

# Gravité émergente et théorie M

David Viennot – Maître de Conférences

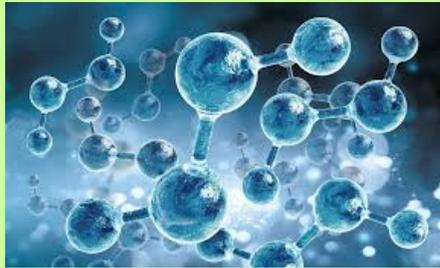
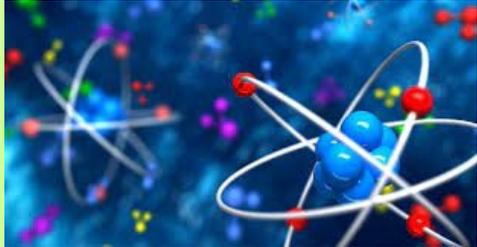
Institut UTINAM (CNRS) / Observatoire de Besançon / UFC





# **Le modèle standard de la physique**

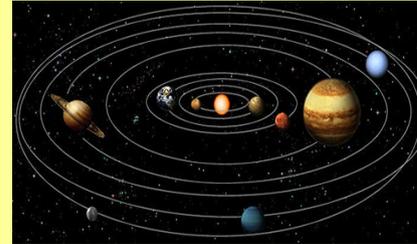
## Physique quantique



approximation  
pour les objets de  
grandes  
dimensions



## Relativité générale



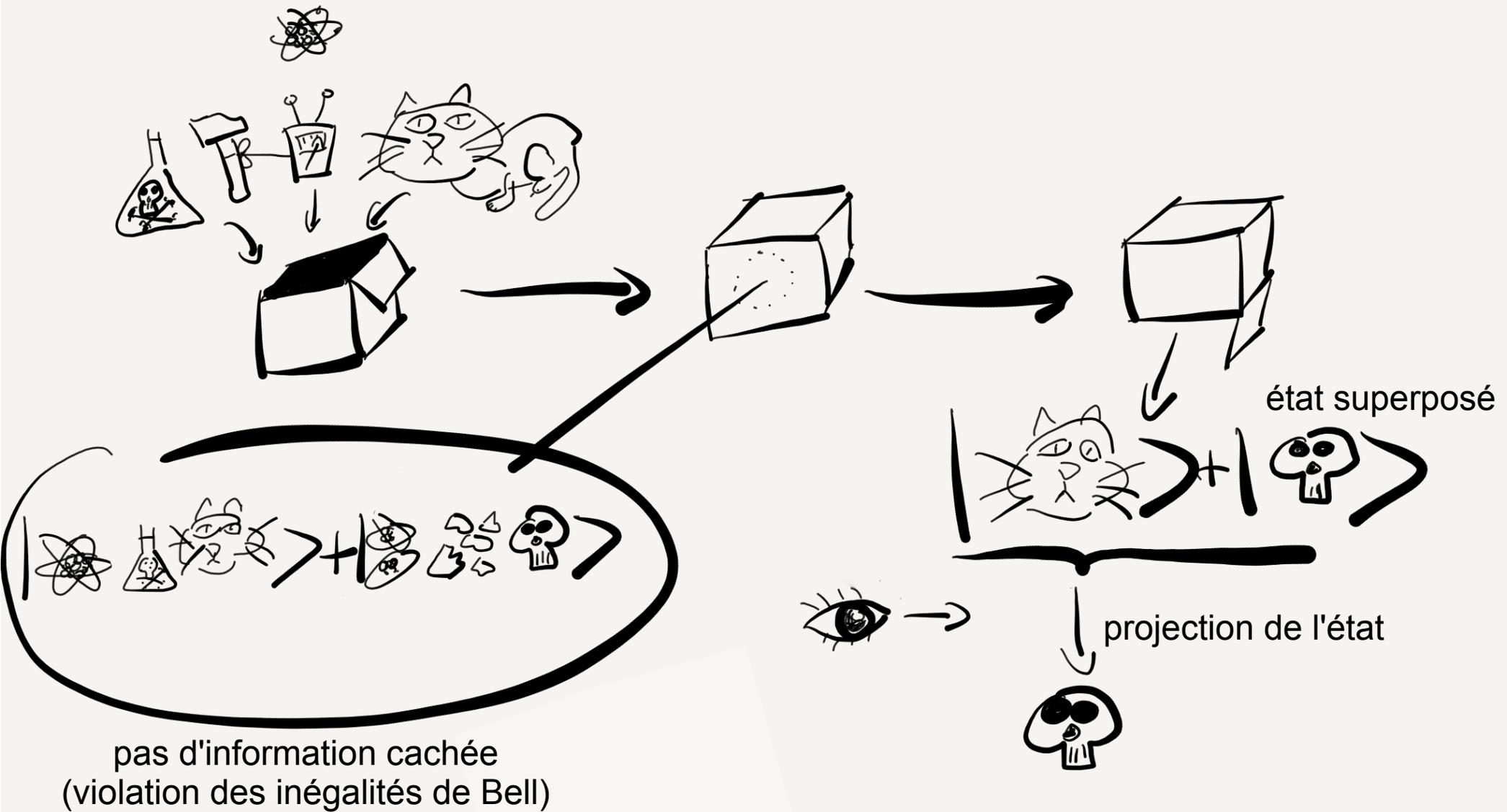
approximation  
pour les objets de  
faibles densités



## Physique classique (Newton + Maxwell)



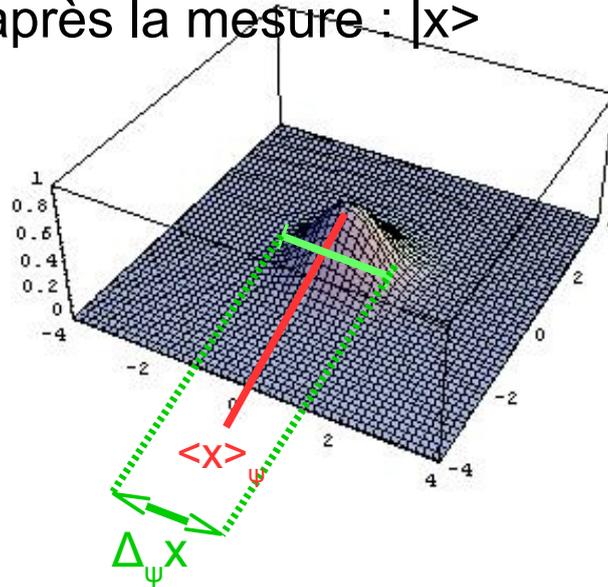
# La mécanique quantique : la parabole du chat de Schrödinger



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

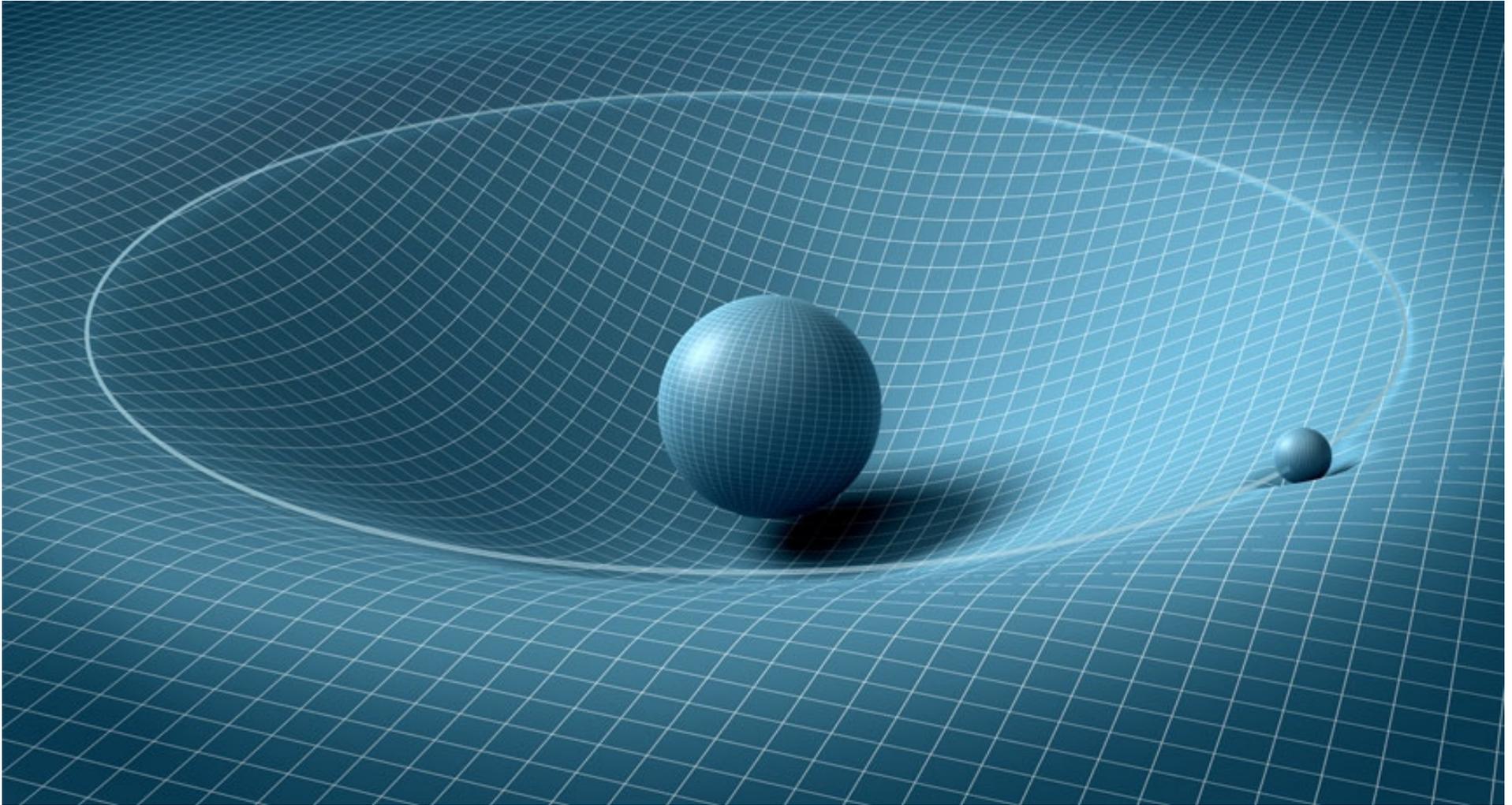
État quantique  $|\psi\rangle$  :

- 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 :  $|x\rangle$



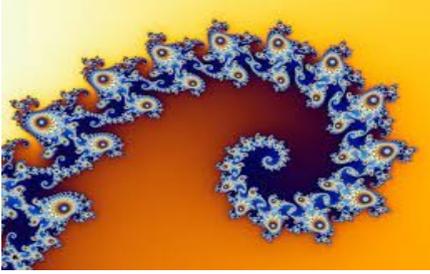
- mesure de vitesse: probabilité de trouver  $v$  :  $p_\psi(v)$ , valeur moyenne :  $\langle v \rangle_\psi$   
avec incertitude :  $\Delta_\psi v$ , état après la mesure :  $|v\rangle$
- mesure de vitesse après avoir trouvé la position en  $x$  :  $p_x(v)$ ,  $\langle v \rangle_x$ ,  $\Delta_x v$
- 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.

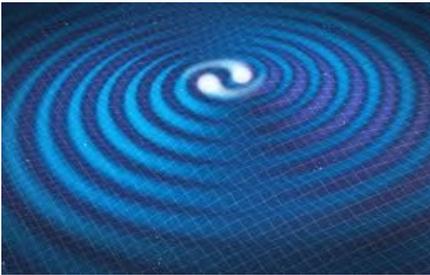


Attention, la géométrie observée est relative à l'observateur !

# 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.



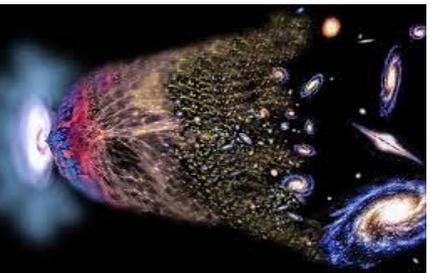
- Problème de l'interaction gravitationnelle entre particules fondamentales.
- Problème des fluctuations du vide à l'échelle de Planck ( $10^{-35}\text{m}$ ).



- 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.

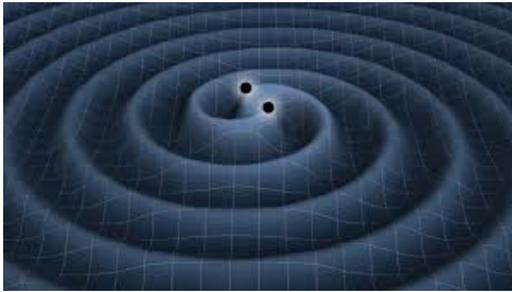


- Problème de la singularité du Big-Bang.
- Problème de l'origine de l'inflation.

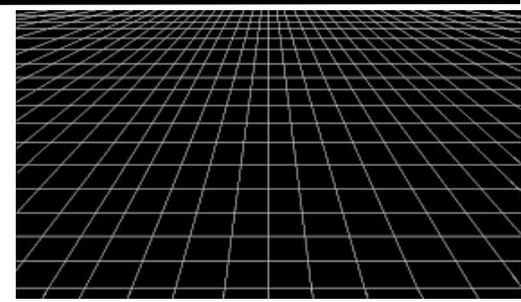
## Relativité Générale

## Mécanique Quantique

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



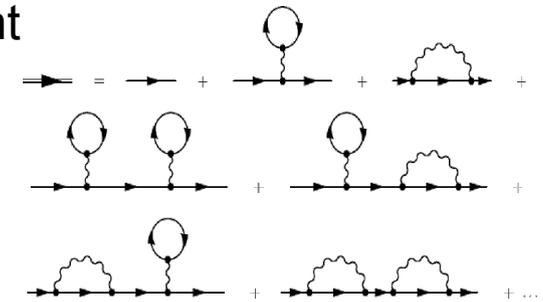
Dépendante d'un espace-temps plat en arrière-fond



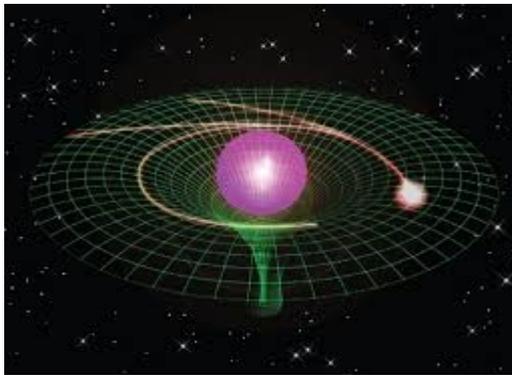
Fortement non-perturbative



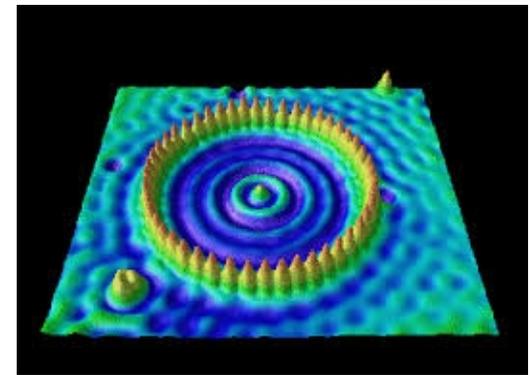
Fondamentalement perturbative renormalisable



Géométrie



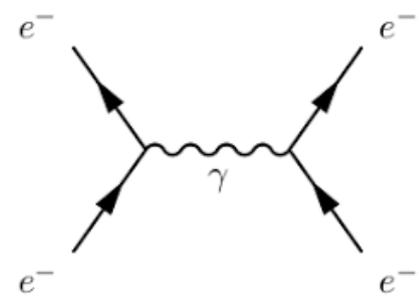
Non-locale (ondulatoire)

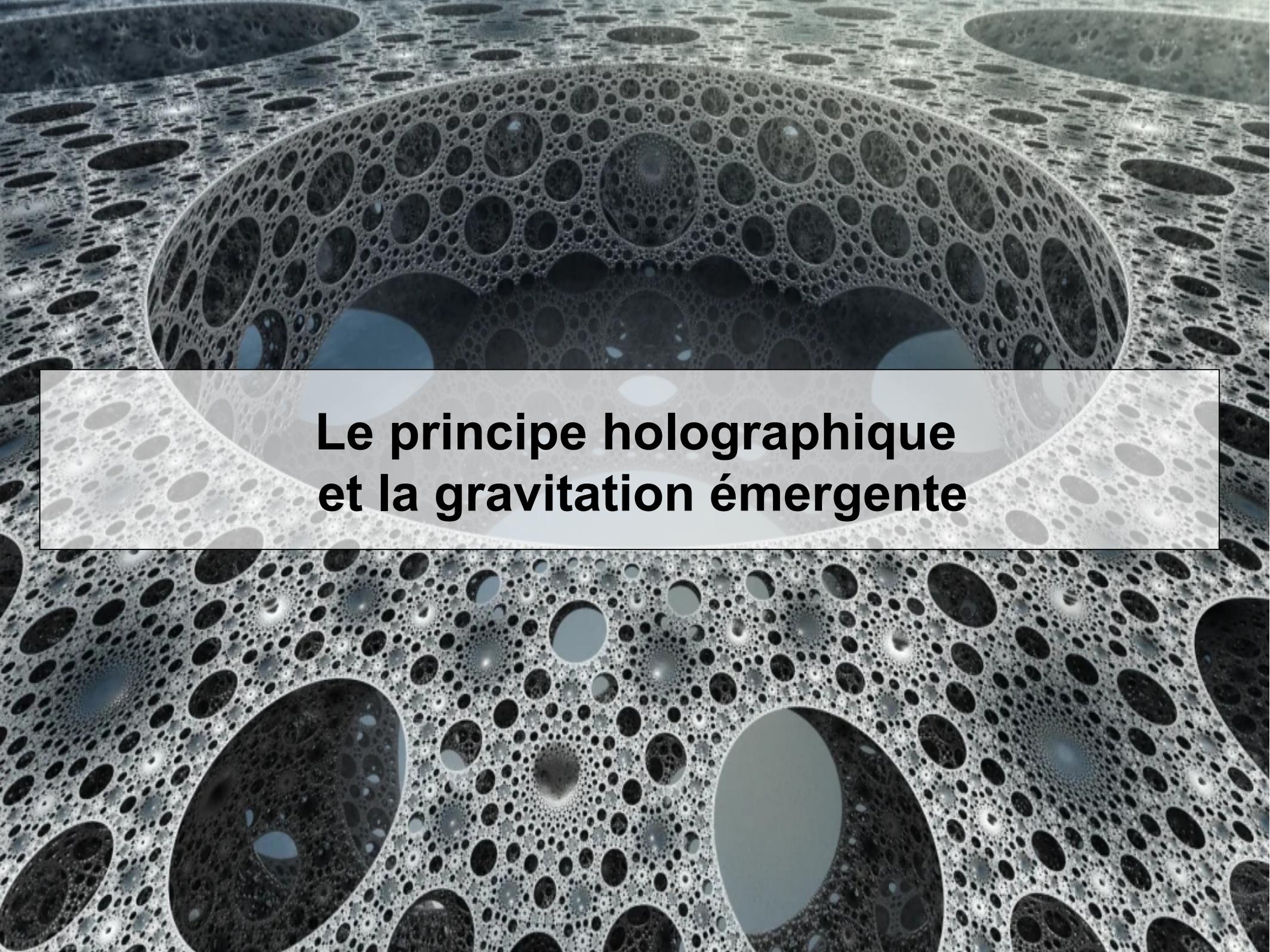


Admet un principe d'équivalence :  
Gravité  $\Leftrightarrow$  Inertie  
 $\Leftrightarrow$  Géométrie



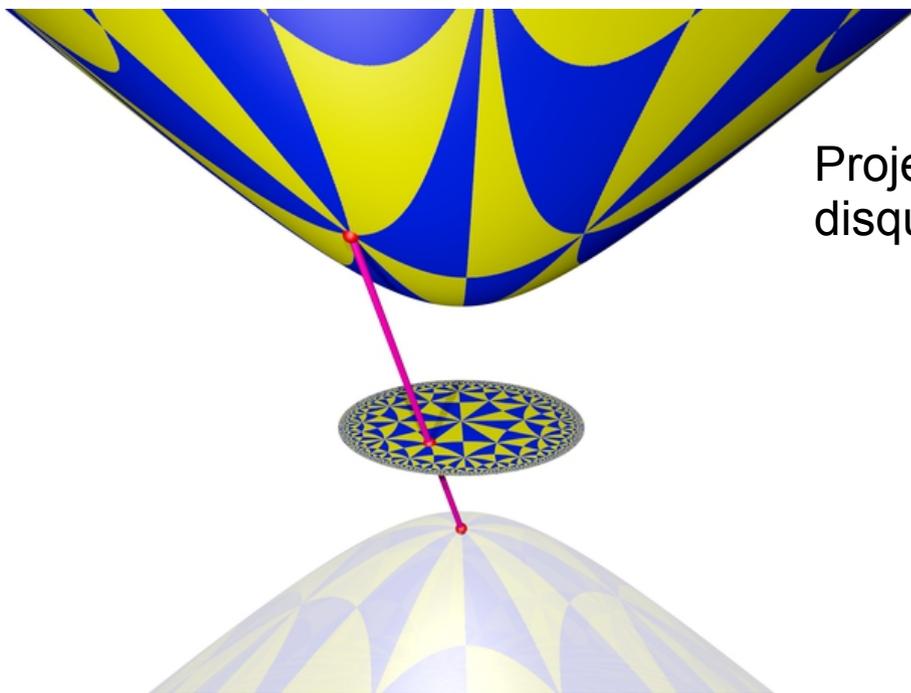
Les interactions sont des théories de jauge : Forces = échanges de particules





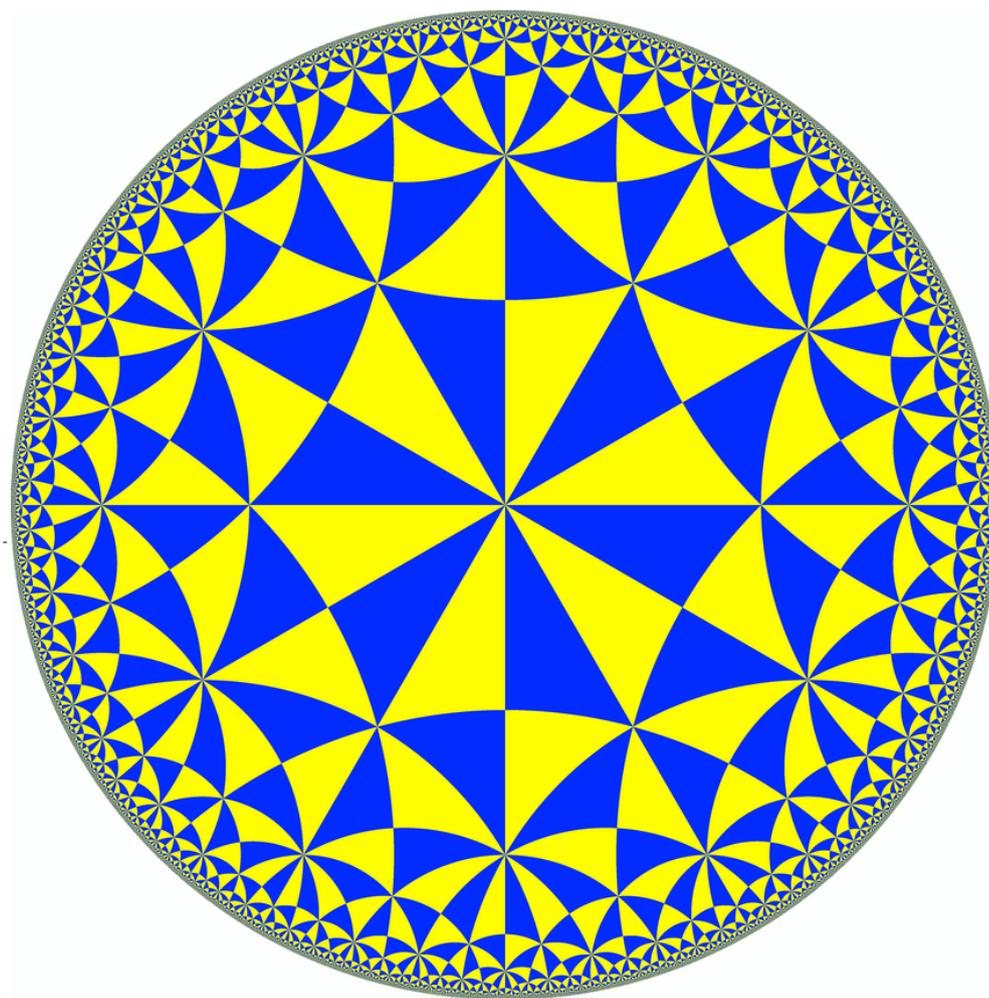
**Le principe holographique  
et la gravitation émergente**

# Le disque de Poincaré

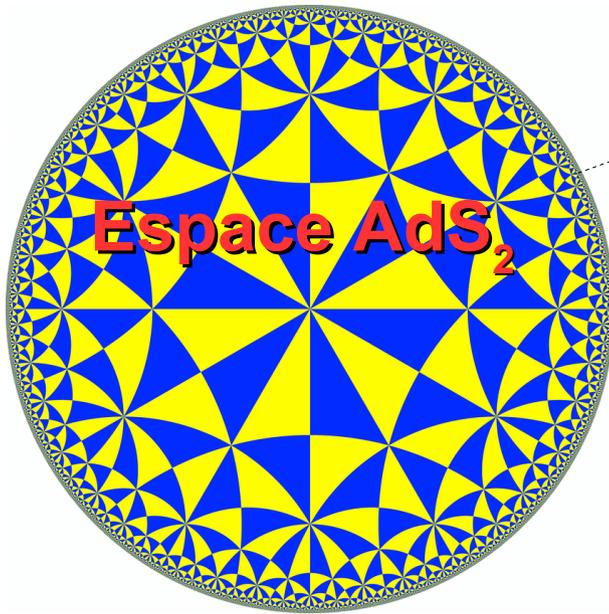


Projection stéréographique de l'hyperboloïde sur le disque de Poincaré

Disque de Poincaré



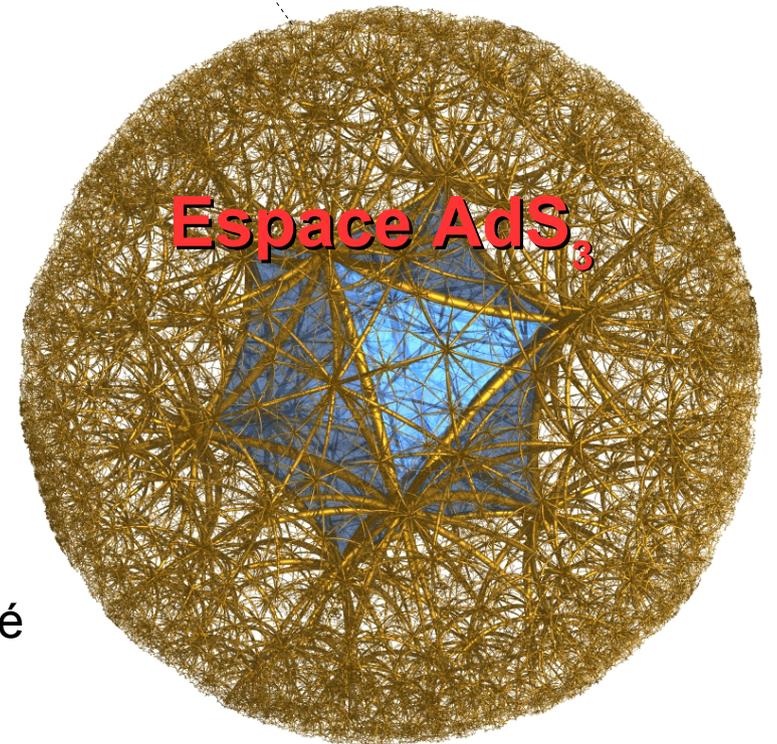
Cercle limite  
(à l'infini sur l'hyperboloïde)



Théorie de l'information CFT<sub>1</sub>

Disque de Poincaré

Théorie de l'information CFT<sub>2</sub>



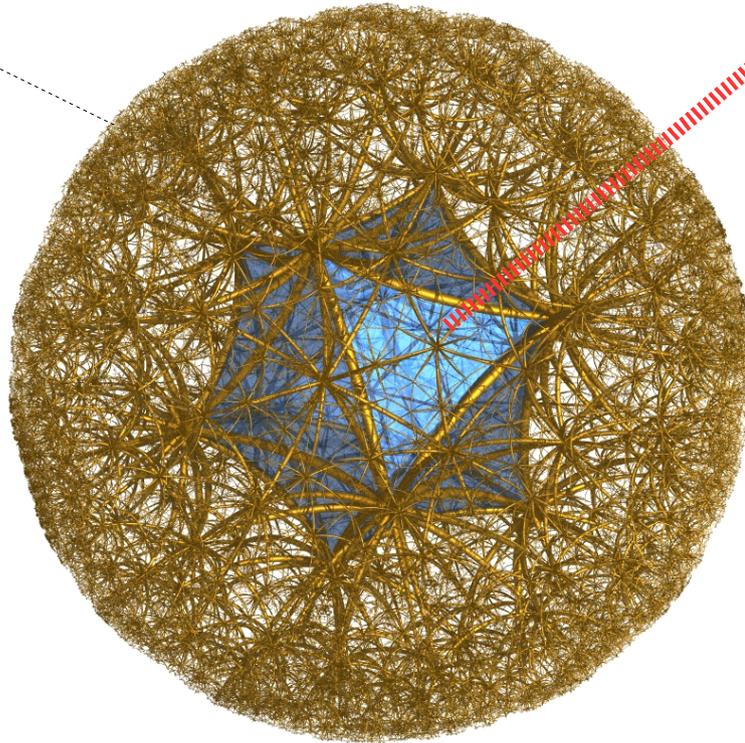
Boule de Poincaré

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 ( $\ell_p = 10^{-35}m$ ), 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 :  $\frac{1}{2}Nk_B T = Mc^2$  ( $T = 2Mc^2/(Nk_B)$ )

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

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

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  $\frac{1}{2}m\langle v \rangle^2 = \frac{3}{2}Nk_B T$

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

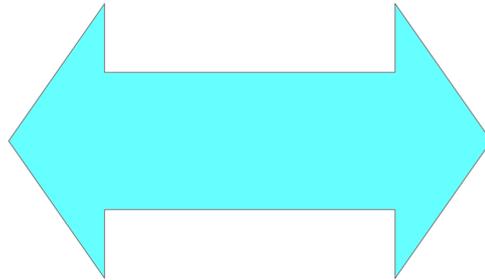
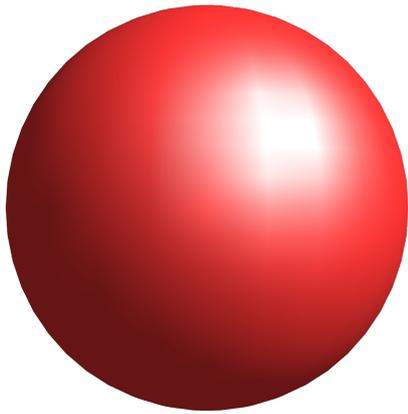
atome vs atome → interaction (car gravité de l'atome négligeable)

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 consist of dense, dark green trees and shrubs, while the inner rings are lighter, suggesting water or less dense vegetation. The overall pattern is highly symmetrical and circular.

# La gravitation non-commutative

sphère classique



Observables :

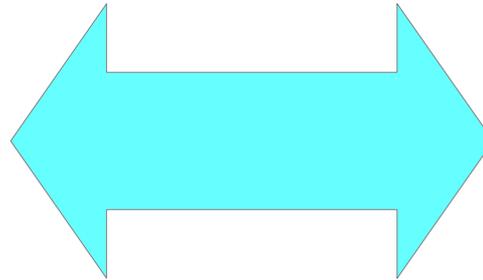
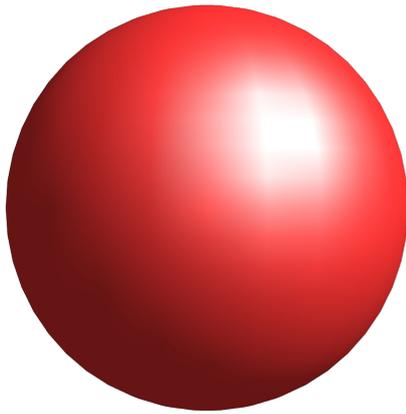
$\theta$  : latitude

$\varphi$  : longitude

$f(\theta, \varphi)$

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

sphère classique



*Idée de Connes*

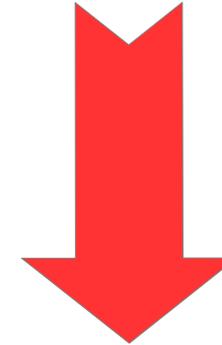
Observables commutatives :

$\theta$  : latitude

$\varphi$  : longitude

$f(\theta, \varphi)$

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



Observables non-commutatives:

$\Theta$  : latitude

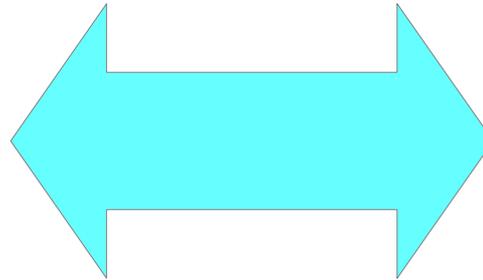
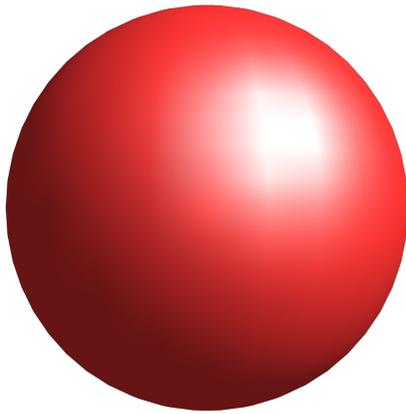
$\Phi$  : longitude

$P(\Theta, \Phi)$

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

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

sphère classique



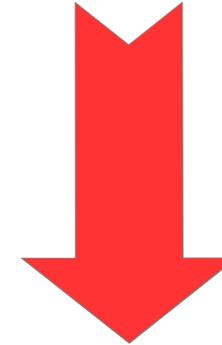
Observables commutatives :

$\theta$  : latitude

$\varphi$  : longitude

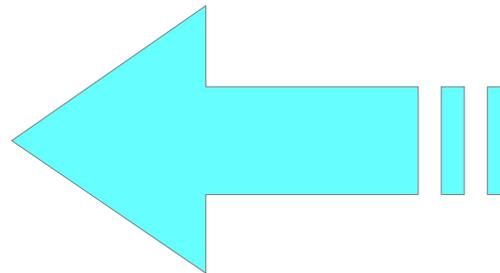
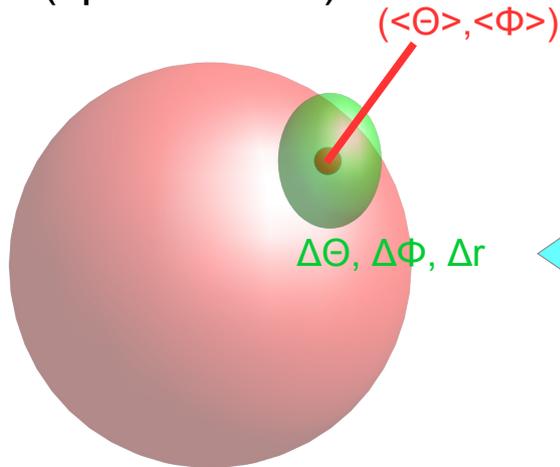
$f(\theta, \varphi)$

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



*Idée de Connes*

sphère non-commutative  
(sphère floue)



Observables non-commutatives:

$\Theta$  : latitude

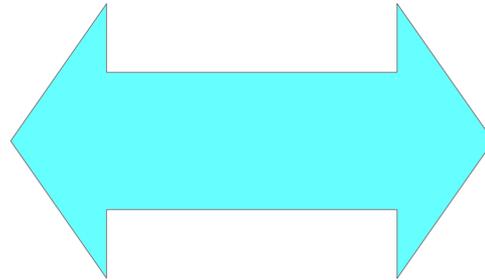
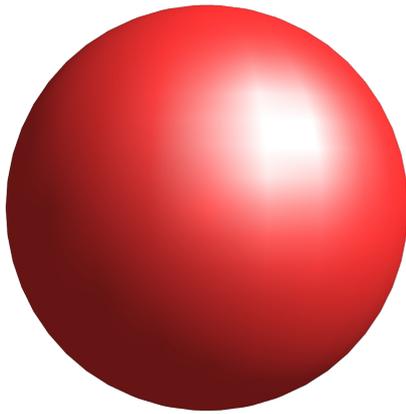
$\Phi$  : longitude

$P(\Theta, \Phi)$

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

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

sphère classique



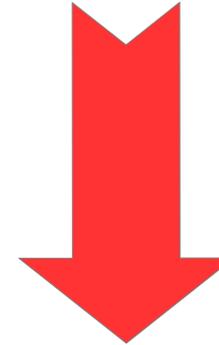
Observables commutatives :

$\theta$  : latitude

$\varphi$  : longitude

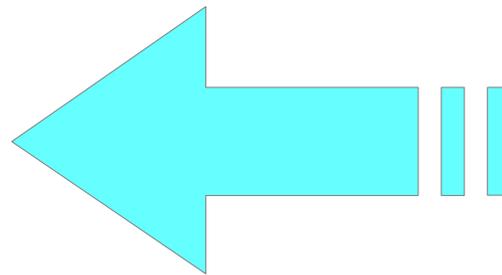
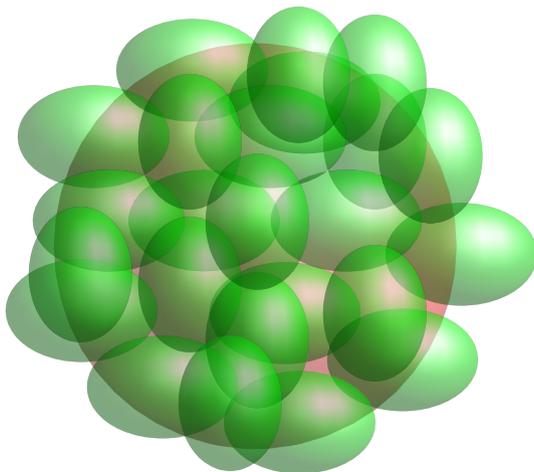
$f(\theta, \varphi)$

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



*Idée de Connes*

sphère non-commutative  
(sphère floue)



Observables non-commutatives:

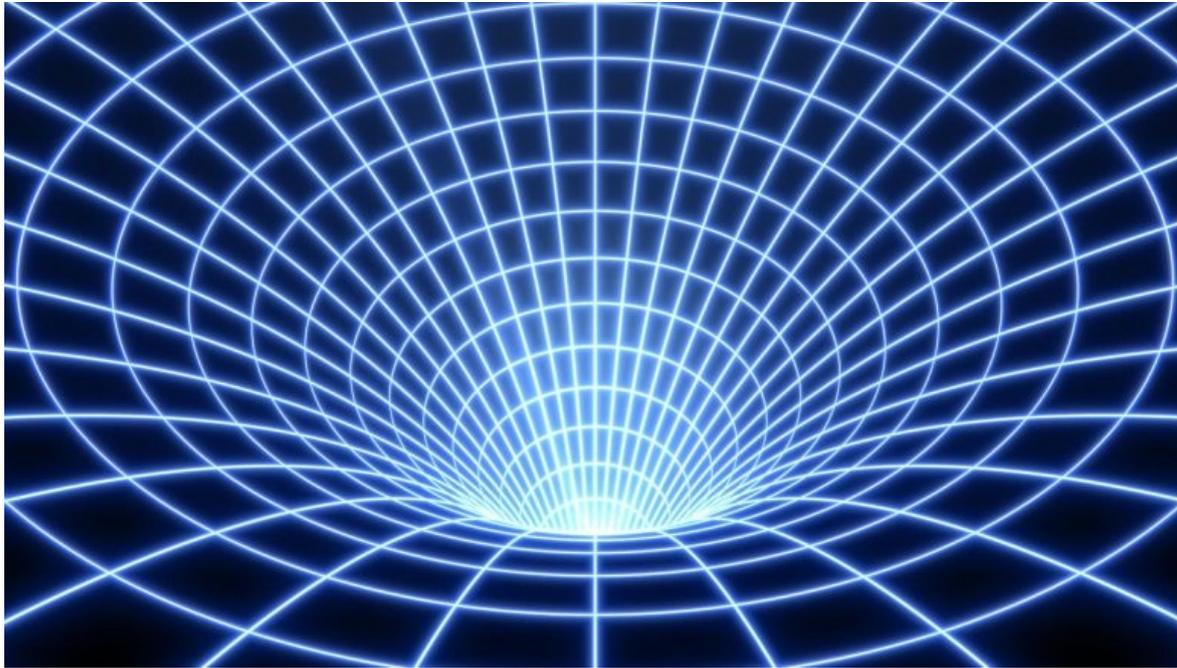
$\Theta$  : latitude

$\Phi$  : longitude

$P(\Theta, \Phi)$

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

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



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

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

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

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

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

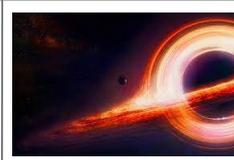
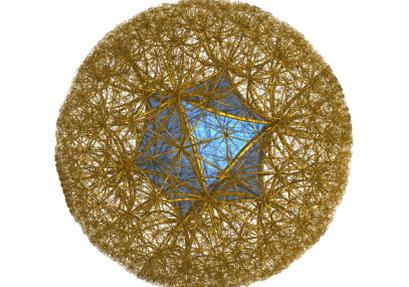
$$c \Delta t \Delta z \geq \ell_p^2 / 2$$

} espace-temps courbe non-commutatif

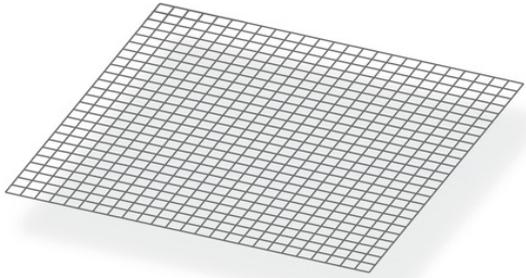


**La théorie M**

# 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

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

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

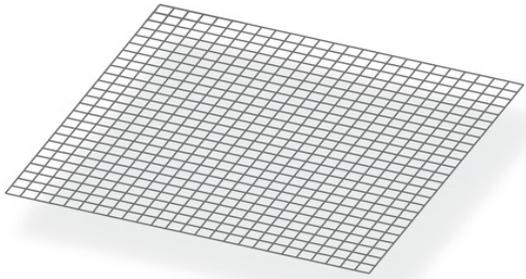
$$Y = \begin{array}{|c|c|} \hline y_{11} & y_{12} \\ \hline y_{12} & y_{22} \\ \hline \end{array}$$

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

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

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

# 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

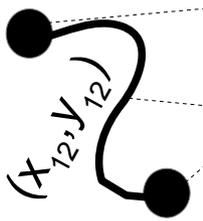
$$X \cdot Y \neq Y \cdot X$$

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

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

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

$(x_{11}, y_{11})$



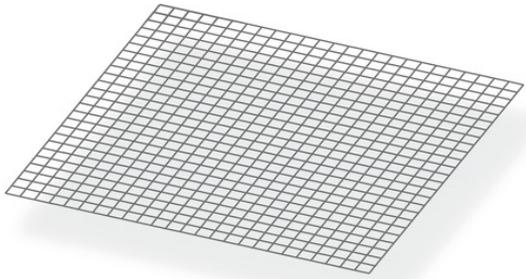
D0-branes

corde bosonique

$(x_{22}, y_{22})$

~ 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

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

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

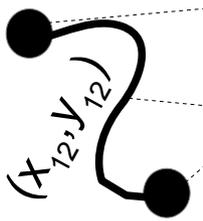
$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{12} & y_{22} \end{bmatrix}$$

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

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

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

$(x_{11}, y_{11})$



$(x_{22}, y_{22})$

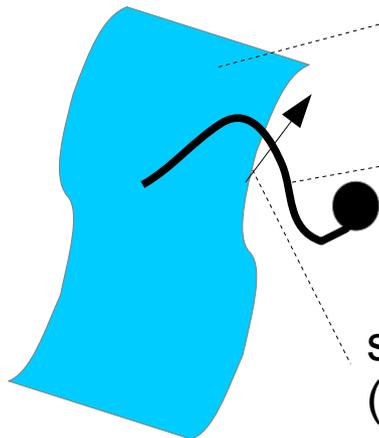
D0-branes

corde bosonique

~ théorie des cordes de type IIA  
à la limite perturbative

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

~ espace-temps courbe

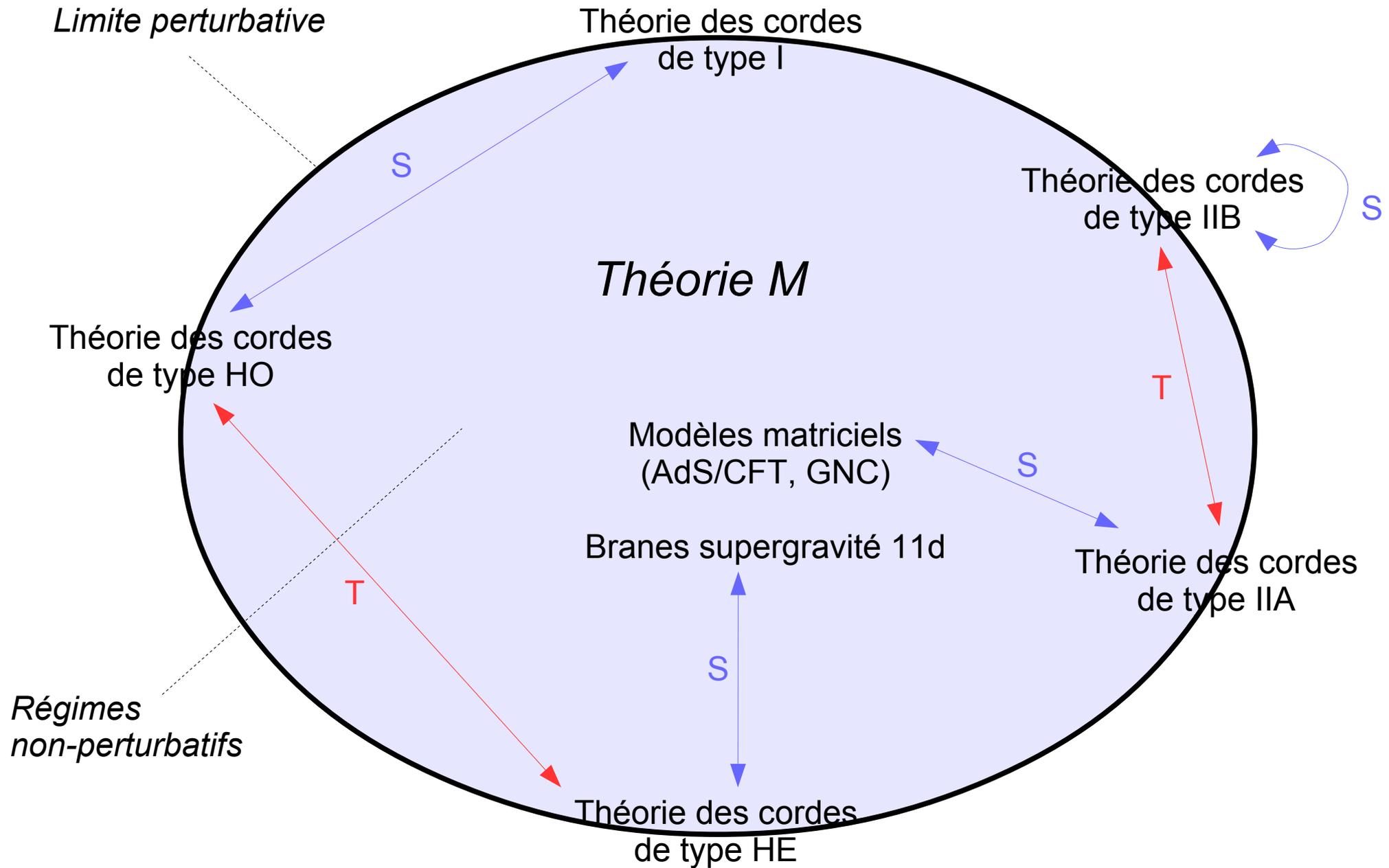


supercorde fermionique

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 ?

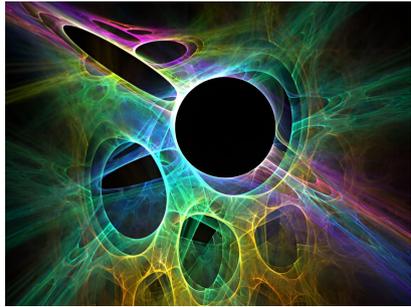


dualité T :  $\ell \leftrightarrow 1/\ell$  (cordes ouvertes  $\leftrightarrow$  cordes fermées)

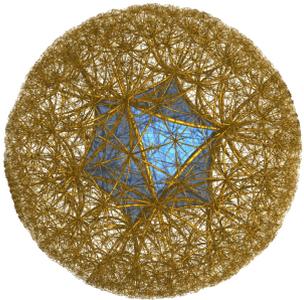
dualité S :  $g \leftrightarrow 1/g$  (champ faible  $\leftrightarrow$  champ fort)



Gravitation  
quantique par  
boucles



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



Gravitation  
émergente

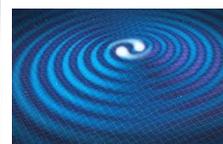


Gravitation non-  
commutative

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>