

La théorie des cordes

David Viennot – Maître de Conférences

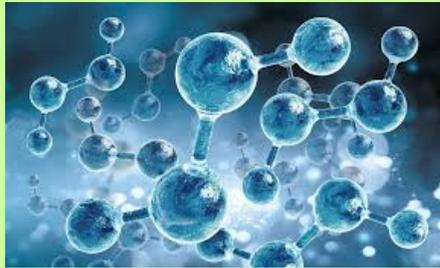
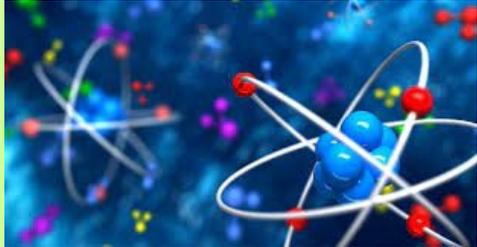
Institut UTINAM (CNRS) / Observatoire de Besançon / UFC





Le modèle standard de la physique

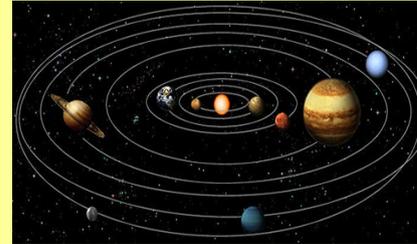
Physique quantique



approximation
pour les objets de
grandes
dimensions



Relativité générale



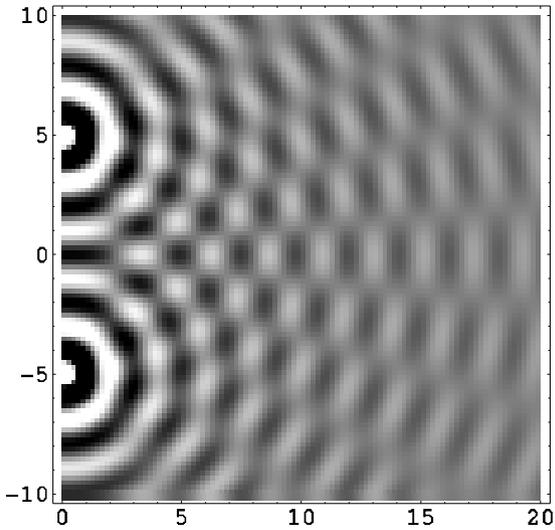
approximation
pour les objets de
faibles densités



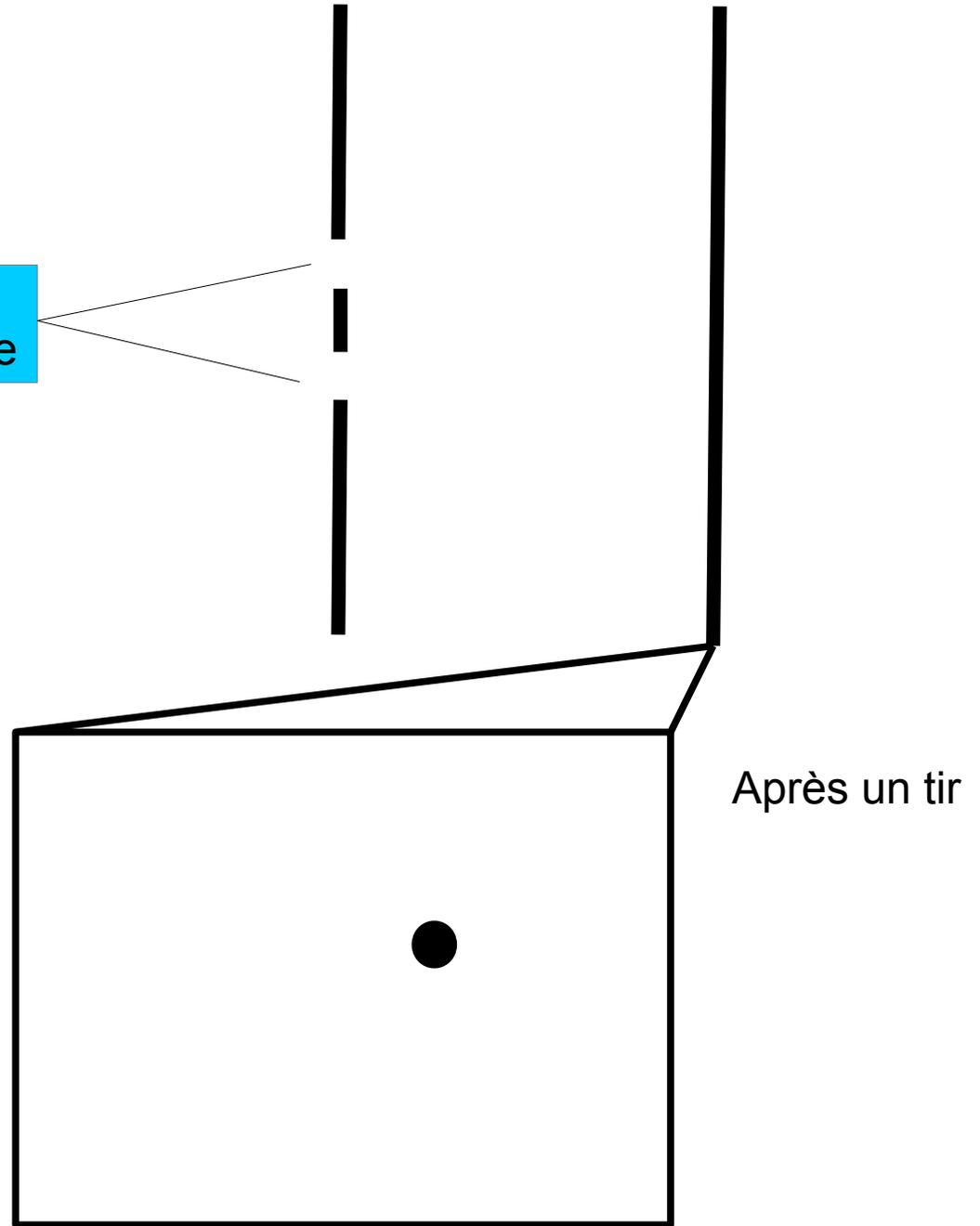
Physique classique (Newton + Maxwell)



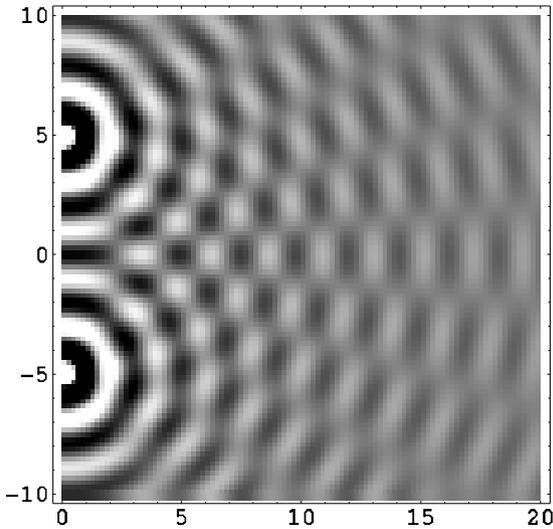
Les interférences sont typiques des phénomènes ondulatoires



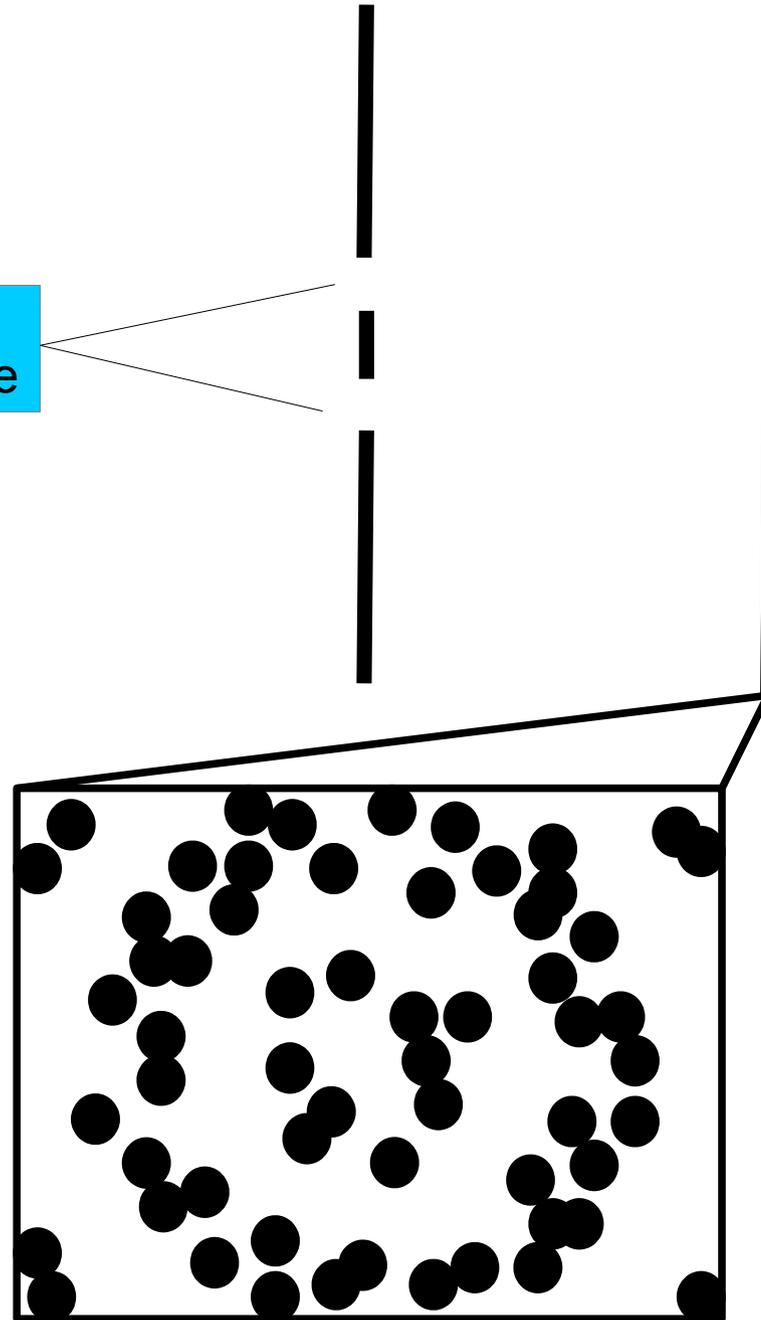
Source à une particule



Les interférences sont typiques des phénomènes ondulatoires

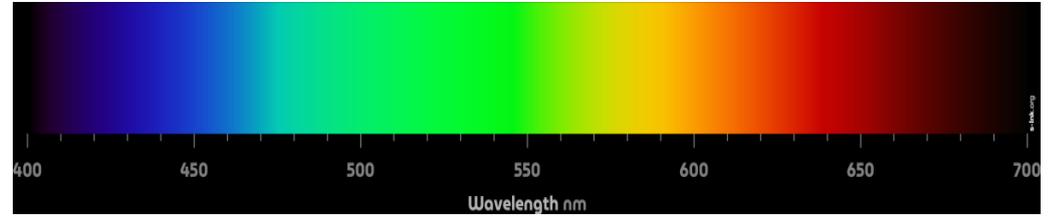
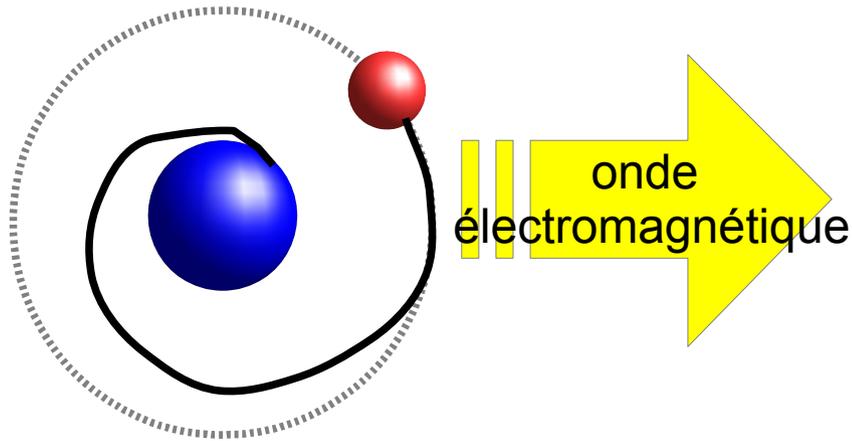


Source à une particule



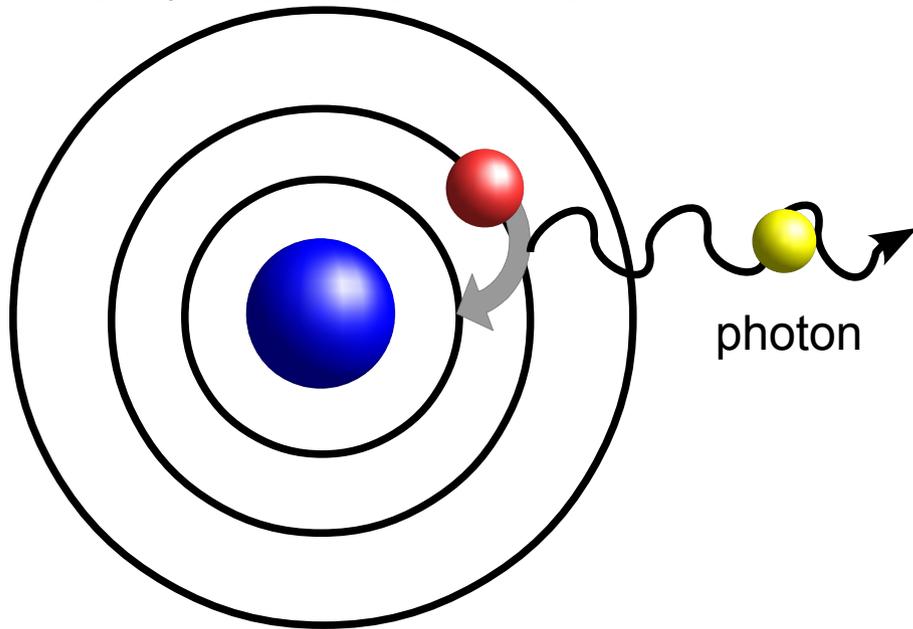
Après de nombreux tirs

En physique classique :

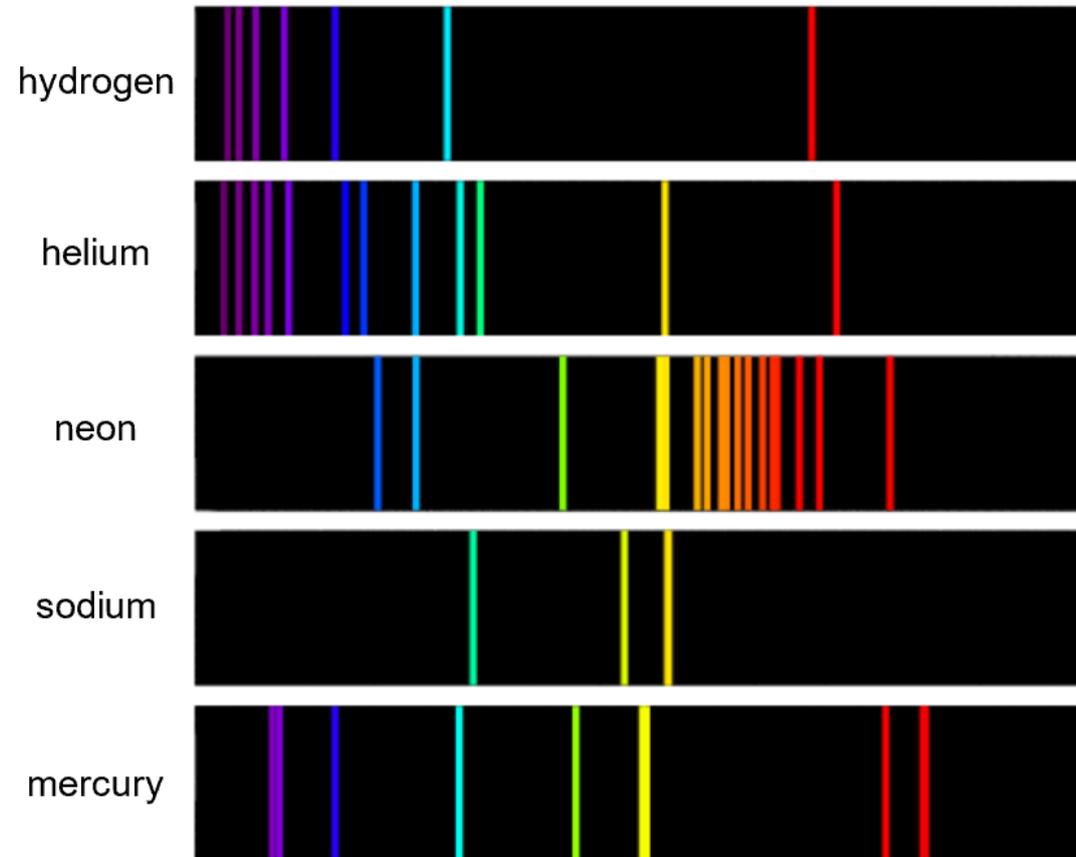


crash des électrons sur le noyau

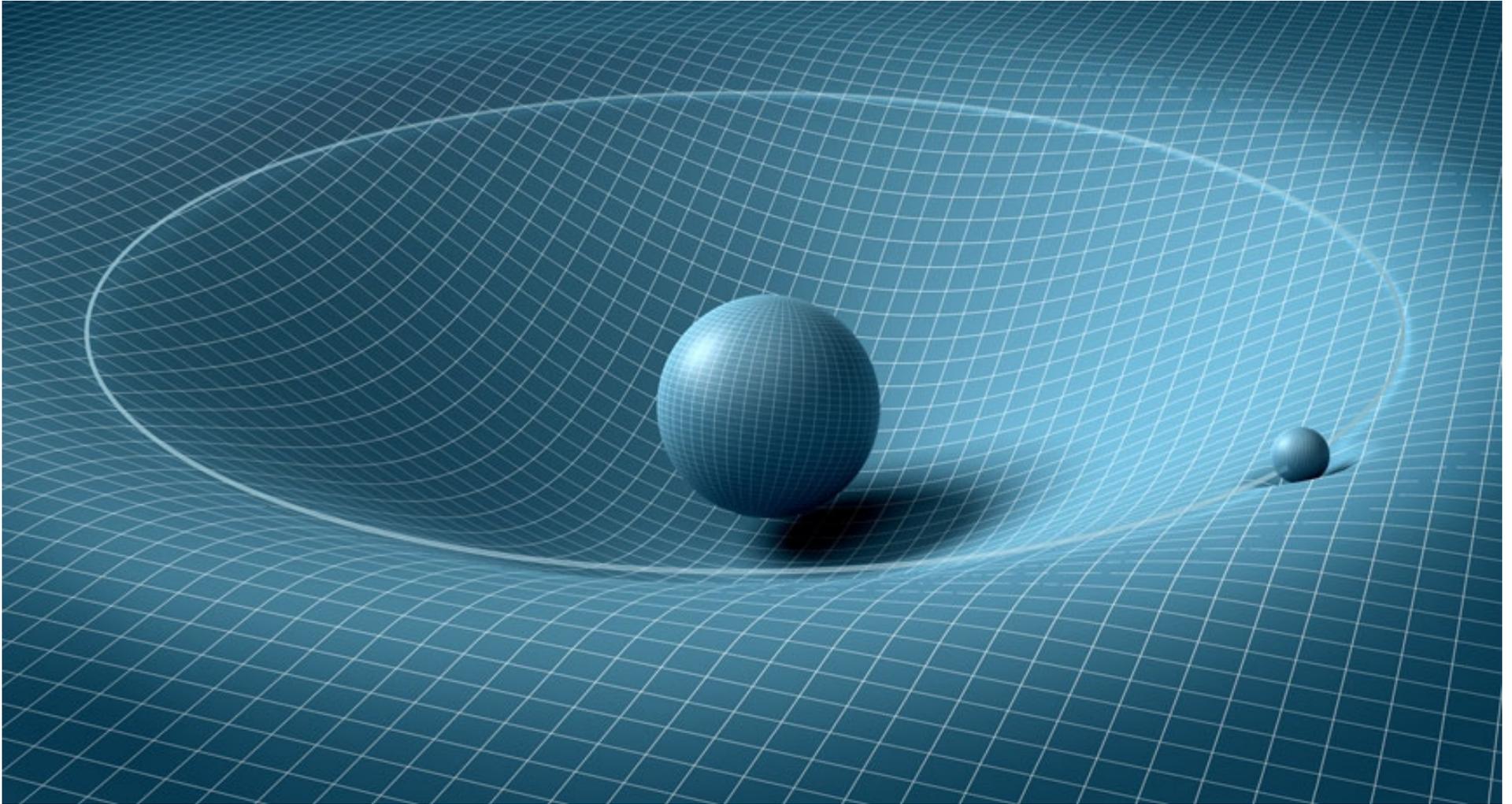
En physique quantique :



spectres d'émission des atomes

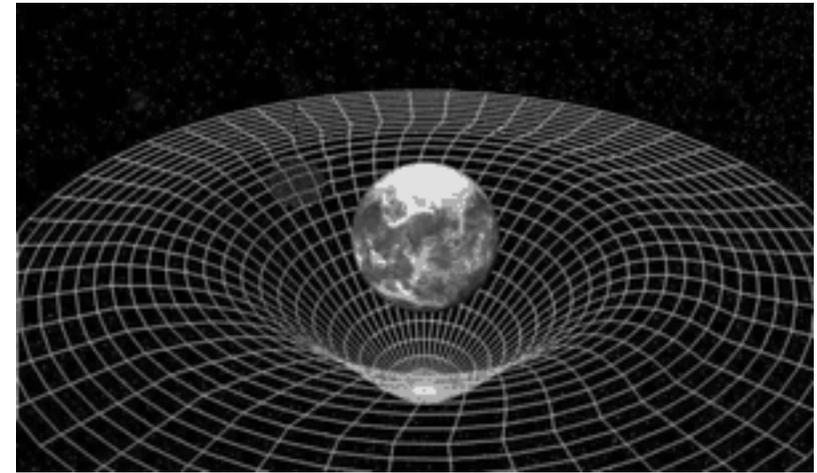
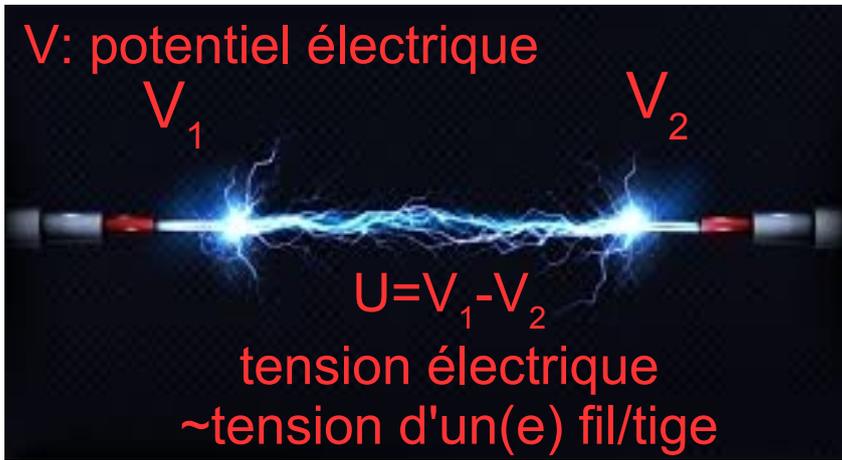


La gravité n'est pas une force mais une manifestation de la courbure de l'espace-temps.

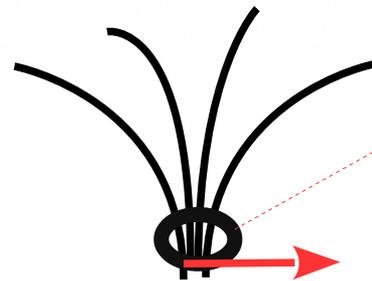
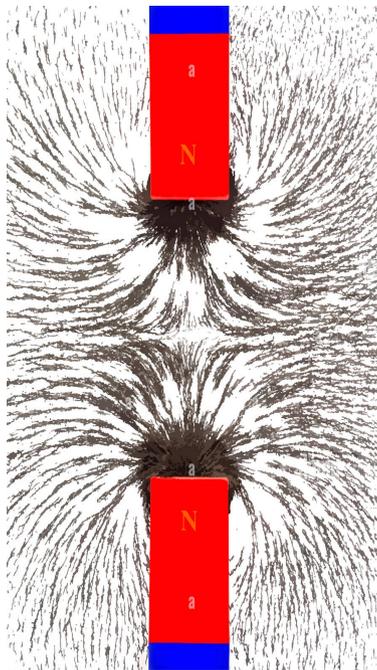
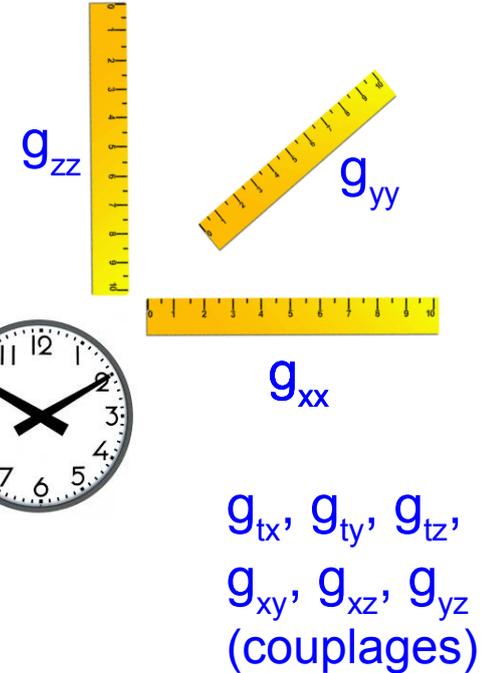


Attention, la géométrie observée est relative à l'observateur !

MQ vs RG: les interactions fondamentales



g métrique
 gravitationnelle



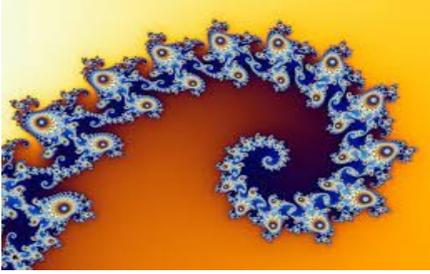
tension magnétique
 de serrage $\int \mathbf{A} \cdot d\boldsymbol{\ell}$

A: potentiel-vecteur
 magnétique

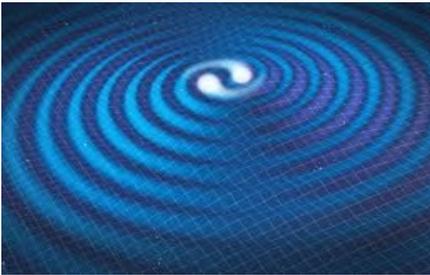
+ champs d'interaction
 nucléaire faible
 + champs d'interaction
 nucléaire forte

Théories de jauge (MQ) / Théorie géométrique (RG)

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.



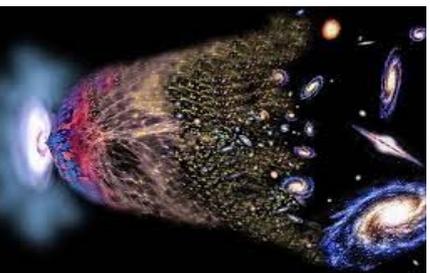
- Problème de l'interaction gravitationnelle entre particules fondamentales.
- Problème des fluctuations du vide à l'échelle de Planck (10^{-35}m).



- 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.

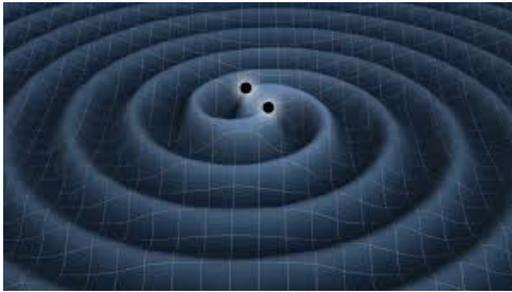


- Problème de la singularité du Big-Bang.
- Problème de l'origine de l'inflation.

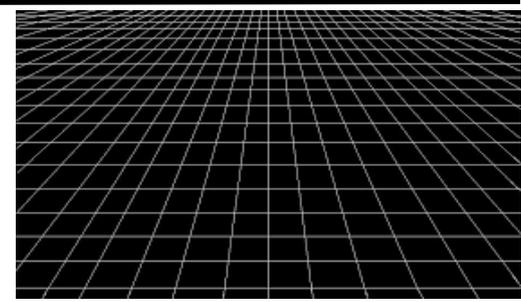
Relativité Générale

Mécanique Quantique

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



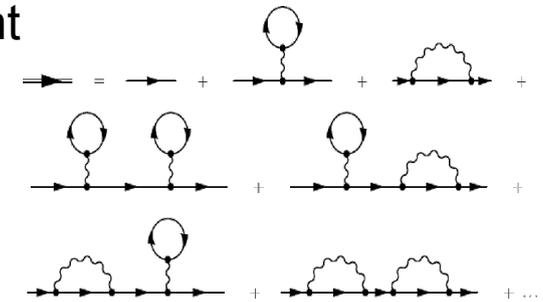
Dépendante d'un espace-temps plat en arrière-fond



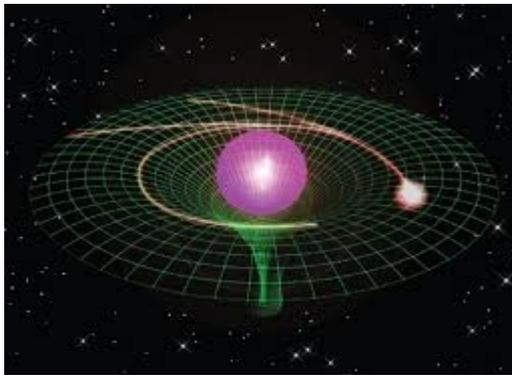
Fortement non-perturbative



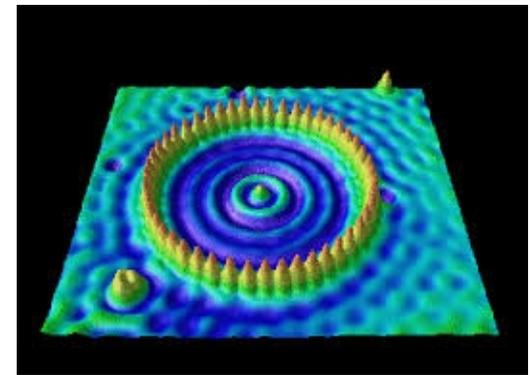
Fondamentalement perturbative renormalisable



Géométrique



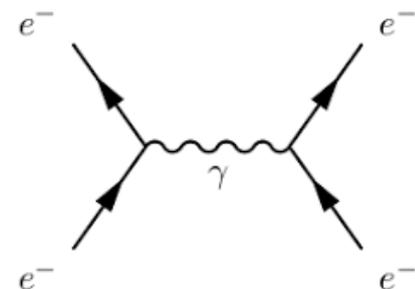
Non-locale (ondulatoire)

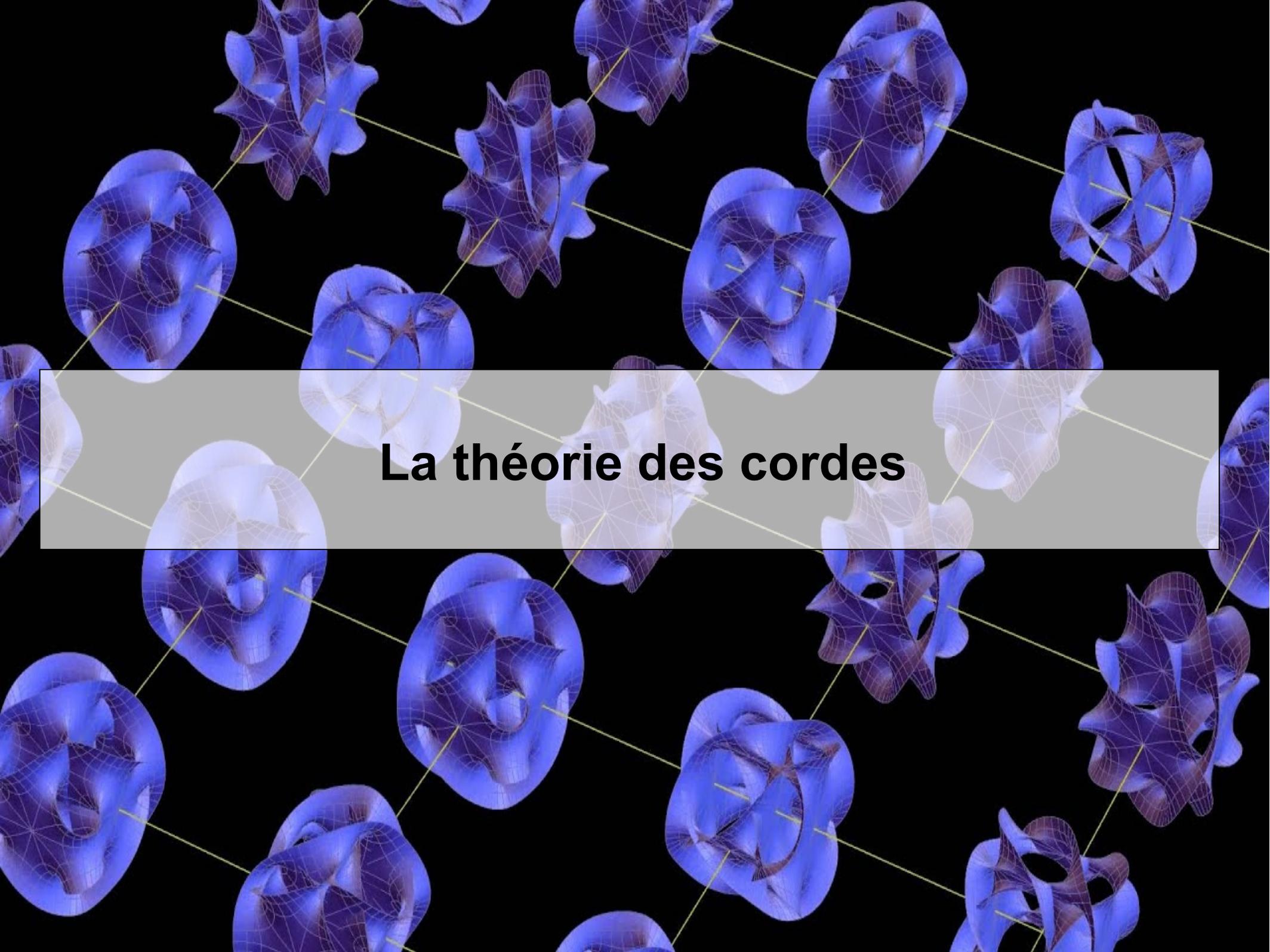


Admet un principe d'équivalence :
Gravité \Leftrightarrow Inertie
 \Leftrightarrow Géométrie

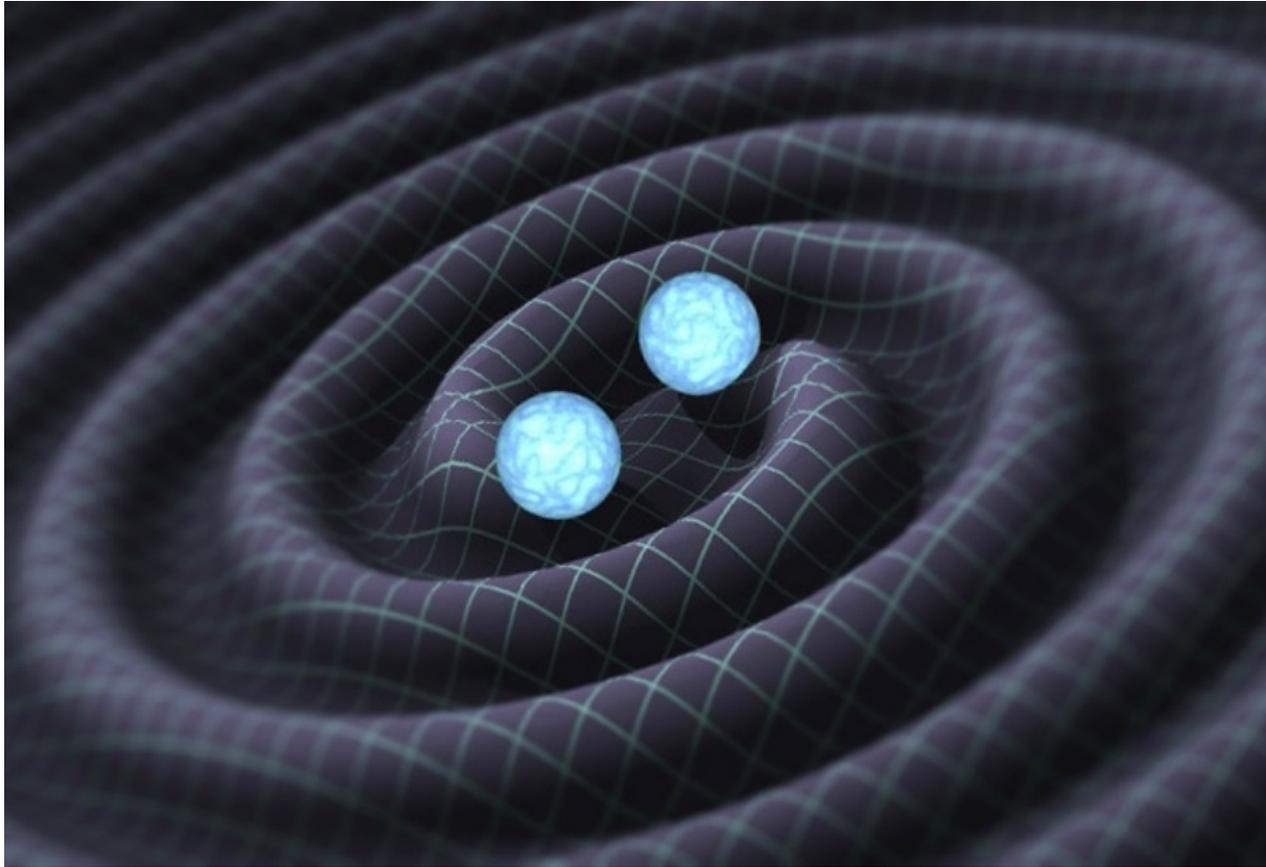


Les interactions sont des théories de jauge : Forces = échanges de particules





La théorie des cordes

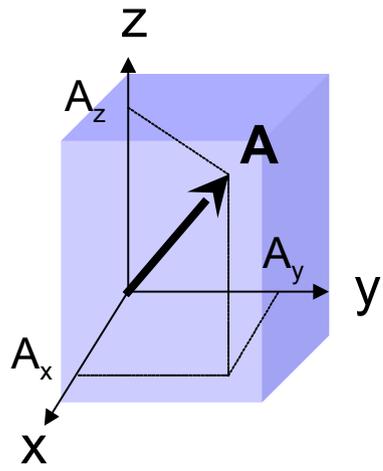


Ondes gravitationnelles = ondes de déformation de l'espace-temps (régime perturbatif de la relativité générale)

Si l'on restreint les effets gravitationnels à ceux descriptibles uniquement avec des ondes gravitationnelles, la gravitation est une pure théorie de jauge de même symétrie que l'électromagnétisme.
→ Même symétrie, une seule et même interaction ?

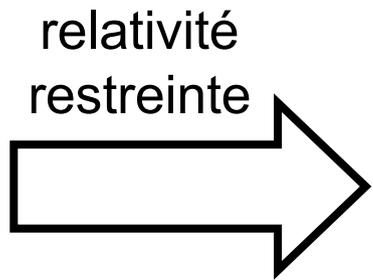
Electricité : V potentiel électrique (tension potentielle)

Magnétisme :

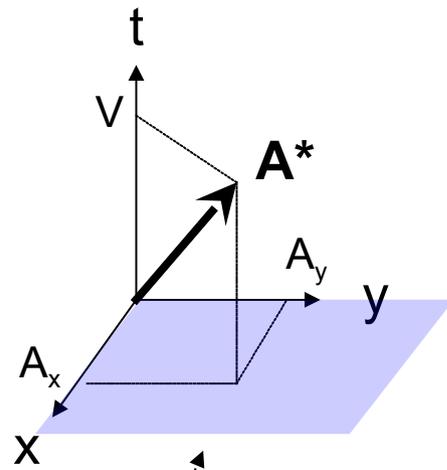


potentiel magnétique
(circulation potentielle)

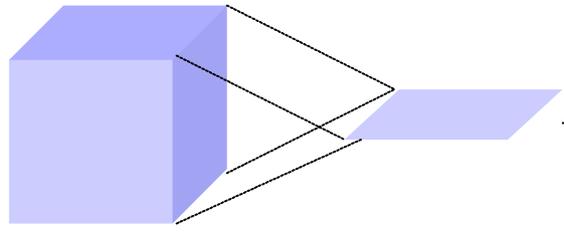
**espace à
3 dimensions**



électromagnétisme :

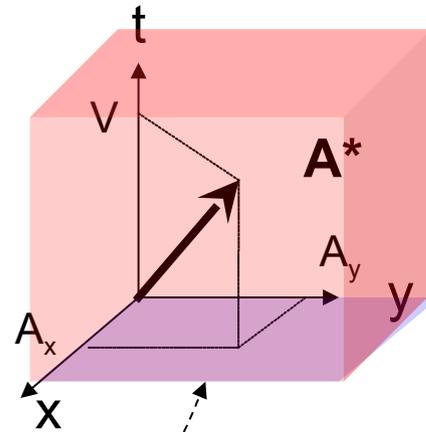


**espace-temps à
4 dimensions**

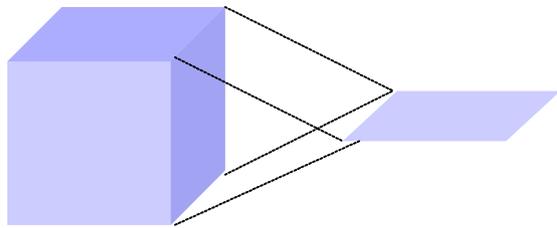


Unification de l'électromagnétisme et de la gravité

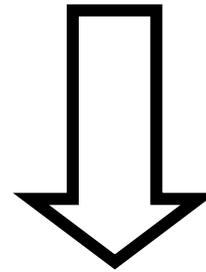
électromagnétisme :



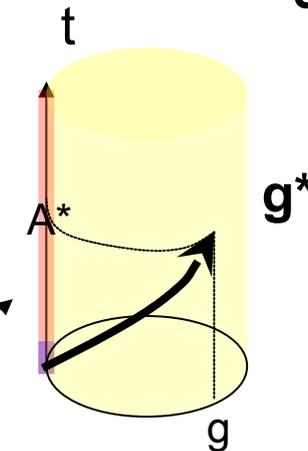
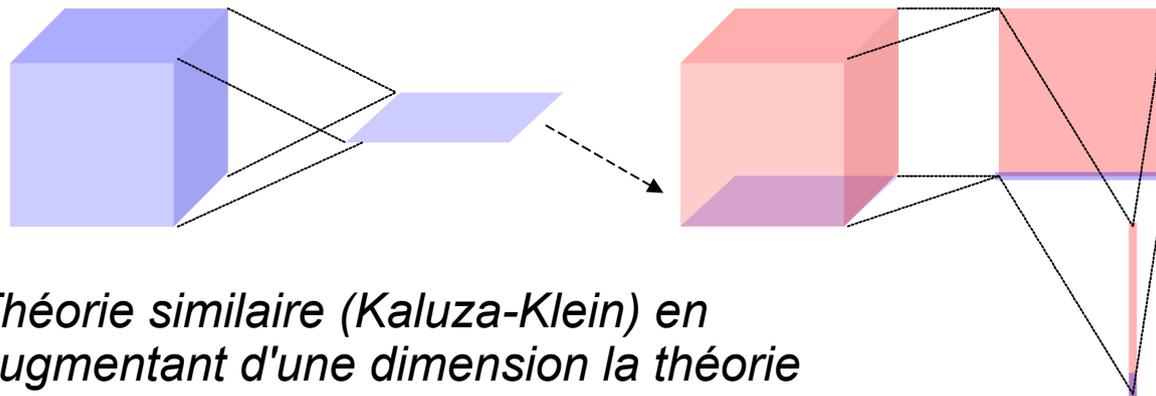
**espace-temps à
4 dimensions**



théorie de
Weyl



**espace-temps à
5 dimensions**

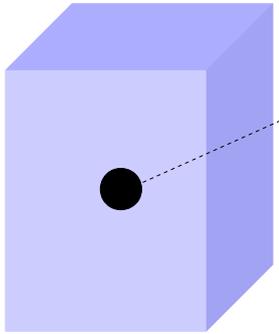


gravitation : g
(régime perturbatif)

Théorie similaire (Kaluza-Klein) en augmentant d'une dimension la théorie de la gravité.

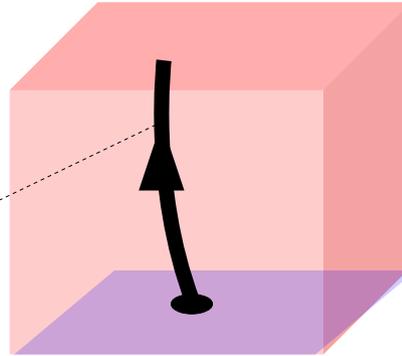
Les cordes

Particule
ponctuelle



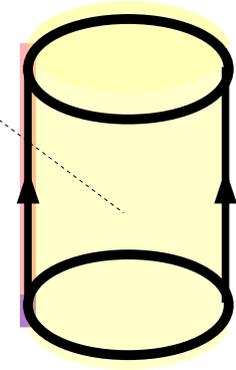
*espace à
3 dimensions*

Ligne
d'univers



*espace-temps à
4 dimensions*

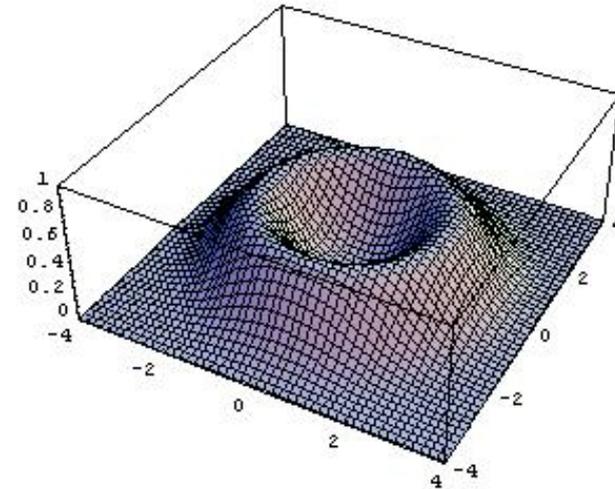
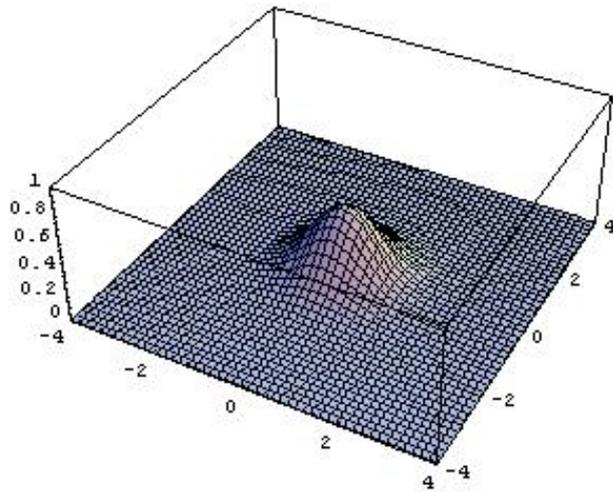
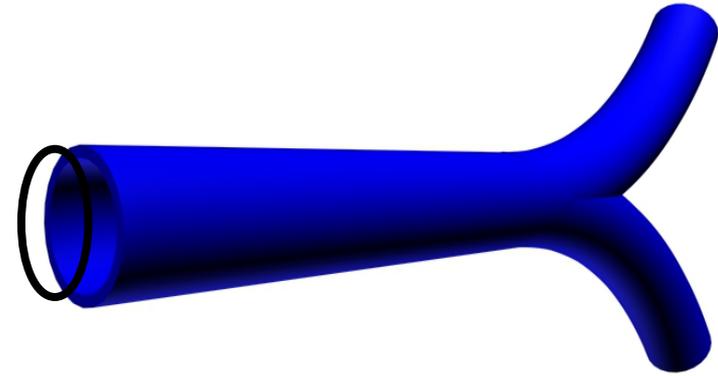
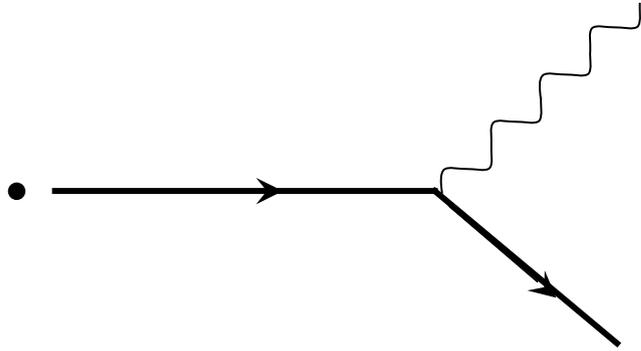
Feuillet
d'univers



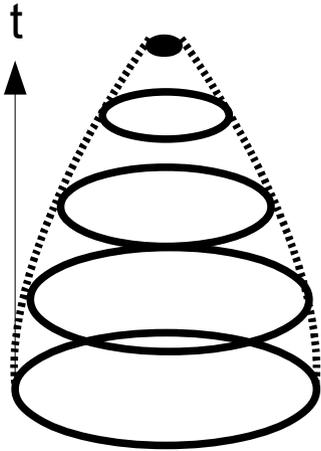
*espace-temps à
5 dimensions*

Les particules ponctuelles sont remplacées par des cordes (ouvertes ou fermées).

Les particules ponctuelles sont remplacées par des cordes (ouvertes ou fermées).



Les théories classiques de Kaluza-Klein et de Weyl sont instables :



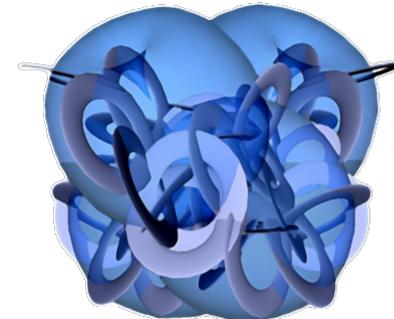
collapse temporel de l'extra-dimension



Quantification de l'extra-dimension compacte pour éviter le collapse.

La théorie électromagnétique est inséparable de l'interaction faible (modèle de Glashow-Salam-Weinberg) : une seule interaction électrofaible [jusqu'à 10^{-18} m manifestation conjointe, au delà extinction de la manifestation faible (les bosons faibles ne se propagent pas au delà de 10^{-18} m)]

→ dans le cadre du modèle GSW, il faut 6 extra-dimensions compactes.



Photon, graviton et dilaton

V potentiel électrique

A_x
 A_y
 A_z potentiel magnétique

V
 A_x
 A_y
 A_z quadri-potentiel électromagnétique

g_{tt}	g_{tx}	g_{ty}	g_{tz}
g_{tx}	g_{xx}	g_{xy}	g_{xz}
g_{ty}	g_{xy}	g_{yy}	g_{yz}
g_{tz}	g_{xz}	g_{yz}	g_{zz}

métrique gravitationnelle

hyper-métrique gravi-électromagnétique

g_{tt}	g_{tx}	g_{ty}	g_{tz}	V
g_{tx}	g_{xx}	g_{xy}	g_{xz}	A_x
g_{ty}	g_{xy}	g_{yy}	g_{yz}	A_y
g_{tz}	g_{xz}	g_{yz}	g_{zz}	A_z
V	A_x	A_y	A_z	φ

Photon, graviton et dilaton

V potentiel électrique

A_x
 A_y
 A_z potentiel magnétique

V
 A_x
 A_y
 A_z quadri-potentiel électromagnétique

g_{tt}	g_{tx}	g_{ty}	g_{tz}
g_{tx}	g_{xx}	g_{xy}	g_{xz}
g_{ty}	g_{xy}	g_{yy}	g_{yz}
g_{tz}	g_{xz}	g_{yz}	g_{zz}

métrique gravitationnelle

hyper-métrique gravi-électromagnétique

g_{tt}	g_{tx}	g_{ty}	g_{tz}	V
g_{tx}	g_{xx}	g_{xy}	g_{xz}	A_x
g_{ty}	g_{xy}	g_{yy}	g_{yz}	A_y
g_{tz}	g_{xz}	g_{yz}	g_{zz}	A_z
V	A_x	A_y	A_z	ϕ

photon

graviton

dilaton

nouveau boson de jauge \Leftrightarrow nouvelle interaction se comportant comme une « anti-gravité »

Les supercordes

théories de jauge ~ analogie avec des tensions (fils, tiges, membranes,...)
 → descriptibles par des vibrations de cordes !

photon γ	boson Z^0	Higgs H	
boson W^+	boson W^-	graviton G	dilaton ϕ
gluon g_{rr^*}	gluon g_{bb^*}	gluon g_{rb^*}	gluon g_{rg^*}
gluon g_{bg^*}	gluon g_{br^*}	gluon g_{gr^*}	gluon g_{gb^*}

les bosons de jauge (particules médiatrices des interactions)

électron e^-	muon μ^-	tauon τ^-
neutrino ν_e	neutrino ν_μ	neutrino ν_τ
quark u	quark c	quark t
quark d	quark s	quark b

particules de la matière
 → pas de description en vibration de cordes !

les fermions (particules « matérielles »)

Les supercordes

sélectron	smuon	stauon
sneutrino e	sneutrino μ	sneutrino τ
squark u	squark c	squark t
squark d	squark s	squark b

théories de jauge des sfermions

photon γ	boson Z^0	Higgs H	
boson W^+	boson W^-	graviton G	dilaton ϕ
gluon g_{rr^*}	gluon g_{bb^*}	gluon g_{rb^*}	gluon g_{rg^*}
gluon g_{bg^*}	gluon g_{br^*}	gluon g_{gr^*}	gluon g_{gb^*}

les bosons de jauge (particules médiatrices des interactions)

Supersymétrie

électron e^+	muon μ^+	tauon τ^+
neutrino ν_e	neutrino ν_μ	neutrino ν_τ
quark u	quark c	quark t
quark d	quark s	quark b

les fermions (particules « matérielles »)

→ par symétrie avec les théories de jauge des sfermions permet de définir les supercordes fermioniques.

photino	bosino Z^0	Higgsino	
bosino W^+	bosino W^-	gravitino	dilatino
gluino g_{rr^*}	gluino g_{bb^*}	gluino g_{rb^*}	gluino g_{rg^*}
gluino g_{bg^*}	gluino g_{br^*}	gluino g_{gr^*}	gluino

nouvelles particules matériels les WIMPs (Particules Massives Interagissant Faiblement)

Problème : il y a cinq théories des supercordes (en fonction du groupe de symétrie utilisé et du choix d'avoir des cordes ouvertes ou non), qui sont dites de type I, IIA, IIB, Hétérotique O, Hétérotique E.

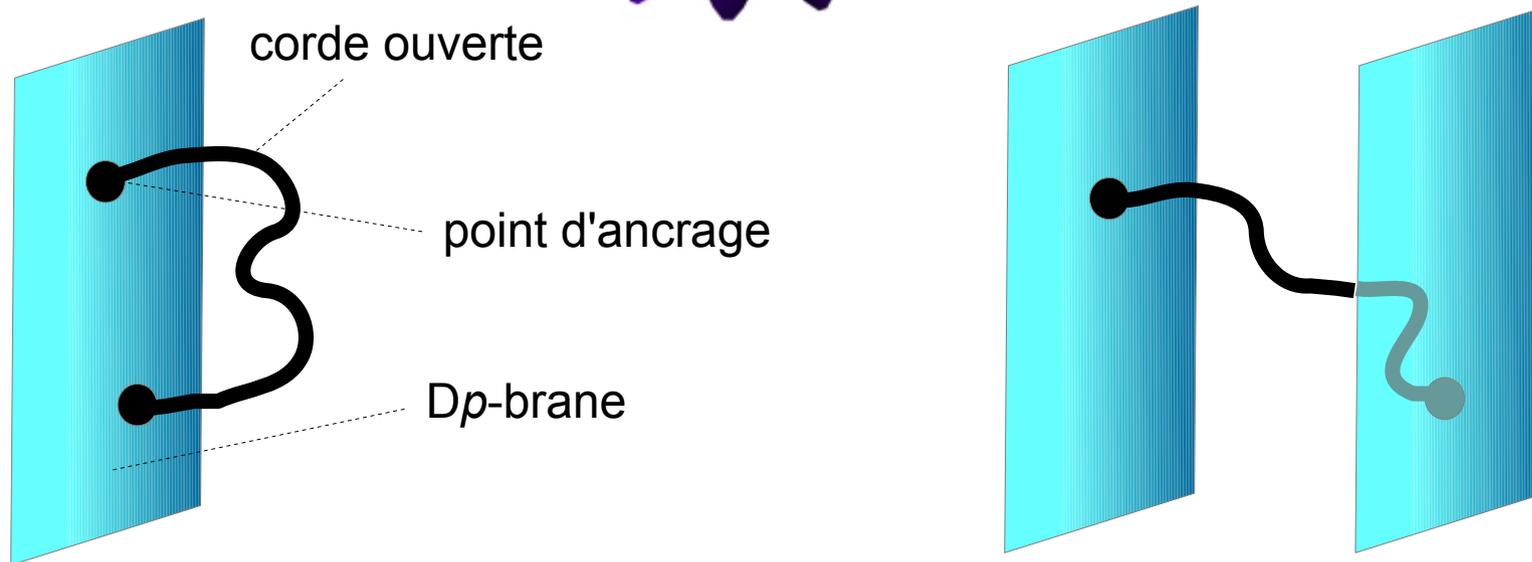


La théorie des branes

L'énergie des « particules » devient l'énergie de vibration des cordes : $E = \hbar\omega$ (ω : fréquence de vibration)

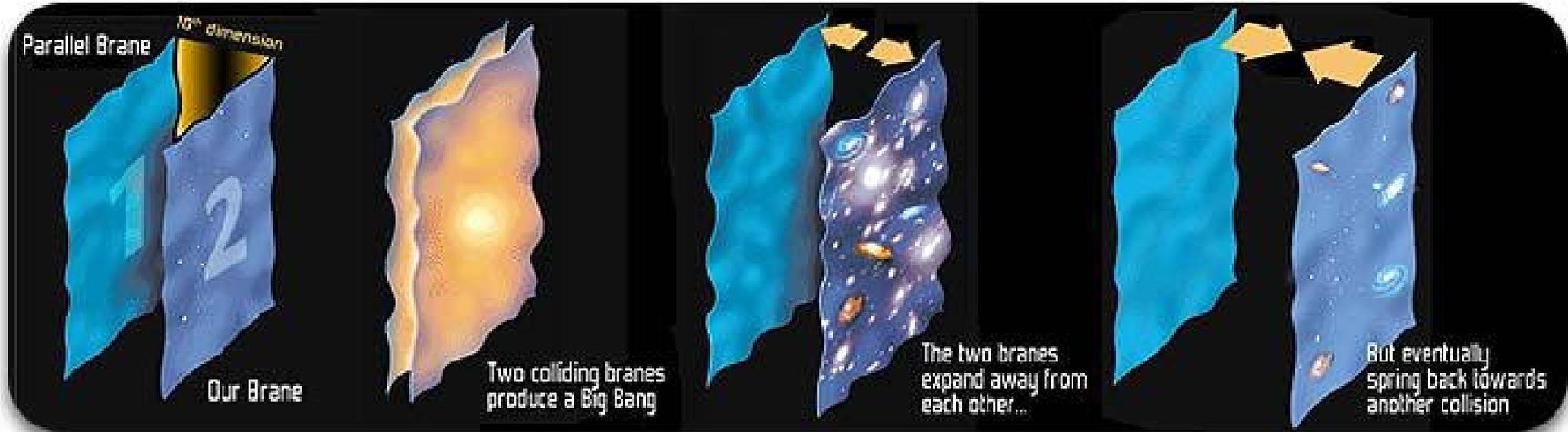


Mais pour vibrer une corde ouverte doit avoir ses extrémités attachées à quelque chose !



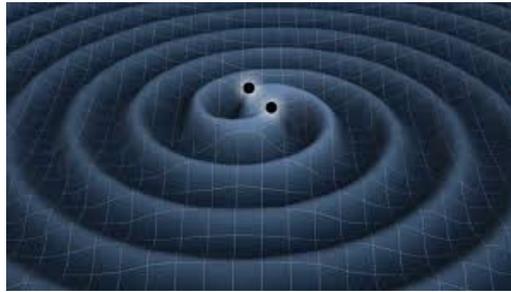
brane : aphérèse de « membrane », 2-brane=membrane, p -brane=brane à p dimensions, ...
D : condition de Dirichlet (condition aux limites mathématique de l'équation des cordes vibrantes)

Cosmologie branaire : l'Univers ekpyrotique

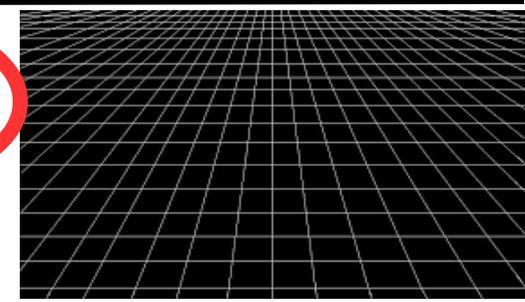


Gravitation Quantique par Boucles

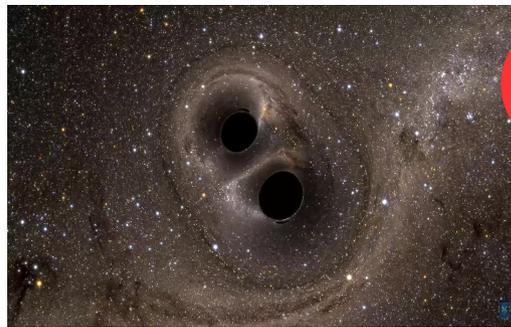
~~Indépendante d'arrière-fond (espace-temps dynamique)~~



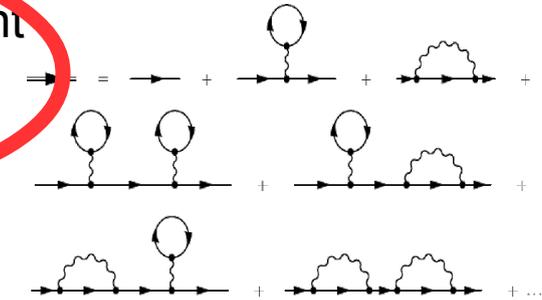
Dependante d'un espace-temps plat en arrière-fond



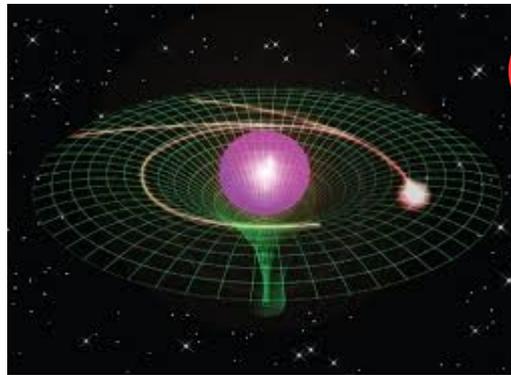
~~Fortement non-perturbative~~



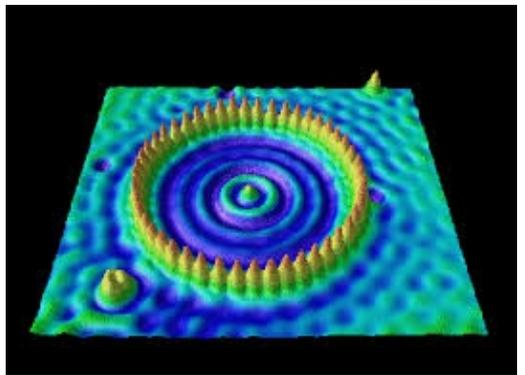
Fondamentalement perturbative renormalisable



~~Géométrique~~



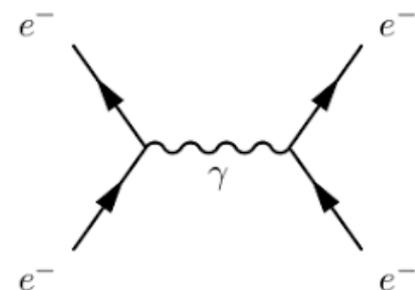
Non-locale (ondulatoire)



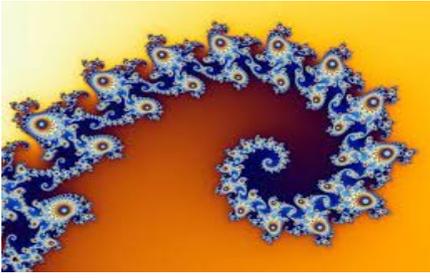
Admet un principe d'équivalence :
Gravité \Leftrightarrow Inertie
 ~~\Leftrightarrow Géométrie~~



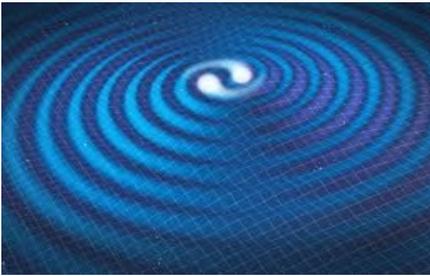
Les interactions sont des théories de jauge :
Forces = échanges de particules



Résolutions des problèmes



- 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. ✗



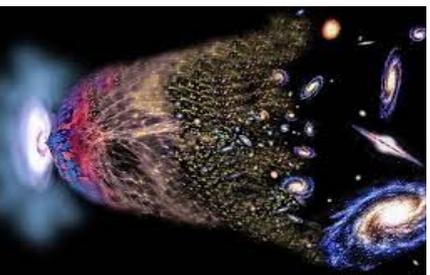
- Problème de l'interaction gravitationnelle entre particules fondamentales. ✓
- Problème des fluctuations du vide à l'échelle de Planck (10^{-35}m). ✓



- 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. ✓ (avec modèles académiques)
- Paradoxe de l'information des trous noirs. ✗



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