

Avant-propos

L'objet de ce cours est de présenter de façon simple quelques développements récents de la physique théorique des « hautes énergies » qui ont conduit à envisager l'existence de « grandes » dimensions d'espace-temps supplémentaires (nous préciserons ce que nous entendons précisément par là dans le cours). Ce sujet peut paraître quelque peu éloigné de l'astronomie, cependant l'existence de ces dimensions supplémentaires pourrait avoir des conséquences très importantes pour comprendre les premiers instants de l'Univers, voire son évolution récente.

Le matériel fourni ci-après correspond à la trame du cours, et aux idées principales que nous aimerions faire passer à notre auditoire. Le cours étant dans le parcours « fil rouge », nous ferons aussi quelques petits calculs simples pour expliciter et préciser certaines notions et certains résultats. Ces calculs ne seront en **aucune façon nécessaires pour comprendre les idées générales du cours**. Ils nécessiteront simplement une certaine familiarité avec le « théorème de Gauss » de l'électromagnétisme, ainsi que de savoir ce qu'est une dérivée partielle et une série de Fourier. Mais nous précisons bien qu'il est tout à fait possible de suivre ce cours sans connaître ces notions, qui n'interviendront que de façon très périphérique.

Les dimensions supplémentaires de l'espace-temps

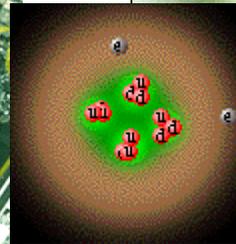
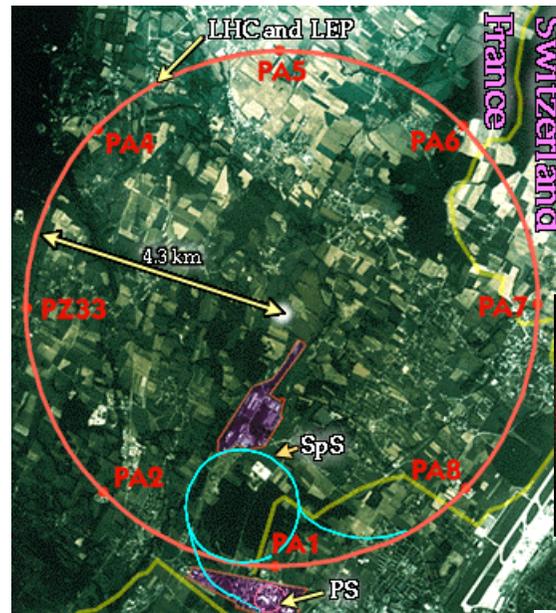
ou: à quoi ressemble l'espace-temps,
d'après la « théorie des cordes »,
et comment le savoir ?

Cédric Deffayet



Physique de
« l'infiniment grand »

Cosmologie



Les poupées russes conceptuelles de la physique:



La description du monde qui nous entoure dépend
des questions que l'on se pose...

Pour décrire un phénomène:
une théorie physique peut
convenir ...

...Mais n'être qu'une
approximation d'une autre
théorie physique décrivant le
même phénomène de façon
plus fine...

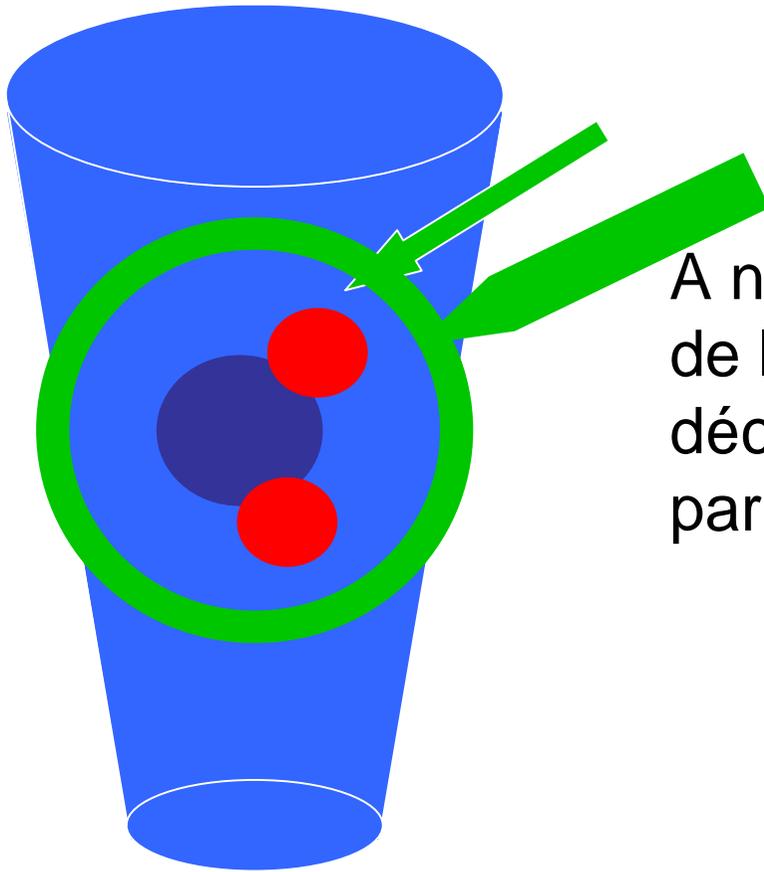
etc...



1. Les poupées russes de l'infiniment petit

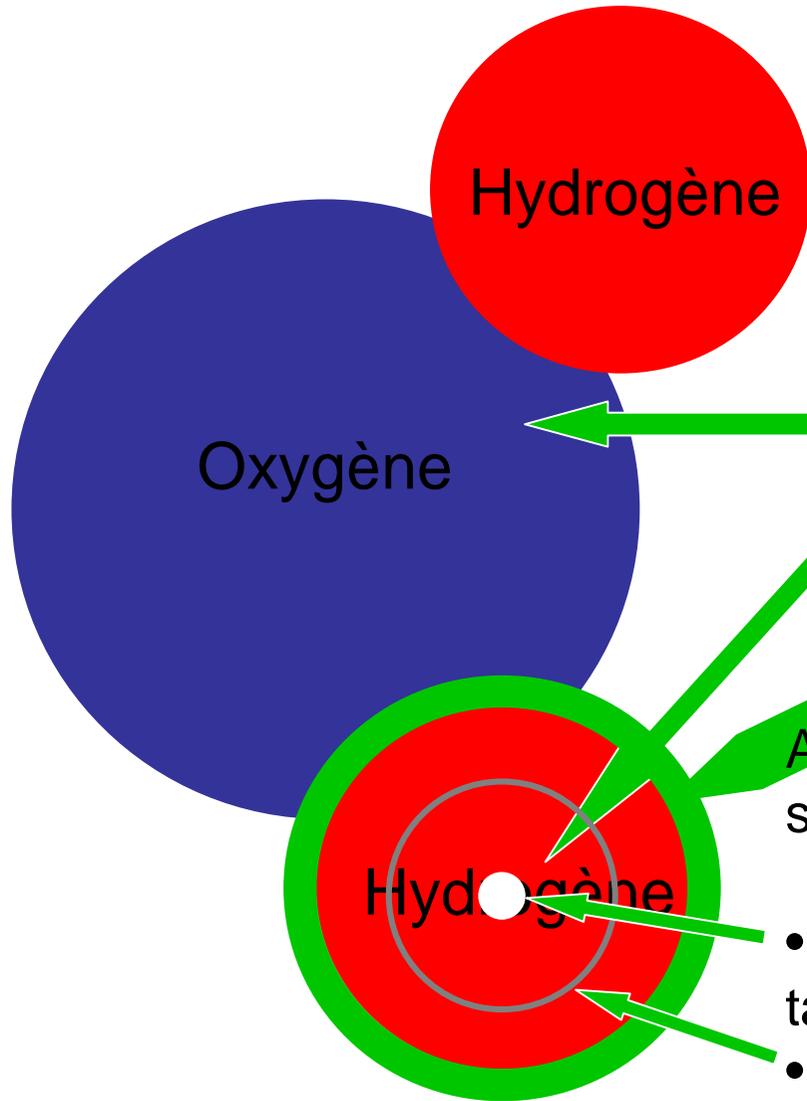


A plus petite échelle (10 mm):
molécules d'eau: physique moléculaire,
chimie



A notre échelle:
de l'eau dans un verre est bien
décrite comme un milieu continu,
par l'hydrodynamique



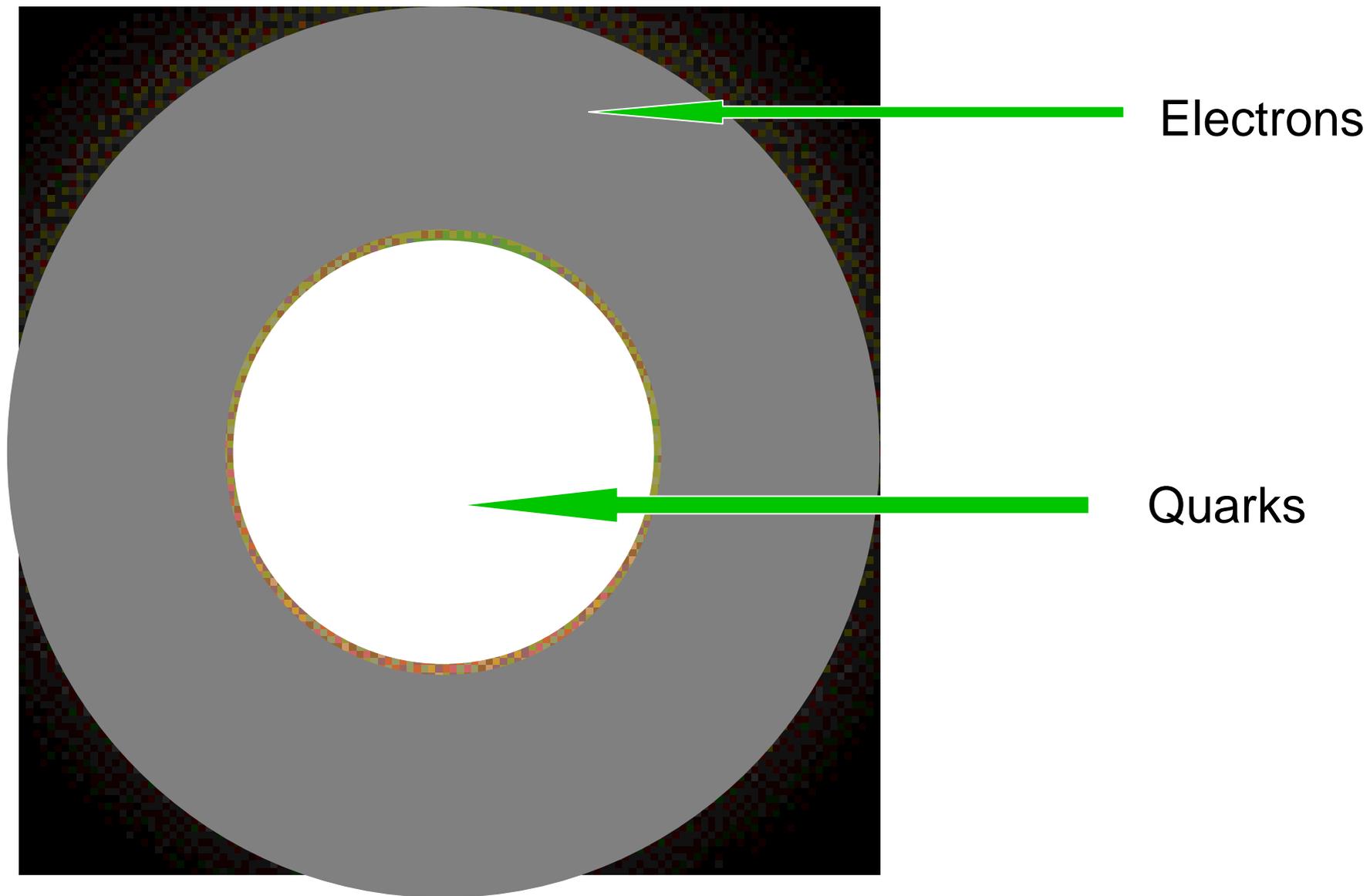


A une plus petite échelle:

les molécules sont faites
d'atomes

A une plus petite échelle, les atomes
sont faits:

- d'un noyau (protons, neutrons) de
taille 10 mm
- d'électrons qui « tournent » autour du
noyau



A chaque étape:

- Comprendre le plus petit permet (en principe) de comprendre le plus grand



Donc en allant vers le plus petit on va vers le plus « fondamental »

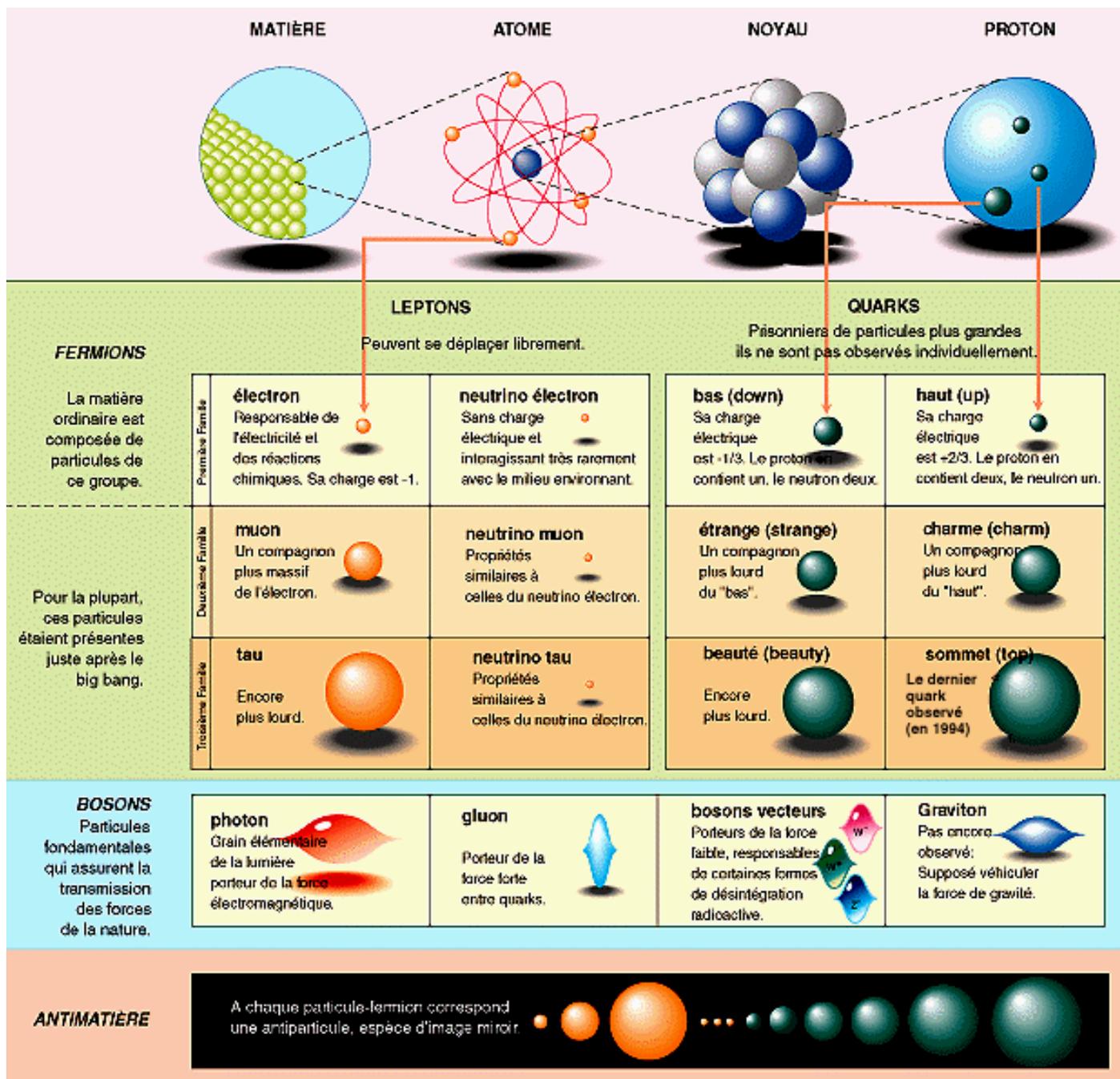
Aujourd'hui le plus « fondamental » :

- « Matière »: quarks, électrons...
- « Forces » entre ces constituants:

3 forces bien comprises au niveau microscopique (électromagnétique, forte et faible) dans le cadre de la **Mécanique quantique**



Modèle standard de la physique des particules, remarquablement bien testé expérimentalement.



Mais le modèle standard n'est pas complètement satisfaisant:

- Trop de paramètres sans explication (une vingtaine)
- Ne décrit pas la force de gravitation de façon quantique (c'est-à-dire la façon dont la gravitation se comporte à très petite distance)... La façon dont la force gravitationnelle se comporte à petite distance est inconnue, elle a seulement été mesurée jusqu'à des distances de l'ordre de 0.1 mm.

Une solution à ces problèmes ?

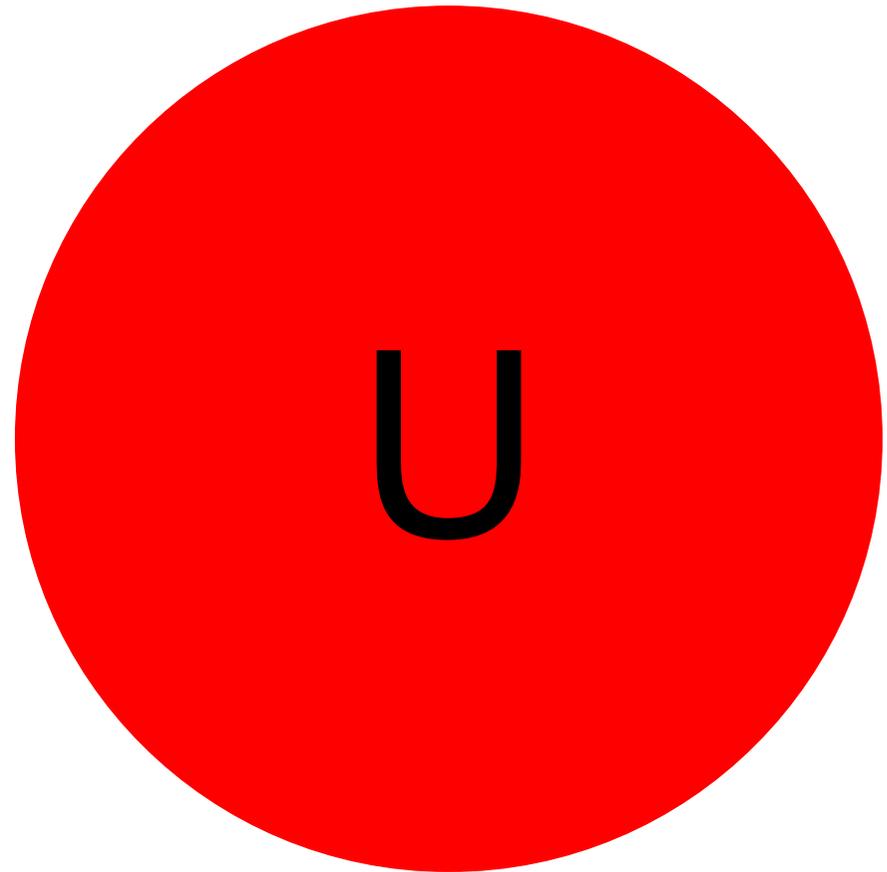
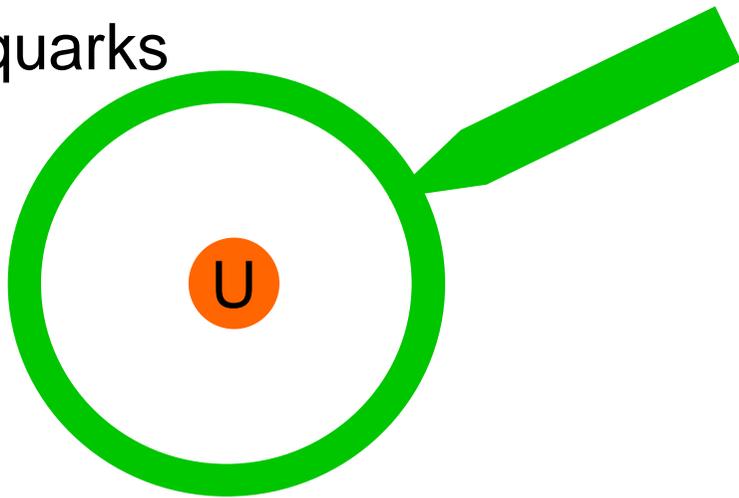


La « théorie des cordes » ?

Particules élémentaires

électron 

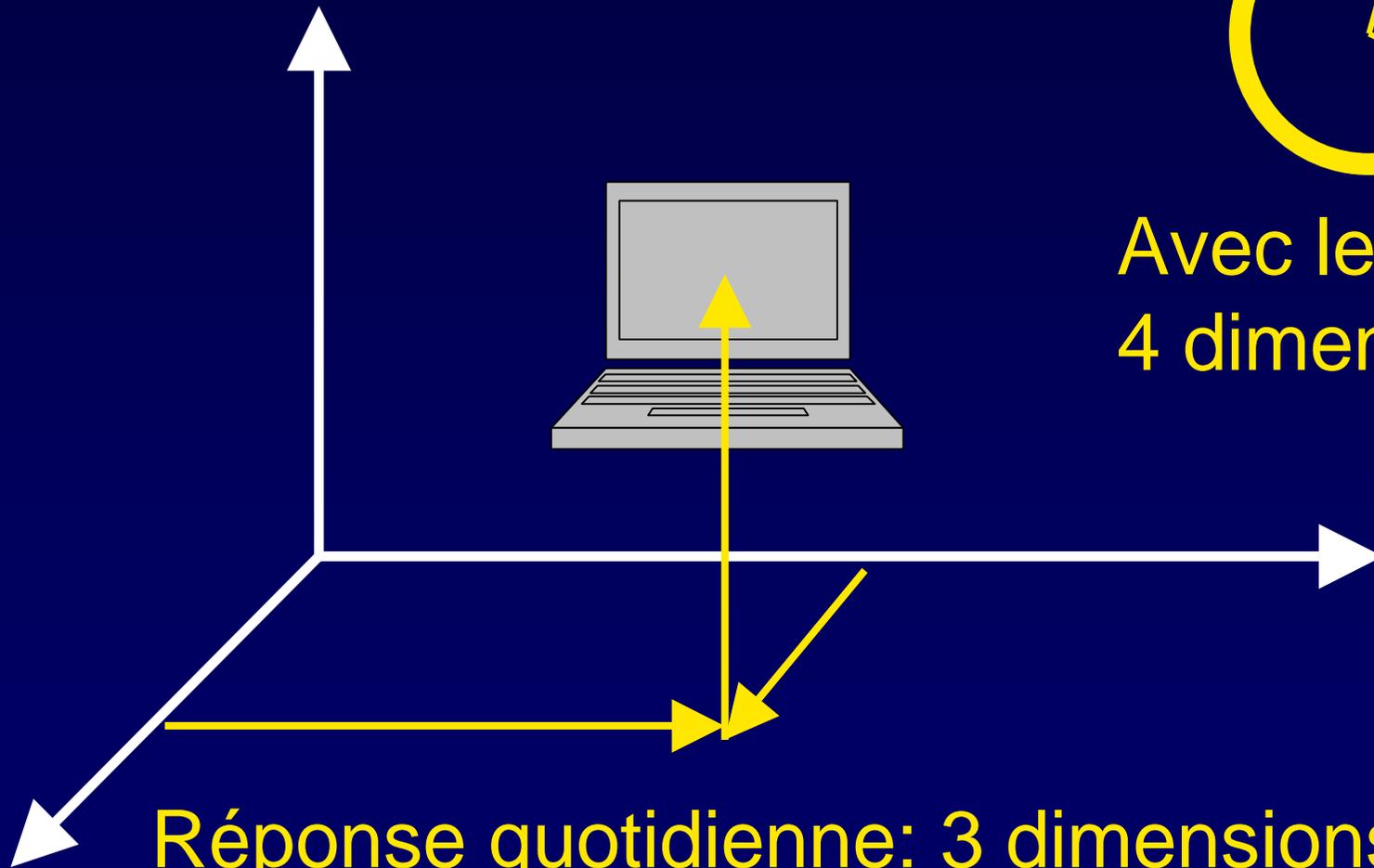
quarks



La théorie des cordes donne une description quantique de toutes les forces fondamentales, y compris la force de gravitation.

2. Les poupées russes de l'espace-temps et de la gravitation

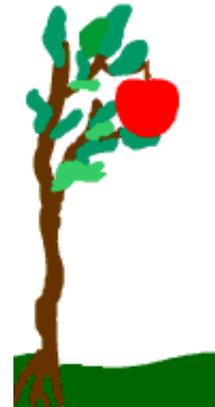
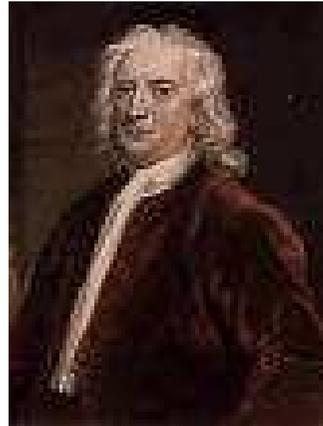
Dans combien de dimensions vivons-nous?



Avec le temps:
4 dimensions

Réponse quotidienne: 3 dimensions
= 3 nombres pour repérer un objet

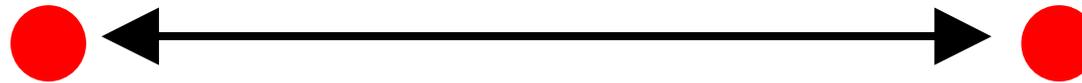
Une autre « preuve » que nous vivons dans 3+1 dimensions : la gravitation newtonienne



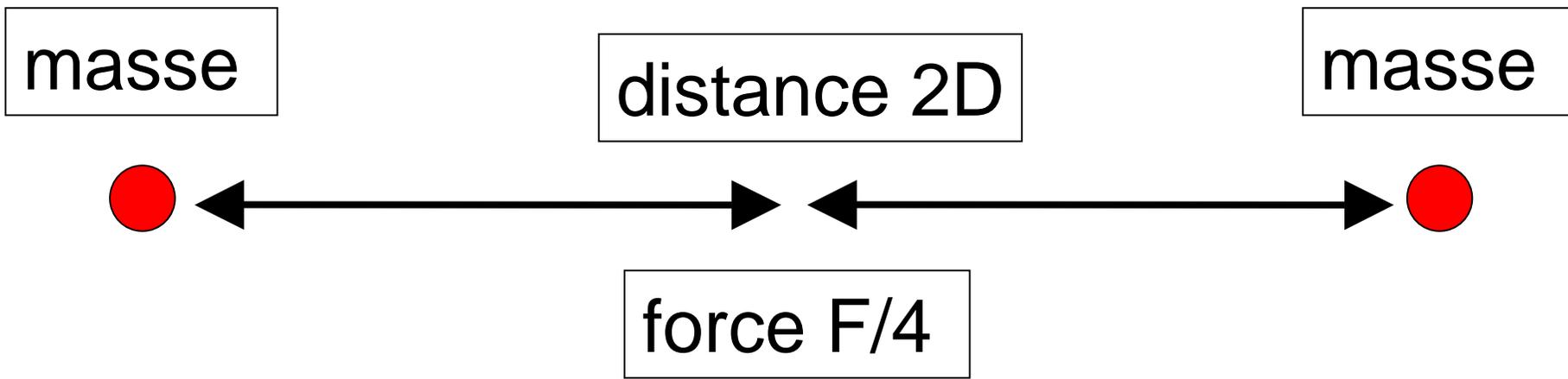
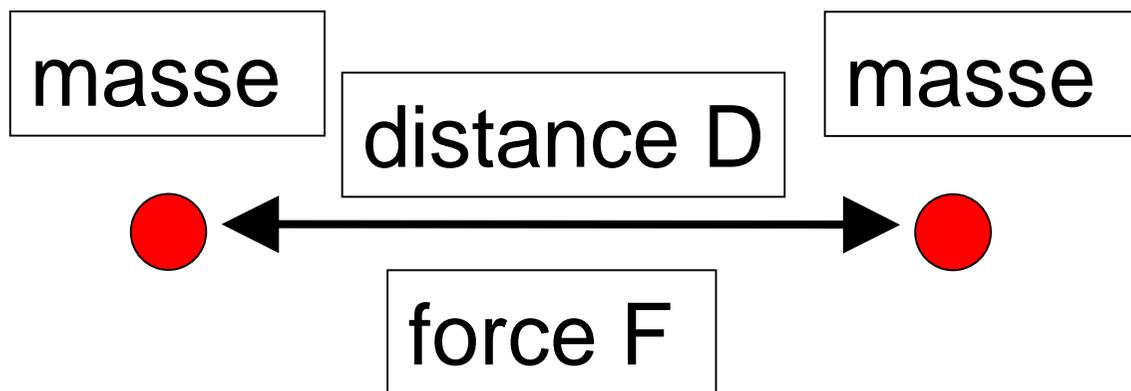
masse

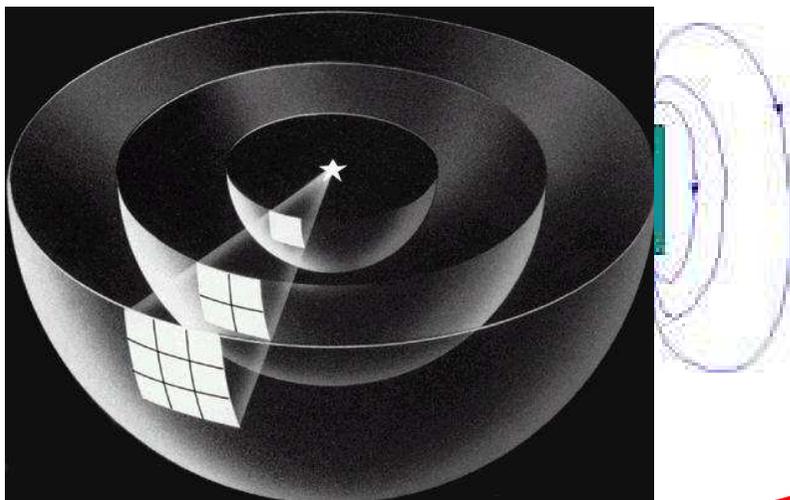
distance D

masse

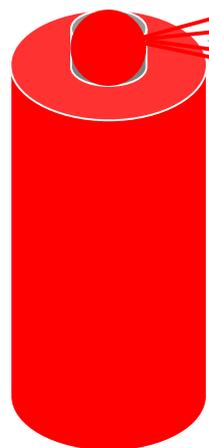


La force gravitationnelle varie comme $1/D^2$

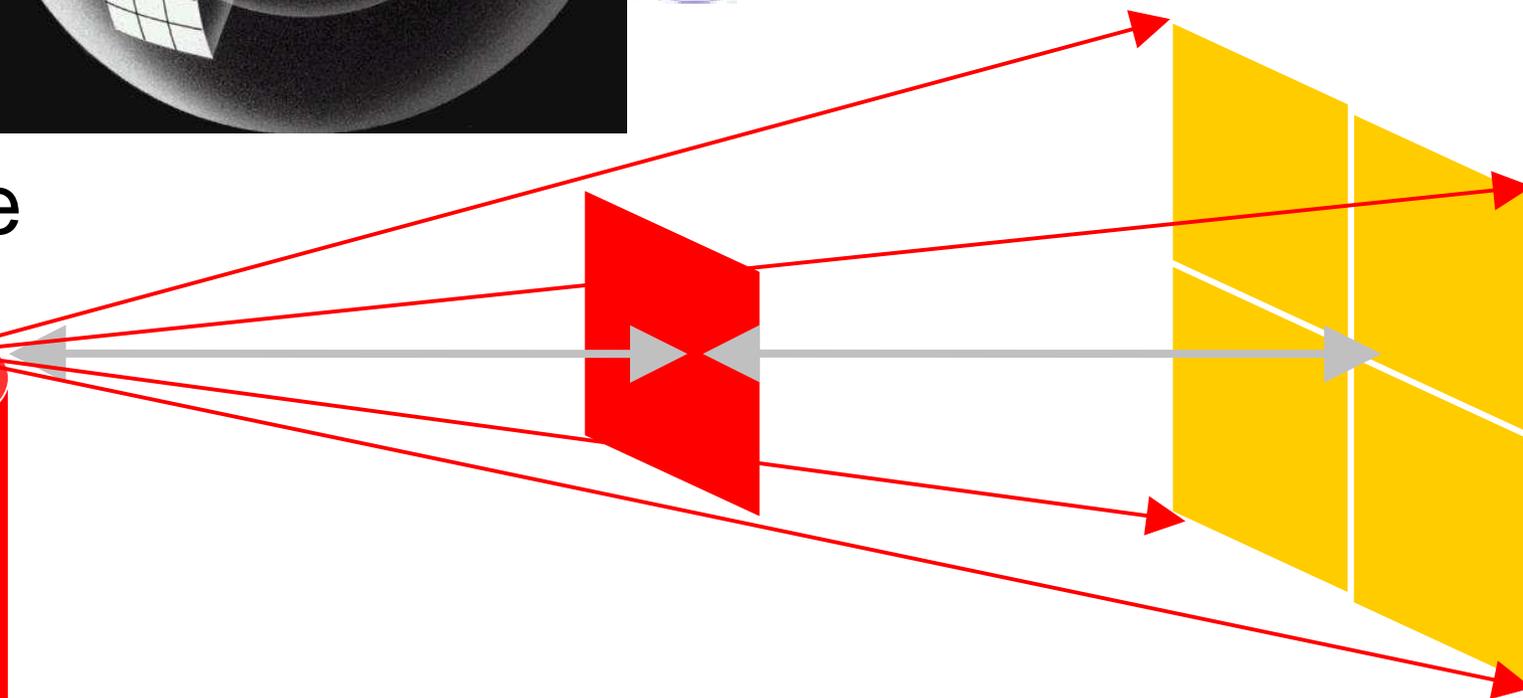




masse



bombe de peinture



Se généralise à plus de dimensions

| Nombre de dimensions | Force vs distance | Force entre deux masses éloignées de 2D |
|----------------------|-------------------|---|
| 3+1 | $1/D^2$ | F/4 |
| 4+1 | $1/D^3$ | F/8 |
| 5+1 | $1/D^4$ | F/16 |

etc.

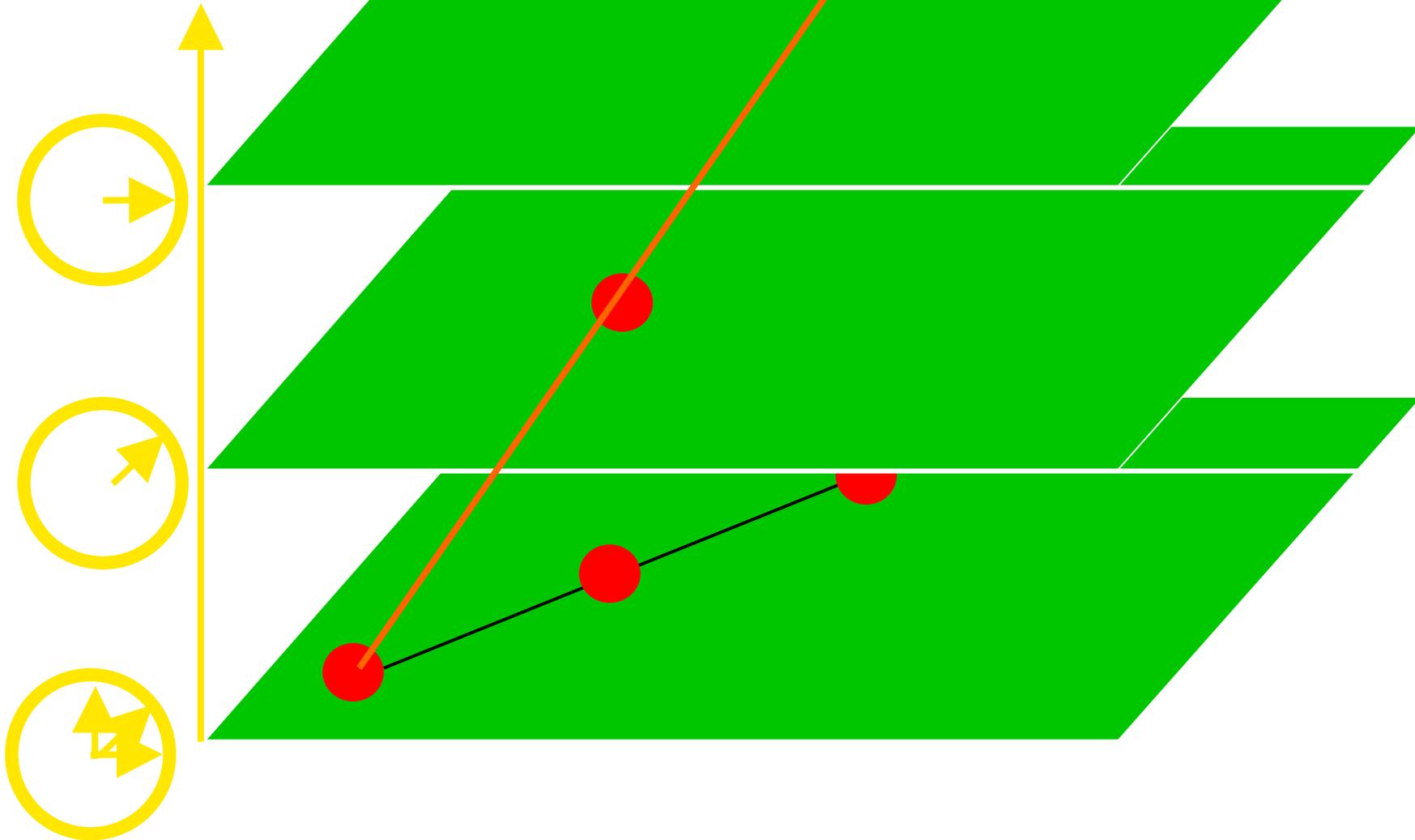
Comment se représenter 4 dimensions?



Une façon de comprendre intuitivement les choses: supprimer une dimension d'espace (3 → 2)

Le temps:
troisième dimension

Trajectoire de la boule



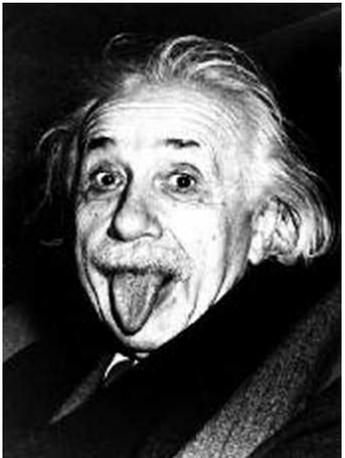
Donc si on rajoute le temps à nos 3 dimensions spatiales « intuitives »:

on obtient l'espace-temps de Galilée qui a 4 dimensions, 3 dimensions spatiales et une temporelle.





Einstein (1905), La « relativité restreinte » : notre vision intuitive (galiléenne) de l'espace-temps n'est plus valable si on se déplace à des vitesses proches de celles de la lumière.

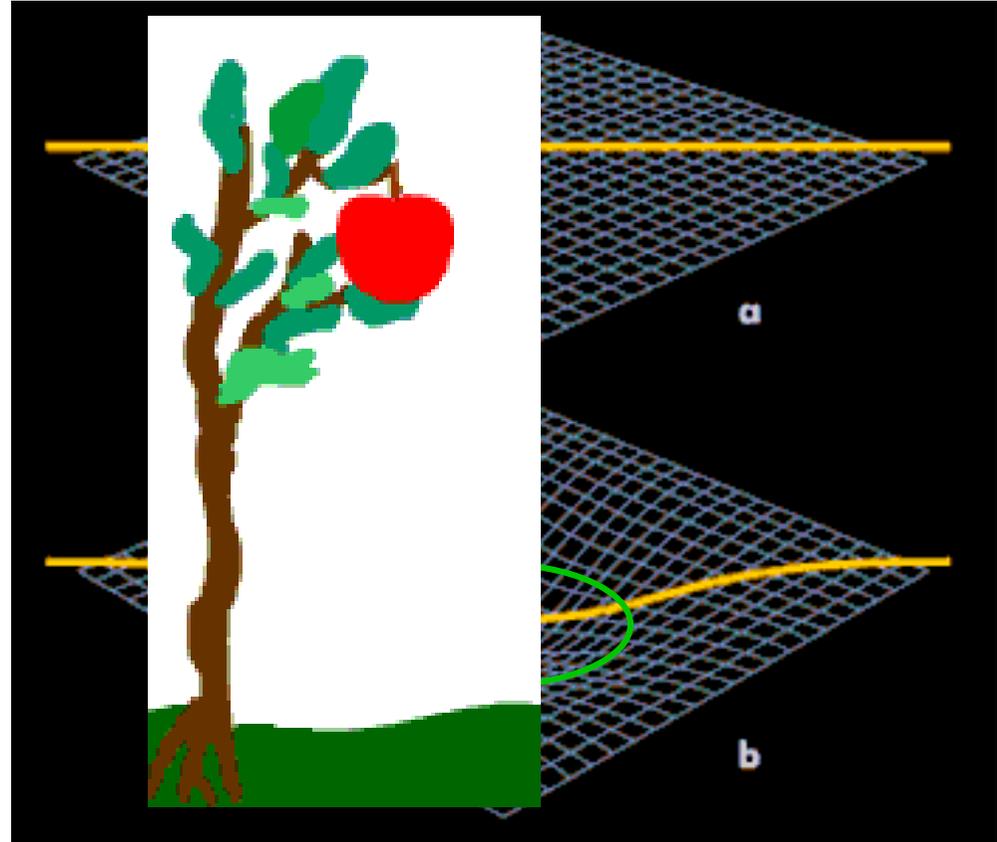


Einstein (1916), La « relativité générale » : la vision newtonienne de la force de gravitation n'est plus valable si on tient compte de la relativité restreinte.

En relativité générale:

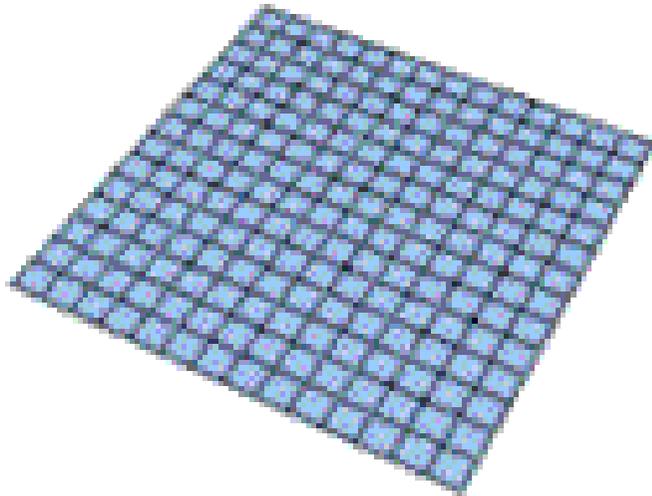
la Terre (comme toute masse) courbe l'espace-temps autour d'elle.

Cette courbure de l'espace-temps dévie les objets qui y circulent, ce qui se manifeste pour nous comme une force.



Pour se représenter les choses, on peut utiliser de nouveau une analogie à deux dimensions

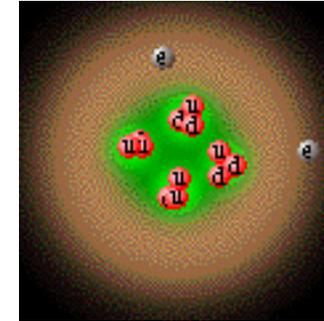
L'espace-temps (4D) est « élastique »,
toute masse ou énergie le perturbe,
l'excite, le courbe ... comme le fait le vent
à la surface de l'eau...



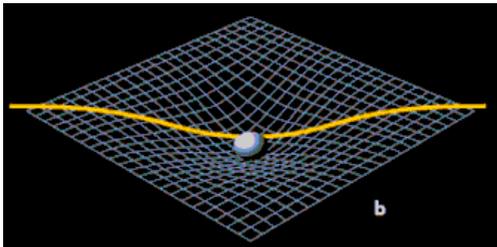
... des ondes peuvent aussi s'y
propager ...

Pour résumer:

1. le modèle standard de la physique des particules (dans le cadre de la mécanique quantique)



difficiles à concilier



2. la force gravitationnelle décrite par la relativité générale

une solution: la théorie des cordes (qui les décrit de façon unifiée) ?

Théorie des cordes



Plusieurs réponses possibles !
Plusieurs modèles du monde !

la théorie des cordes

requiert pour sa cohérence interne



- 10 ou 11 dimensions d'espace-temps
- Leur taille: petites: 10⁻³⁵ mm ?, grandes: 0.1 mm ?, infinies ?
- Pour le savoir: cosmologie, physique des particules, mesures de la force de gravitation à petite distance.

- 10 (ou 11) dimensions,
qu'est ce que cela veut dire:

- il faut 10 (ou 11) nombres pour repérer un événement de l'espace-temps,

- de même qu'un espace-temps à 4 dimensions est un empilement d'espace-temps à 3 dimensions, ..., un espace-temps à 10 dimensions est un empilement d'espace-temps à 9 dimensions.

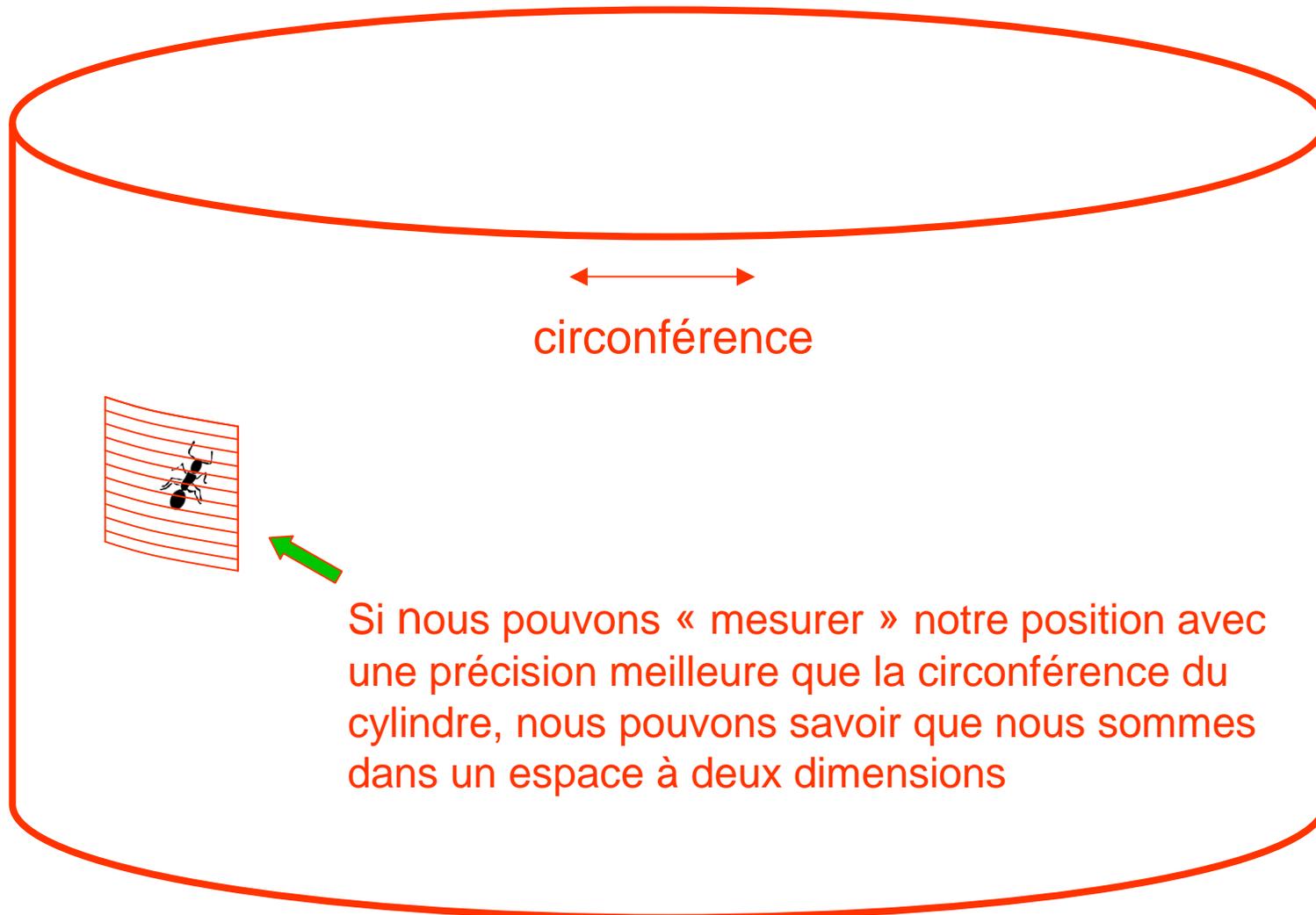
- 10 dimensions: 1 temps et 9 dimensions d'espace.

Comment 6 (ou 7) dimensions
pourraient nous avoir échappé:



Le mécanisme de Kaluza-Klein (1920)

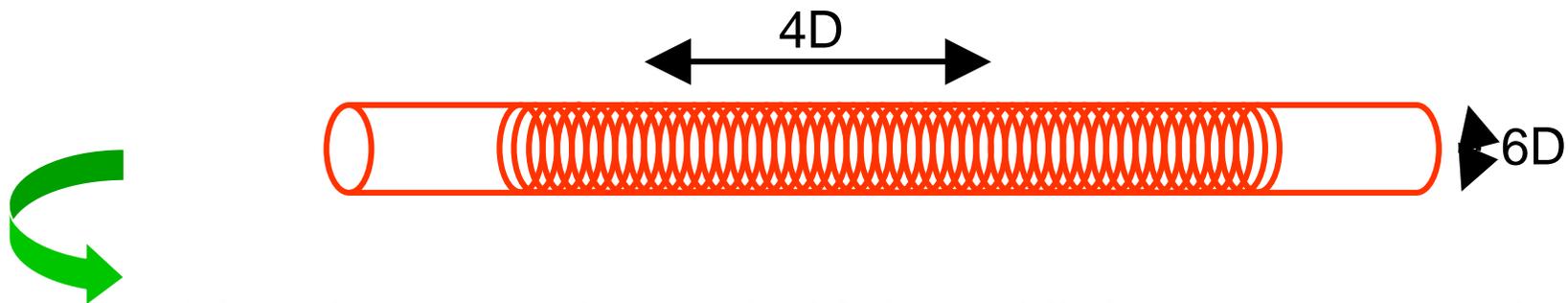
Si nous vivions à la surface d'un cylindre (à deux dimensions):



sinon, nous avons l'impression de vivre dans un espace à une dimension



- Donc des dimensions supplémentaires d'espace-temps peuvent nous avoir échappé si elles sont « recourbées » sur elles-mêmes avec un circonférence beaucoup plus petite que les plus petites distances observables



C'est le mécanisme de Kaluza-Klein, et une première façon de « cacher » les dimensions supplémentaires de la théorie des cordes.

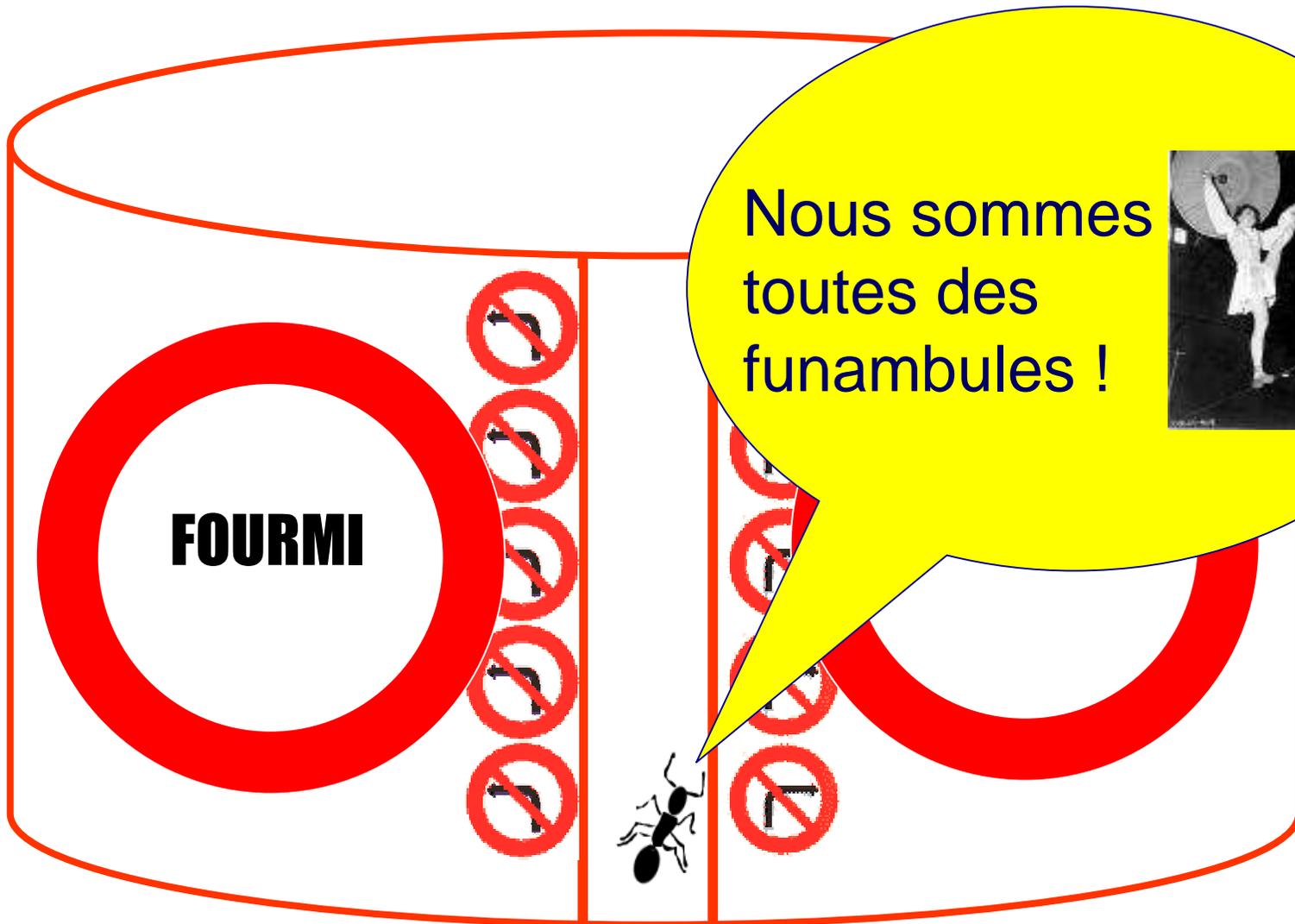


La taille de ces dimensions supplémentaires (accessibles aux accélérateurs de particules) doit être inférieure à 10 mm

Tout ce qui précède est vrai, si on peut effectivement sonder les dimensions supplémentaires avec les accélérateurs de particules... c'est-à-dire si la matière ordinaire (avec laquelle sont faits les accélérateurs) peut se déplacer dans ces dimensions supplémentaires



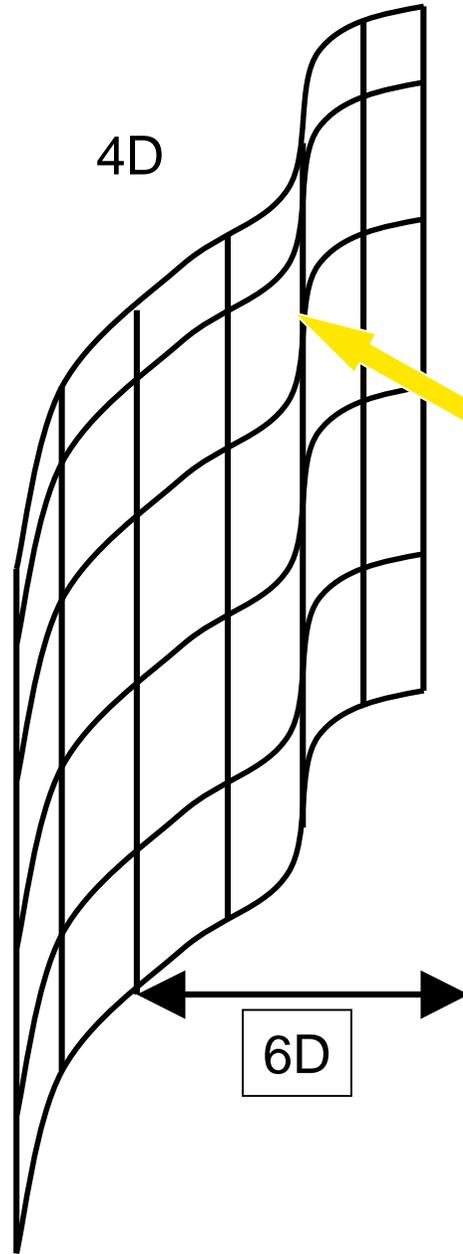
D'où une autre solution pour « cacher » les dimensions supplémentaires: « interdire » que la matière ordinaire puisse s'y déplacer!



FOURMI

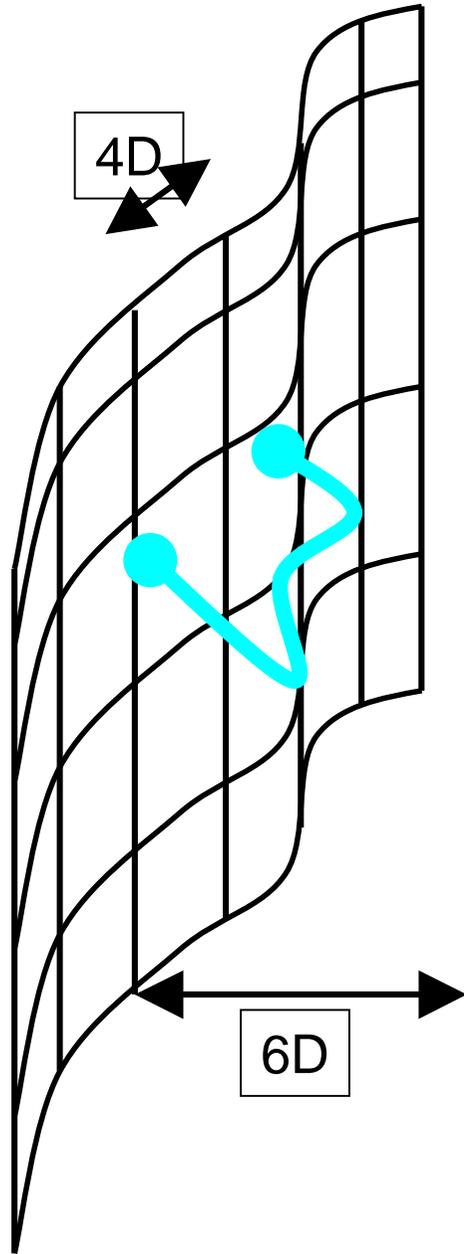
Nous sommes
toutes des
funambules !





On a découvert depuis quelques années que la théorie des cordes conduisait (aussi) à ce genre de situation.

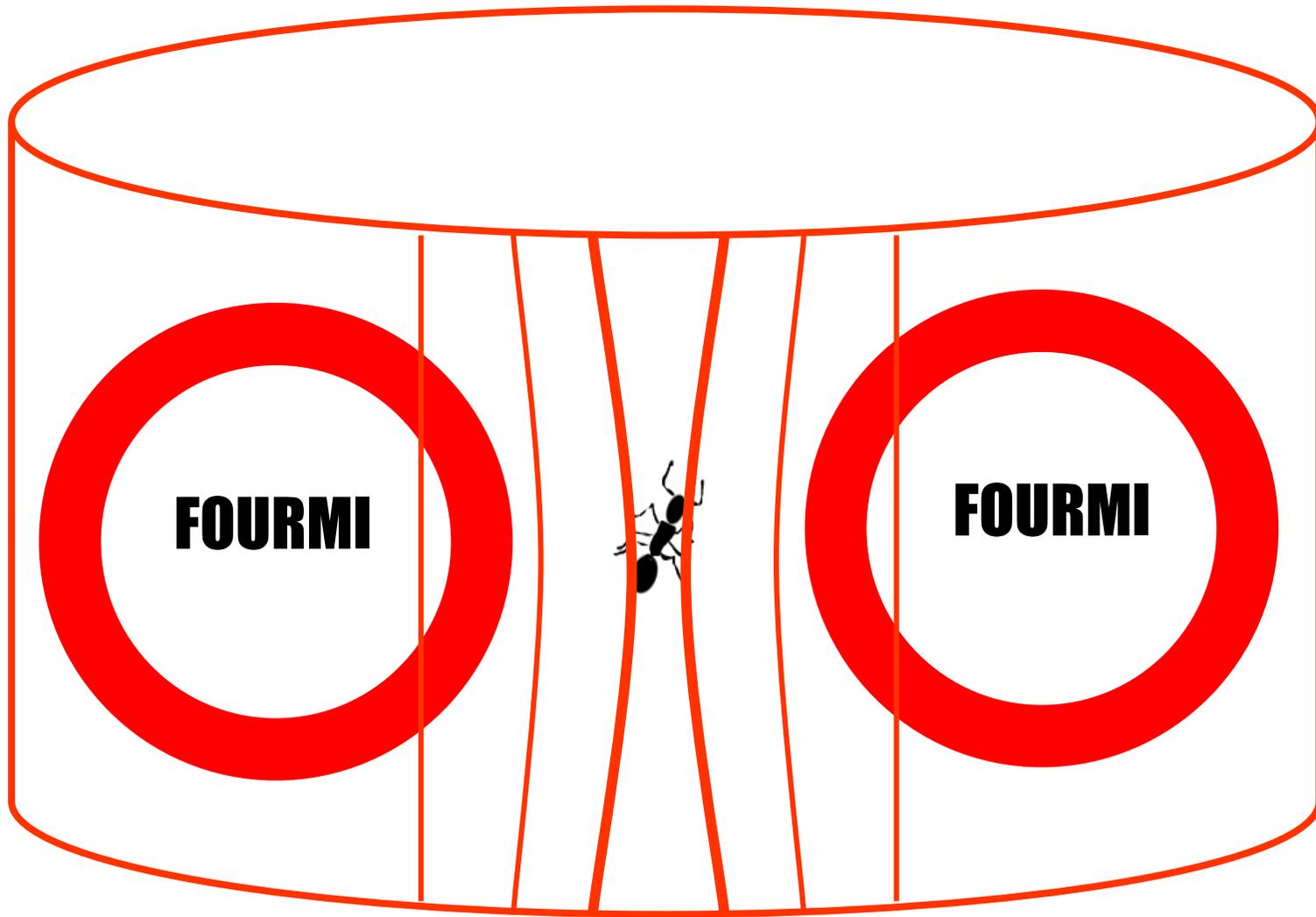
Les particules du modèle standard de la physique des particules (avec lesquelles nous sommes faits) peuvent être confinées sur une surface (« brane ») à 4 dimensions (notre espace-temps « intuitif »). Cette « brane » est plongée dans un espace-temps à 10 dimensions.



Si tel est le cas: la seule façon de s'apercevoir de l'existence de dimensions supplémentaires, c'est via la gravitation.



En effet la gravitation est véhiculée par la courbure de l'espace-temps, et ne peut donc pas être confinée sur un sous-espace de l'espace-temps tout entier!



La courbure due à la fourmi se transmet dans la dimension supplémentaire!

Est-ce observable ?

- ✓ Observable dans les accélérateurs de particules (mais seulement par perte d'énergie sous forme gravitationnelle dans les dimensions supplémentaires)
- ✓ Change la cosmologie
- ✓ Modification de la gravitation à petite distance: sur des distances de l'ordre de la taille des dimensions supplémentaires



des dimensions supplémentaires
aussi grandes qu'une fraction de
mm!

... voire même infinies dans certains scénarios plus compliqués....

... pour l'instant aucun signe de l'existence de ces dimensions, mais certains physiciens les recherchent activement...

