

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)



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

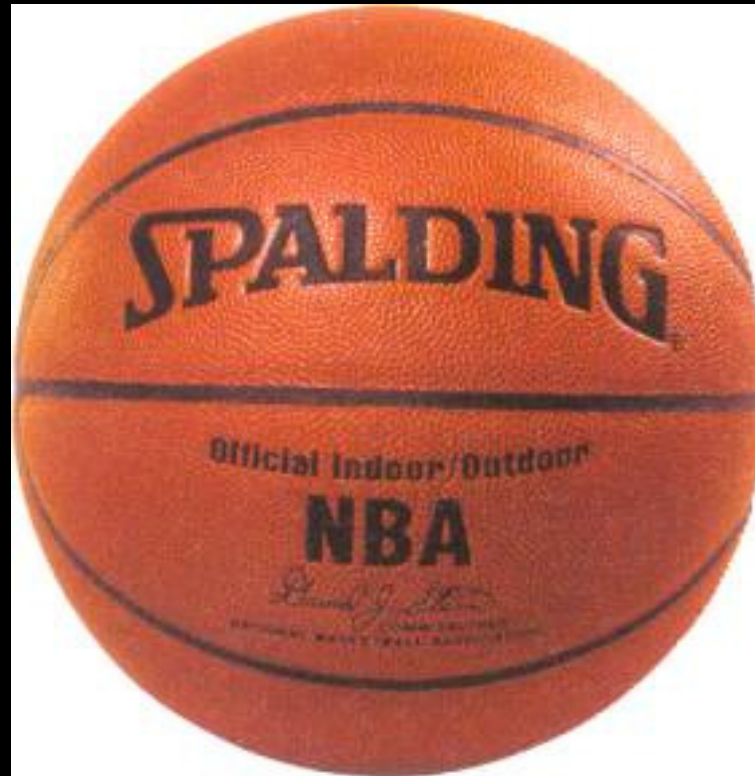
Dimensions

Espace de dimension 2: *le plan*



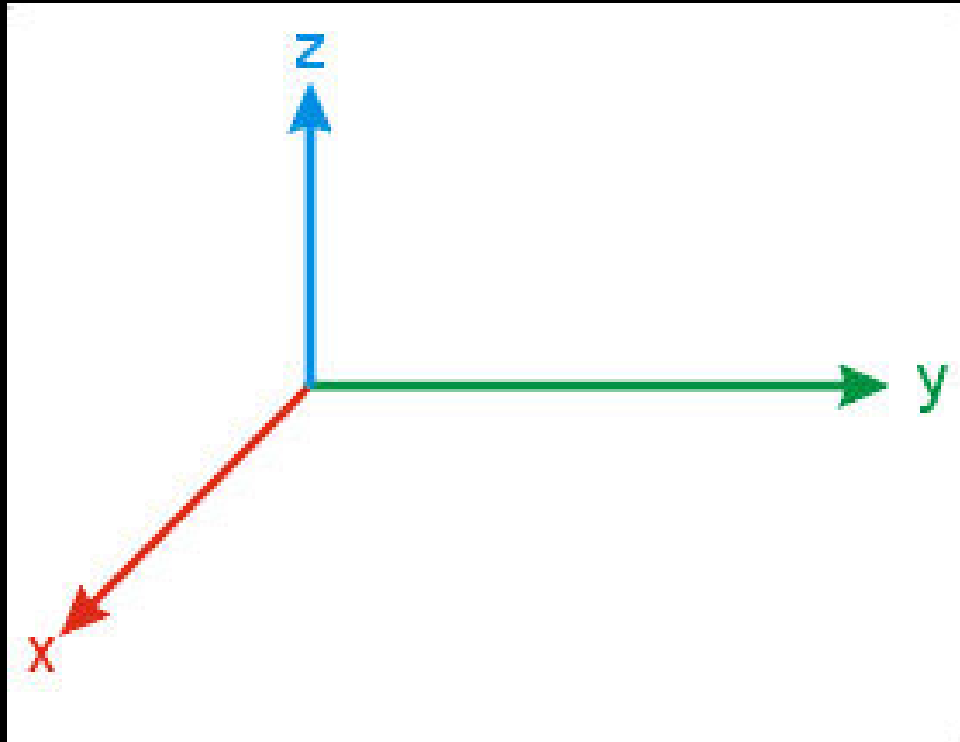
Dimensions

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



Dimensions

Espace de dimension 3 (3D)



Dimensions

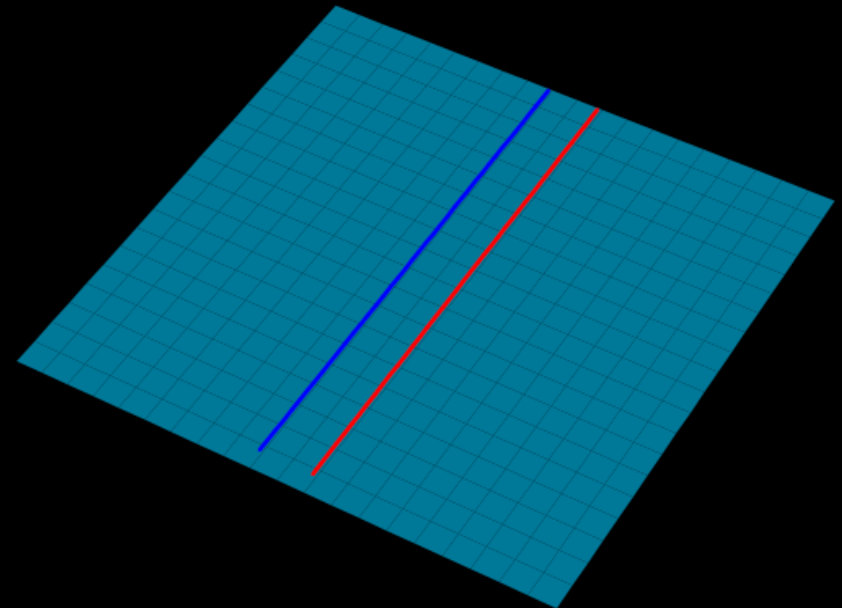
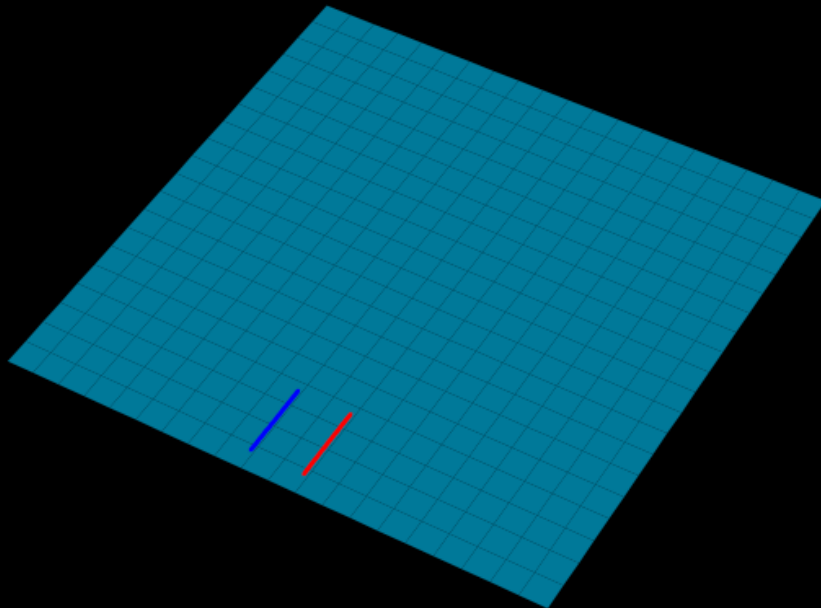
Espace de dimension 3



Courbure

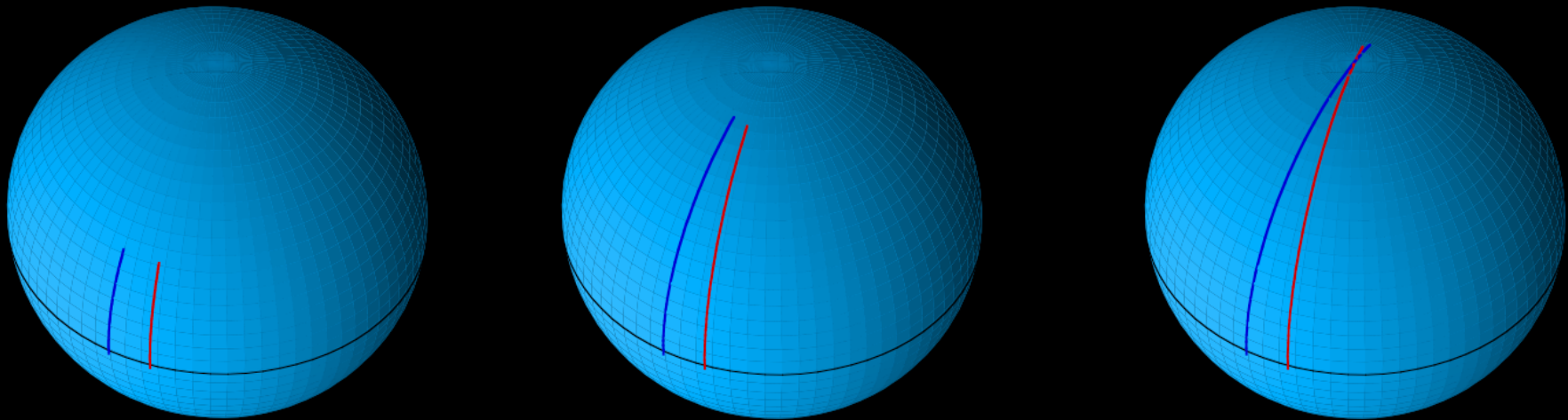
Espace plat :

deux parallèles ne se croisent pas



Courbure

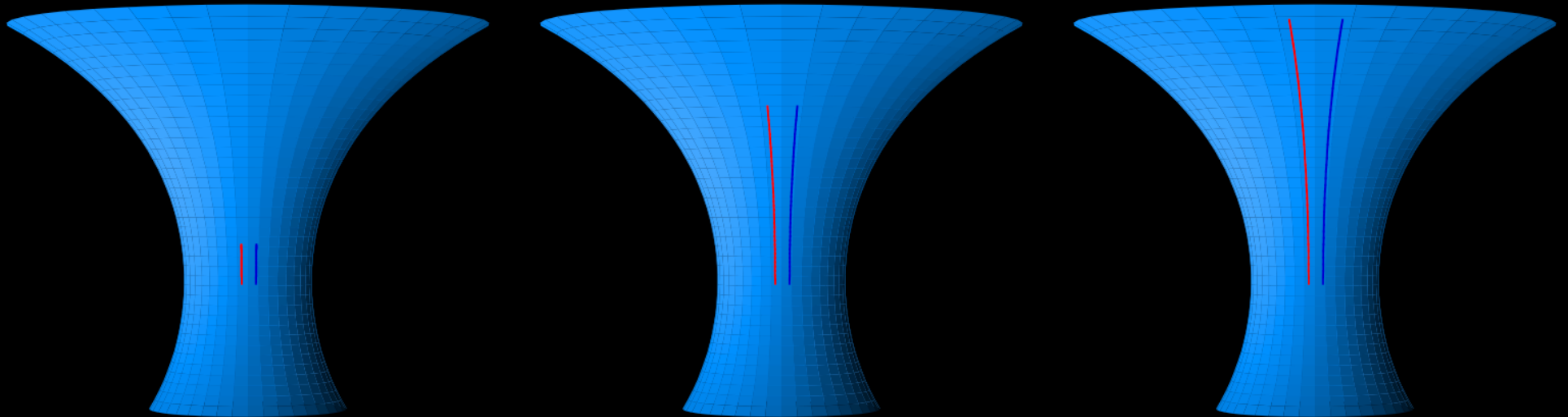
Sphère : deux parallèles se croisent



Courbure

Hyperboloïde :

deux parallèles ne se croisent pas et s'écartent



Rigidité

indépendance du contenu

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (LZW)
sont requis pour visionner cette image.

Distances absolues

Accord sur les mesures entre observateurs



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Le temps



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Le temps

paramètre l'évolution d'un système

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (LZW)
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (LZW)
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (LZW)
sont requis pour visionner cette image.

L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Le temps

paramètre le mouvement



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

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



L'énigme des muons “cosmiques”

Temps de vie mesuré : 2 microsecondes

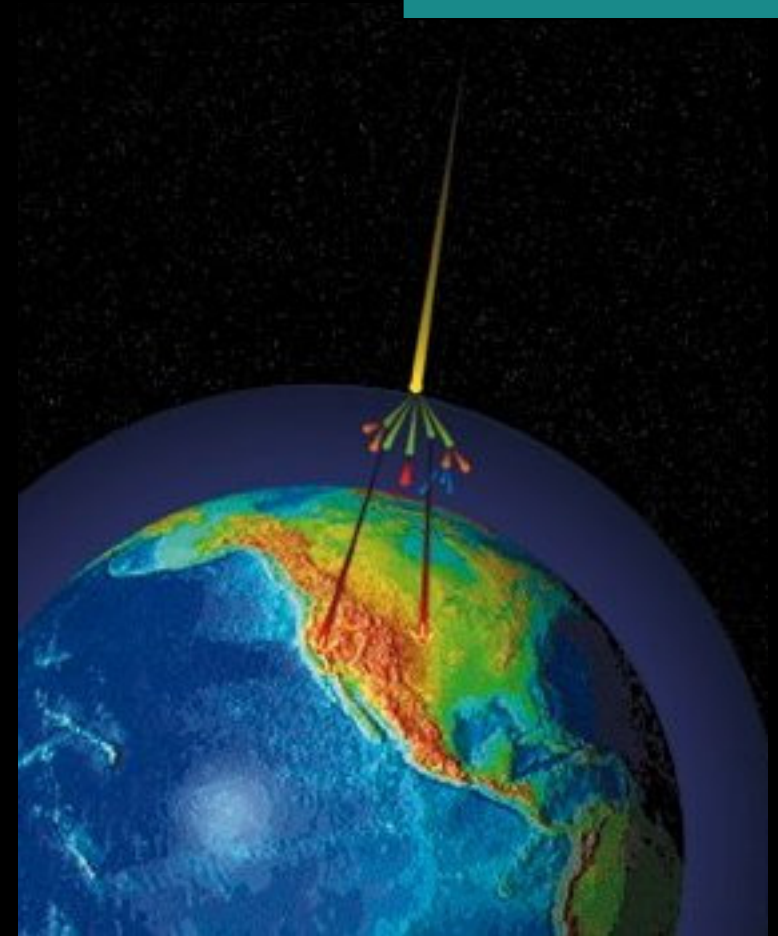
Vitesse : ~300 000 km/s

Distance de vol : 600 mètres

Distance de vol observée : 60 km!!!

Propriétés

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



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

Propriétés

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

???

le point de vue du muon :

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

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



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)

Propriétés

plat et rigide
espace-temps
4D

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

***espace-temps 4D**, rigide et plat*



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

La relativité restreinte

Propriétés

plat et rigide
espace-temps
4D

vérifications expérimentales:

horloge du Concorde

accélérateurs de particules



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

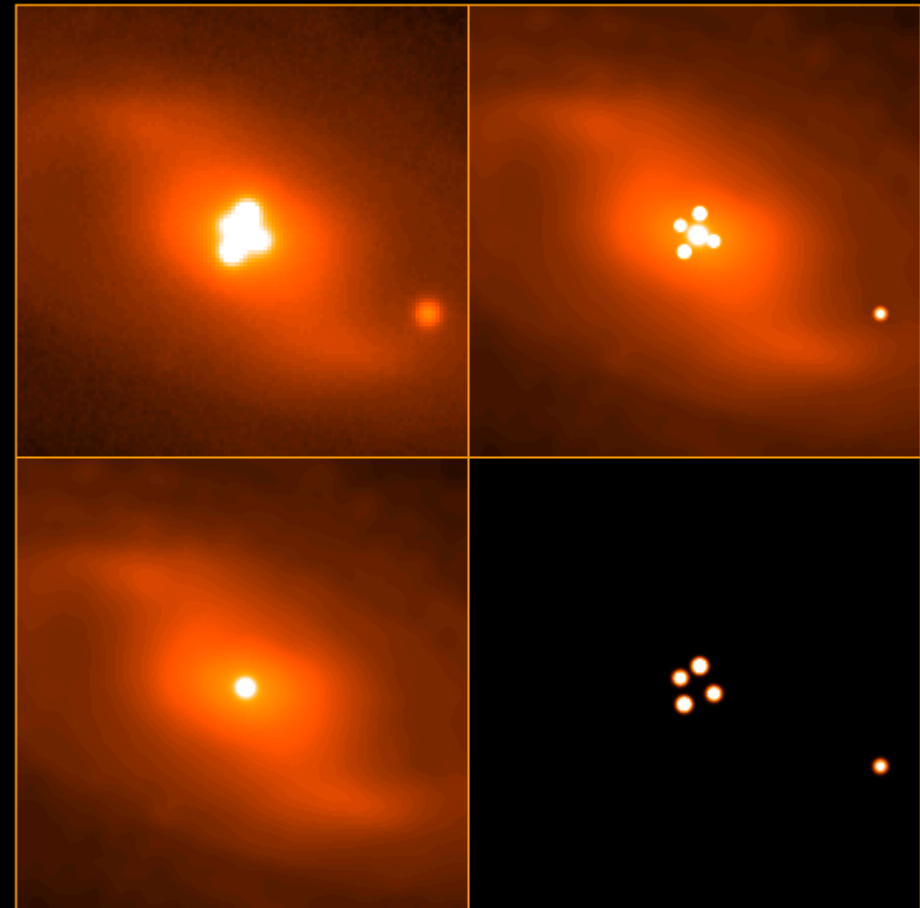
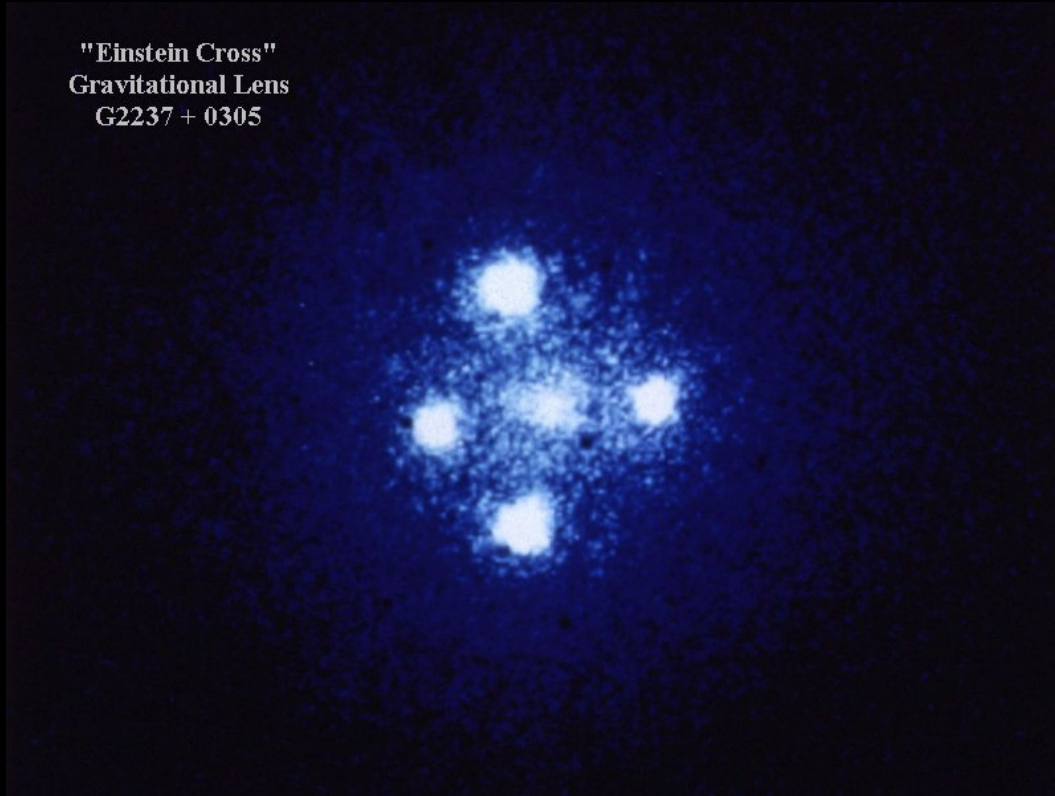
La croix d'Einstein (1979)

Propriétés

???

plat
espace-temps
4D
rigide

"Einstein Cross"
Gravitational Lens
G2237 + 0305



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

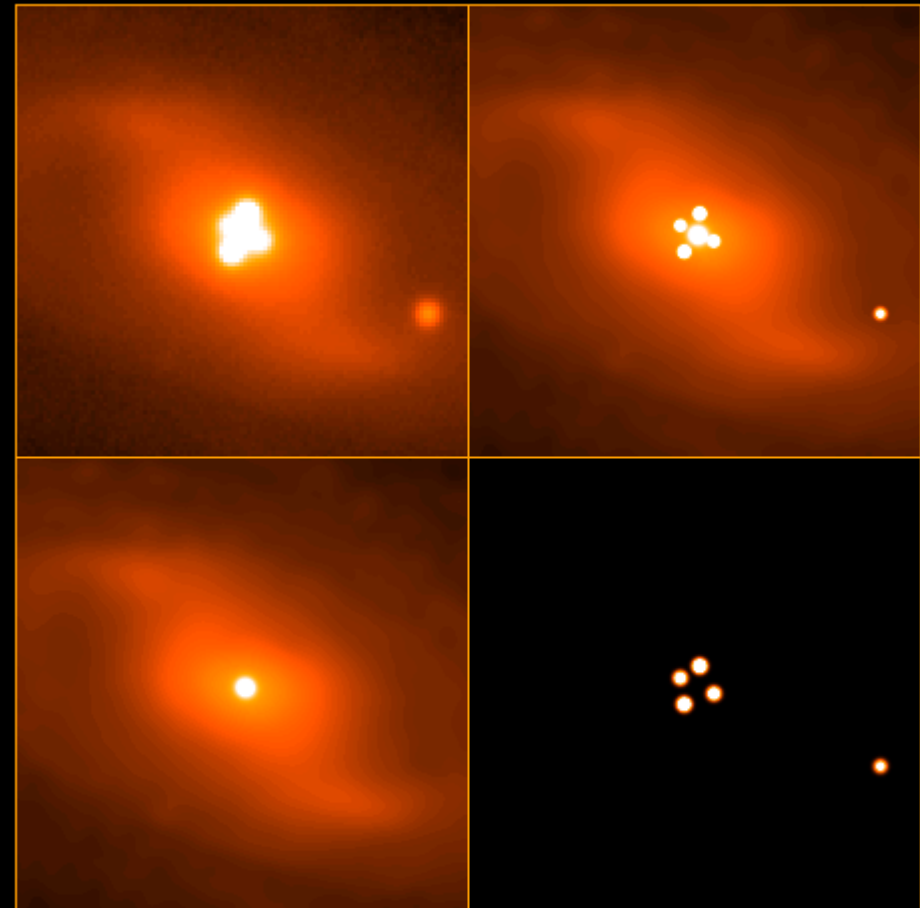
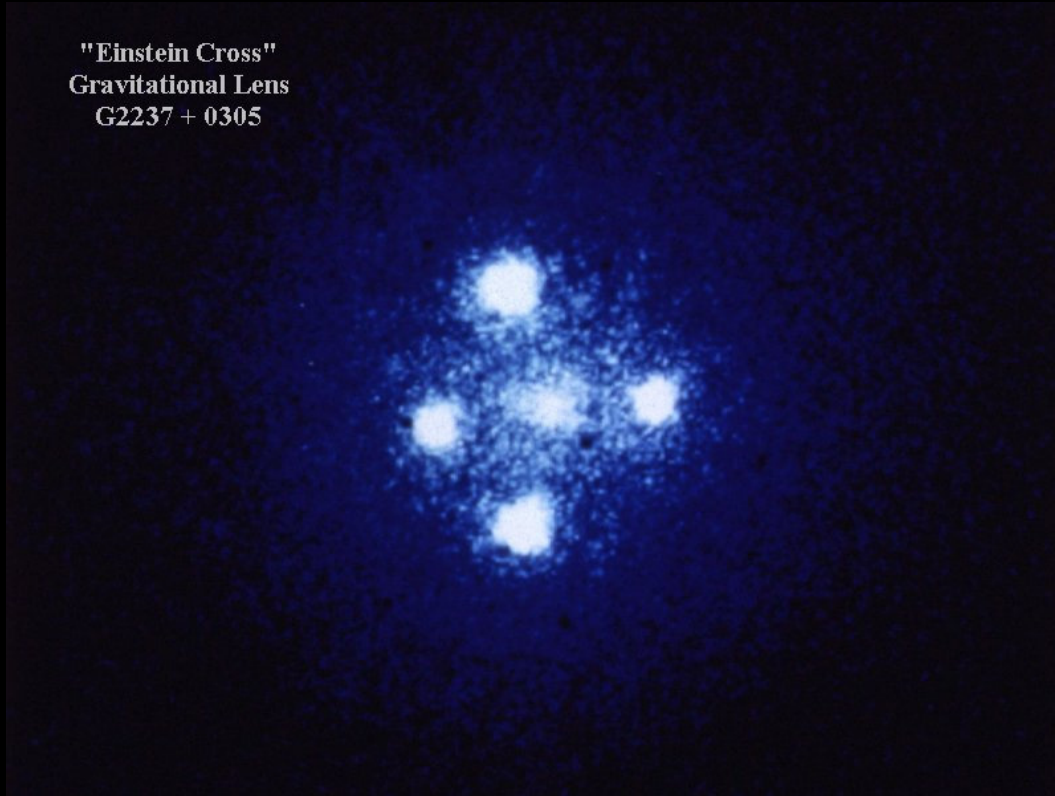
La croix d'Einstein (1979)

Propriétés

non

plat
espace-temps
4D
rigide

"Einstein Cross"
Gravitational Lens
G2237 + 0305



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

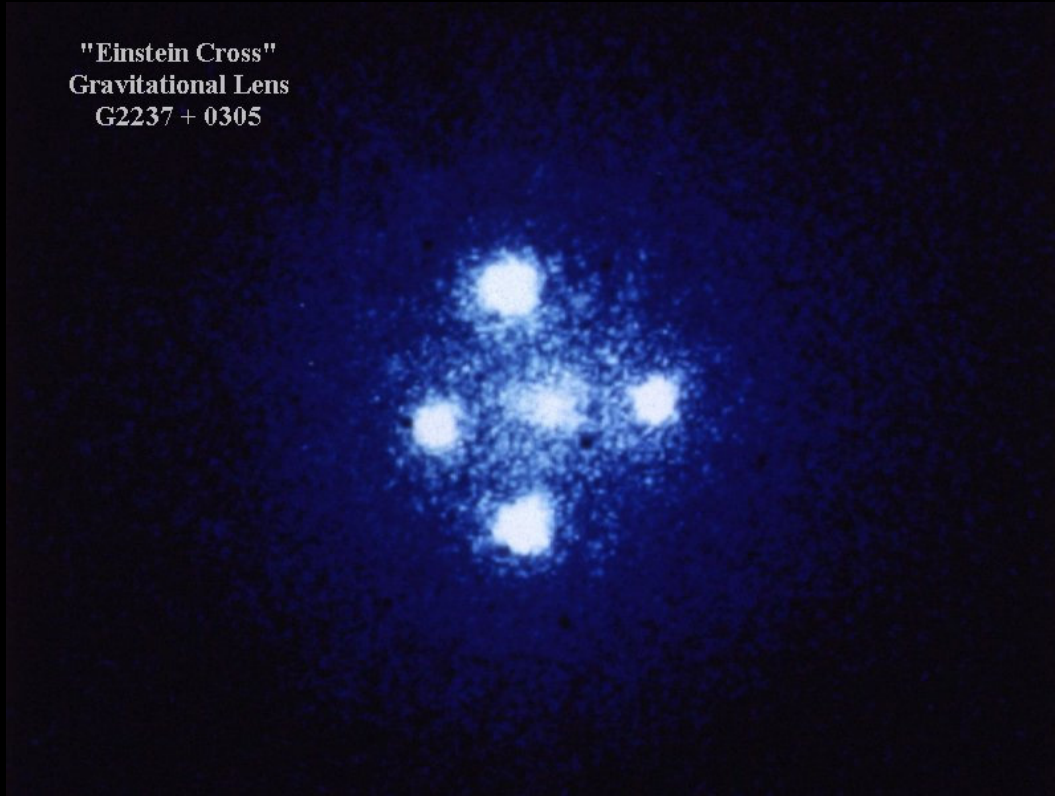
Dimensions supplémentaires

La croix d'Einstein (1979)

Propriétés

courbe
espace-temps
4D
rigide

"Einstein Cross"
Gravitational Lens
G2237 + 0305



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Déviation des rayons lumineux

Propriétés

courbe
espace-temps
4D
rigide

???



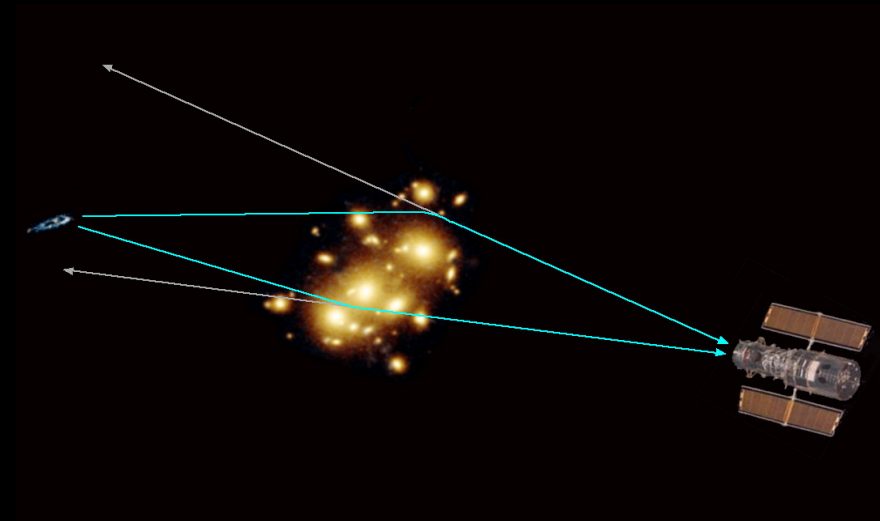
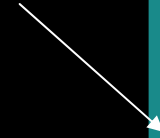
Déviation des rayons lumineux

due à la déformation de l'espace

Propriétés

courbe
espace-temps
4D
rigide

non



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

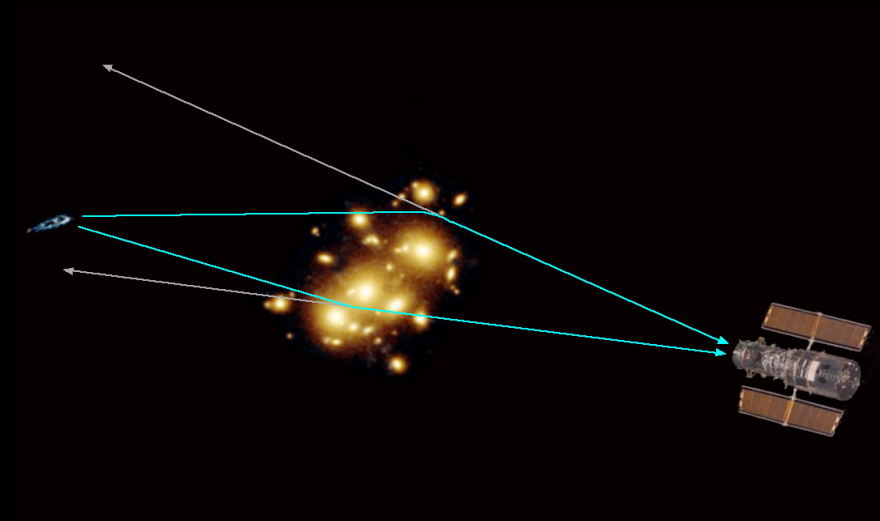
Dimensions supplémentaires

Déviation des rayons lumineux

due à la déformation de l'espace

Propriétés

courbe
espace-temps
4D
souple



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Les distortions du temps

Propriétés

courbe
espace-temps
4D
souple



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

L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

La relativité générale (Einstein 1917)

Propriétés

espace-temps

courbe/souple

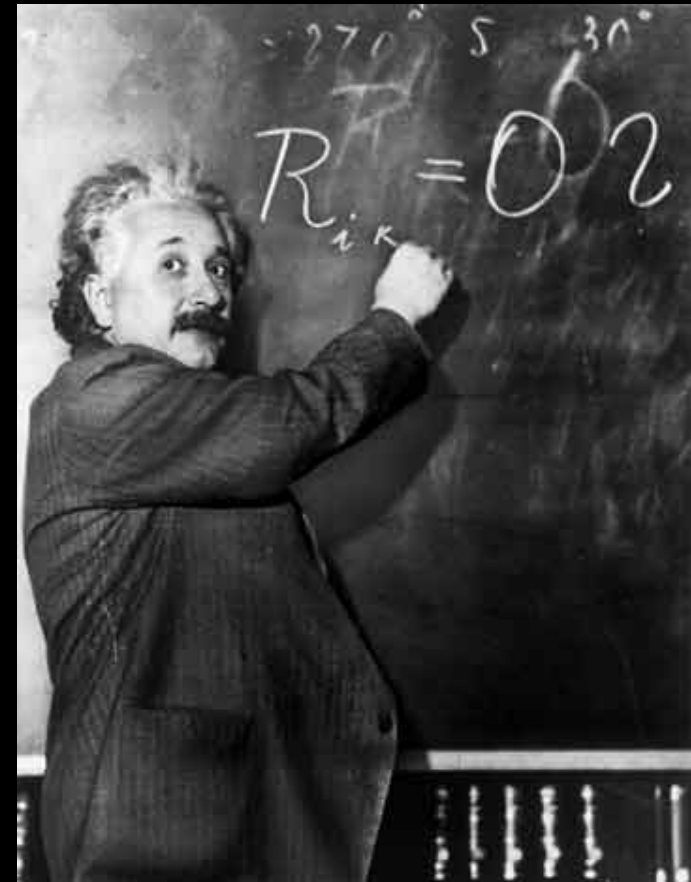
4D

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)



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

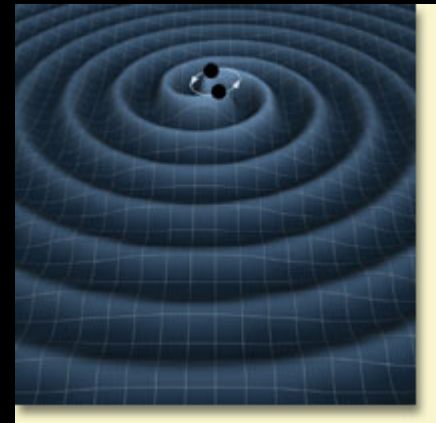
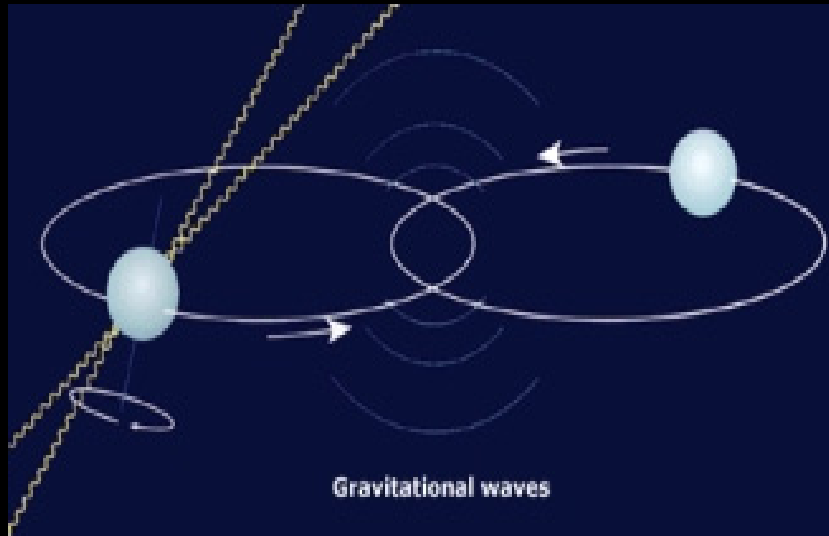
Dimensions supplémentaires

Coalescence du pulsar binaire

(Hulse & Taylor 1974, Nobel 1993)

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
4D



L'espace et le temps

Relativité restreinte

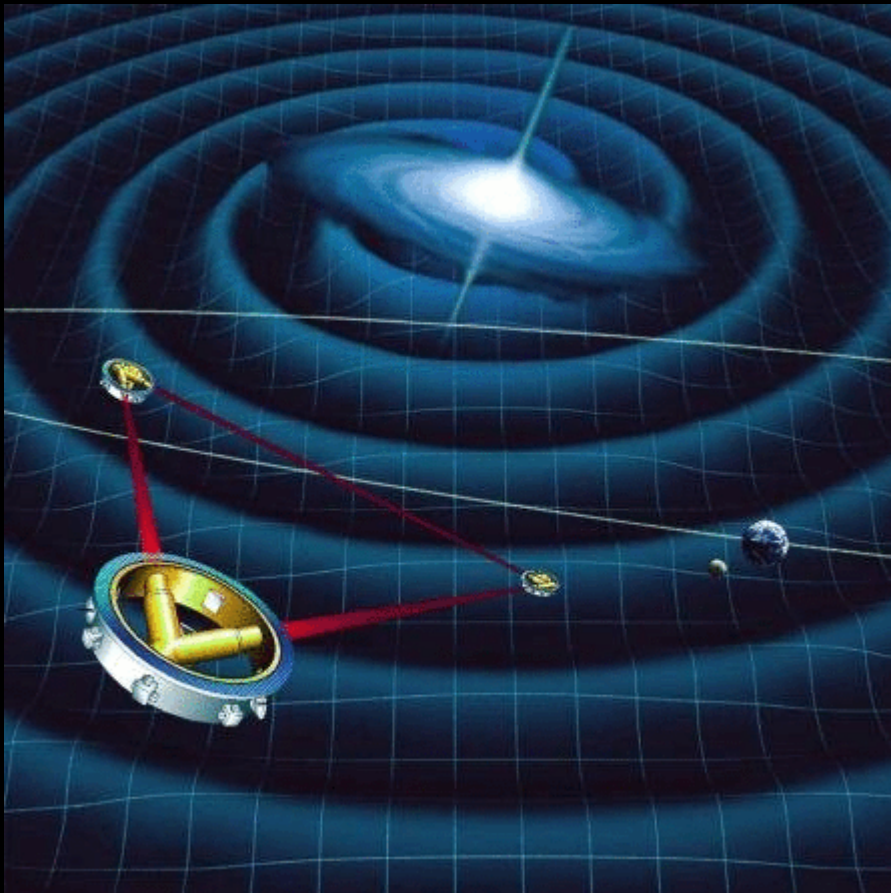
Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Ondes gravitationnelles

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
4D



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Dimensions supplémentaires

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
4D

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

???

Modèle de Kaluza et Klein

Propriétés

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

L'idée de Kaluza (1917) :

gravité en $(4+1)D$ =

gravité 4D

ET

électromagnétisme 4D

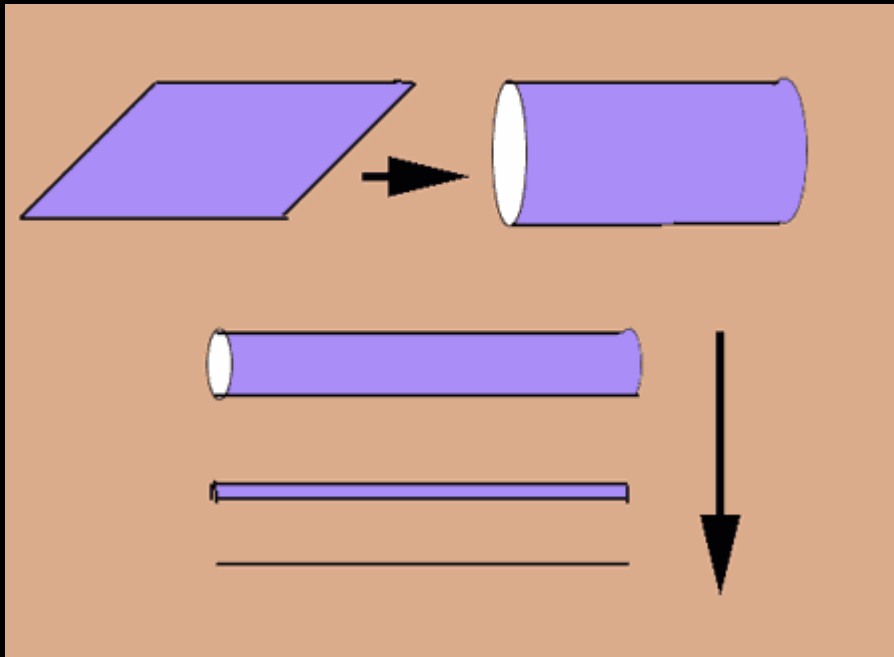


Modèle de Kaluza et Klein

Propriétés

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

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



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Modèle de Kaluza et Klein

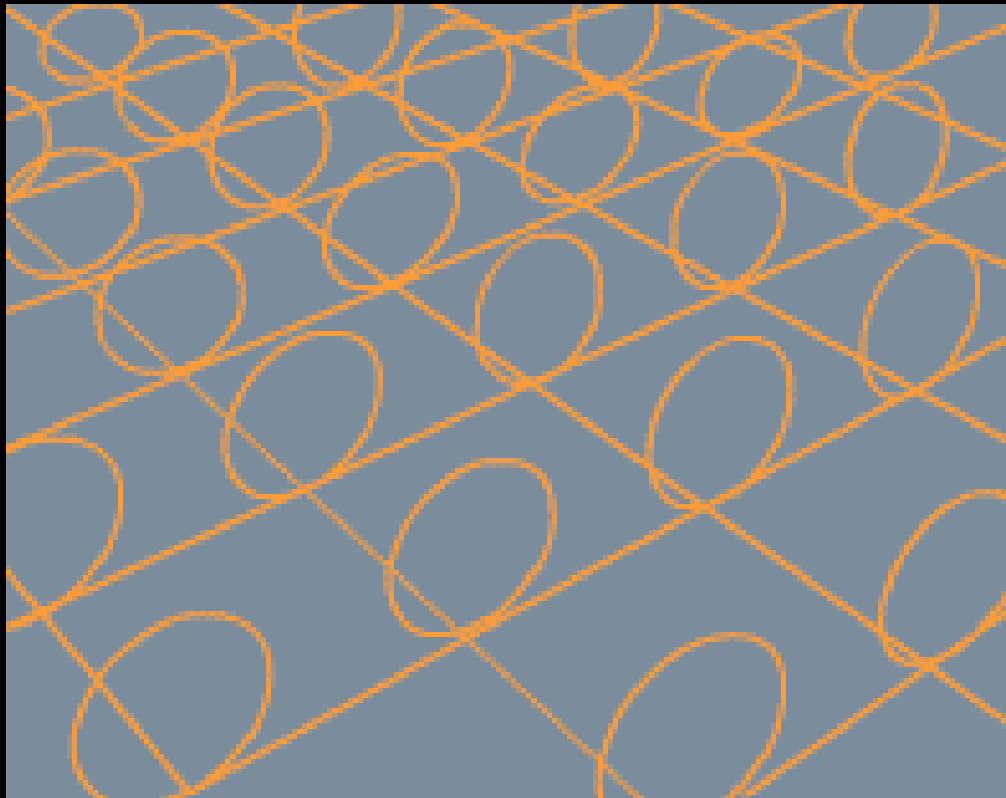
Propriétés

espace-temps

courbe/souple

4D + 1D ?

Le raffinement de Klein (1926):



Conséquence:
quantification de la
charge électrique

L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Modèle de Kaluza et Klein

Propriétés

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

*Extension possible aux autres interactions
avec plus de dimensions :
nombre non contraint*

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

Modèles de cordes

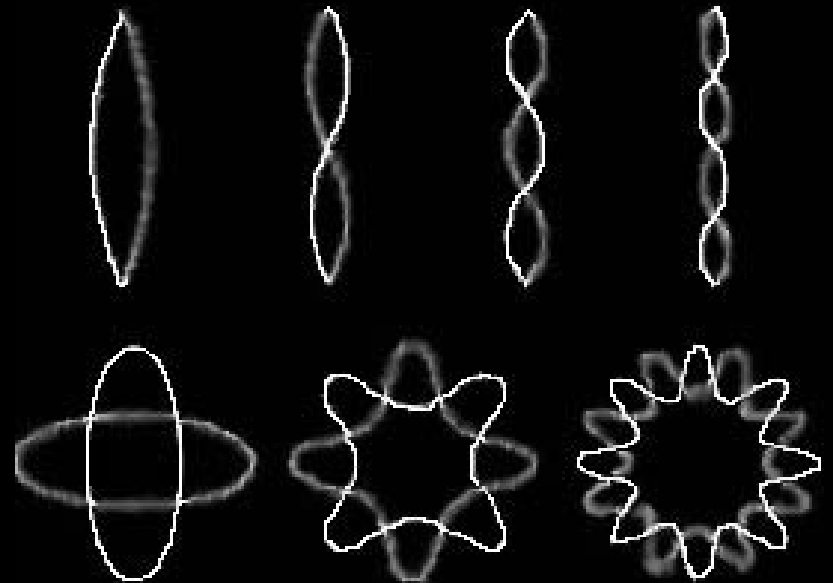
Propriétés

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)

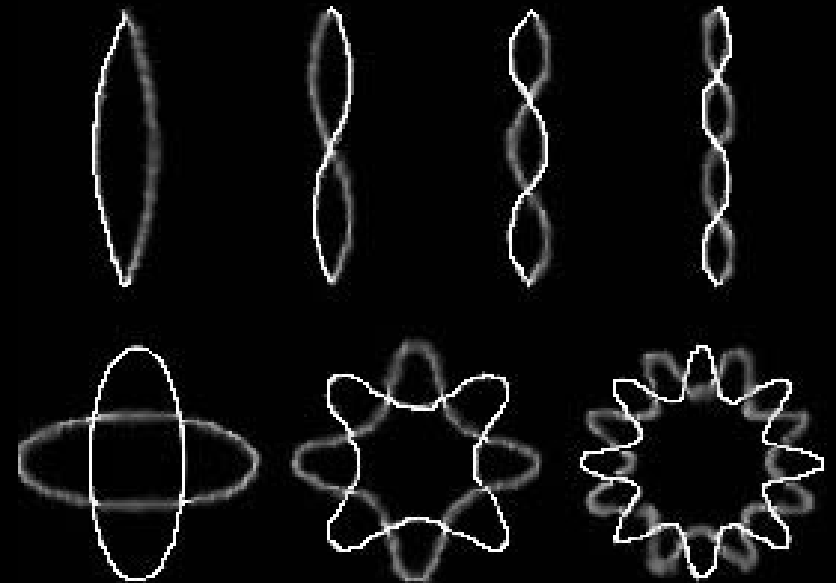
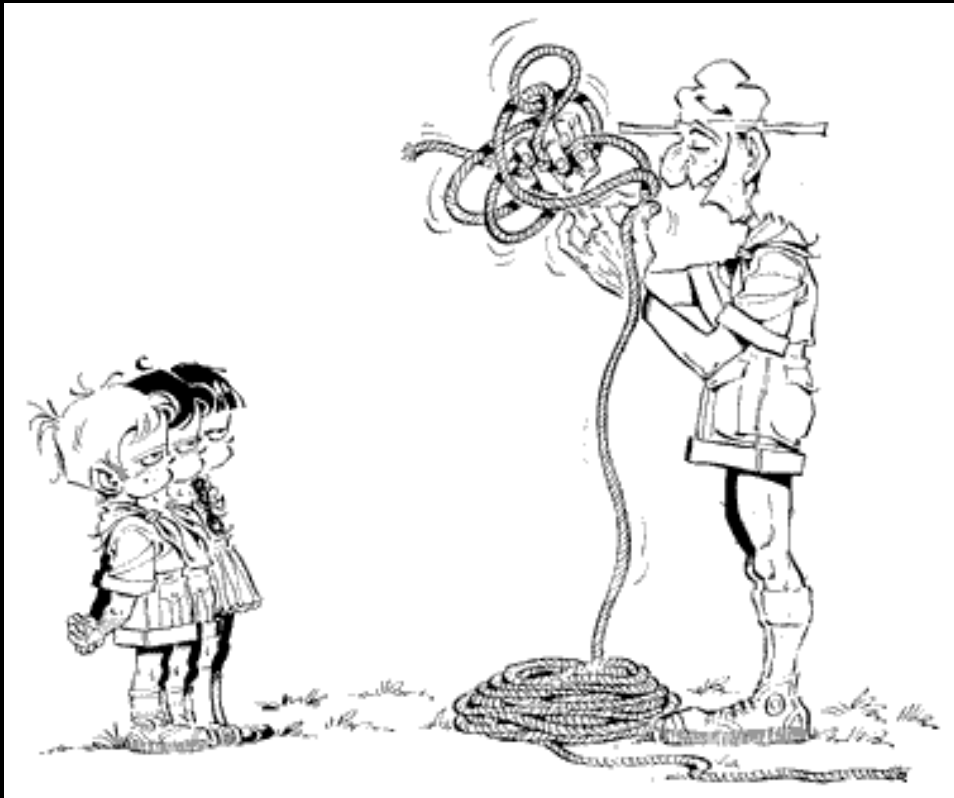


Modèles de cordes

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
10D ?

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



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

Modèles de cordes

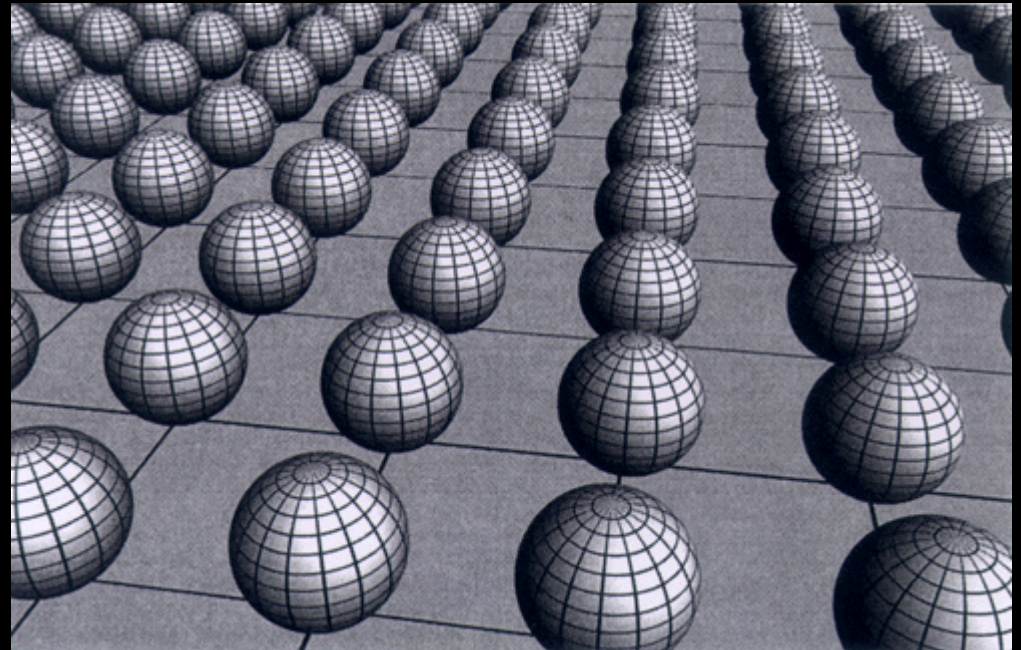
Propriétés

espace-temps
courbe/souple
10D ?

Les cordes vivent en 10 dimensions :

*les six dimensions supplémentaires sont une
contrainte mathématique!*

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



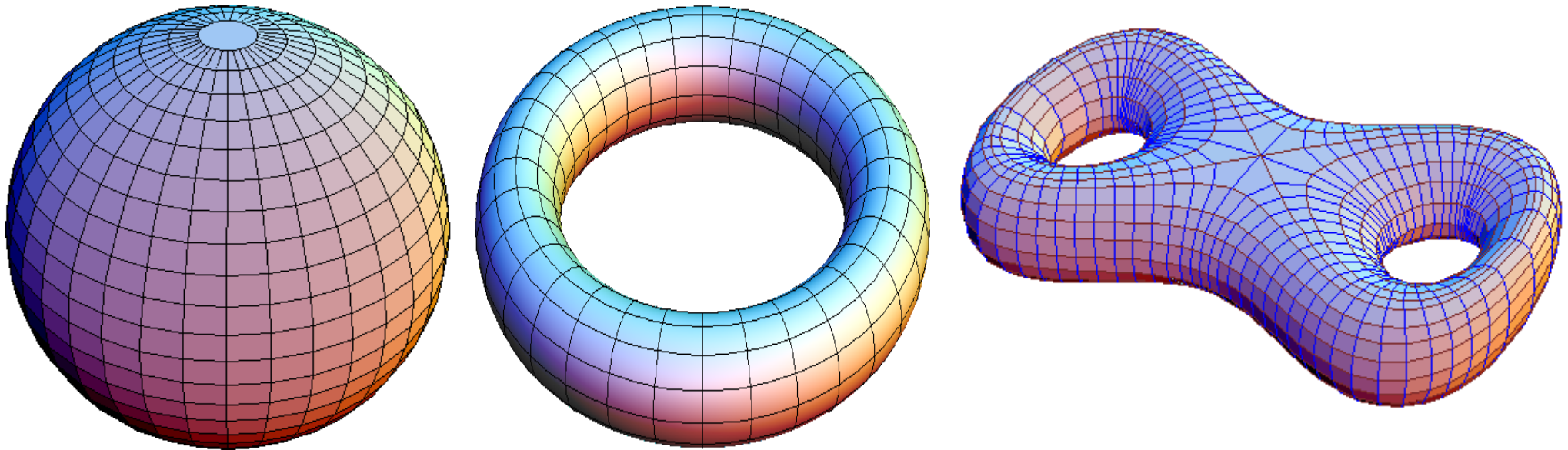
Modèles de cordes

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
10D ?

Réponse:

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



L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

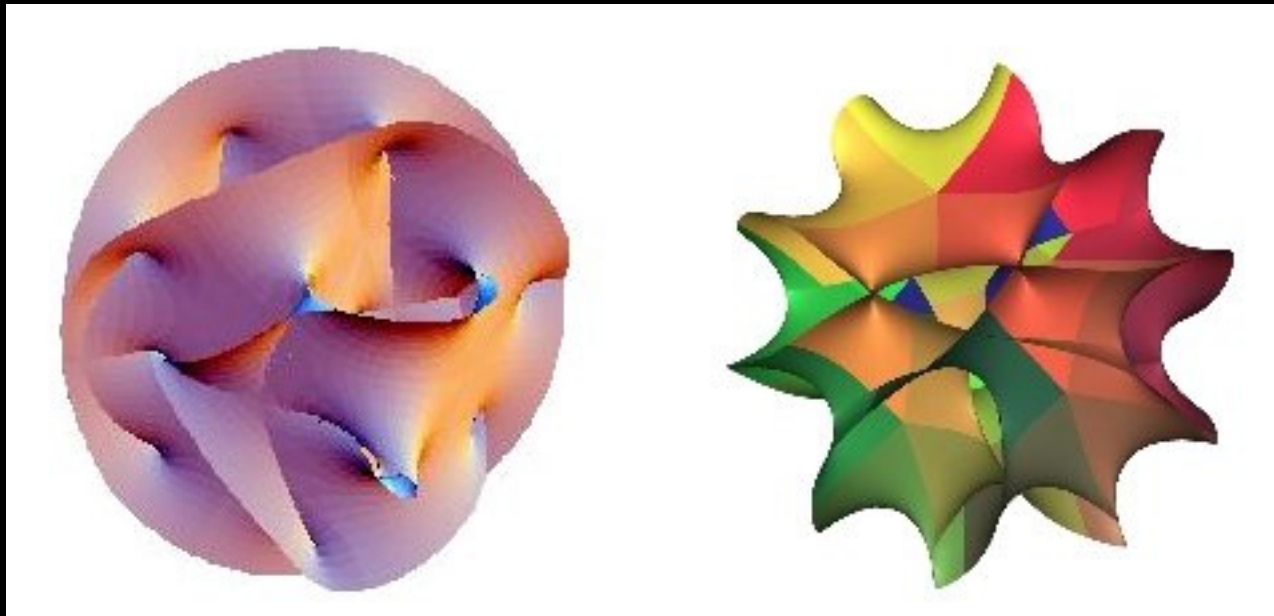
Dimensions supplémentaires

Modèles de cordes

Propriétés

espace-temps
courbe/souple
10D ?

*Une **pléthore** de modèles possibles*



L'espace et le temps

Relativité restreinte

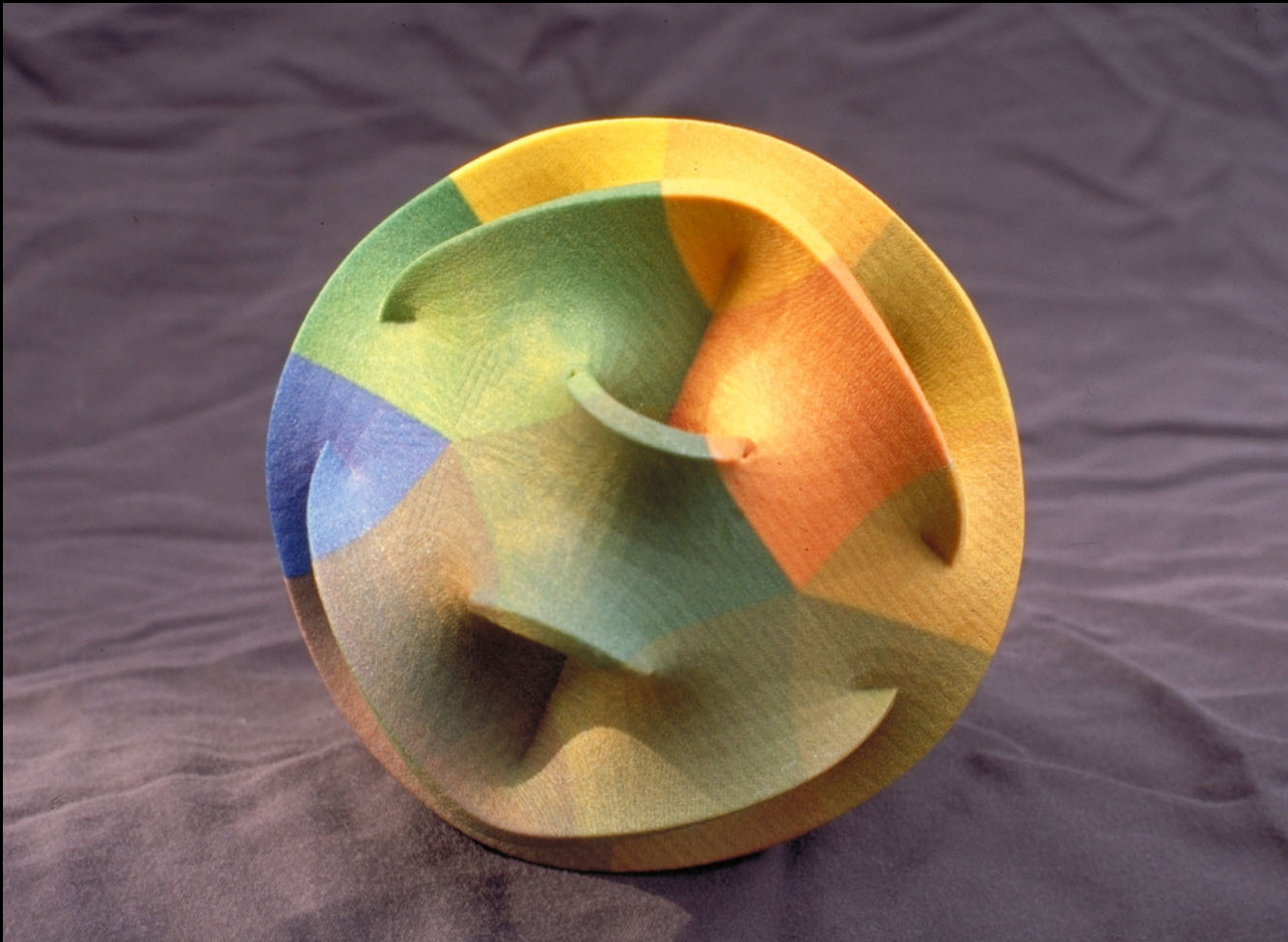
Relativité générale

Dimensions supplémentaires

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 !)

L'espace et le temps

Relativité restreinte

Relativité générale

Dimensions supplémentaires

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

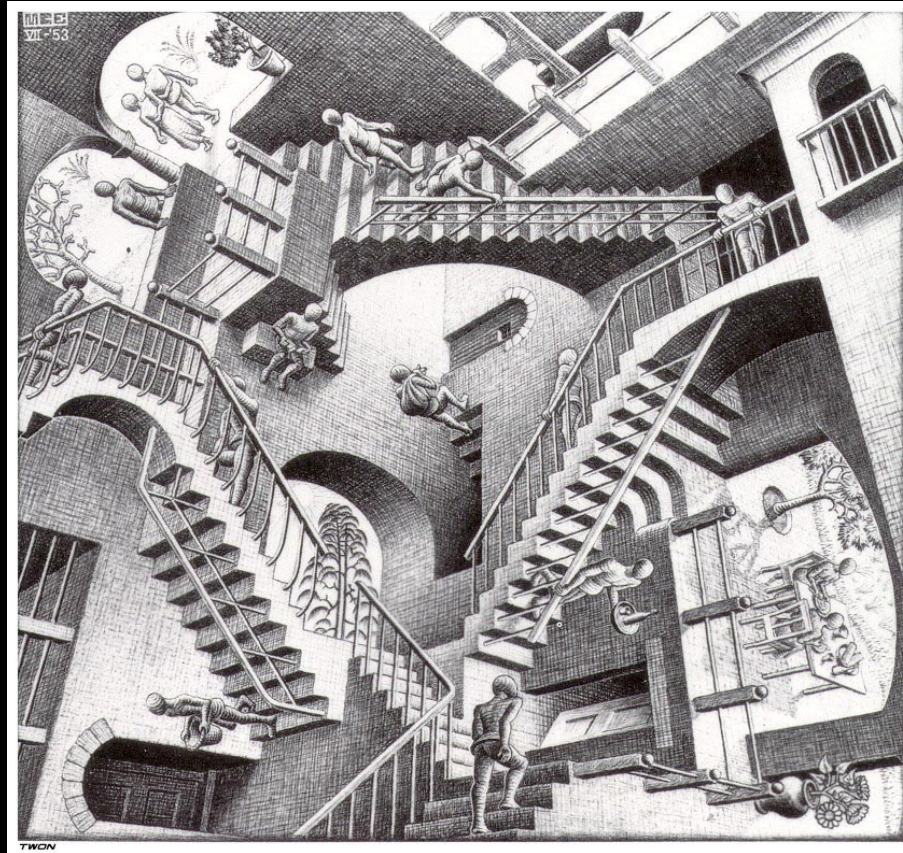
dualité

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*](http://www.futura-sciences.com)

Kaluza et Klein, Supercordes

[*www.diffusion.ens.fr/vip*](http://www.diffusion.ens.fr/vip)

La page ouebe de la conference

[*lappweb.in2p3.fr/lapth-2005*](http://lappweb.in2p3.fr/lapth-2005)

