sont pas séparées par l'ouverture de la boîte.

→ les probabilités quantiques deviennent des statistiques :

$$p(\text{chat vivant}) = (\text{Nombre de réalités où le chat est vivant}) / (\text{Nombre total de réalités})$$

→ calculs « parallèles » des qubits \Leftrightarrow réalités parallèles

→ mesure = décohérence liée à la température des qubits


\Leftrightarrow intrication entre réalités parallèles

\Leftrightarrow manque d'information de notre réalité concernant les autres.

→ phénomène gravitationnel émergent

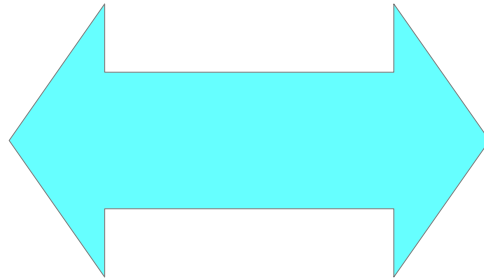
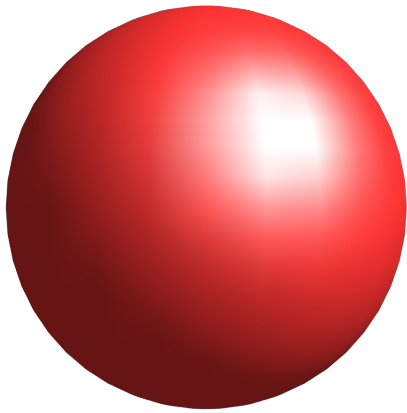
atome vs atome → interaction (car gravité de l'atome négligeable)

atome vs instrument → projection (car gravité de l'instrument importante)

An aerial photograph of a circular wetland or pond system. The center is a bright, circular area, surrounded by concentric rings of varying vegetation and water. The outer rings show more dense, darker vegetation, while the inner rings are lighter and more open. The overall pattern is highly symmetrical and circular.

La gravitation non-commutative

sphère classique



Observables :

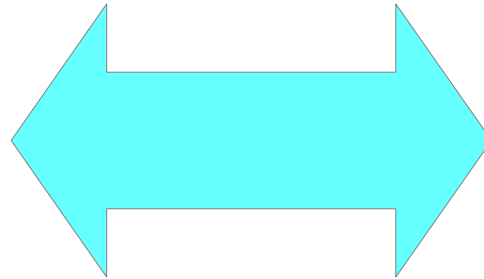
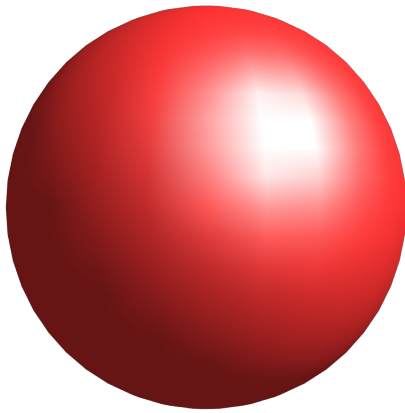
θ : latitude

φ : longitude

$f(\theta, \varphi)$

$$\theta\varphi = \varphi\theta$$

sphère classique



Idée de Connes

Observables commutatives :

θ : latitude

φ : longitude

$f(\theta, \varphi)$

$$\theta\varphi = \varphi\theta$$



Observables non-commutatives:

Θ : latitude

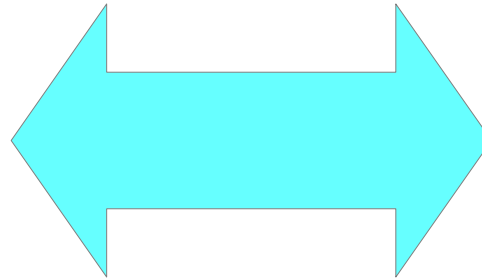
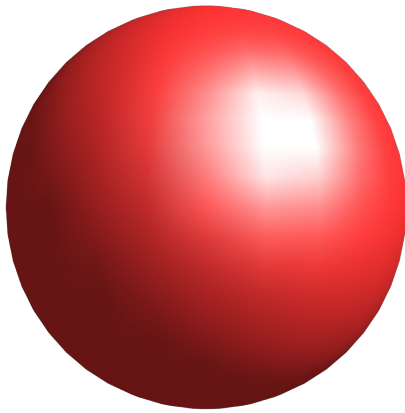
Φ : longitude

$P(\Theta, \Phi)$

$$\Theta \cdot \Phi \neq \Phi \cdot \Theta$$

$$\Leftrightarrow \Delta\Theta\Delta\Phi \geq \frac{1}{2}$$

sphère classique



Observables commutatives :

θ : latitude

φ : longitude

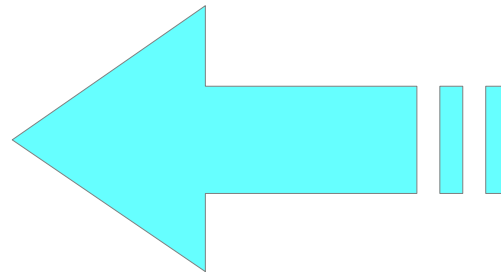
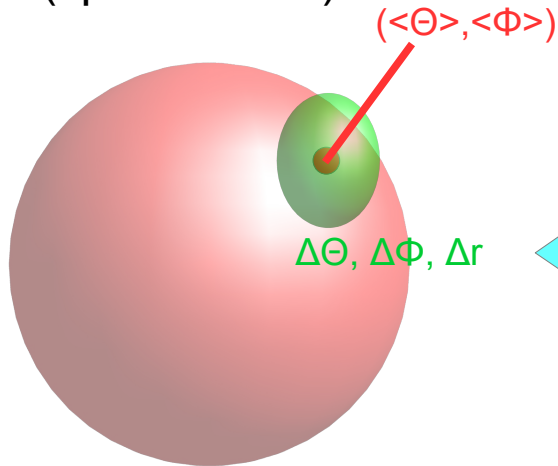
$f(\theta, \varphi)$

$$\theta\varphi = \varphi\theta$$



Idée de Connes

sphère non-commutative
(sphère floue)



Observables non-commutatives:

Θ : latitude

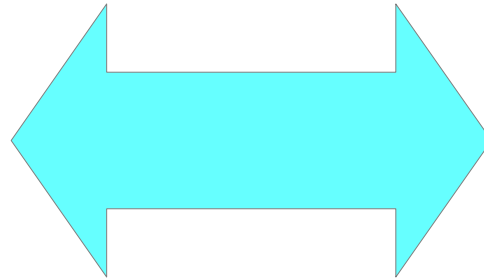
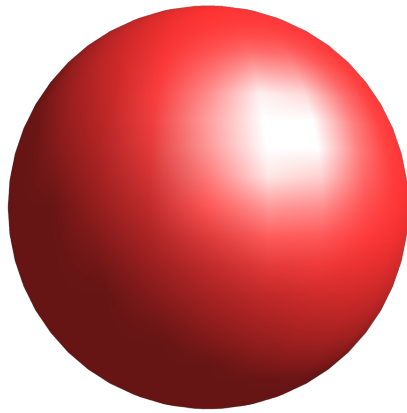
Φ : longitude

$P(\Theta, \Phi)$

$$\Theta \cdot \Phi \neq \Phi \cdot \Theta$$

$$\Leftrightarrow \Delta\Theta\Delta\Phi \geq \frac{1}{2}$$

sphère classique



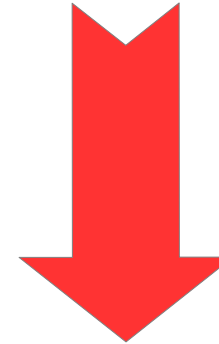
Observables commutatives :

θ : latitude

φ : longitude

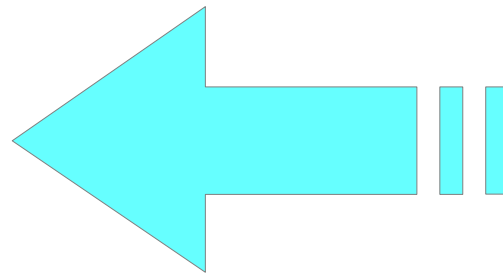
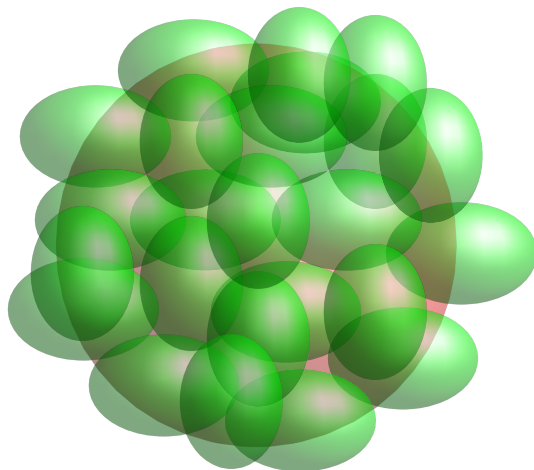
$f(\theta, \varphi)$

$$\theta\varphi = \varphi\theta$$



Idée de Connes

sphère non-commutative
(sphère floue)



Observables non-commutatives:

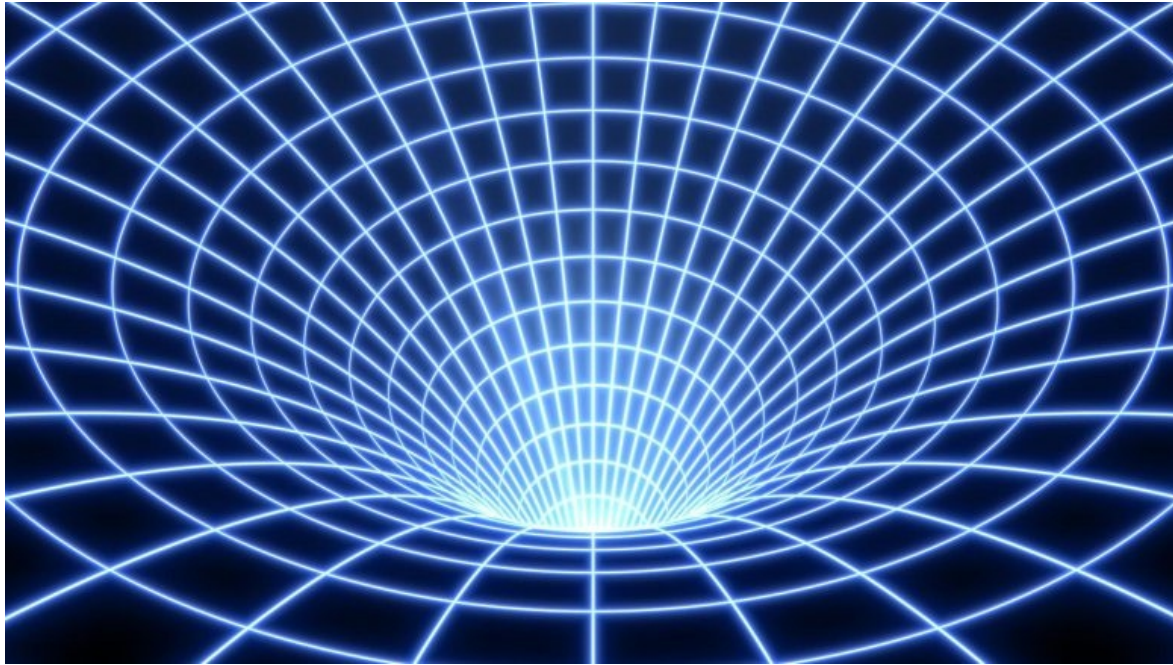
Θ : latitude

Φ : longitude

$P(\Theta, \Phi)$

$$\Theta \cdot \Phi \neq \Phi \cdot \Theta$$

$$\Leftrightarrow \Delta\Theta\Delta\Phi \geq \frac{1}{2}$$



$$\Delta x \Delta y \geq \ell_p^2 / 2$$

$$\Delta y \Delta z \geq \ell_p^2 / 2$$

$$\Delta x \Delta z \geq \ell_p^2 / 2$$

$$c \Delta t \Delta x \geq \ell_p^2 / 2$$

$$c \Delta t \Delta y \geq \ell_p^2 / 2$$

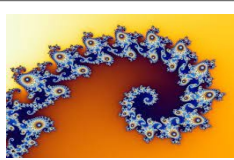
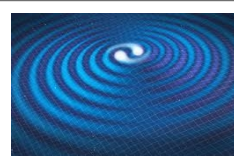


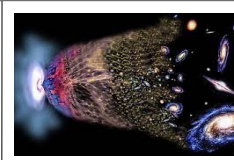
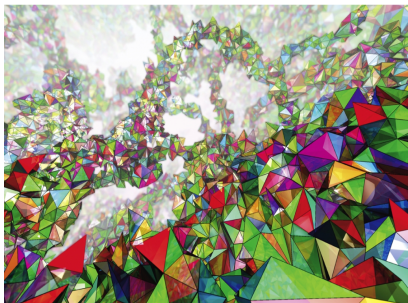
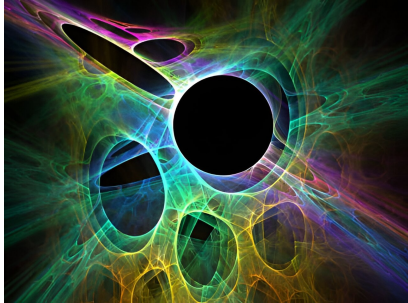
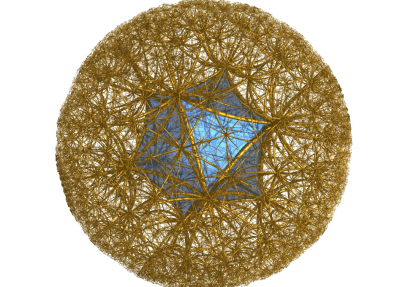

$$c \Delta t \Delta z \geq \ell_p^2 / 2$$

} espace-temps courbe non-commutatif

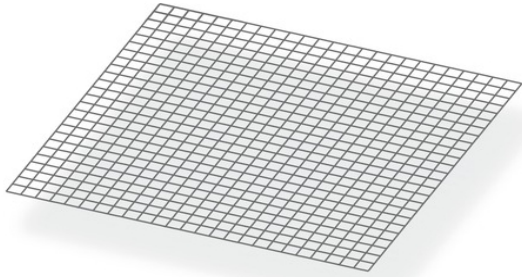
The background is a complex, multi-colored fractal pattern. It features a central white circle that is partially obscured by a horizontal white rectangular box. The fractal consists of numerous overlapping, glowing lines in shades of purple, blue, green, and yellow, creating a dense, web-like structure. The overall effect is that of a highly detailed, mathematical visualization.

La théorie M

Les théories concurrentes de gravitation quantique

						Indé. AF
 <p>Gravitation quantique par boucles + Triangulation dynamique causale</p>	✗ ✗	✓ ✓	✗ ✗	✓ ✓	✓ ✗	✓
 <p>Théories des cordes : type I type IIA type IIB type HE type HO</p>	✗ ✗	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✗	✓ ✓	✗
 <p>Gravitation émergente (AdS/CFT)</p>	✓ ✗	✓ ✗	✗ ✗	✓ ✓	✗ ✗	✗
 <p>Gravitation non-commutative + autres théories de géométries quantiques</p>	✗ ✓	✓ ✗	✗ ✗	✓ ✗	✗ ✗	✓

Les modèles matriciels



$$\begin{aligned} \Delta x \Delta y &\geq \ell_p^2/2 \\ \Delta y \Delta z &\geq \ell_p^2/2 \\ \Delta x \Delta z &\geq \ell_p^2/2 \\ c\Delta t \Delta x &\geq \ell_p^2/2 \\ c\Delta t \Delta y &\geq \ell_p^2/2 \\ c\Delta t \Delta z &\geq \ell_p^2/2 \end{aligned}$$

espace-temps plat non-commutatif

$$X \cdot Y \neq Y \cdot X$$

$$X = \begin{array}{|c|c|} \hline x_{11} & x_{12} \\ \hline x_{12} & x_{22} \\ \hline \end{array}$$

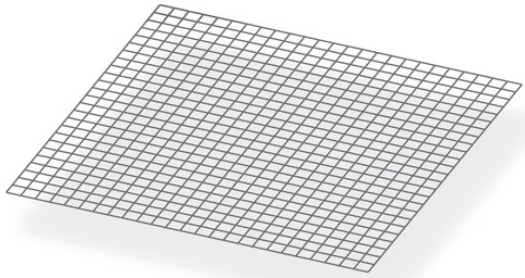
$$Y = \begin{array}{|c|c|} \hline y_{11} & y_{12} \\ \hline y_{12} & y_{22} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{|c|c|} \hline x_{11} & x_{12} \\ \hline x_{12} & x_{22} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|c|} \hline y_{11} & y_{12} \\ \hline y_{12} & y_{22} \\ \hline \end{array}$$

$$\cdot \begin{array}{|c|c|} \hline y_{11} & y_{12} \\ \hline y_{12} & y_{22} \\ \hline \end{array}$$

$$= \begin{array}{|c|c|} \hline x_{11}y_{11} + x_{12}y_{21} & x_{11}y_{12} + x_{12}y_{22} \\ \hline x_{21}y_{11} + x_{22}y_{21} & x_{21}y_{12} + x_{22}y_{22} \\ \hline \end{array}$$

Les modèles matriciels



$$\begin{aligned} \Delta x \Delta y &\geq \ell_p^2/2 \\ \Delta y \Delta z &\geq \ell_p^2/2 \\ \Delta x \Delta z &\geq \ell_p^2/2 \\ c\Delta t \Delta x &\geq \ell_p^2/2 \\ c\Delta t \Delta y &\geq \ell_p^2/2 \\ c\Delta t \Delta z &\geq \ell_p^2/2 \end{aligned}$$

espace-temps plat non-commutatif

$$X \cdot Y \neq Y \cdot X$$

$$X = \begin{array}{|c|c|} \hline x_{11} & x_{12} \\ \hline x_{12} & x_{22} \\ \hline \end{array}$$

$$Y = \begin{array}{|c|c|} \hline y_{11} & y_{12} \\ \hline y_{12} & y_{22} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{|c|c|} \hline x_{11} & x_{12} \\ \hline x_{12} & x_{22} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|c|} \hline y_{11} & y_{12} \\ \hline y_{12} & y_{22} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline x_{11}y_{11} + x_{12}y_{21} & x_{11}y_{12} + x_{12}y_{22} \\ \hline x_{21}y_{11} + x_{22}y_{21} & x_{21}y_{12} + x_{22}y_{22} \\ \hline \end{array}$$

(x_{11}, y_{11})



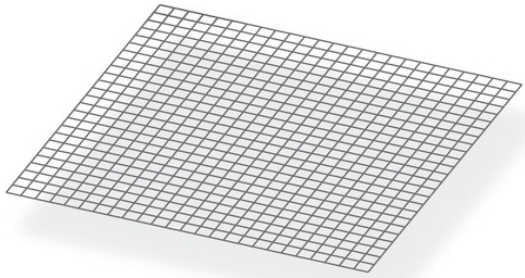
(x_{22}, y_{22})

D0-branes

corde bosonique

~ théorie des cordes de type IIA
à la limite perturbative

Les modèles matriciels



$$\begin{aligned} \Delta x \Delta y &\geq \ell_p^2/2 \\ \Delta y \Delta z &\geq \ell_p^2/2 \\ \Delta x \Delta z &\geq \ell_p^2/2 \\ c\Delta t \Delta x &\geq \ell_p^2/2 \\ c\Delta t \Delta y &\geq \ell_p^2/2 \\ c\Delta t \Delta z &\geq \ell_p^2/2 \end{aligned}$$

espace-temps plat non-commutatif

$$X \cdot Y \neq Y \cdot X$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{12} & x_{22} \end{bmatrix}$$

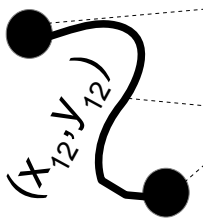
$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{12} & y_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{12} & x_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{12} & y_{22} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} x_{11}y_{11} + x_{12}y_{21} & x_{11}y_{12} + x_{12}y_{22} \\ x_{21}y_{11} + x_{22}y_{21} & x_{21}y_{12} + x_{22}y_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_{11}y_{11} + x_{12}y_{21} & x_{11}y_{12} + x_{12}y_{22} \\ x_{21}y_{11} + x_{22}y_{21} & x_{21}y_{12} + x_{22}y_{22} \end{bmatrix}$$

(x_{11}, y_{11})



(x_{22}, y_{22})

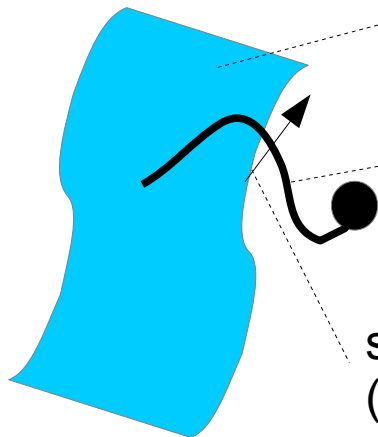
D0-branes

corde bosonique

~ théorie des cordes de type IIA
à la limite perturbative

Dp-brane non-commutative
(pile de D0-branes)

~ espace-temps courbe

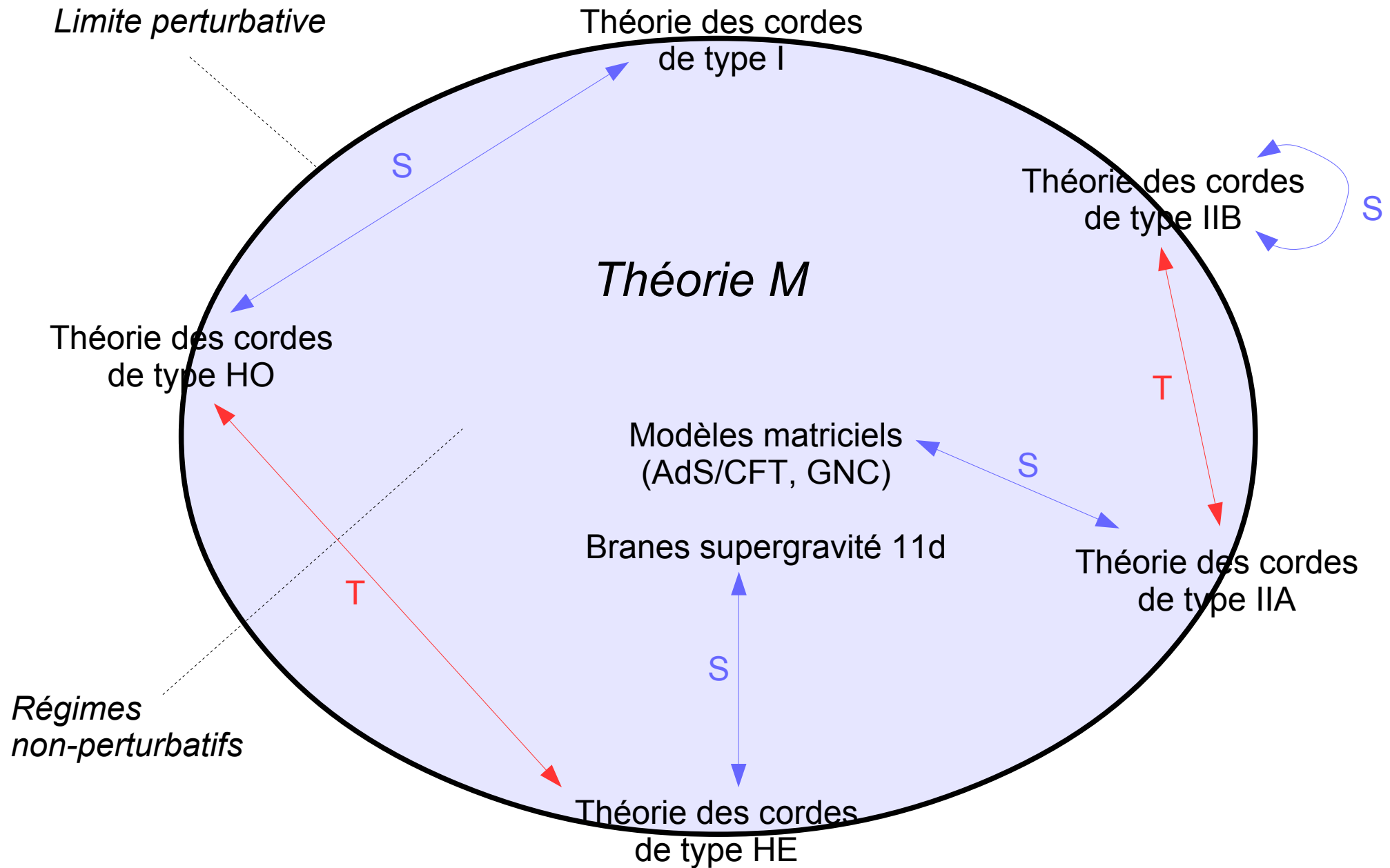


supercorde fermionique

spin
(moment angulaire) ~ qubit

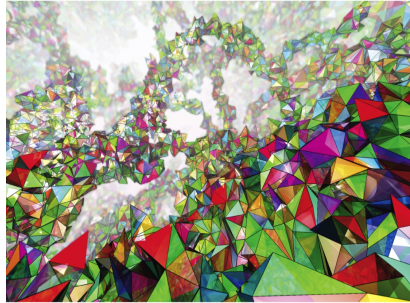
La gravité émerge par effet collectif de la non-commutativité lorsque le nombre de D0-branes devient très grand.

Théorie M ?

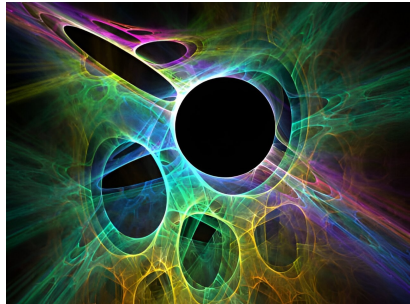


dualité T : $\ell \leftrightarrow 1/\ell$ (cordes ouvertes \leftrightarrow cordes fermées)

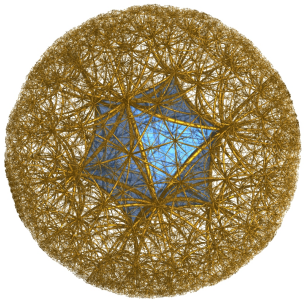
dualité S : $g \leftrightarrow 1/g$ (champ faible \leftrightarrow champ fort)



Gravitation
quantique par
boucles



Théories des
cordes :
type I
type IIA
type IIB
type HE
type HO

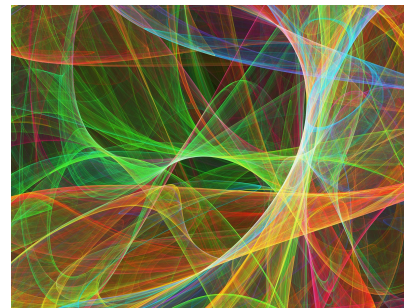


Gravitation
émergente

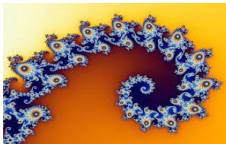



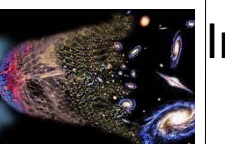
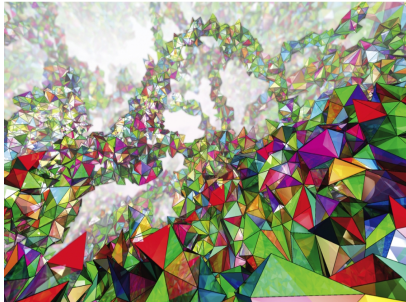
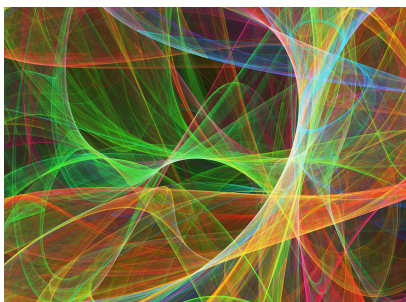


Gravitation non-
commutative

Théorie M



Les théories concurrentes de gravitation quantique

						Indé. AF
 <p>Gravitation quantique par boucles</p>	<p>✗ ✗</p>	<p>✓ ✓</p>	<p>✗ ✗</p>	<p>✓ ✓</p>	<p>✓ ✗</p>	<p>✓</p>
 <p>Théorie M (?)</p>	<p>✓ ✓</p>	<p>✓ ✓</p>	<p>✓ ✓</p>	<p>✓ ✓</p>	<p>✓ ✓</p>	<p>✓</p>