

Un voyage dans l'espace et le temps



L. Gallot, J.P. Guillet, E. Pilon, E. Ragoucy, R. Taillet

Plan de l'exposé

1/ l'espace et le temps

2/ l'espace-temps en relativité restreinte

3/ l'espace-temps en relativité générale

4/ des dimensions supplémentaires ?

L'espace: une définition

Intuitivement : cadre de nos déplacements

Plus généralement: planètes, étoiles, galaxies...

objets du quotidiens

molécules, atomes, particules...

Mathématicien: nombreux espaces

dimension, rigidité, platitude ou courbure...

Physicien: cherche un espace adapté à la modélisation d'une situation

Dimensions

Espace de dimension 1 (1D)



Dimensions

Espace de dimension 2: *le plan*



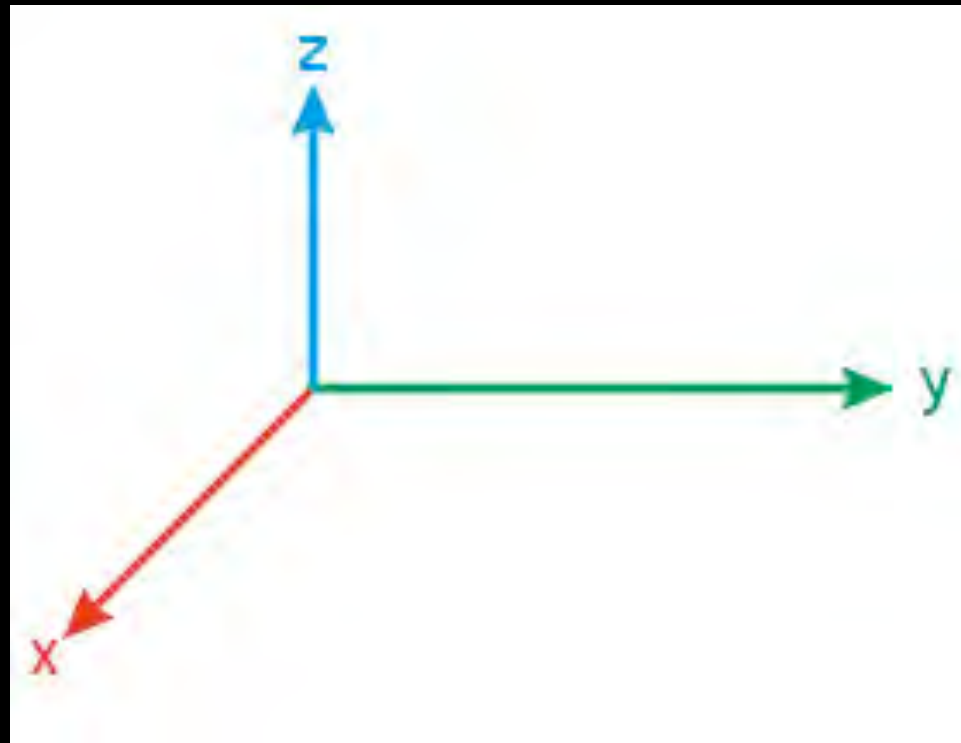
Dimensions

Espace de dimension 2 (2D): *surface d'une sphère*



Dimensions

Espace de dimension 3 (3D)



Dimensions

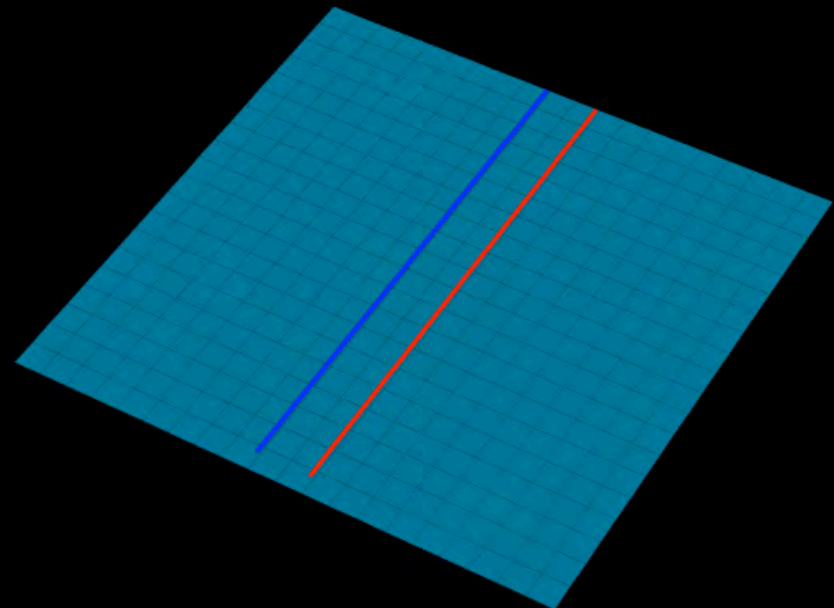
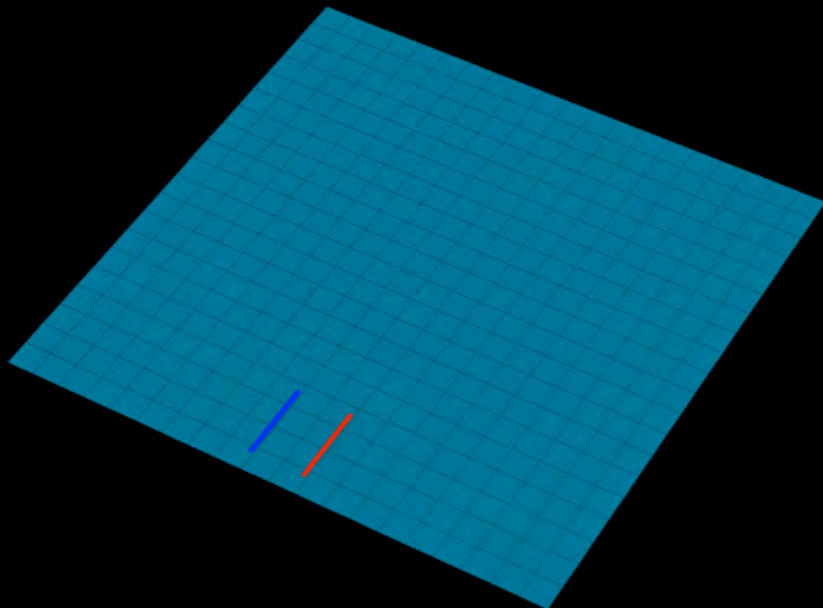
Espace de dimension 3



Courbure

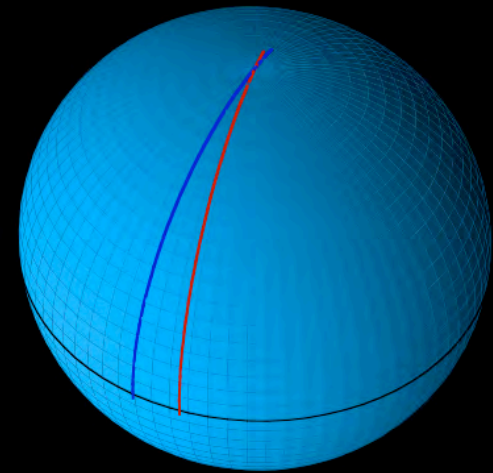
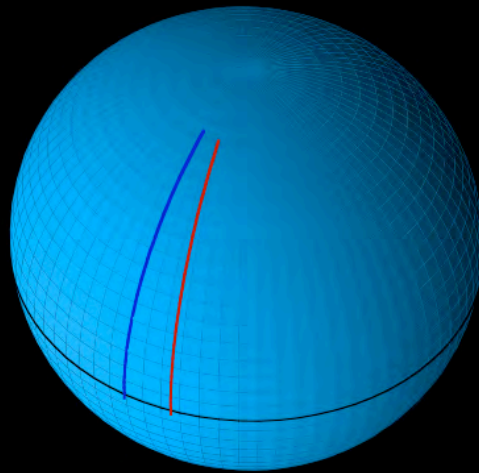
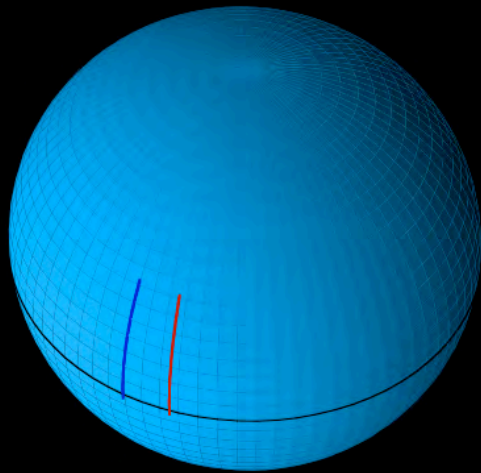
Espace plat :

deux parallèles ne se croisent pas



Courbure

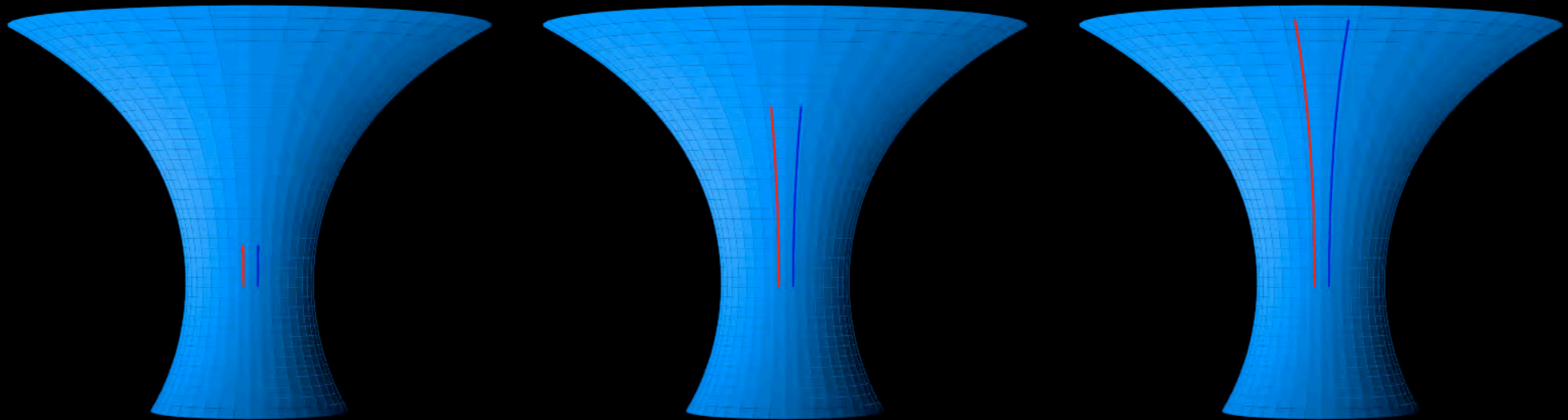
Sphère : deux parallèles se croisent



Courbure

Hyperboloïde :

deux parallèles ne se croisent pas et s'écartent



Rigidité

indépendance du contenu



Distances absolues

Accord sur les mesures entre observateurs



Le temps



Le temps

paramètre l'évolution d'un système



Le temps

paramètre le mouvement



Mécanique newtonienne (XVIIème siècle)

*objets soumis à des forces se déplacent dans un espace à **3 dimensions** (3D).*

*le temps **absolu** sert à repérer le mouvement.*

Propriétés

plat et rigide
espace absolu
temps absolu
3D + 1T



Propriétés

plat et rigide
espace absolu
temps absolu
3D + 1T

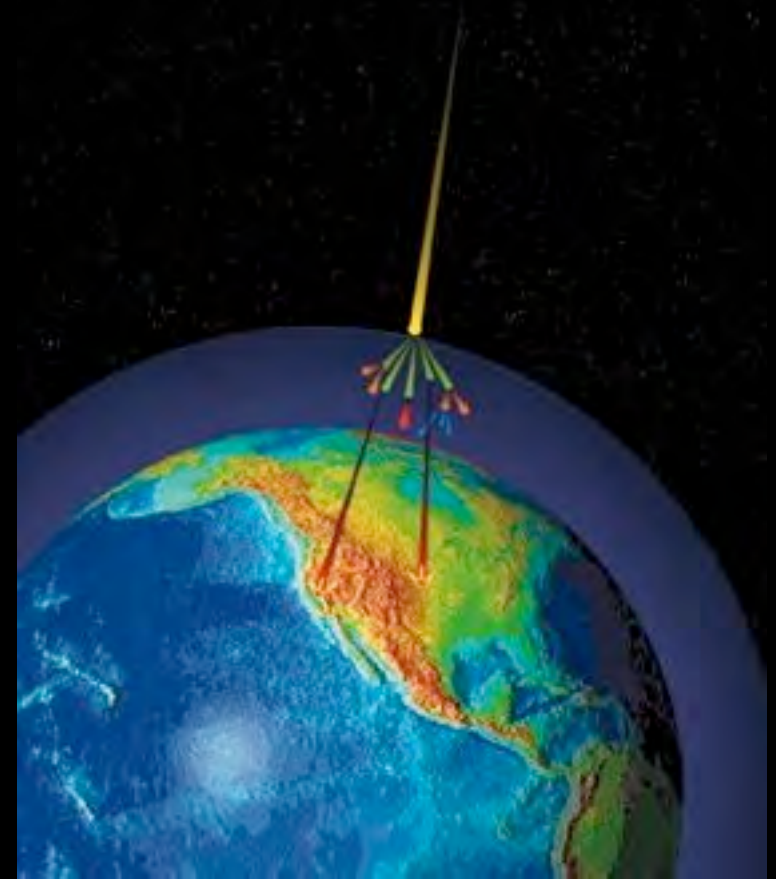
L'énigme des muons "cosmiques"

Temps de vie mesuré : 2 microsecondes

Vitesse : ~300 000 km/s

Distance de vol : 600 mètres

Distance de vol observée : 60 km!!!



Les muons cosmiques

Propriétés

plat et rigide
espace absolu
temps absolu
3D + 1T

???

le point de vue de l'observateur terrestre :

*le muon a une durée de vie **plus longue***

*parce que le temps **s'écoule différemment***



Les muons cosmiques

le point de vue du muon :

*l'atmosphère lui paraît **moins épaisse***

*parce que les longueurs
sont **contractées***

Propriétés

plat et rigide
espace absolu
temps absolu
3D + 1T

???



La relativité restreinte (Einstein 1905)

Propriétés

non

plat et rigide
espace absolu
temps absolu
3D + 1T

*distances et durées **ne** sont **pas** absolues*

espace-temps 4D, rigide et plat



La relativité restreinte (Einstein 1905)

*distances et durées **ne** sont **pas** absolues*

espace-temps 4D, rigide et plat



La relativité restreinte

Propriétés

plat et rigide
espace-temps
4D

vérifications expérimentales:

horloge du Concorde

accélérateurs de particules



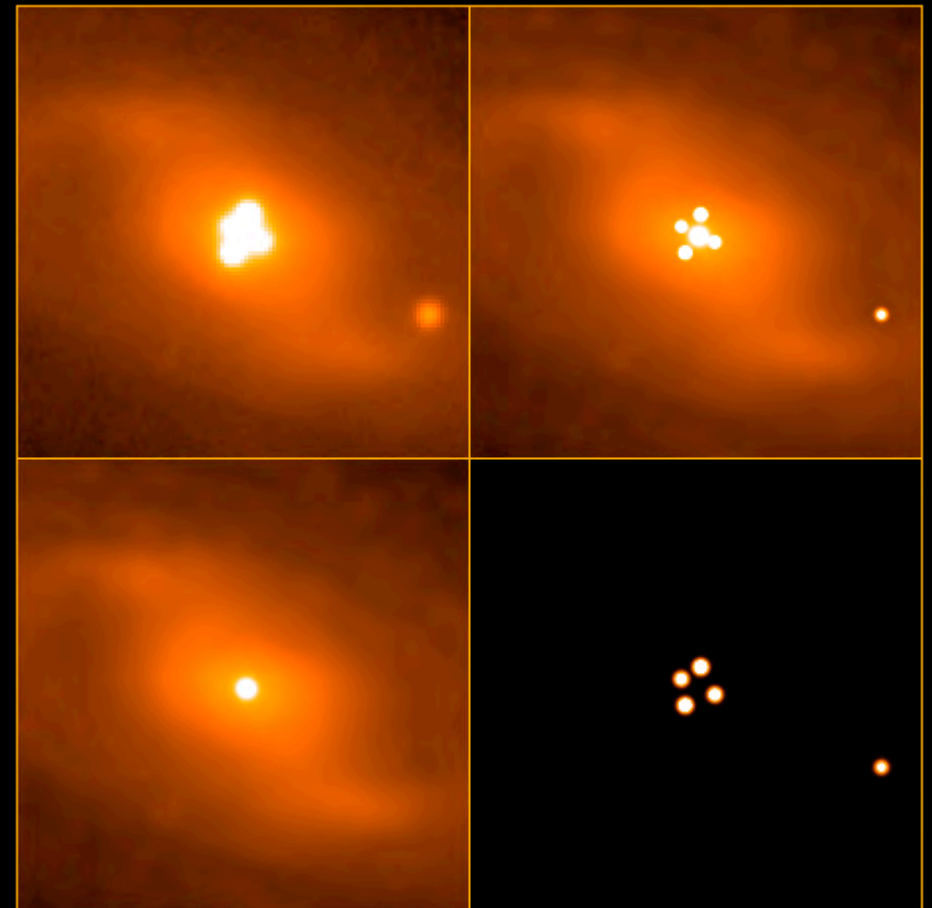
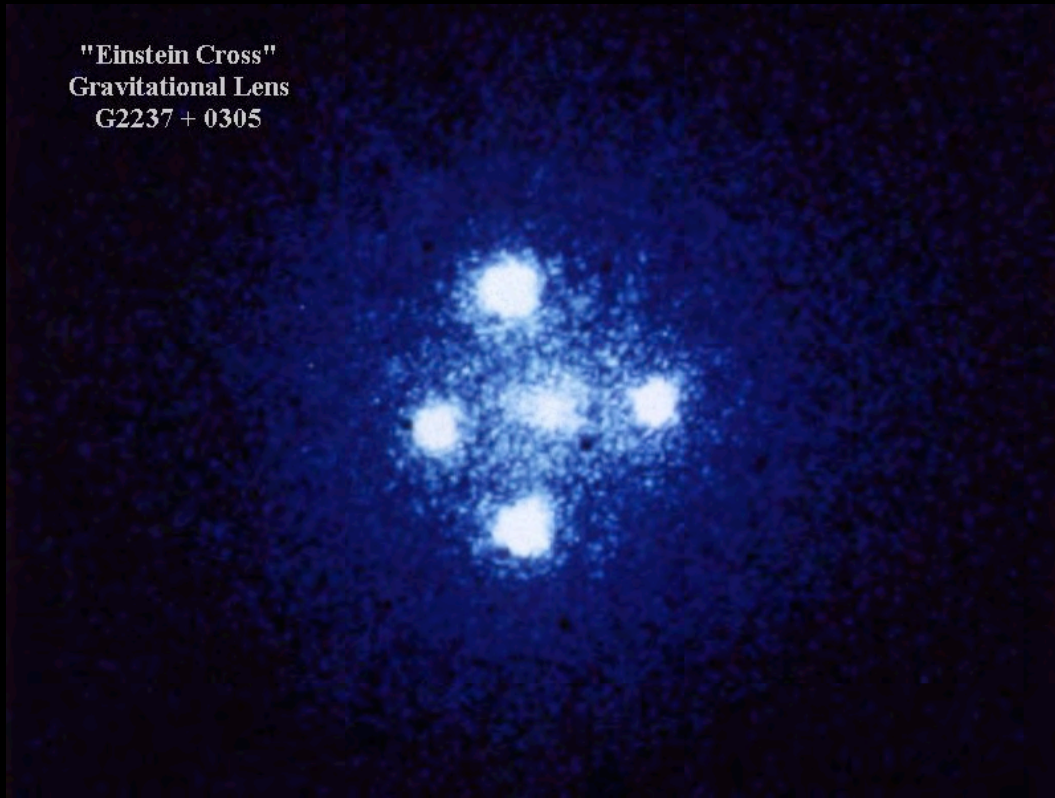
La croix d'Einstein (1979)

Propriétés

???

plat
espace-temps
4D
rigide

"Einstein Cross"
Gravitational Lens
G2237 + 0305



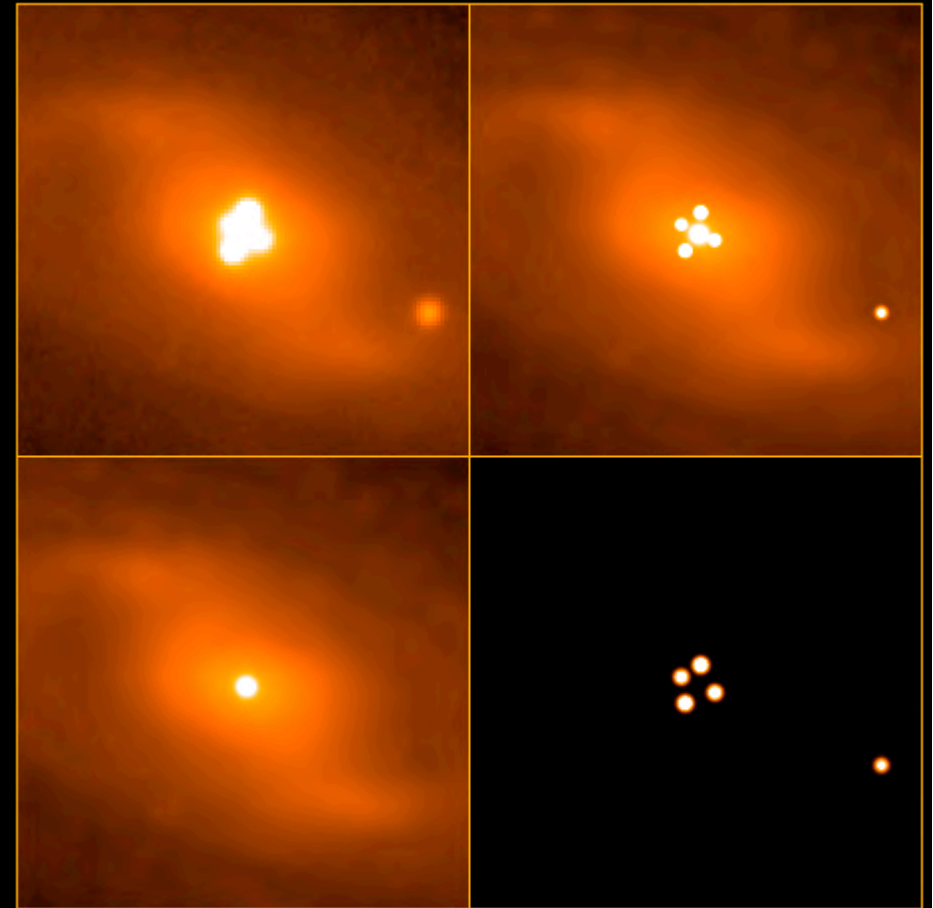
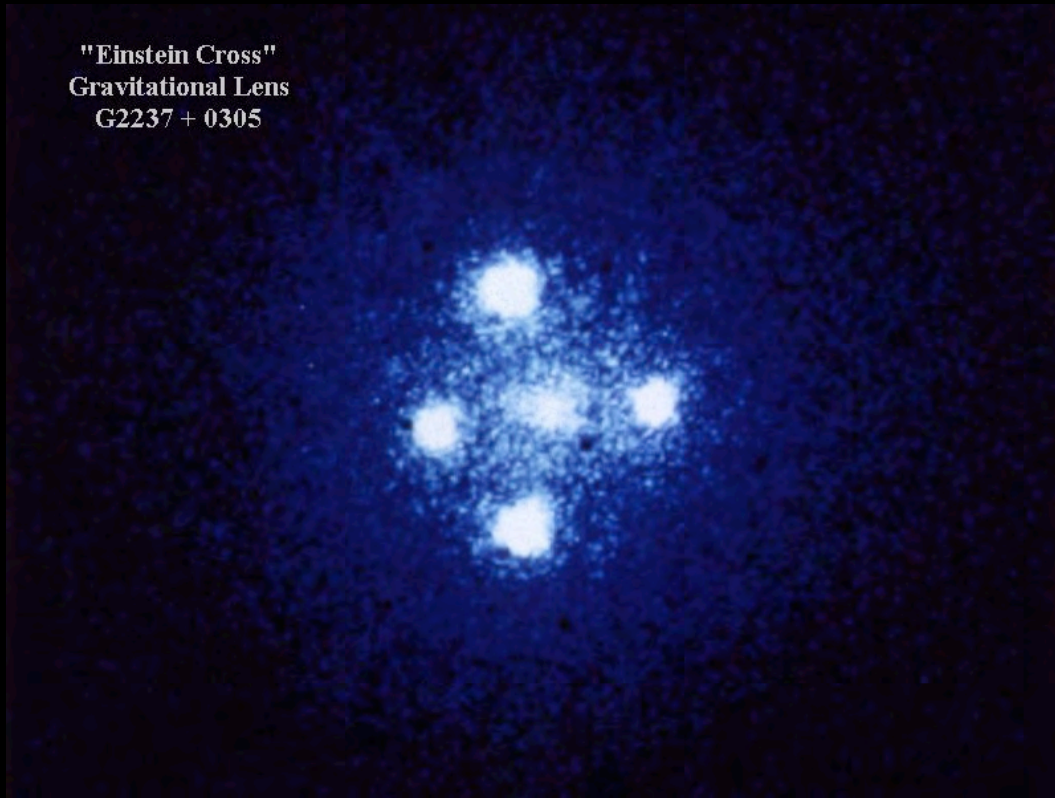
La croix d'Einstein (1979)

Propriétés

non

plat
espace-temps
4D
rigide

"Einstein Cross"
Gravitational Lens
G2237 + 0305

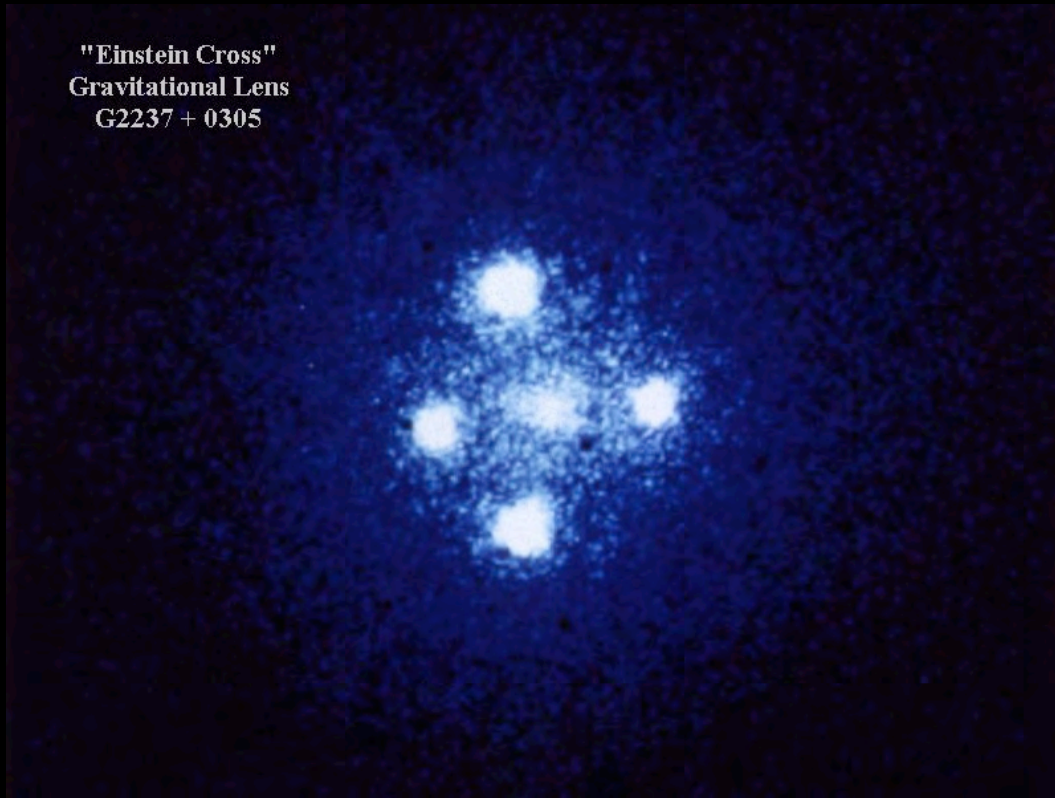


La croix d'Einstein (1979)

Propriétés

courbe
espace-temps
4D
rigide

"Einstein Cross"
Gravitational Lens
G2237 + 0305

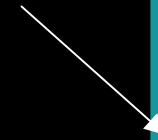


Déviations des rayons lumineux

Propriétés

courbe
espace-temps
4D
rigide

???



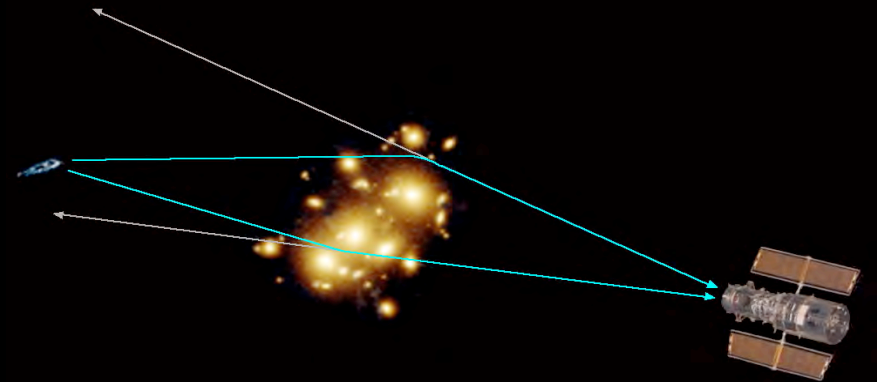
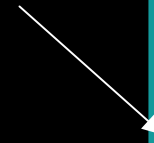
Déviations des rayons lumineux

due à la déformation de l'espace

Propriétés

- courbe
- espace-temps
- 4D
- rigide

non

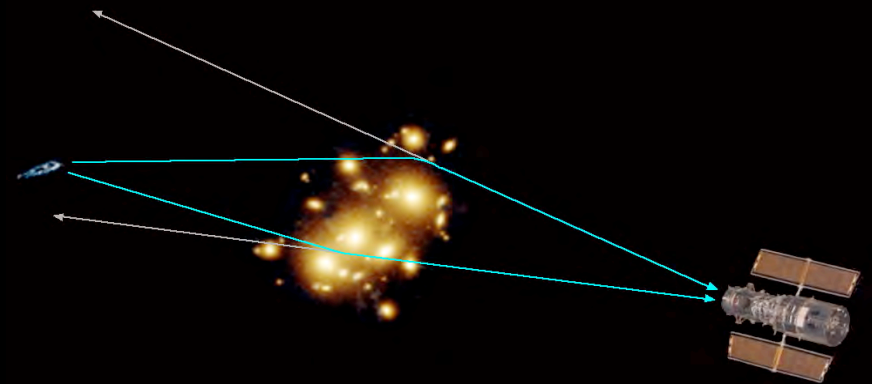


Déviations des rayons lumineux

due à la déformation de l'espace

Propriétés

courbe
espace-temps
4D
souple



Les distortions du temps

Propriétés

courbe
espace-temps
4D
souple



*décalage des fréquences atomiques :
expérience de Pound & Rebka (1960)*

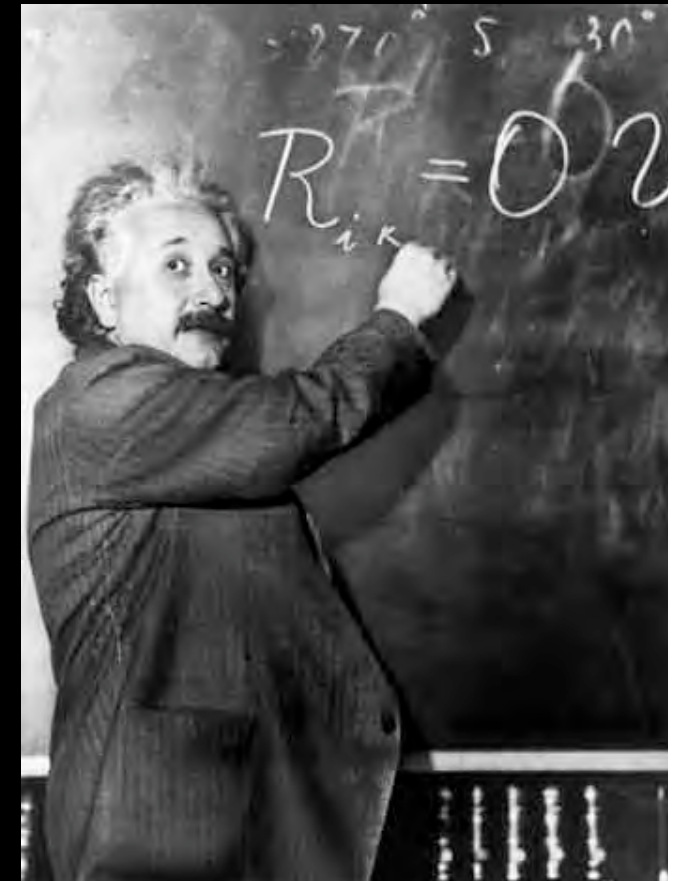
La relativité générale (Einstein 1917)

Lien entre gravitation et géométrie :

*l'espace-temps est (faiblement) élastique
et courbé par la masse*

Newton : force gravitationnelle

*Einstein : mouvement libre dans un
espace courbé par la masse*



Précession du périhélie de Mercure

Propriétés

espace-temps

courbe/souple

4D

observation : Le Verrier (1859)

(1 tour pour 13 millions de révolutions)

explication : Einstein (1915)

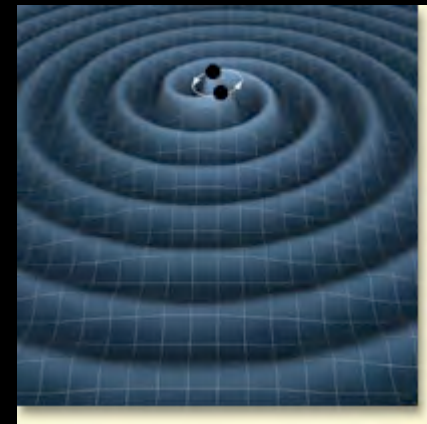
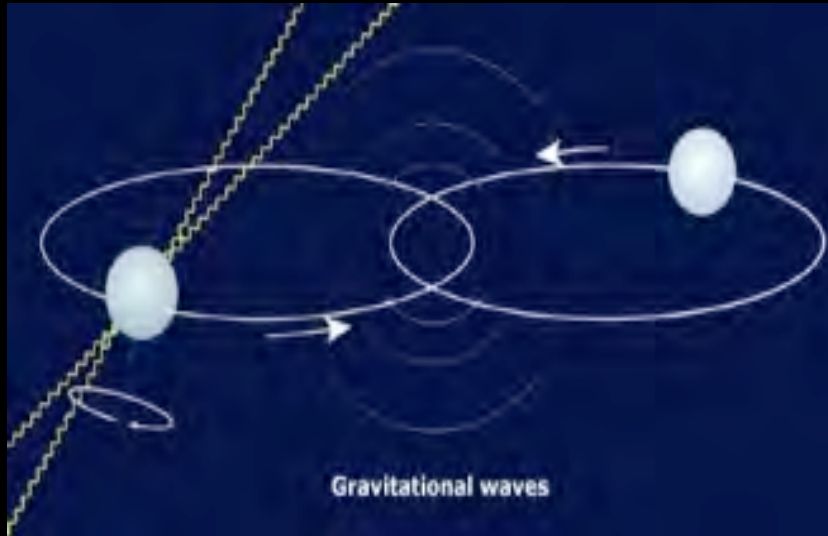


Coalescence du pulsar binaire

(Hulse & Taylor 1974, Nobel 1993)

Propriétés

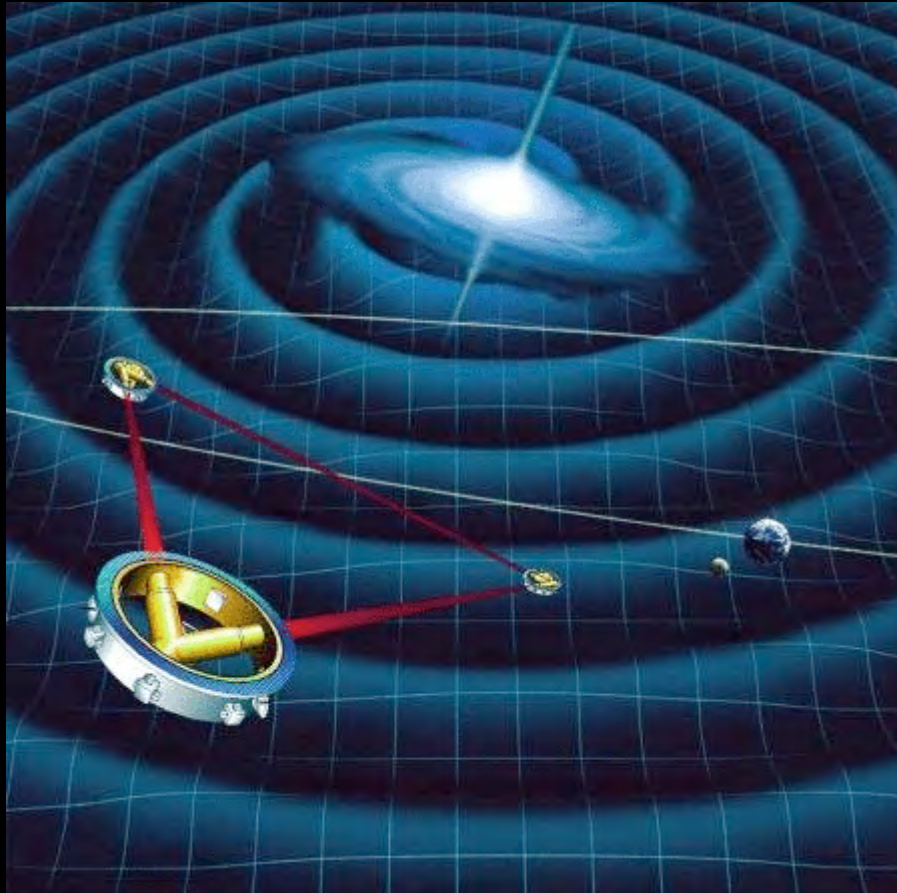
espace-temps
courbe/souple
4D



Ondes gravitationnelles

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
4D



Dimensions supplémentaires

La situation :

- *particules et interactions :*
espace-temps 4D, plat et rigide

- *astres et gravitation :*
espace-temps 4D courbe et souple

Rapprocher, voire unifier, les deux descriptions?

L'espace-temps est-il 4D?

Dimensions supplémentaires

La situation :

- *particules et interactions :*
espace-temps 4D, plat et rigide
- *astres et gravitation :*
espace-temps 4D courbe et souple

Rapprocher, voire unifier, les deux descriptions?

L'espace-temps est-il 4D?

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
4D

???

espace-temps
courbe/souple
4D + 1D ?

Modèle de Kaluza et Klein

L'idée de Kaluza (1917) :

gravité en $(4+1)D =$

gravité $4D$

ET

électromagnétisme $4D$

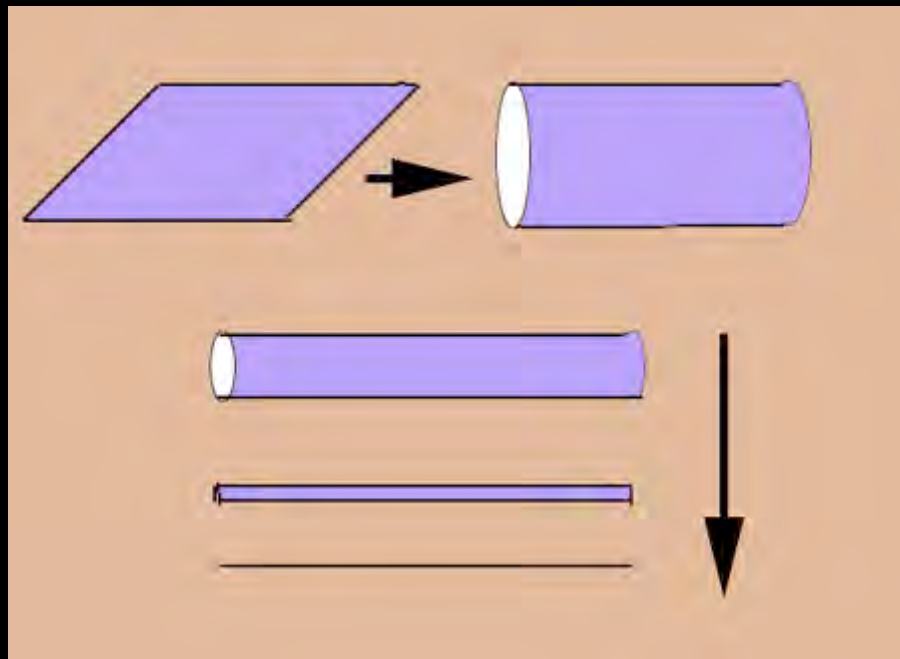


Modèle de Kaluza et Klein

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
4D + 1D ?

*Le raffinement de Klein (1926) :
pour rendre la dimension supplémentaire
inobservable, on la **compactifie***

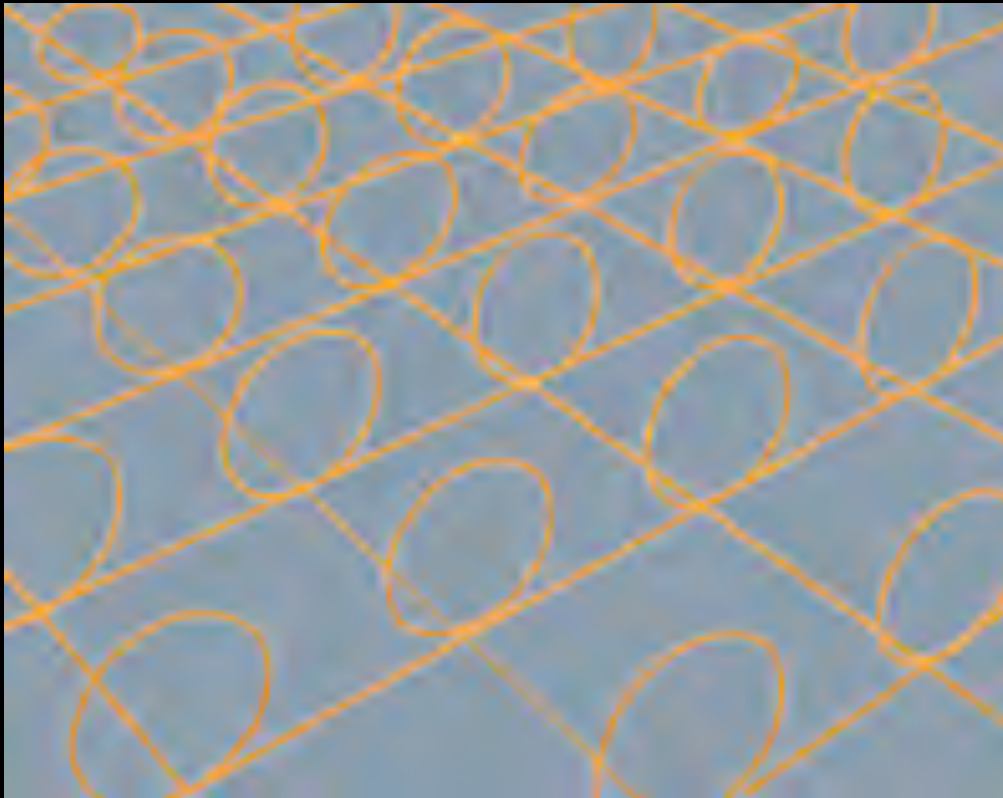


Modèle de Kaluza et Klein

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
4D + 1D ?

Le raffinement de Klein (1926):



Conséquence:
quantification de la
charge électrique

espace-temps

courbe/souple

4D + 1D ?

Modèle de Kaluza et Klein

*Extension possible aux autres interactions
avec plus de dimensions :*

nombre non contraint

*Enfin, l'idée est abandonnée sous cette forme :
désaccord avec la matière observée*

Modèles de cordes

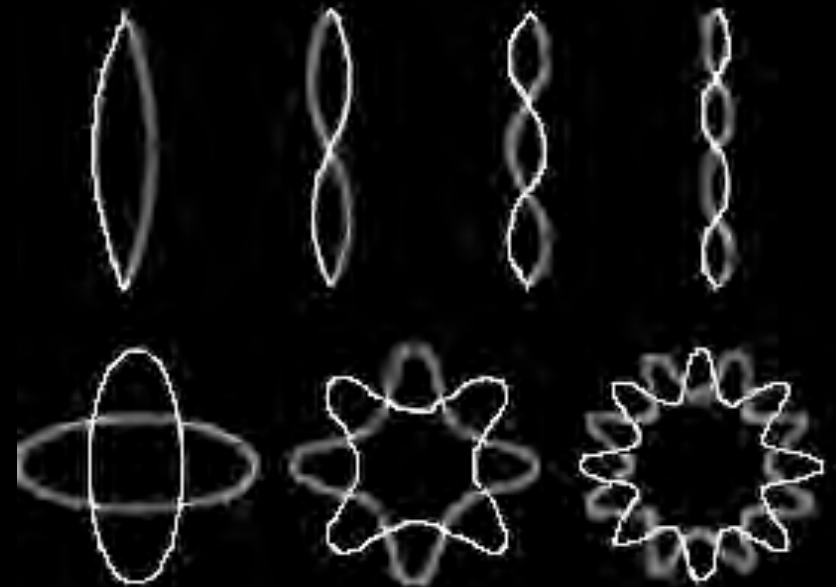
Propriétés

espace-temps
courbe/souple
10D ?

*Idée : abandonner la notion de particule ponctuelle pour celle de **corde***

Gravitation et autres interactions entre particules

(Scherk-Schwarz, 1975)

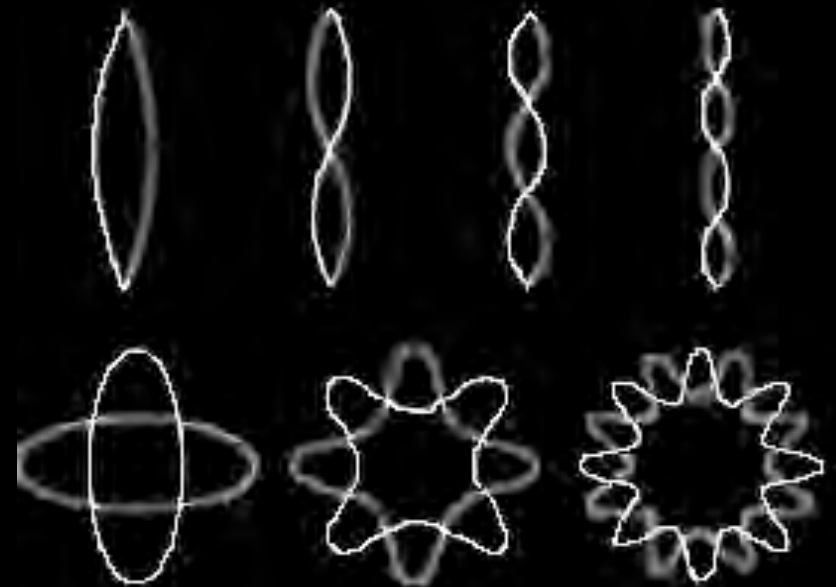
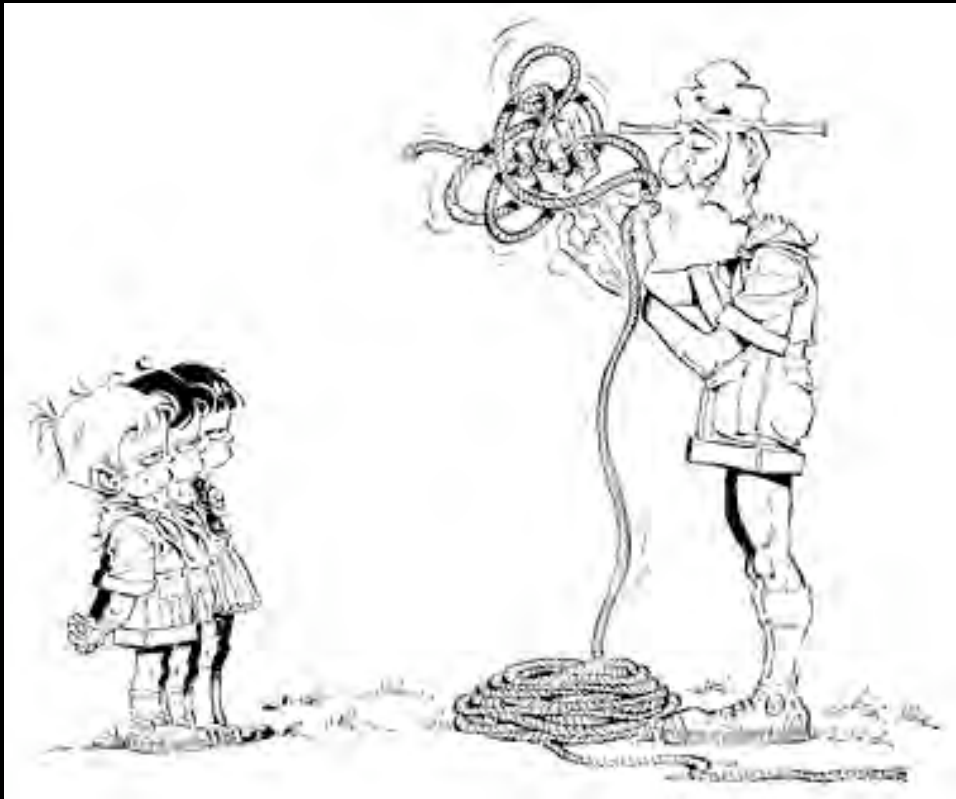


Modèles de cordes

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
10D ?

*Idée : abandonner la notion de particule ponctuelle pour celle de **corde***

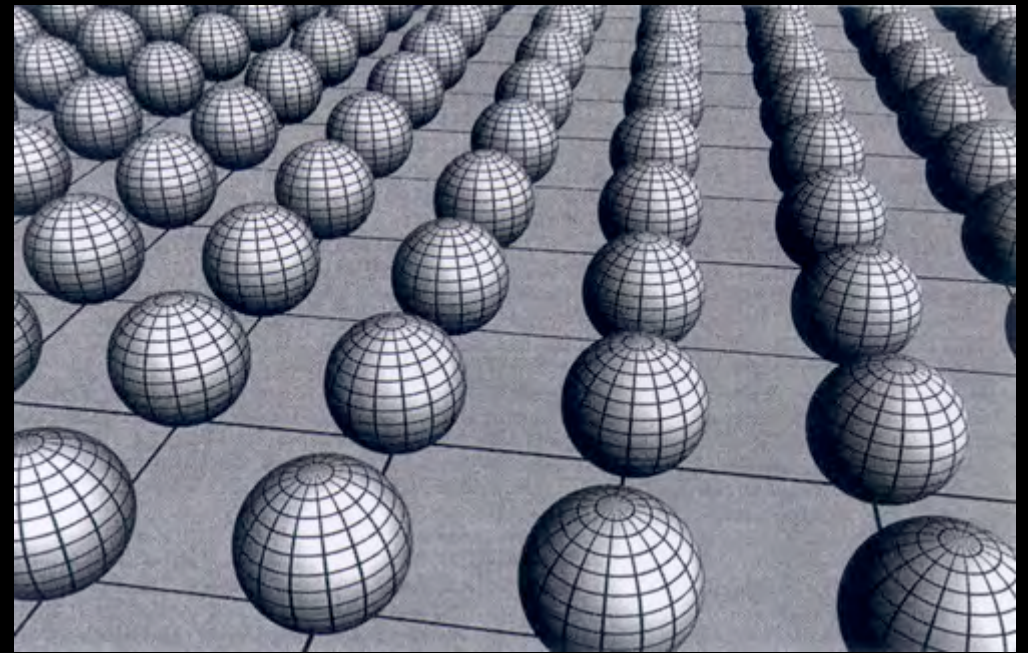


Modèles de cordes

Les cordes vivent en 10 dimensions :

les six dimensions supplémentaires sont une contrainte mathématique!

*Problème :
comment les concilier avec
le monde observé?*



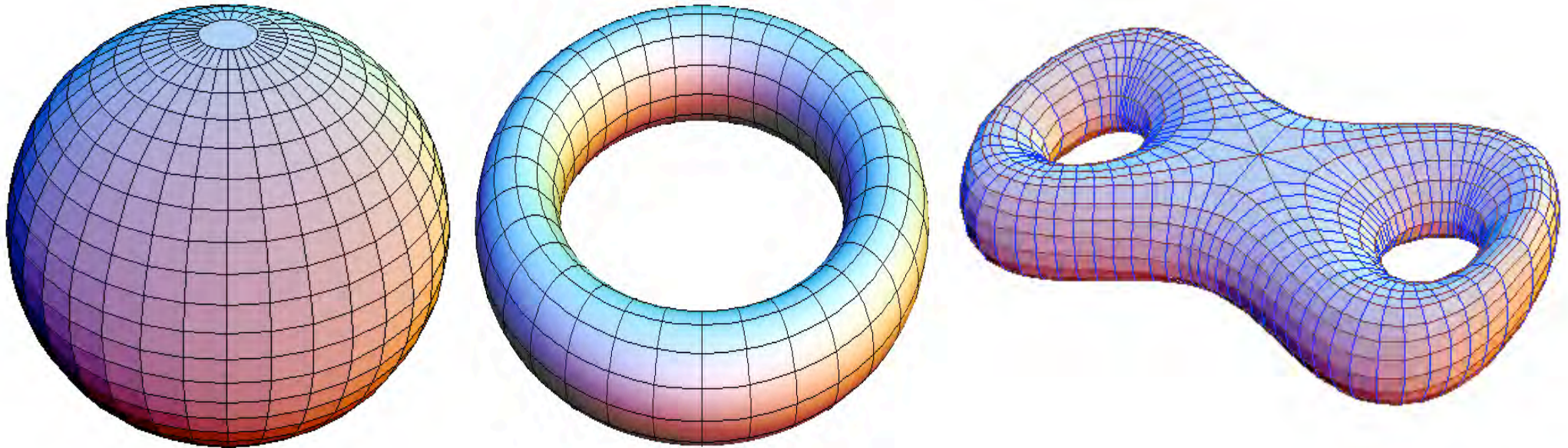
Modèles de cordes

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
10D ?

Réponse:

*la forme des six dimensions supplémentaires
modifie la physique observée à quatre dimensions*

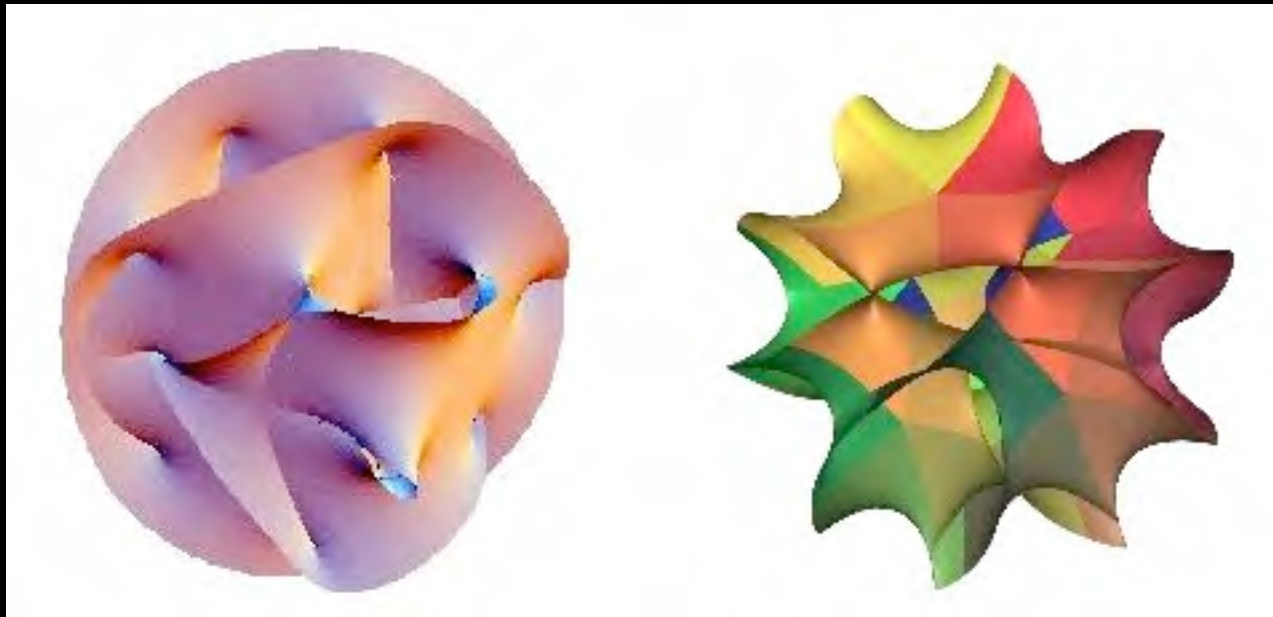


Modèles de cordes

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
10D ?

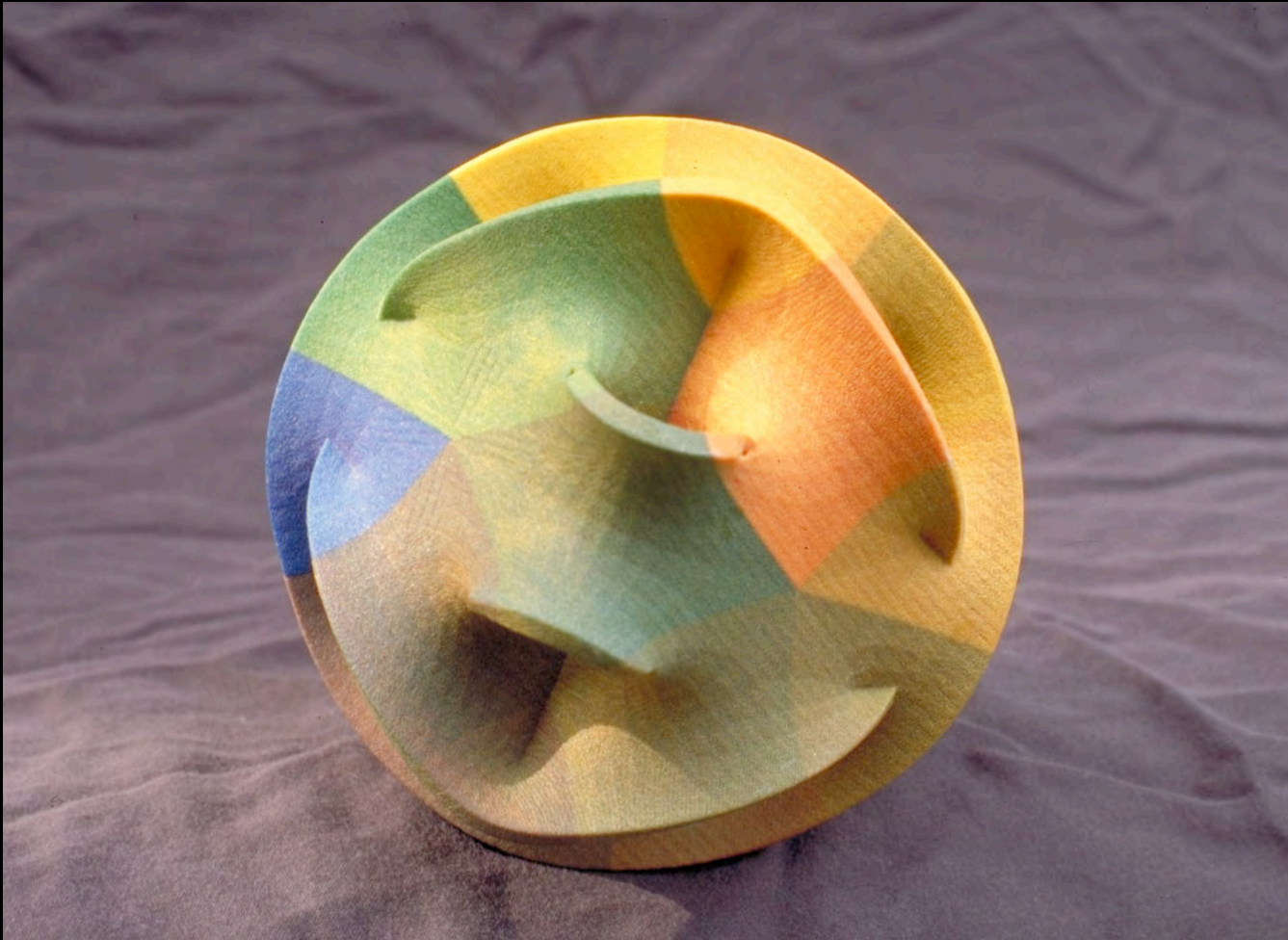
Une *pléthore* de modèles possibles



Modèles de cordes

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
10D ?



Pour certains modèles, les dimensions supplémentaires ne sont pas toutes de petite taille (1/100ème de mm : c'est énorme !)

Finale 1

Résumé: *évolution* de la notion d'espace

- physique classique: *espace 3D + temps*

- Relativité restreinte: *espace-temps 4D, rigide, plat*

- Relativité générale: *espace-temps 4D, élastique, courbe*

Il pourrait encore subir quelques avanies dont les dimensions supplémentaires

Finale 2 : *Tout ce à quoi vous avez échappé!*

topologie compliquée

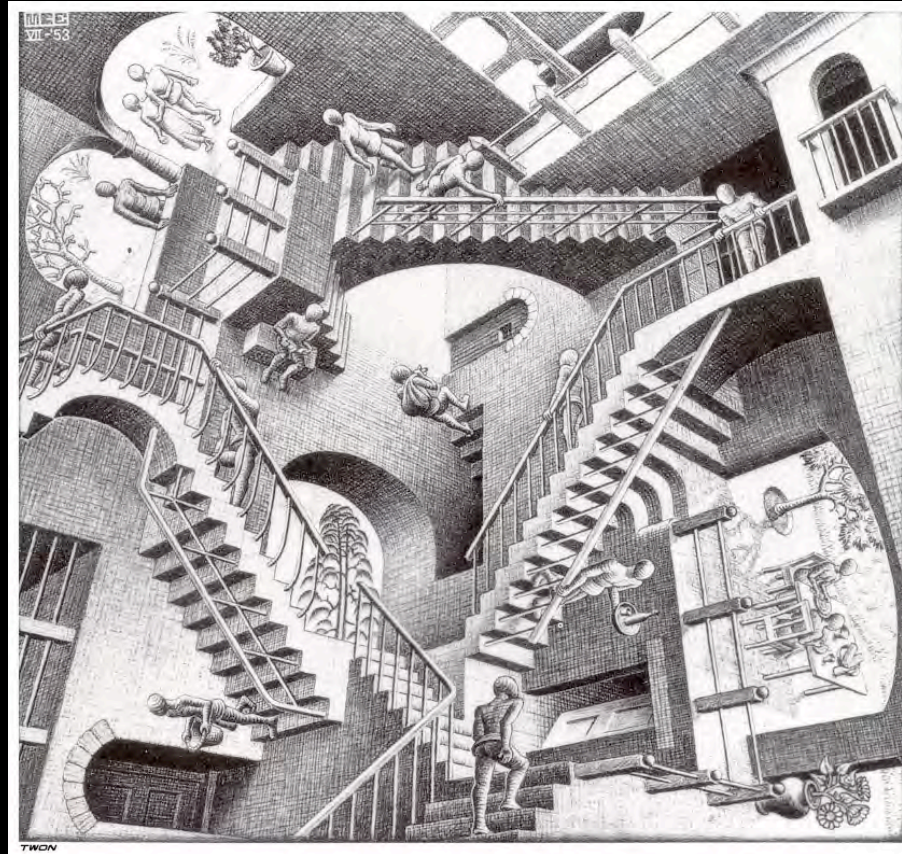
dualité

espace « flou »

branes

*modèles à la
Randall-Sundrum*

*espace
émergent*



espace non commutatif

espace à deux temps

Références

Relativités restreinte et générale

www.futura-sciences.com

Kaluza et Klein, Supercordes

www.diffusion.ens.fr/vip

La page ouebe de la conference

lappweb.in2p3.fr/lapth-2005

