

Au bout de la corde . . . les deux infinis

Pierre Vanhove

IPHT
Saclay



Le Tour de France des déchiffreurs
Lycée d'Excellence, Douai - 16 janvier 2012



Plan de l'exposé

I Temps et espace

II Les deux infinis

III Quel modèle pour les interactions fondamentales ?

IV La théorie des cordes

Première partie I

Temps et espace

Le non-mathématicien est saisi d'un frisson mystique quand il entend parler de quatre dimensions. . . Et pourtant, rien n'est plus banal que l'affirmation que le monde dans lequel nous vivons est un continuum d'espace-temps à quatre dimensions

Albert Einstein, « La relativité » (1956)



Vous êtes venu aujourd'hui écouter cette conférence
à **17h00** au **Lycée d'excellence de Douai**.

Cet événement a été annoncé à **une heure et un lieu précis**.

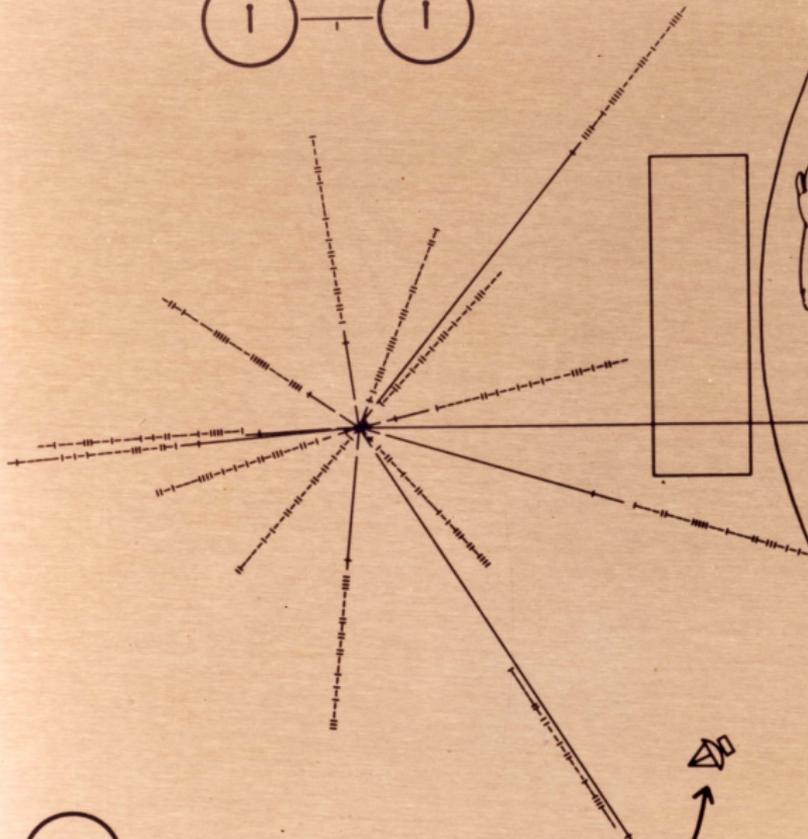
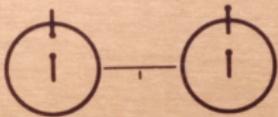
Les notions de temps et d'espace sont intuitives résultant des
données immédiates de l'expérience quotidienne.



Vous êtes venu aujourd'hui écouter cette conférence
à **17h00** au **Lycée d'excellence de Douai**.

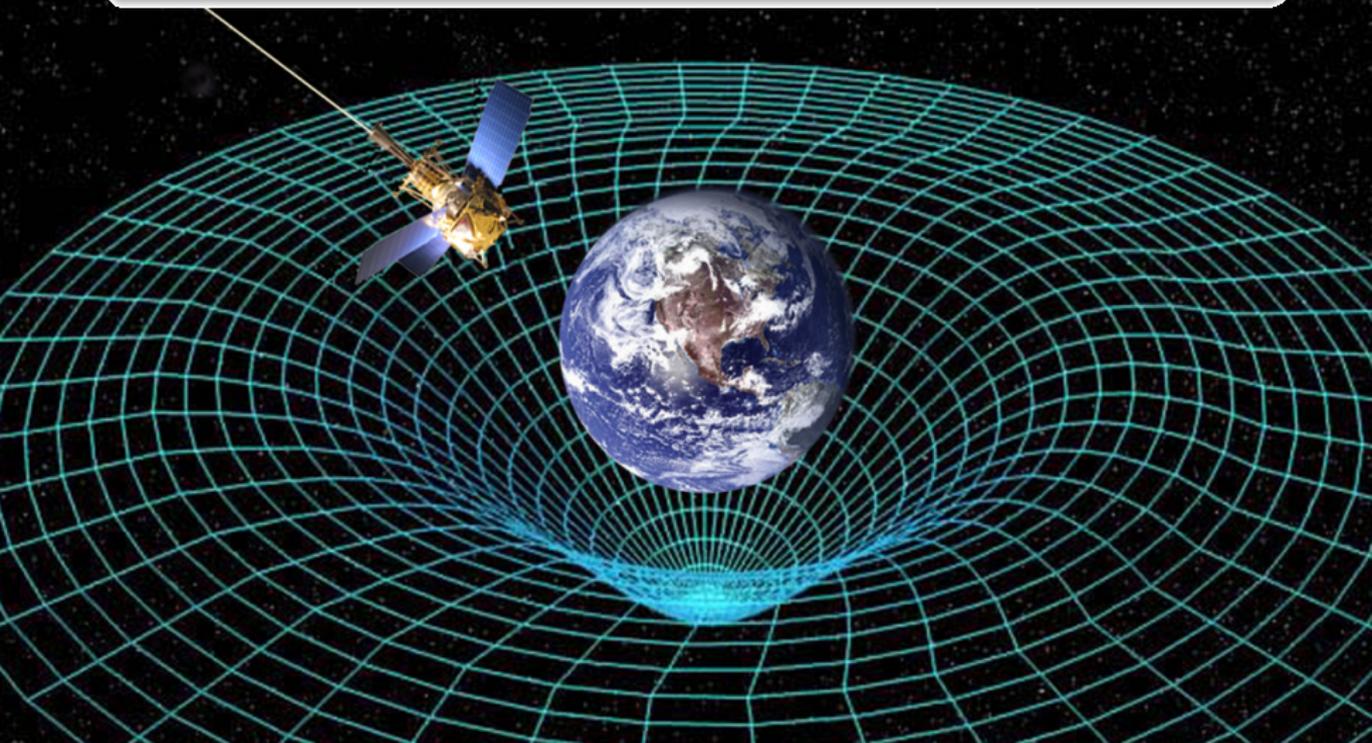
Cet événement a été annoncé à **une heure et un lieu précis**.

Par exemple la sonde Pioneer 10 envoyée dans l'espace en 1972
contient la localisation de la Terre au sein du système solaire.



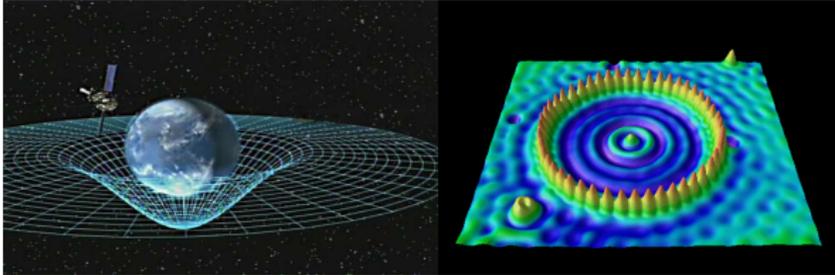
De nos jours vous pouvez déterminer votre position sur Terre grâce aux systèmes GPS et ГЛОНАСС.

Ces systèmes utilisent des propriétés fondamentales de **la relativité générale et restreinte** pour déterminer avec précision les positions sur Terre.

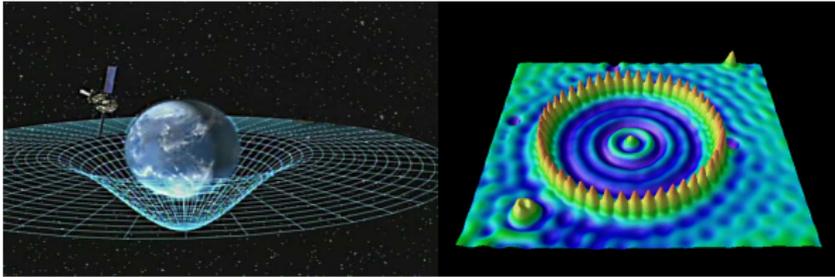


Les **horloges atomiques** servent à définir une référence chronologique universelle.

Elles sont utilisées dans les réseaux de télécommunications pour fournir un signal de référence aux oscillateurs internes des équipements, afin d'assurer une qualité de transmission des services en accord avec les normes internationales.



En fait les deux piliers de la physique fondamentale
la relativité générale et la **mécanique quantique**
jouent un rôle fondamental dans notre vie de tous les jours.



Au-delà de leur importance quotidienne, les physiciens pensent que ces deux théories jouent un rôle important dans les phénomènes physiques :

▶ **de l'infiniment petit**

- ▶ au premiers instants de l'univers (le Big Bang).
- ▶ pour déterminer la structure de l'espace aux échelles les plus intimes et au sein des trous noirs.

▶ **de l'infiniment grand**

- ▶ aux échelles cosmologiques : formation des structures (galaxies et amas de galaxies).
- ▶ évolution de notre univers (visible) en expansion accélérée.

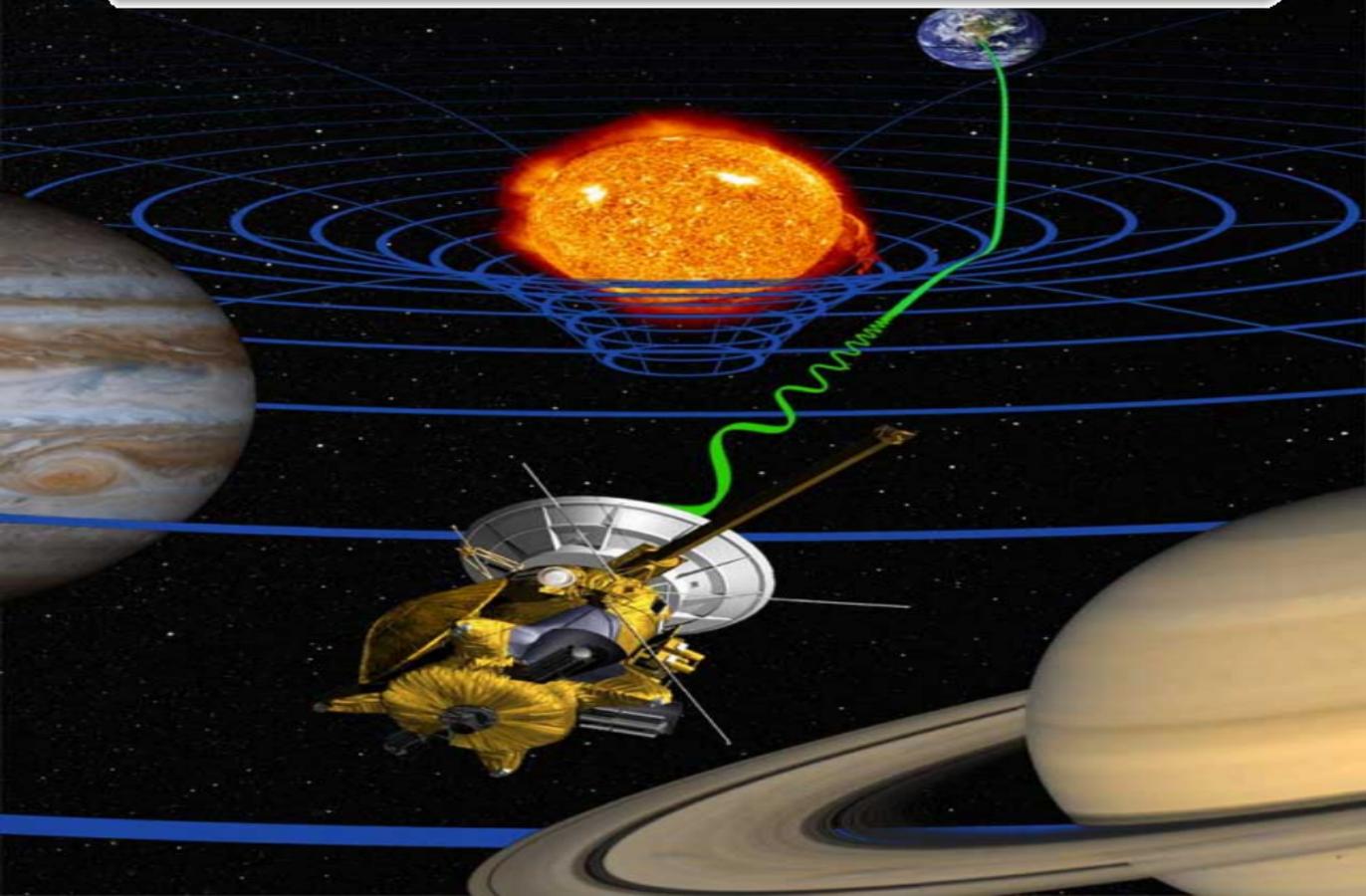
Deuxième partie II

Les deux infinis

D'après une théorie, le jour où quelqu'un découvrira exactement à quoi sert l'Univers et pourquoi il est là, ledit Univers disparaîtra sur-le-champ pour se voir remplacé par quelque chose de considérablement plus inexplicable et bizarre. Selon une autre théorie, la chose se serait en fait déjà produite.

Douglas Adams « Le Dernier Restaurant avant la fin du monde »

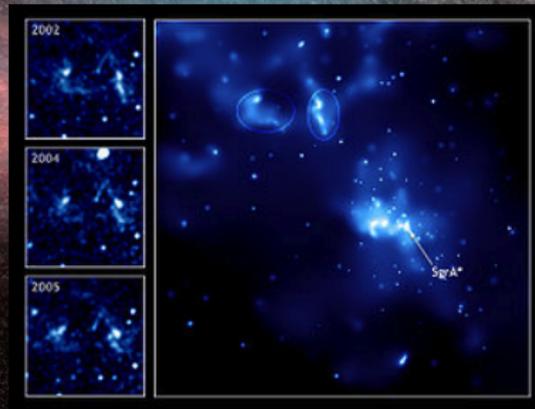
Des mesures de précision essayent de déterminer le domaine de validité de la théorie de la relativité générale.



Au-delà de notre système solaire la théorie de la relativité générale prédit l'existence de trous noirs

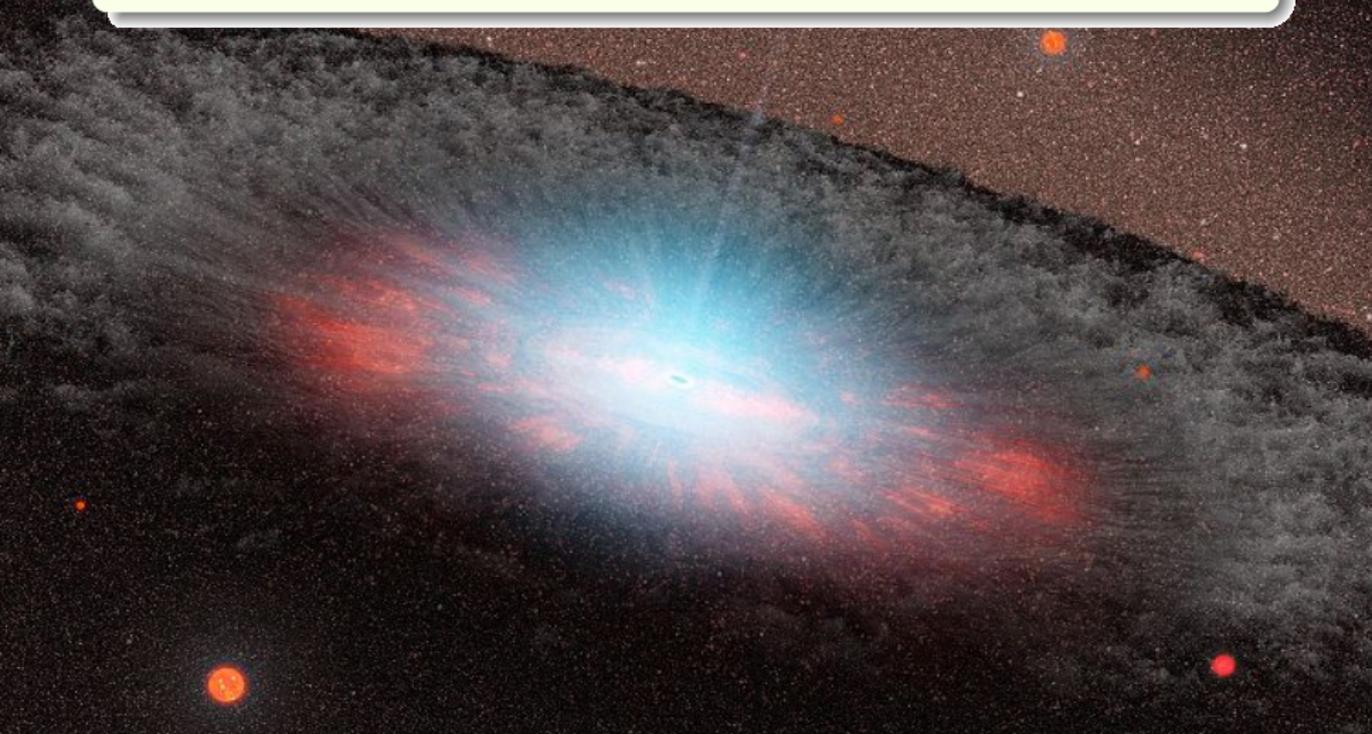


Au-delà de notre système solaire la théorie de la relativité générale prédit l'existence de trous noirs

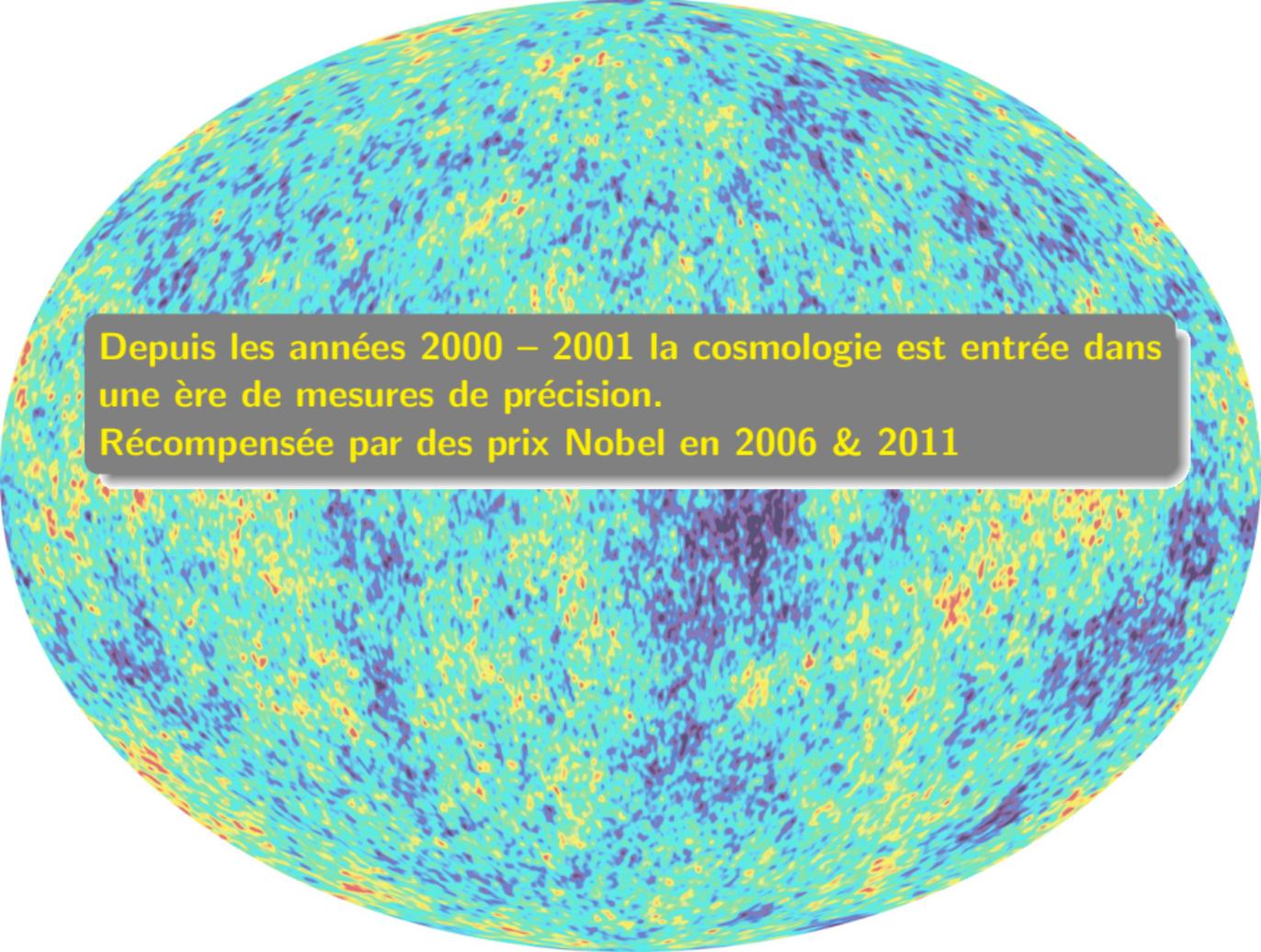


- ▶ Sagittarius A* d'une masse 4.1 millions fois celle du soleil au centre de notre galaxie dans la constellation du Sagittaire

Au-delà de notre système solaire la théorie de la relativité générale prédit l'existence de trous noirs

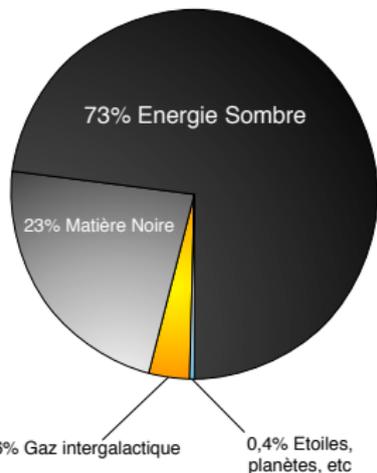


► de la collisions d'étoiles à neutrons : Vidéo1 Vidéo2
et d'autres manifestations physiques activement recherchées.



Depuis les années 2000 – 2001 la cosmologie est entrée dans une ère de mesures de précision.
Récompensée par des prix Nobel en 2006 & 2011

L'univers selon nos observations :



- ▶ **4% de Matière ordinaire**

(particules, nous dans cette salle, ...)

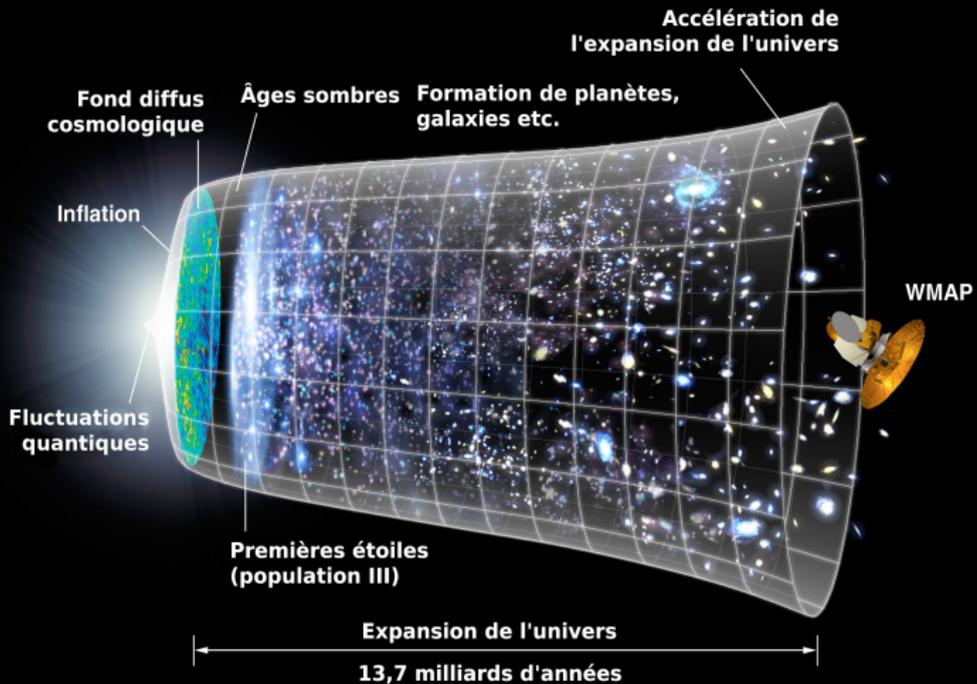
- ▶ **23% de matière noire**

(baignant les galaxies et les groupements de galaxies, aidant à la formation des structures)

- ▶ **73% d'énergie sombre**

(densité d'énergie non compressible moteur de l'expansion de l'univers)

- ▶ **un univers en expansion et en accélération (Prix Nobel 2011)**



Fond diffus cosmologique

Âges sombres

Formation de planètes, galaxies etc.

Accélération de l'expansion de l'univers

La théorie de la gravitation d'Einstein ne suffit **pas** pour expliquer l'univers observé.

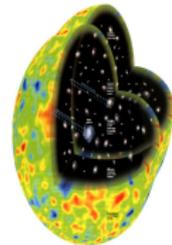
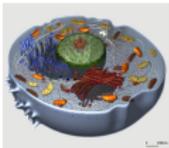
On pense que c'est une **approximation** d'une théorie plus **complète**.

Fluctuations quantiques

Premières étoiles (population III)

Expansion de l'univers

13,7 milliards d'années



$10^{-35} m$

$10^{-6} m$

$1 m$

$10^9 m$

$10^{19} m$

$10^{21} m$

$10^{27} m$

connaissance
faible

assez
correcte

bonne

pas de données
précises

faible

expériences de laboratoire



mesures avec
des sondes
spatiales



astronomie



astrophysique

cosmologie





Même si la théorie de la relativité et la mécanique quantique ont eu des succès expérimentaux fantastiques qui ont changé notre quotidien, **elles ne suffisent pas pour expliquer l'état actuel et l'évolution de notre univers observable, ni l'ensemble des particules (élémentaires) ni leurs interactions.**

Quel modèle pour les interactions fondamentales ?

- [...] Mais il m'est impossible d'admettre que la résolution de ces exercices formels ait un autre intérêt que celui d'un dressage de l'esprit à l'usage des écoliers. Je trouverais puéril et stupide qu'un homme se tienne sa vie entière sur des calculs et couvre éternellement du papier avec des rangées de chiffres.
- Tu te trompes, Goldmund ; tu supposes qu'un calculateur comme celui-là ne cesserait de résoudre de nouveaux exercices scolaires qu'un maître lui poserait. Mais il peut aussi se poser les questions lui-même ; elles peuvent se poser en lui avec une force irrésistible. Il faut avoir calculé et mesuré bien des espaces réels et fictifs avant de s'attaquer, comme penseur, au problème de l'espace.

Hermand Hesse « Narcisse & Goldmund »

$$-dx^2 - dy^2 - dz^2$$

$$\left(\frac{m}{1-\mu^2}, \frac{m u_i}{\sqrt{1-\mu^2}} \right) \quad \left| \begin{array}{l} \frac{m u_i}{\sqrt{1-\mu^2}} \text{ Impuls} \\ m \left(\frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}} - 1 \right) \text{ Kin. Energie} \end{array} \right.$$

$$= \frac{t' + vx'}{\sqrt{1-v^2}} \quad \left| \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1-v^2}} \\ y = y' \\ z = z' \end{array} \right.$$

$$\sum \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}} = \frac{2}{\sqrt{1-\mu^2} \sqrt{1-\mu^2}}$$

$$\sum \frac{u_i}{\sqrt{1-\mu^2}} = \frac{2v}{\sqrt{1-\mu^2} \sqrt{1-\mu^2}}$$

$$\text{Imp. } \sum u_i = \sum \frac{u_i}{\sqrt{1-\mu^2}}$$

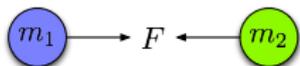
$$\sum \frac{u_i}{\sqrt{1-\mu^2}} = \sum \frac{u_i}{\sqrt{1-\mu^2}}$$

$$J_y = m u_y \sqrt{1-\mu^2}$$

$$G_y = G_y - m \frac{G_y}{\mu}$$



Les constantes de la physique fondamentale



- ▶ La gravitation

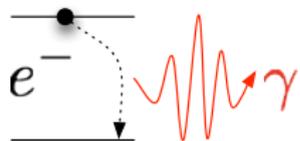
$$E_{pot.} = -\frac{G_N m_1 m_2}{r} \quad G_N = 6,67384(80) \times 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

- ▶ La relativité

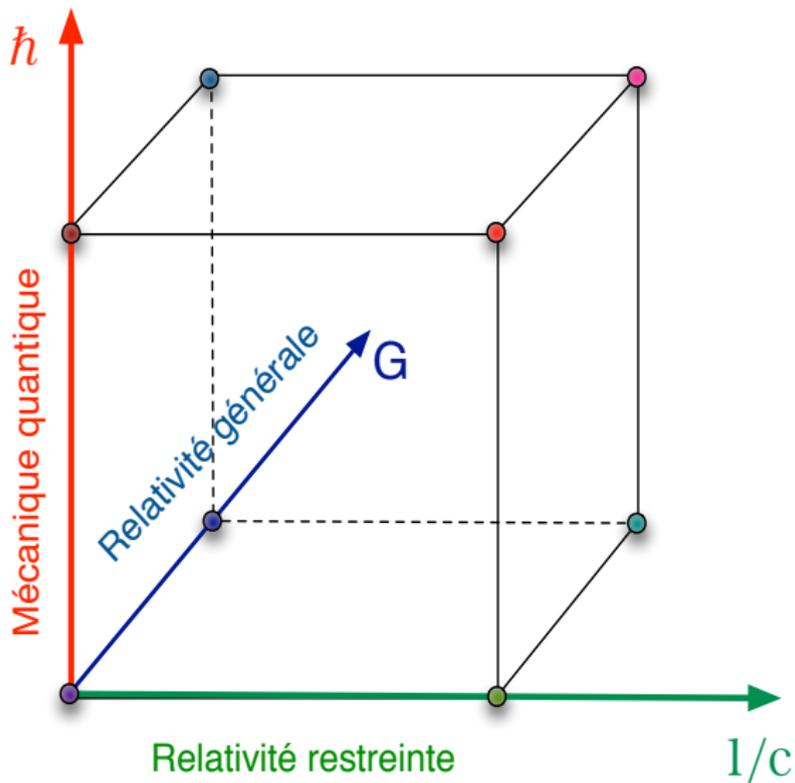
$$E_{relat.} = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad c = 299\,792\,458 \frac{m}{s}$$

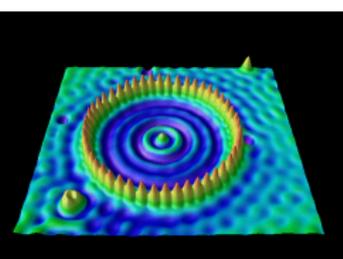
- ▶ La mécanique quantique

$$E_{photon} = 2\pi \hbar f \quad \hbar = 1,054571726 \times 10^{-34} \frac{kg \cdot m^2}{s}$$

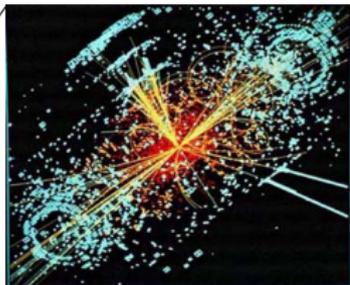


Le cube des théories





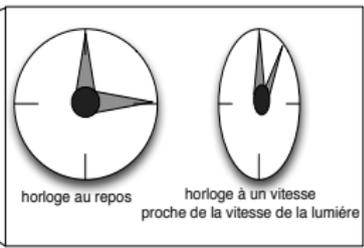
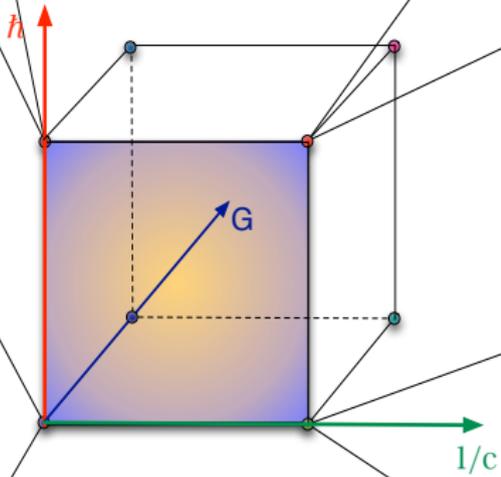
mécanique quantique



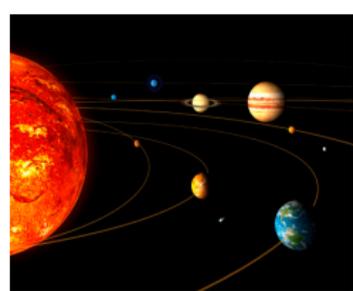
Théorie quantique des champs
Simulation d'un événement de production du Higgs au CERN



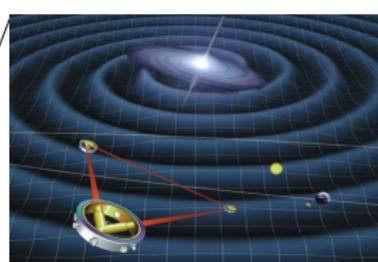
Physique Classique :
Les déviations du pendule de Foucault
montrent la rotation de la Terre



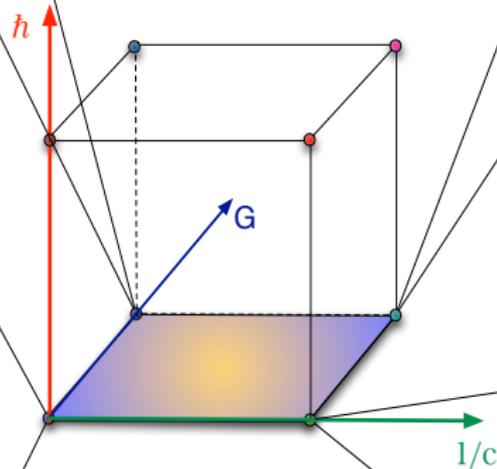
relativité restreinte:
unifie le temps et l'espace. Le temps se dilate pour les objets
en mouvement.
L'énergie et la masse selon équivalent selon la formule $E=mc^2$



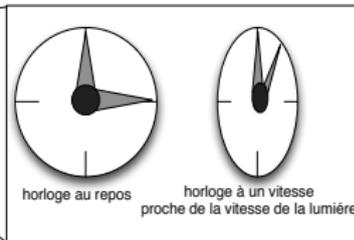
Loi de la gravitation universelle de Newton



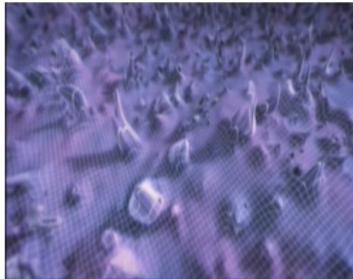
La théorie de la gravitation d'Einstein donne une description géométrique dynamique de l'espace-temps



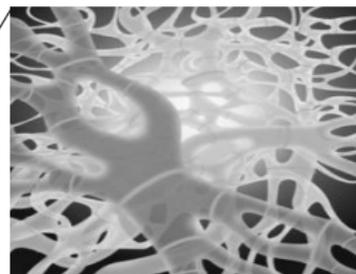
Physique Classique :
Les déviations du pendule de Foucault montrent la rotation de la Terre



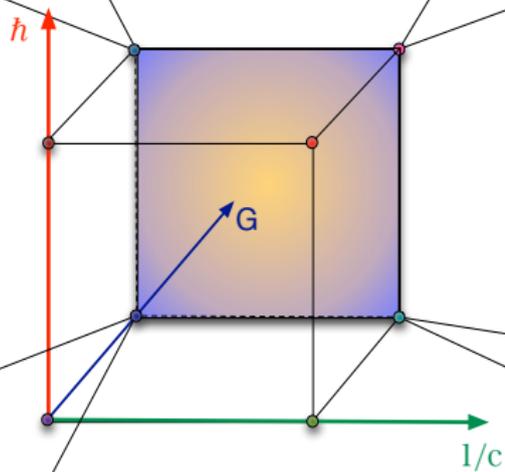
relativité restreinte:
unifie le temps et l'espace. Le temps se dilate pour les objets en mouvement.
L'énergie et la masse selon équivalent selon la formule $E=mc^2$



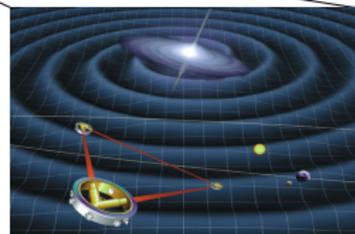
Gravité Quantique



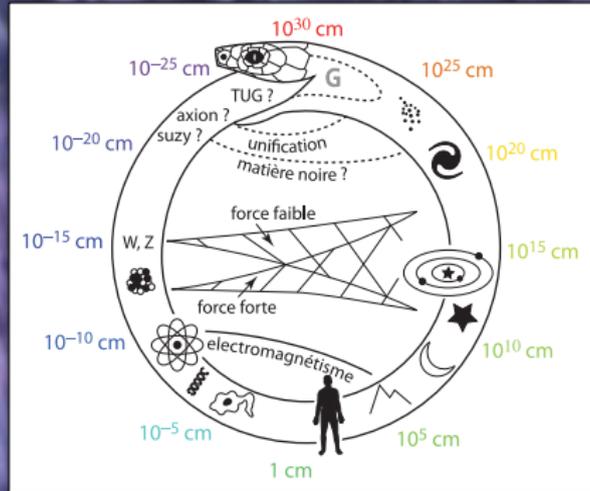
Théorie d'unification :
théorie des cordes, théorie M, ...



Loi de la gravitation
universelle de Newton

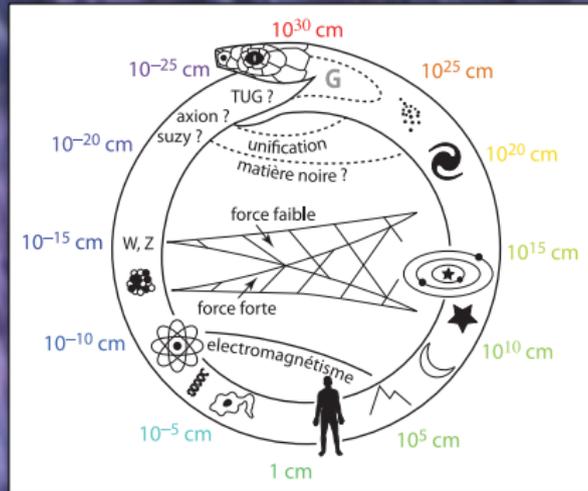


La théorie de la gravitation d'Einstein
donne une description géométrique
dynamique de l'espace-temps



À cause de l'universalité de la gravitation qui couple à **toutes les formes de matières et d'énergie**, à **toutes les échelles**.

Toute modification de la structure de l'espace-temps aux échelles microscopiques à des conséquences aux échelles macroscopiques.



- ▶ Observation des raies spectrales venants des sursauts Gamma
- ▶ Fluctuations quantiques après le Big Bang à l'origine des structures de notre univers
- ▶ Origine de l'énergie noire moteur de l'évolution de l'univers

Quatrième partie IV

La théorie des cordes

[...] on ne peut pas.

- C'est qu'on ne sait pas s'y prendre.

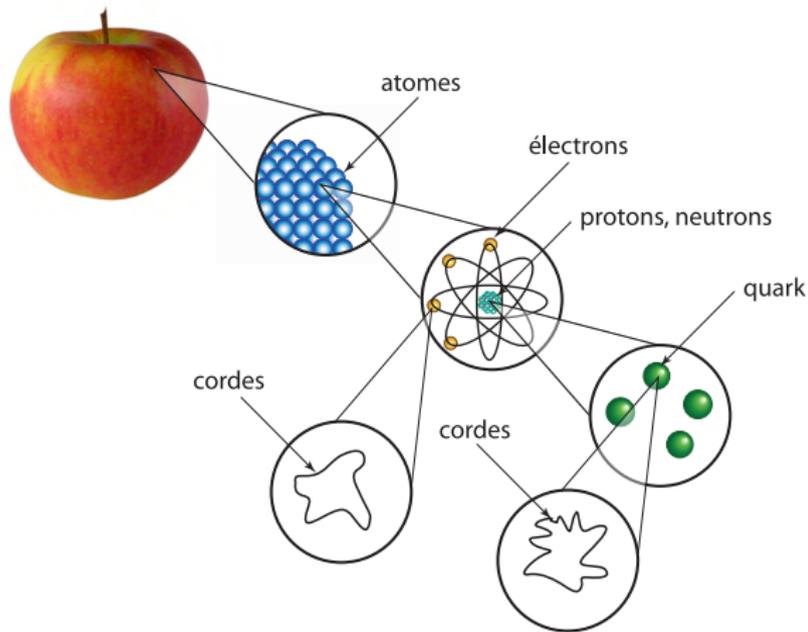
- On le démontre.

- Mais c'est scandaleux.

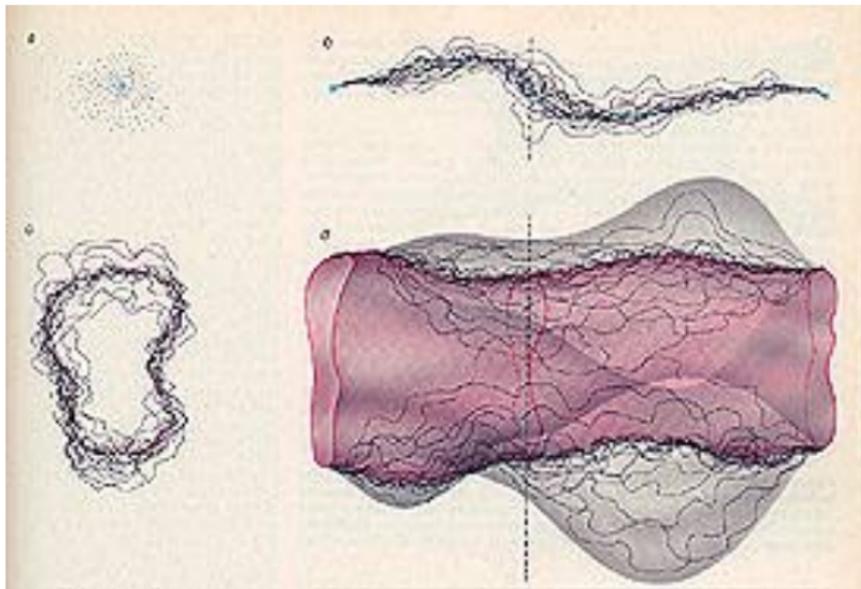
- Comme vous le dites. C'est scandaleux parce qu'il y a là une réalité rebelle au langage algébrico-logique, parce qu'il y a là une réalité qui nous dépasse [...]

R. Queneau, « Odile »

La théorie des cordes fait l'hypothèse que les particules élémentaires sont des modes de vibrations de cordes microscopiques et fondamentales ($l_s \sim 10^{-35} m$).

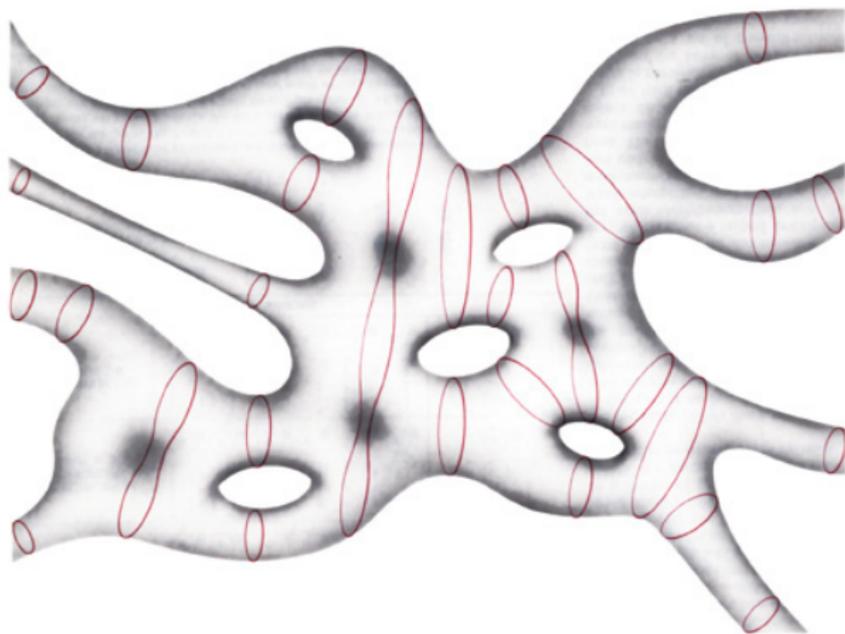


La théorie des cordes fait l'hypothèse que les particules élémentaires sont des modes de vibrations de cordes microscopiques et fondamentales ($l_s \sim 10^{-35} m$).

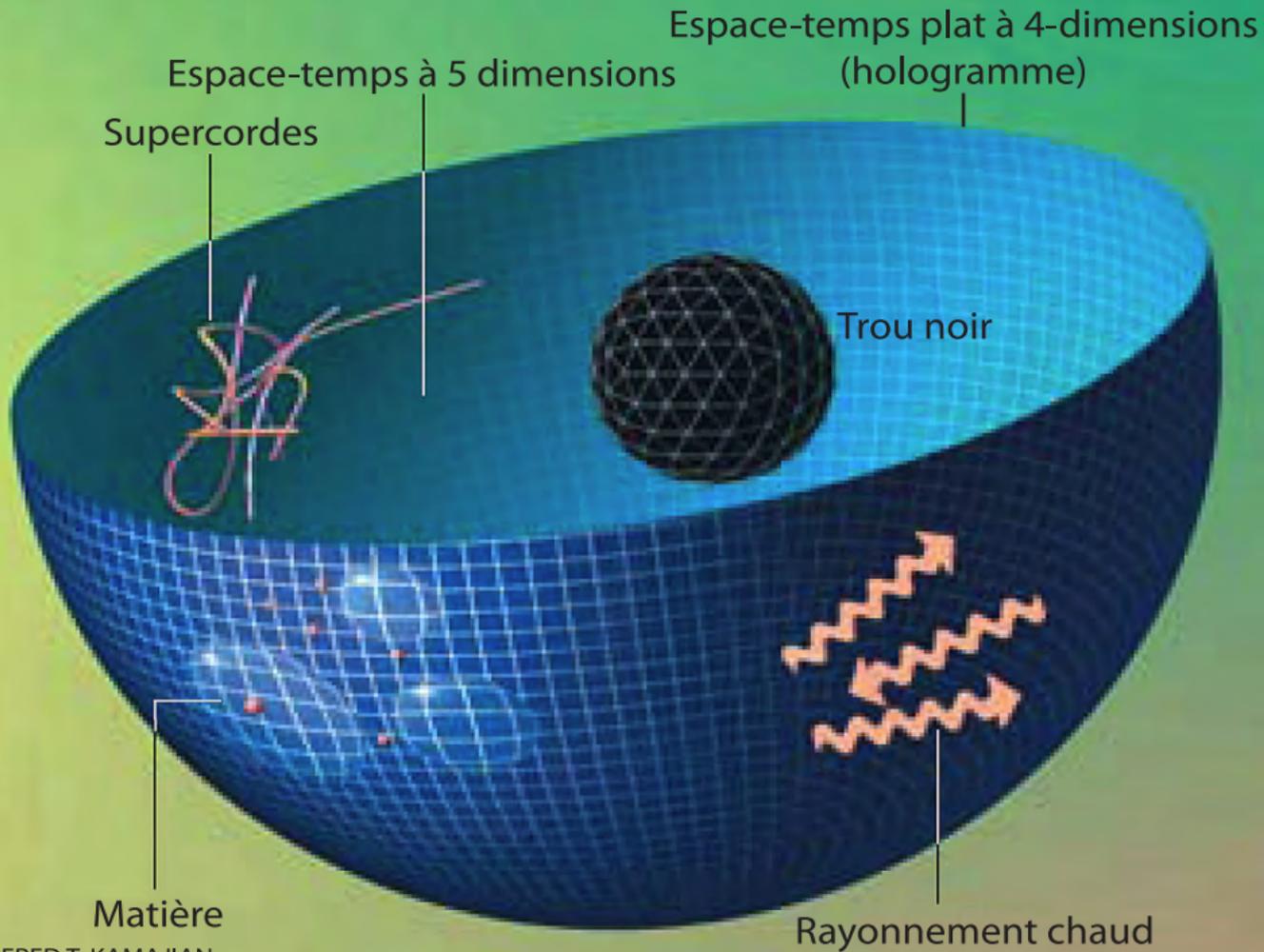


Avec la théorie des cordes les points n'existent plus car seules des petites cordes se propagent dans l'espace-temps.

L'espace-temps acquiert une géométrie quantique fluctuante.



C'est ainsi que la théorie des cordes unifie la force de gravité avec les autres forces entre particules et la mécanique quantique.





**La théorie des cordes fait des prédictions importantes :
Notre monde espace-temps à quatre dimensions serait un
plan dans un espace-temps à dix dimensions.
Des manifestations expérimentales de ces prédictions sont
recherchées :**

- 
- ▷ dans les accélérateur de particule : création de trous noirs microscopiques au LHC
 - ▷ les mesures des fluctuations primordiales image de l'univers après le Big Bang
 - ▷ des manifestations de la modification de la force de gravité
 - ▷ ...vos contributions !!