

Le défi de la gravitation quantique

Marc Henneaux

Paris, 13 décembre 2021

Introduction

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Introduction

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La physique du 20^e siècle a connu deux grandes révolutions :

Introduction

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La physique du 20^e siècle a connu deux grandes révolutions :
la théorie de la relativité d'Einstein d'une part, qui est
principalement pertinente à notre échelle et aux échelles plus
grandes (étoiles, galaxies, ..., jusqu'à l'univers tout entier - monde
de l'“infiniment grand”) ;

Introduction

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La physique du 20^e siècle a connu deux grandes révolutions :
la théorie de la relativité d'Einstein d'une part, qui est
principalement pertinente à notre échelle et aux échelles plus
grandes (étoiles, galaxies, ..., jusqu'à l'univers tout entier - monde
de l'“infiniment grand”) ;
et la mécanique quantique d'autre part, qui décrit le monde à
l'échelle microscopique (atomes, particules élémentaires -
monde de l'“infiniment petit”).

Introduction

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La physique du 20^e siècle a connu deux grandes révolutions :

la théorie de la relativité d'Einstein d'une part, qui est principalement pertinente à notre échelle et aux échelles plus grandes (étoiles, galaxies, ..., jusqu'à l'univers tout entier - monde de l'“infiniment grand”) ;

et la mécanique quantique d'autre part, qui décrit le monde à l'échelle microscopique (atomes, particules élémentaires - monde de l'“infiniment petit”).

Ces deux théories ont été abondamment validées par l'expérience et ont permis de faire de nombreuses prédictions nouvelles vérifiées ensuite avec un succès spectaculaire.

Introduction

**Le défi de la
gravitation
quantique**

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Introduction

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Problème : la théorie de la gravitation d'Einstein et la mécanique quantique dans leurs formulations actuelles sont incompatibles !

Introduction

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Problème : la théorie de la gravitation d'Einstein et la mécanique quantique dans leurs formulations actuelles sont incompatibles !

Ce conflit n'a pas de conséquence directe car on n'a pas besoin de la "gravitation quantique" aux échelles qui nous sont accessibles. Explorer les effets quantiques de la gravité einsteinienne nécessiterait des énergies énormes hors de notre portée.

Introduction

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Problème : la théorie de la gravitation d'Einstein et la mécanique quantique dans leurs formulations actuelles sont incompatibles !

Ce conflit n'a pas de conséquence directe car on n'a pas besoin de la "gravitation quantique" aux échelles qui nous sont accessibles. Explorer les effets quantiques de la gravité einsteinienne nécessiterait des énergies énormes hors de notre portée.

Mais cette tension est non seulement intellectuellement perturbante (deux théories incompatibles ne peuvent être toutes les deux correctes), elle ne nous permet pas non plus de comprendre des situations extrêmes physiquement intéressantes telles que le "big bang" ou l'évolution des trous noirs, où "l'infiniment petit rejoint l'infiniment grand".

Introduction

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Problème : la théorie de la gravitation d'Einstein et la mécanique quantique dans leurs formulations actuelles sont incompatibles !

Ce conflit n'a pas de conséquence directe car on n'a pas besoin de la "gravitation quantique" aux échelles qui nous sont accessibles. Explorer les effets quantiques de la gravité einsteinienne nécessiterait des énergies énormes hors de notre portée.

Mais cette tension est non seulement intellectuellement perturbante (deux théories incompatibles ne peuvent être toutes les deux correctes), elle ne nous permet pas non plus de comprendre des situations extrêmes physiquement intéressantes telles que le "big bang" ou l'évolution des trous noirs, où "l'infiniment petit rejoint l'infiniment grand".

Quelles sont les difficultés ?

La révolution einsteinienne

**Le défi de la
gravitation
quantique**

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La révolution einsteinienne

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie d'Einstein = relativité générale = théorie relativiste de la gravitation

La révolution einsteinienne

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie d'Einstein = relativité générale = théorie relativiste de la gravitation

La description einsteinienne de la gravitation a conduit à une véritable révolution dans notre conception de l'espace et du temps.

La révolution einsteinienne

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie d'Einstein = relativité générale = théorie relativiste de la gravitation

La description einsteinienne de la gravitation a conduit à une véritable révolution dans notre conception de l'espace et du temps.

En effet, selon Einstein :

La révolution einsteinienne

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie d'Einstein = relativité générale = théorie relativiste de la gravitation

La description einsteinienne de la gravitation a conduit à une véritable révolution dans notre conception de l'espace et du temps.

En effet, selon Einstein :

GRAVITATION = DÉFORMATION DE LA GÉOMÉTRIE DE
L'ESPACE-TEMPS

La révolution einsteinienne

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie d'Einstein = relativité générale = théorie relativiste de la gravitation

La description einsteinienne de la gravitation a conduit à une véritable révolution dans notre conception de l'espace et du temps.

En effet, selon Einstein :

GRAVITATION = DÉFORMATION DE LA GÉOMÉTRIE DE
L'ESPACE-TEMPS

Qu'est-ce que cela signifie ?

Théorie d'Einstein

Le défi de la gravitation quantique

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie d'Einstein

**Le défi de la
gravitation
quantique**

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La présence de masses (énergie) déforme la géométrie de l'espace,

Théorie d'Einstein

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

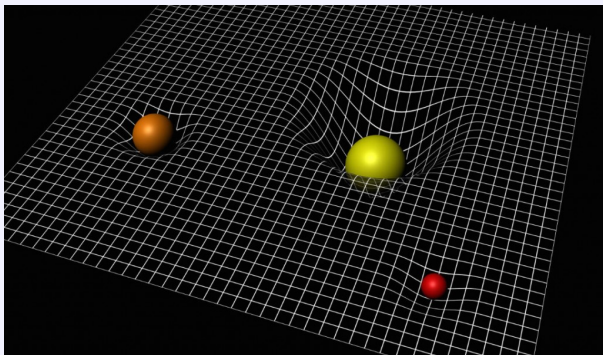
Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La présence de masses (énergie) déforme la géométrie de l'espace,



(Crédit ESA)

Théorie d'Einstein

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

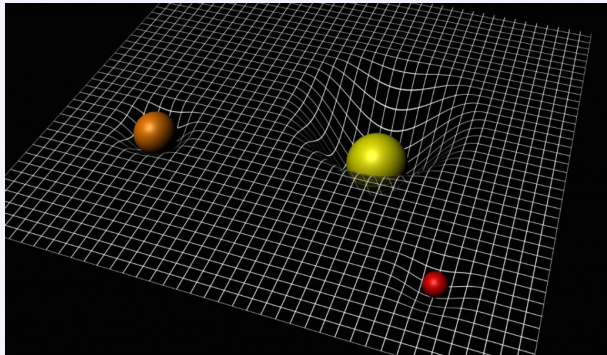
Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La présence de masses (énergie) déforme la géométrie de l'espace,



(Crédit ESA)

et du temps (“espace-temps”).

Courbure du temps

**Le défi de la
gravitation
quantique**

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Courbure du temps

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

COURBURE GRAVITATIONNELLE DU TEMPS

La gravité ralentit le temps



Les horloges au rez-de-chaussée avancent plus lentement que les horloges au sommet du bâtiment (environ 1s par 3×10^6 années)

Courbure du temps

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

COURBURE GRAVITATIONNELLE DU TEMPS

La gravité ralentit le temps



Les horloges au rez-de-chaussée avancent plus lentement que les horloges au sommet du bâtiment (environ 1s par 3×10^6 années)

Important pour le système de navigation par satellites (GPS) !

Théorie d'Einstein - ordres de grandeur

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La gravitation est une force faible :

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

(équations d'Einstein)

$G = \text{constante gravitationnelle} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

$$\frac{8\pi G}{c^4} = 2,08 \times 10^{-43} \text{ s}^2 \text{ m}^{-1} \text{ kg}^{-1}$$

Théorie d'Einstein - ordres de grandeur

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La gravitation est une force faible :

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

(équations d'Einstein)

G = constante gravitationnelle = $6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$

$$\frac{8\pi G}{c^4} = 2,08 \times 10^{-43} s^2 m^{-1} kg^{-1}$$

Proton - électron :

$$\frac{F_e}{F_g} = 10^{39} = 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000$$

Théorie d'Einstein - ordres de grandeur

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La gravitation est une force faible :

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

(équations d'Einstein)

G = constante gravitationnelle = $6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$

$$\frac{8\pi G}{c^4} = 2,08 \times 10^{-43} s^2 m^{-1} kg^{-1}$$

Proton - électron :

$$\frac{F_e}{F_g} = 10^{39} = 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000$$

La déformation de la géométrie à la surface du soleil est de l'ordre de 10^{-5} , et à la surface de la terre, de l'ordre de 10^{-9} .

Théorie d'Einstein - ordres de grandeur

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La gravitation est une force faible :

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

(équations d'Einstein)

G = constante gravitationnelle = $6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$

$$\frac{8\pi G}{c^4} = 2,08 \times 10^{-43} s^2 m^{-1} kg^{-1}$$

Proton - électron :

$$\frac{F_e}{F_g} = 10^{39} = 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000$$

La déformation de la géométrie à la surface du soleil est de l'ordre de 10^{-5} , et à la surface de la terre, de l'ordre de 10^{-9} .

Etoiles à neutrons : 10^{-1}

Théorie d'Einstein - ordres de grandeur

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

La gravitation est une force faible :

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

(équations d'Einstein)

G = constante gravitationnelle = $6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$

$$\frac{8\pi G}{c^4} = 2,08 \times 10^{-43} s^2 m^{-1} kg^{-1}$$

Proton - électron :

$$\frac{F_e}{F_g} = 10^{39} = 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000$$

La déformation de la géométrie à la surface du soleil est de l'ordre de 10^{-5} , et à la surface de la terre, de l'ordre de 10^{-9} .

Etoiles à neutrons : 10^{-1}

Déformation de la géométrie encore plus importante pour les trous noirs ou le big bang cosmologique.

Théorie d'Einstein - prédictions remarquables

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

**La révolution
einsteinienne**

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Ondes gravitationnelles.

Théorie d'Einstein - prédictions remarquables

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Ondes gravitationnelles.

Trous noirs :

Théorie d'Einstein - prédictions remarquables

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Ondes gravitationnelles.

Trous noirs :

Objets dont l'attraction gravitationnelle est si forte que rien ne peut s'en échapper.

Théorie d'Einstein - prédictions remarquables

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Ondes gravitationnelles.

Trous noirs :

Objets dont l'attraction gravitationnelle est si forte que rien ne peut s'en échapper.

Jouent un rôle central en astrophysique.

Théorie d'Einstein - prédictions remarquables

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Ondes gravitationnelles.

Trous noirs :

Objets dont l'attraction gravitationnelle est si forte que rien ne peut s'en échapper.

Jouent un rôle central en astrophysique.

Ont été détectés par le "Event Horizon Telescope" .

Théorie d'Einstein - prédictions remarquables

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Ondes gravitationnelles.

Trous noirs :

Objets dont l'attraction gravitationnelle est si forte que rien ne peut s'en échapper.

Jouent un rôle central en astrophysique.

Ont été détectés par le "Event Horizon Telescope" .

Cosmologie : univers en expansion, "Big bang" (il y a environ 13.7 milliards d'années), conditions extrêmes !

Mécanique quantique

Le défi de la gravitation quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

**Mécanique
quantique**

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Mécanique quantique

**Le défi de la
gravitation
quantique**

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

**Mécanique
quantique**

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie pertinente pour décrire le monde microscopique.

Mécanique quantique

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

**Mécanique
quantique**

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie pertinente pour décrire le monde microscopique.
Etrangeté du monde quantique.

Mécanique quantique

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie pertinente pour décrire le monde microscopique.

Etrangeté du monde quantique.

Principe d'incertitude de Heisenberg

Mécanique quantique

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie pertinente pour décrire le monde microscopique.

Etrangeté du monde quantique.

Principe d'incertitude de Heisenberg

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar$$

Mécanique quantique

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie pertinente pour décrire le monde microscopique.

Etrangeté du monde quantique.

Principe d'incertitude de Heisenberg

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar$$

Ici : $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ où $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$ est la constante de Planck associée aux phénomènes quantiques.

Mécanique quantique

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie pertinente pour décrire le monde microscopique.

Etrangeté du monde quantique.

Principe d'incertitude de Heisenberg

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar$$

Ici : $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ où $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$ est la constante de Planck associée aux phénomènes quantiques.

De manière générale, toute variable physique fluctue.

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

**Le défi de la
gravitation
quantique**

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

- Probabilités infinies

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

- Probabilités infinies
- La géométrie de l'espace-temps étant dynamique est soumise au principe d'incertitude. Comment définir la notion de géométrie quantique ?

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

- Probabilités infinies
- La géométrie de l'espace-temps étant dynamique est soumise au principe d'incertitude. Comment définir la notion de géométrie quantique ?

Echelle de Planck

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

- Probabilités infinies
- La géométrie de l'espace-temps étant dynamique est soumise au principe d'incertitude. Comment définir la notion de géométrie quantique ?

Echelle de Planck

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-35} m$$

(longueur de Planck)

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

- Probabilités infinies
- La géométrie de l'espace-temps étant dynamique est soumise au principe d'incertitude. Comment définir la notion de géométrie quantique ?

Echelle de Planck

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-35} m$$

(longueur de Planck)

Longueur minuscule !

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

- Probabilités infinies
- La géométrie de l'espace-temps étant dynamique est soumise au principe d'incertitude. Comment définir la notion de géométrie quantique ?

Echelle de Planck

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-35} m$$

(longueur de Planck)

Longueur minuscule !

Impossible à explorer (formation de trous noirs)

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

- Probabilités infinies
- La géométrie de l'espace-temps étant dynamique est soumise au principe d'incertitude. Comment définir la notion de géométrie quantique ?

Echelle de Planck

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-35} m$$

(longueur de Planck)

Longueur minuscule !

Impossible à explorer (formation de trous noirs)

$G = 6,67 \times 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot sec^{-2}$ (gravitation).

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

- Probabilités infinies
- La géométrie de l'espace-temps étant dynamique est soumise au principe d'incertitude. Comment définir la notion de géométrie quantique ?

Echelle de Planck

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-35} m$$

(longueur de Planck)

Longueur minuscule !

Impossible à explorer (formation de trous noirs)

$G = 6,67 \times 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot sec^{-2}$ (gravitation).

$c = 3 \times 10^8 m/sec$ (relativité).

Théorie d'Einstein et mécanique quantique - Problèmes

Le défi de la gravitation quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution einsteinienne

Mécanique quantique

Les difficultés

Théorie des cordes

Conclusions

On rencontre plusieurs difficultés

- Probabilités infinies
- La géométrie de l'espace-temps étant dynamique est soumise au principe d'incertitude. Comment définir la notion de géométrie quantique ?

Echelle de Planck

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-35} m$$

(longueur de Planck)

Longueur minuscule !

Impossible à explorer (formation de trous noirs)

$G = 6,67 \times 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot sec^{-2}$ (gravitation).

$c = 3 \times 10^8 m/sec$ (relativité).

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ avec $h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot sec$ (mécanique quantique).

Théorie des cordes : une théorie fascinante

**Le défi de la
gravitation
quantique**

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Théorie des cordes : une théorie fascinante

**Le défi de la
gravitation
quantique**

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Un des meilleurs espoirs pour résoudre le problème de la gravité quantique.

Théorie des cordes : une théorie fascinante

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Un des meilleurs espoirs pour résoudre le problème de la gravité quantique.

Dans les théories des cordes, les quanta fondamentaux sont des objets étendus à une dimension, des “cordes”.

Théorie des cordes : une théorie fascinante

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Un des meilleurs espoirs pour résoudre le problème de la gravité quantique.

Dans les théories des cordes, les quanta fondamentaux sont des objets étendus à une dimension, des “cordes”.



Atome $\sim 10^{-10}$ m

Noyau $\sim 10^{-15}$ m

Cordes $\sim 10^{-35}$ m

Théorie des cordes : une théorie fascinante

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Un des meilleurs espoirs pour résoudre le problème de la gravité quantique.

Dans les théories des cordes, les quanta fondamentaux sont des objets étendus à une dimension, des “cordes”.



Atome $\sim 10^{-10}$ m

Noyau $\sim 10^{-15}$ m

Cordes $\sim 10^{-35}$ m

Celles-ci peuvent être ouvertes ou fermées et sont de taille minuscule.

Théorie des cordes : une théorie fascinante

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Un des meilleurs espoirs pour résoudre le problème de la gravité quantique.

Dans les théories des cordes, les quanta fondamentaux sont des objets étendus à une dimension, des “cordes”.



Atome $\sim 10^{-10}$ m

Noyau $\sim 10^{-15}$ m

Cordes $\sim 10^{-35}$ m

Celles-ci peuvent être ouvertes ou fermées et sont de taille minuscule.

La théorie des cordes reproduit (prédit) la théorie d'Einstein à notre échelle.

Théorie des cordes : une théorie fascinante

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Un des meilleurs espoirs pour résoudre le problème de la gravité quantique.

Dans les théories des cordes, les quanta fondamentaux sont des objets étendus à une dimension, des “cordes”.



Atome $\sim 10^{-10}$ m

Noyau $\sim 10^{-15}$ m

Cordes $\sim 10^{-35}$ m

Celles-ci peuvent être ouvertes ou fermées et sont de taille minuscule.

La théorie des cordes reproduit (prédit) la théorie d'Einstein à notre échelle.

Elle unifie de manière quantiquement cohérente (au niveau perturbatif) toutes les interactions fondamentales, réalisant ainsi un rêve d'Einstein.

Théorie des cordes : une théorie fascinante

**Le défi de la
gravitation
quantique**

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Théorie des cordes : une théorie fascinante

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Mais nous ne disposons pas encore de la formulation
fondamentale de la théorie!!!

Théorie des cordes : une théorie fascinante

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

**Théorie des
cordes**

Conclusions

Mais nous ne disposons pas encore de la formulation fondamentale de la théorie!!!

En particulier, la question : "Qu'est ce que l'espace-temps quantique ?" n'a toujours pas de réponse.

Théorie des cordes : une théorie fascinante

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Mais nous ne disposons pas encore de la formulation fondamentale de la théorie!!!

En particulier, la question : "Qu'est ce que l'espace-temps quantique?" n'a toujours pas de réponse.

Mais la théorie des cordes fournit déjà de nombreuses indications que l'espace-temps est un concept "émergent" (nombre de dimensions dépend de la formulation, principe holographique...)

Conclusions

Le défi de la gravitation quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Conclusions

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Le problème de la quantification du champ de gravitation est un défi intellectuel passionnant qui a déjà apporté énormément d'idées fructueuses...

Conclusions

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Le problème de la quantification du champ de gravitation est un défi intellectuel passionnant qui a déjà apporté énormément d'idées fructueuses...

et qui continue à être un sujet de recherches extrêmement actives !

Conclusions

Le défi de la
gravitation
quantique

Marc Henneaux

Introduction

La révolution
einsteinienne

Mécanique
quantique

Les difficultés

Théorie des
cordes

Conclusions

Le problème de la quantification du champ de gravitation est un défi intellectuel passionnant qui a déjà apporté énormément d'idées fructueuses...

et qui continue à être un sujet de recherches extrêmement actives !

Il est vraisemblable que nos conceptions de l'espace-temps en seront encore plus profondément modifiées.