

# Pourquoi la Gravitation Quantique ?

Etera LIVINE

Mars 2025

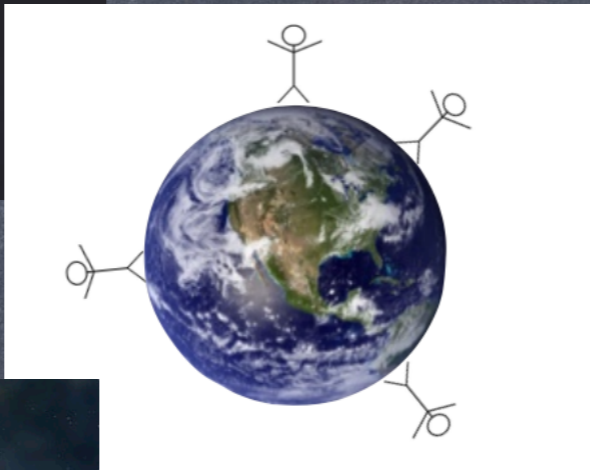


# Gravitation Quantique

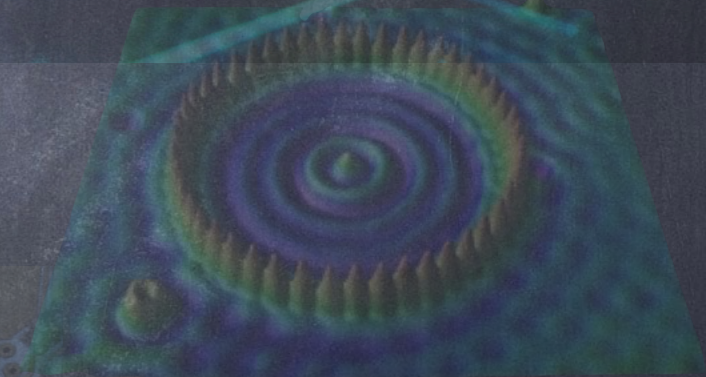
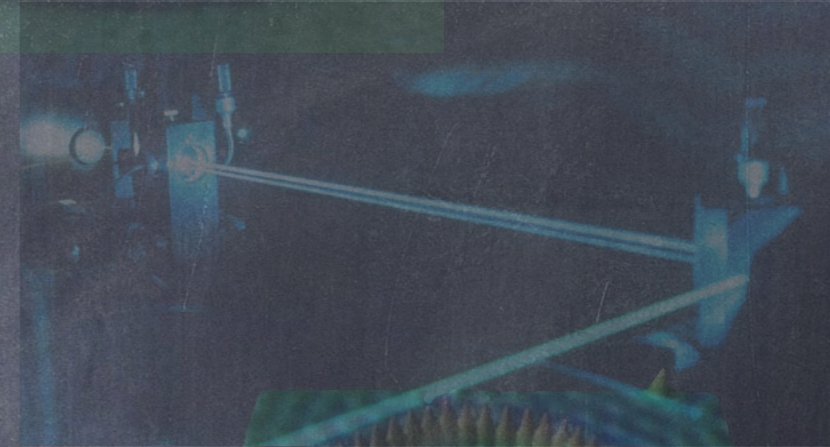
Gravitation

Quantique

# Gravitation



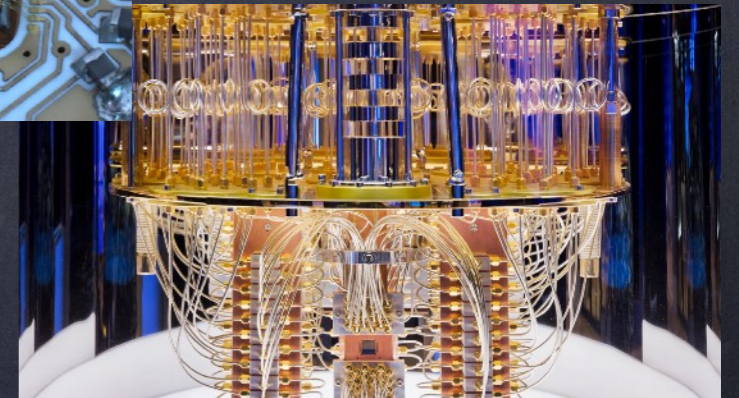
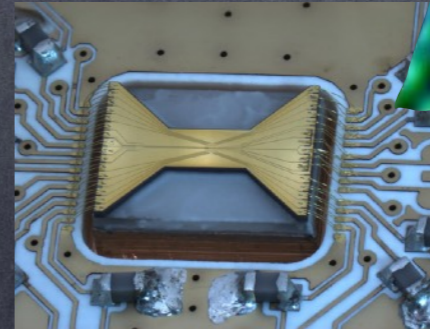
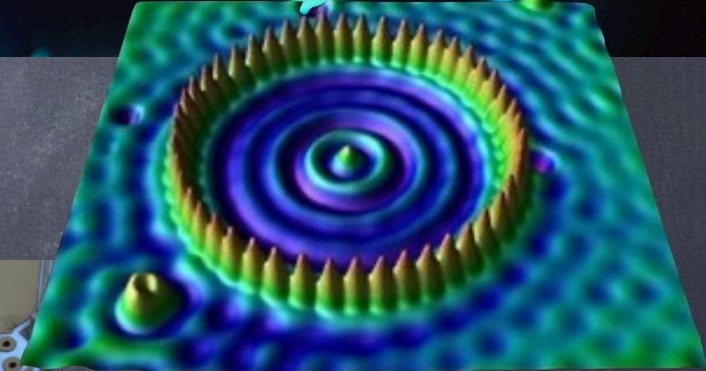
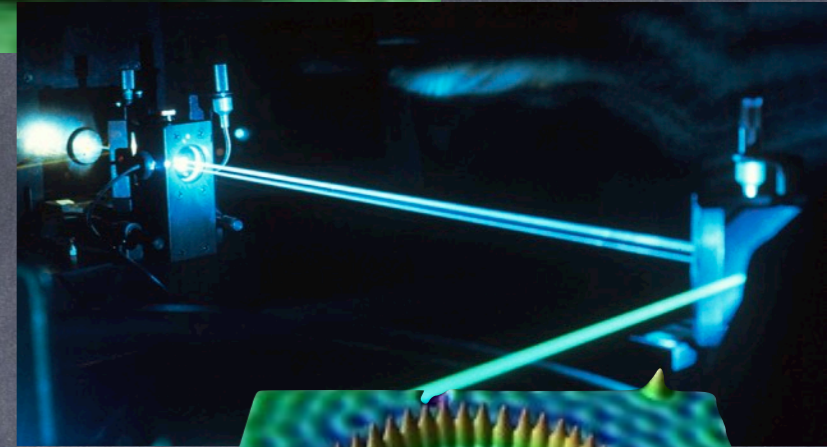
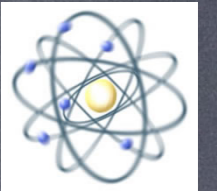
# Quantique



# Gravitation



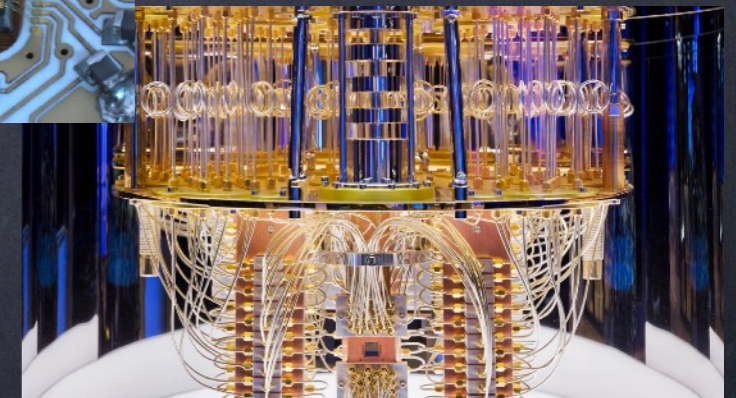
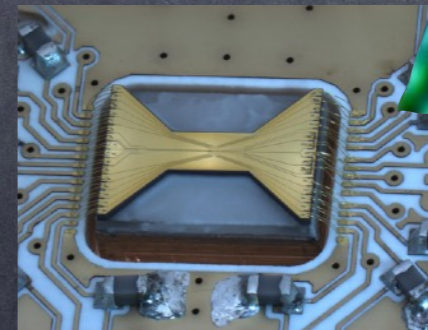
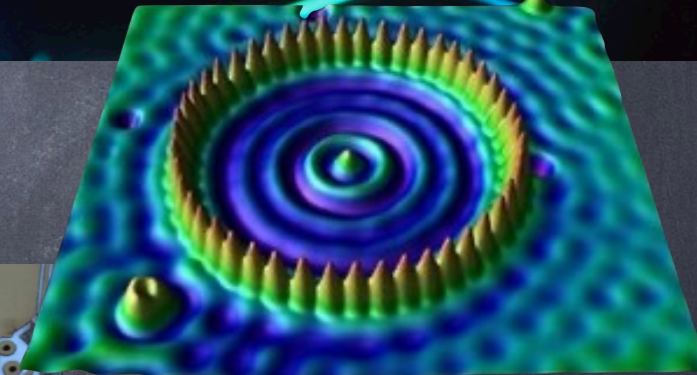
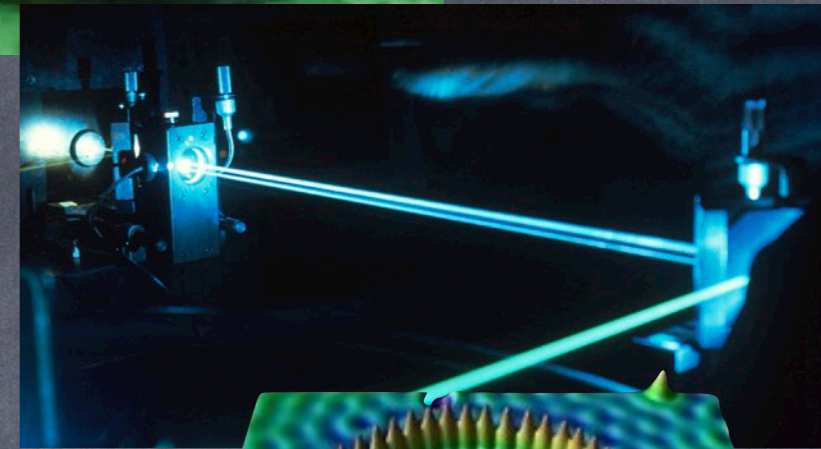
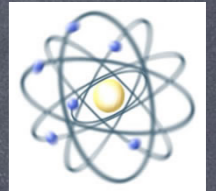
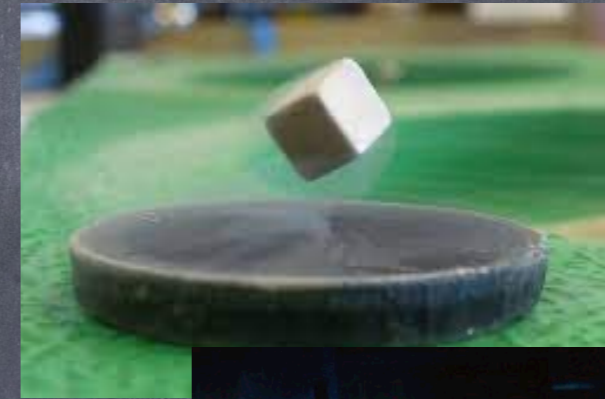
# Quantique



# Gravitation

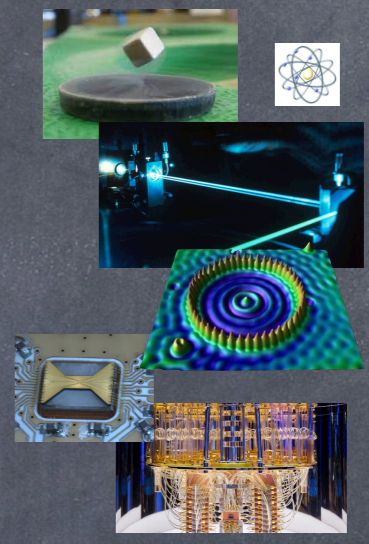


# Quantique



# Gravitation

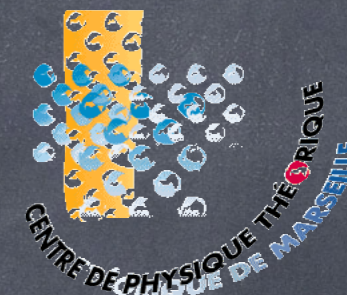
# Quantique



Gravitation Quantique ?

E. LIVINE

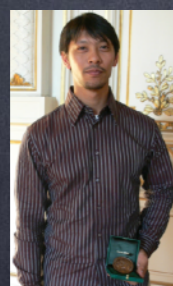
Directeur de Recherche CNRS  
Responsable Physique Théorique  
Laboratoire de Physique de L'ENS de LYON



Doctorat en 2003

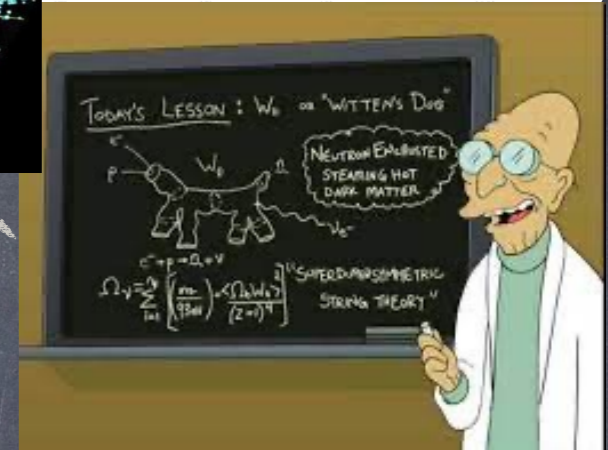
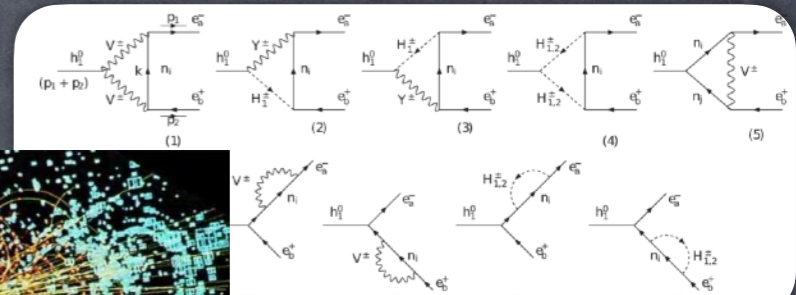
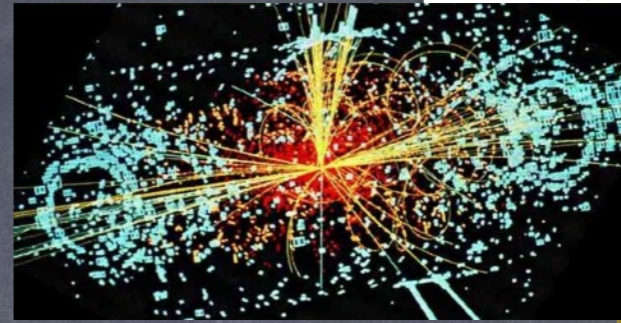
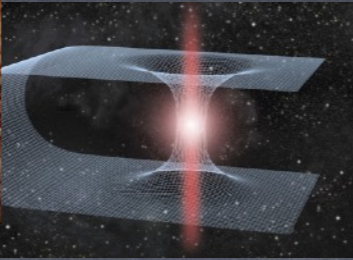
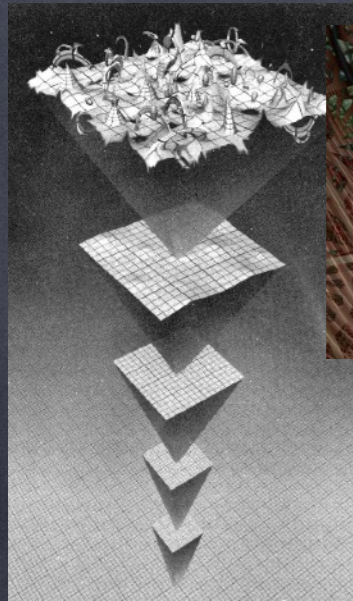


Depuis 2005

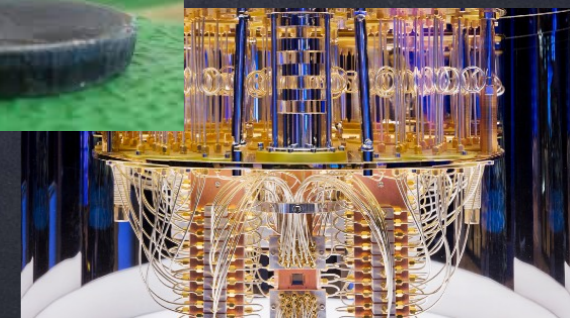
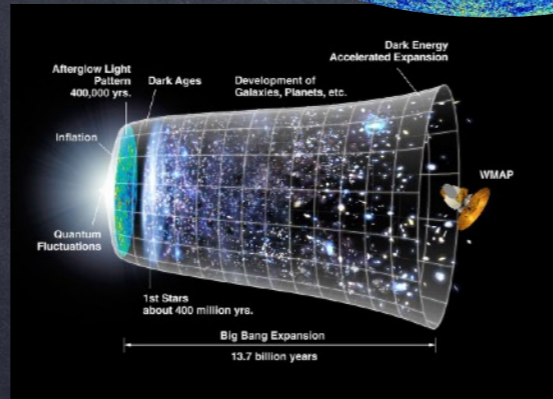
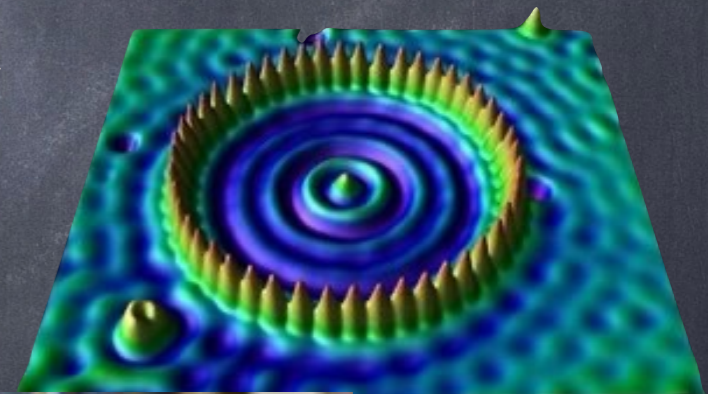
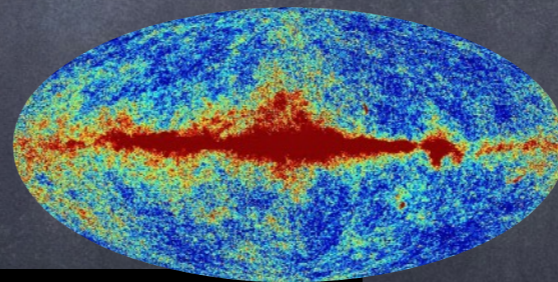
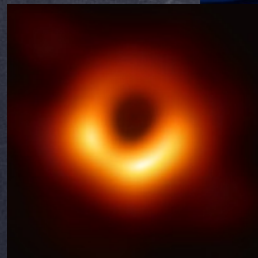
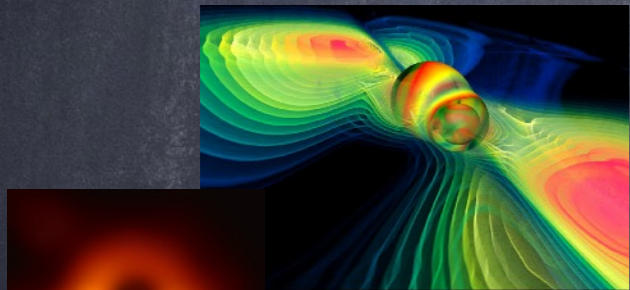




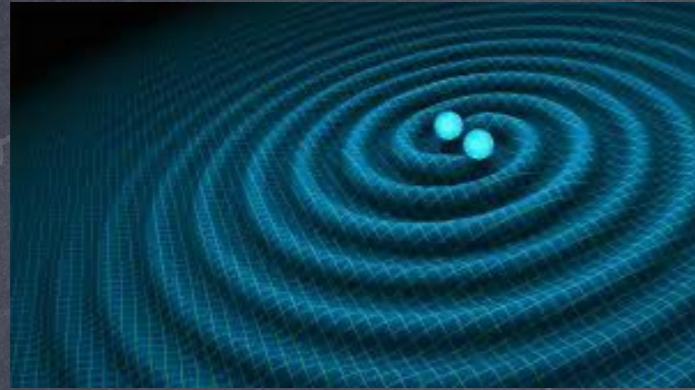
Physique Théorique  
Gravitation classique  
& quantique



Physique Théorique  
 Gravitation classique  
 & quantique

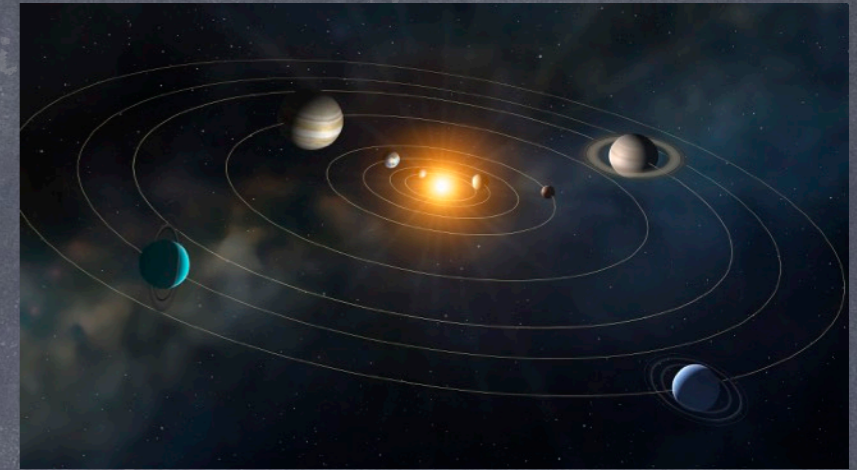


Nature



Hautes Energies:

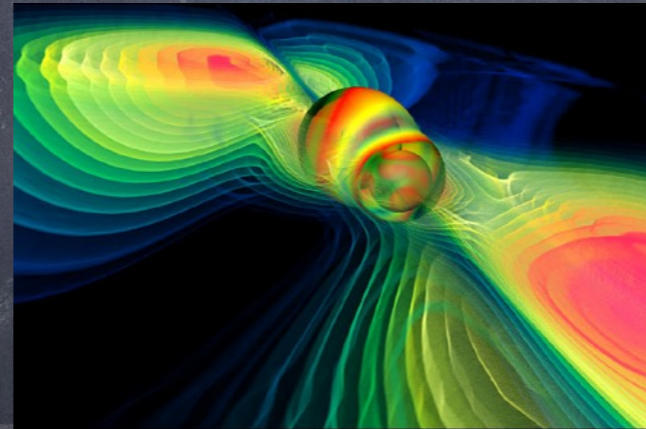
Physique  
théorie



Physique Théorique  
Gravitation classique  
& quantique



Astrophysique:  
Dynamique céleste,  
galaxies, étoiles, ...

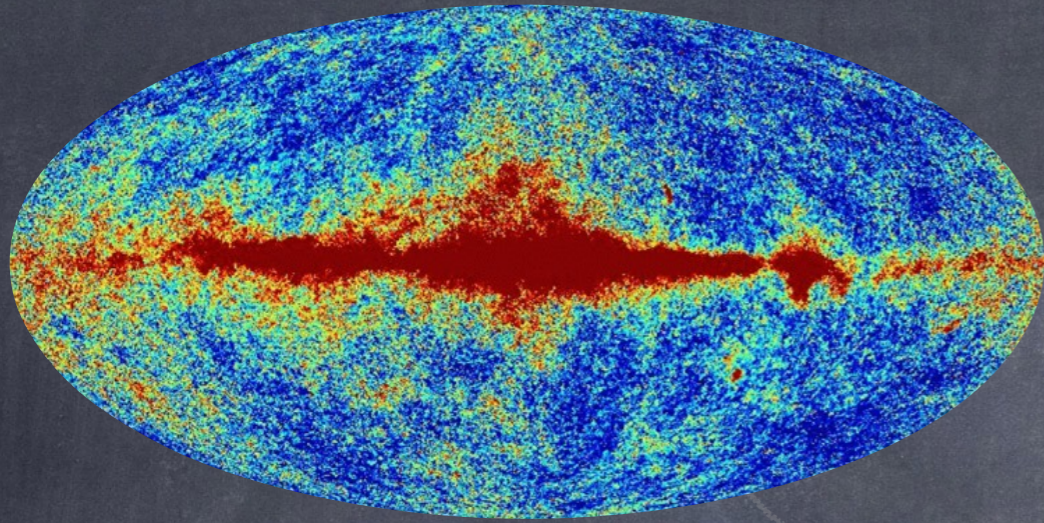


Expansion de l'Univers,  
formation



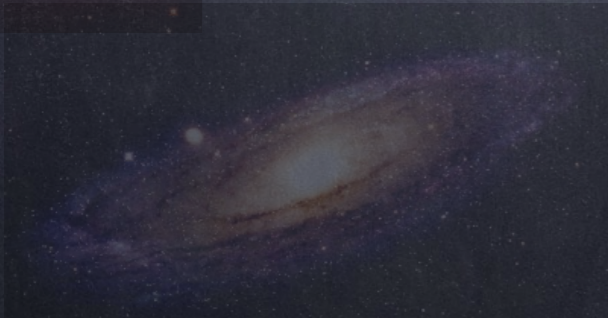
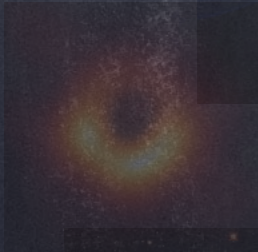
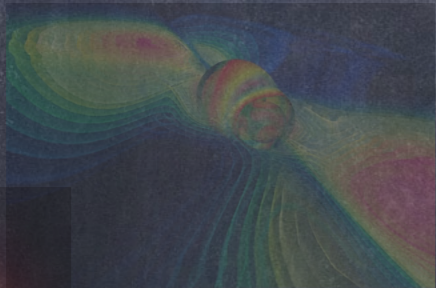
Mécanique  
Quantique :  
Physique atomique,  
superposition quantique,  
fonction d'onde



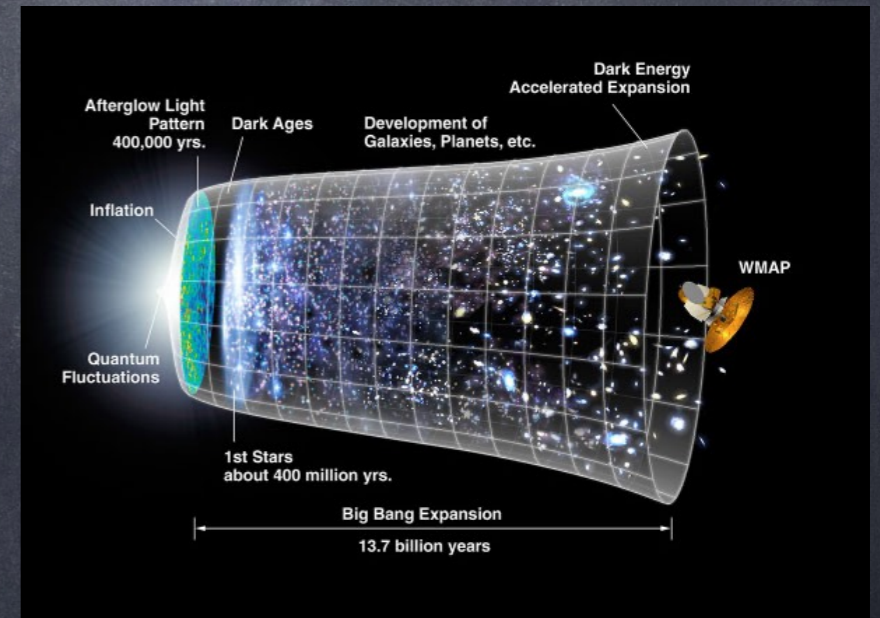


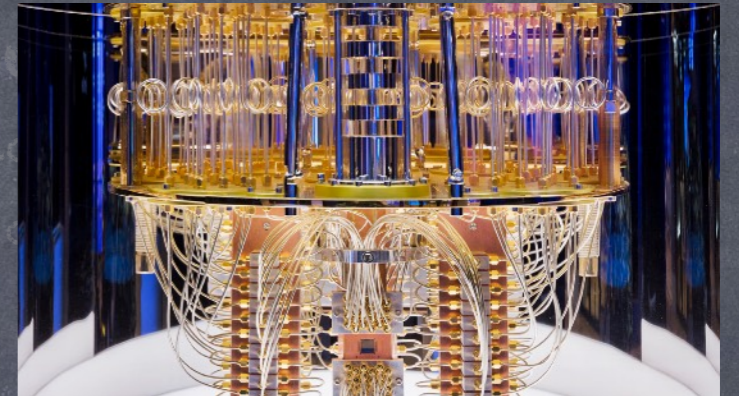
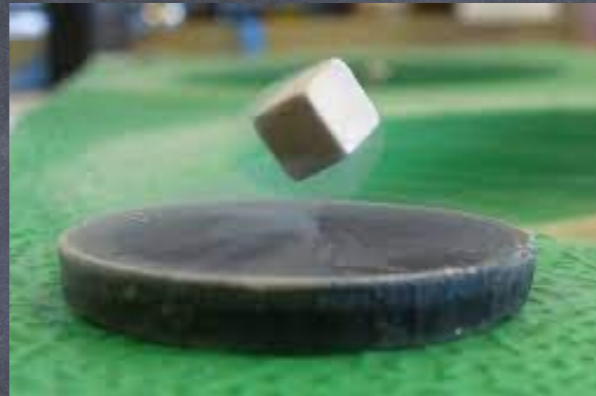
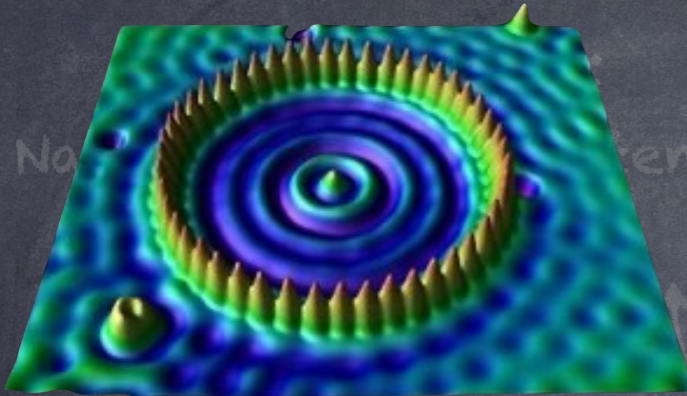
Hautes Energies:  
Physique des particules,  
théorie quantique des champs

Physique Théorique  
Gravitation classique  
& quantique



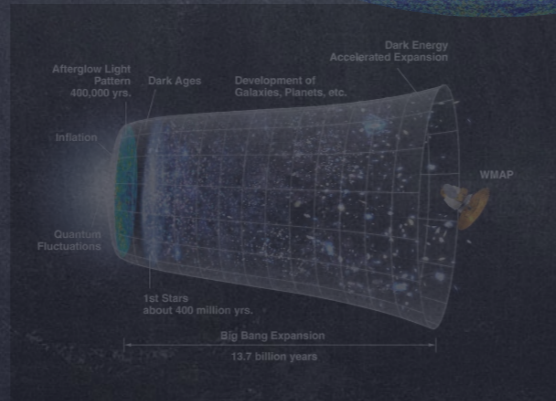
Cosmologie :  
Expansion de l'Univers,  
formation des Structures

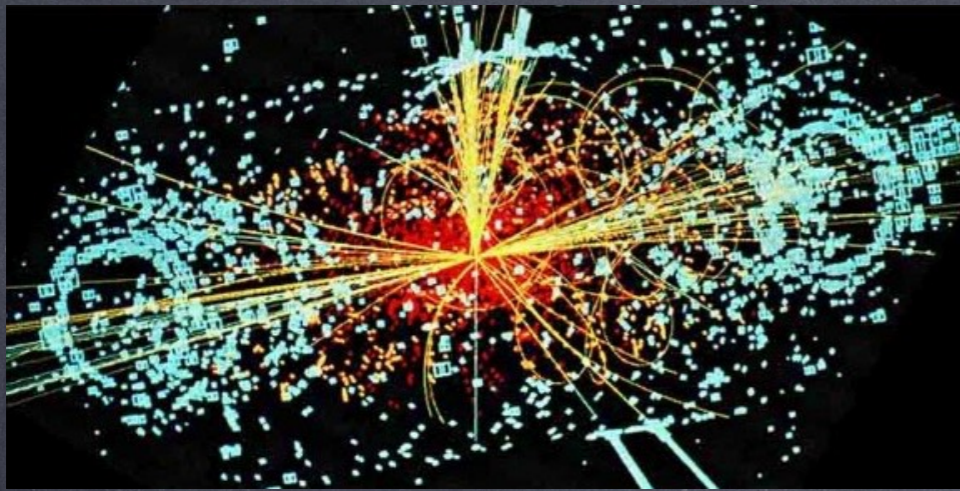




Physique Théorique  
Gravitation classique  
& quantique

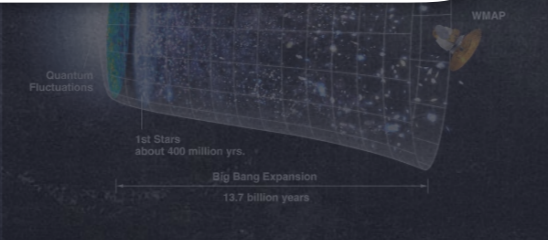
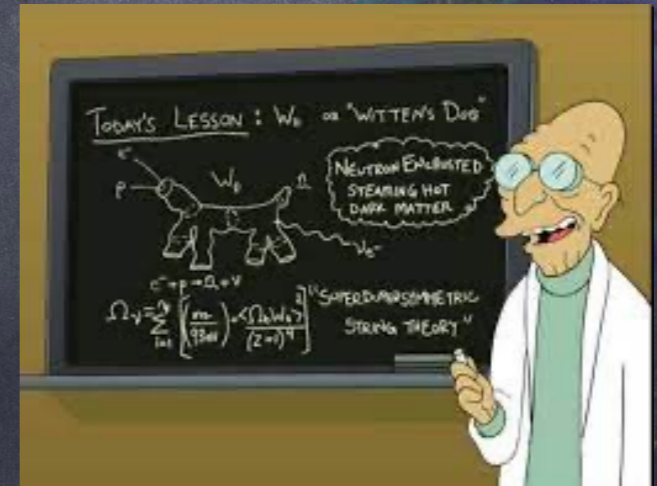
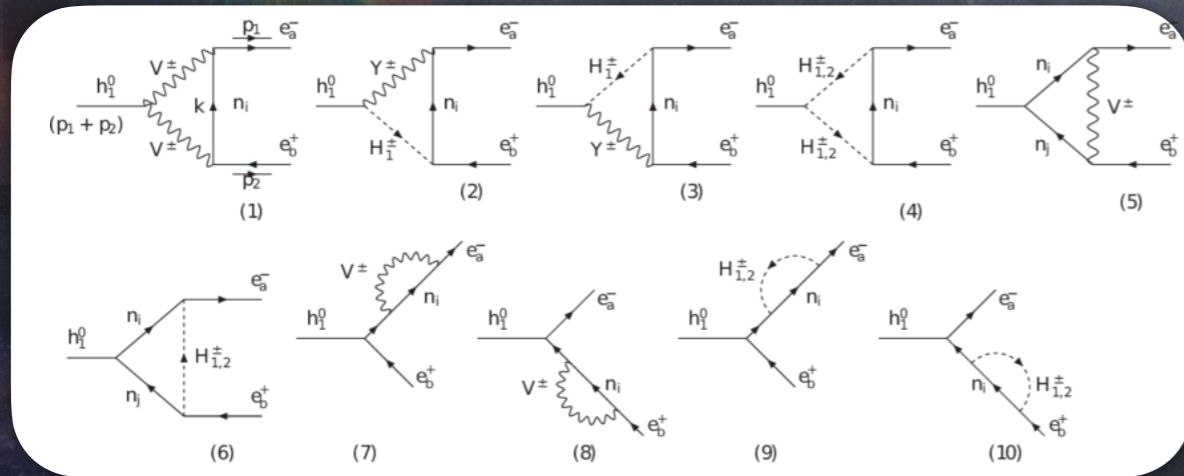
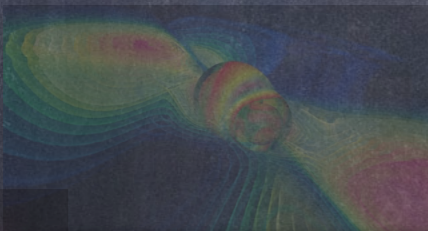
Mécanique  
Quantique :  
Physique atomique,  
superposition quantique,  
fonction d'onde



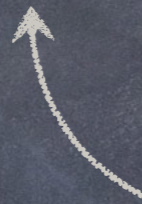


Hautes Energies:  
 Physique des particules,  
 théorie quantique des champs,  
 théorie des cordes

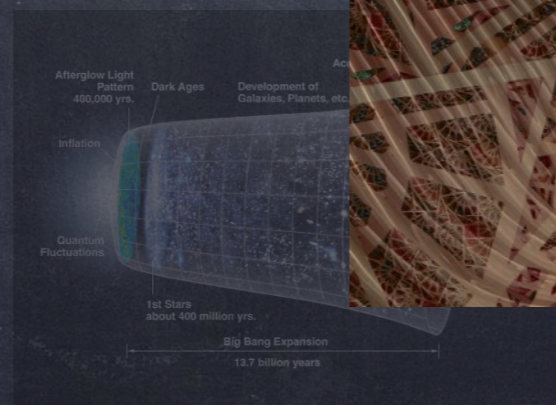
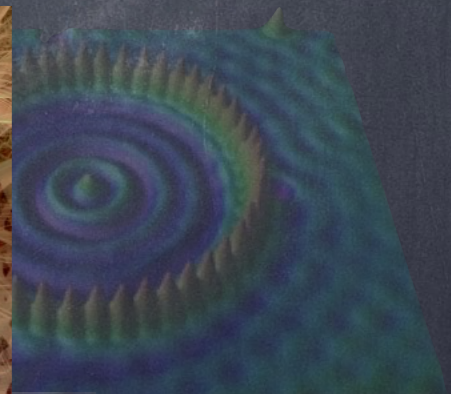
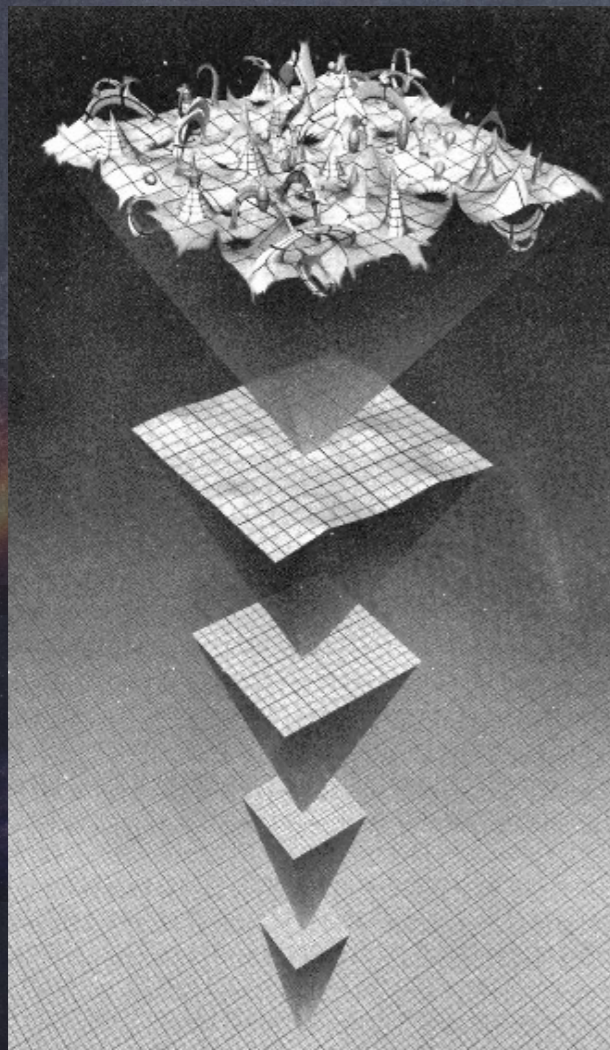
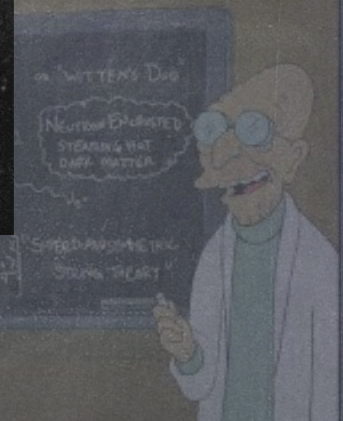
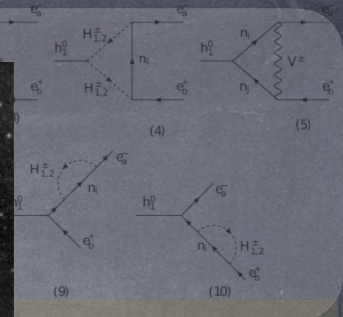
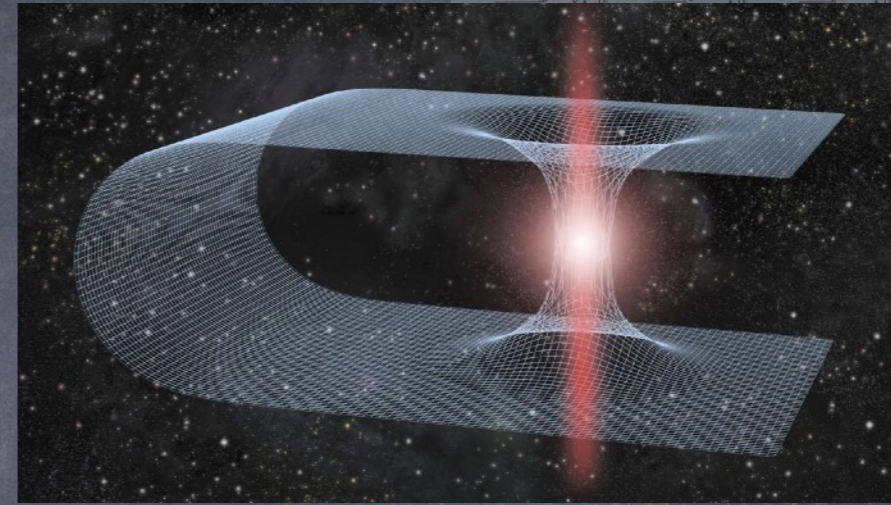
Physique Théorique  
 Gravitation classique  
 & quantique



Relativité:  
Nature de l'Espace-temps ?  
Gravité Quantique ?



Physique Théorique  
Gravitation classique  
& quantique



Relativité:

Nature de l'Espace-temps ?  
Gravité Quantique ?

Hautes Energies:

Physique des particules,  
théorie quantique des champs  
théorie des cordes

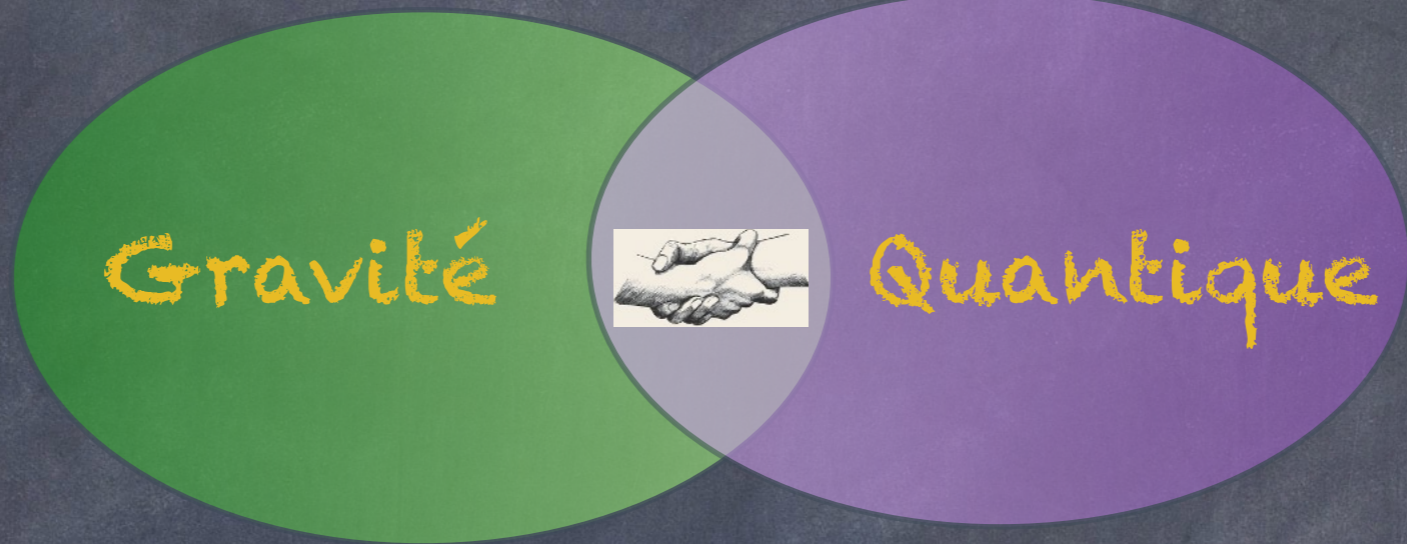
Physique Théorique  
Gravitation classique  
& quantique

Astrophysique:  
Dynamique céleste,  
galaxies, étoiles, ...

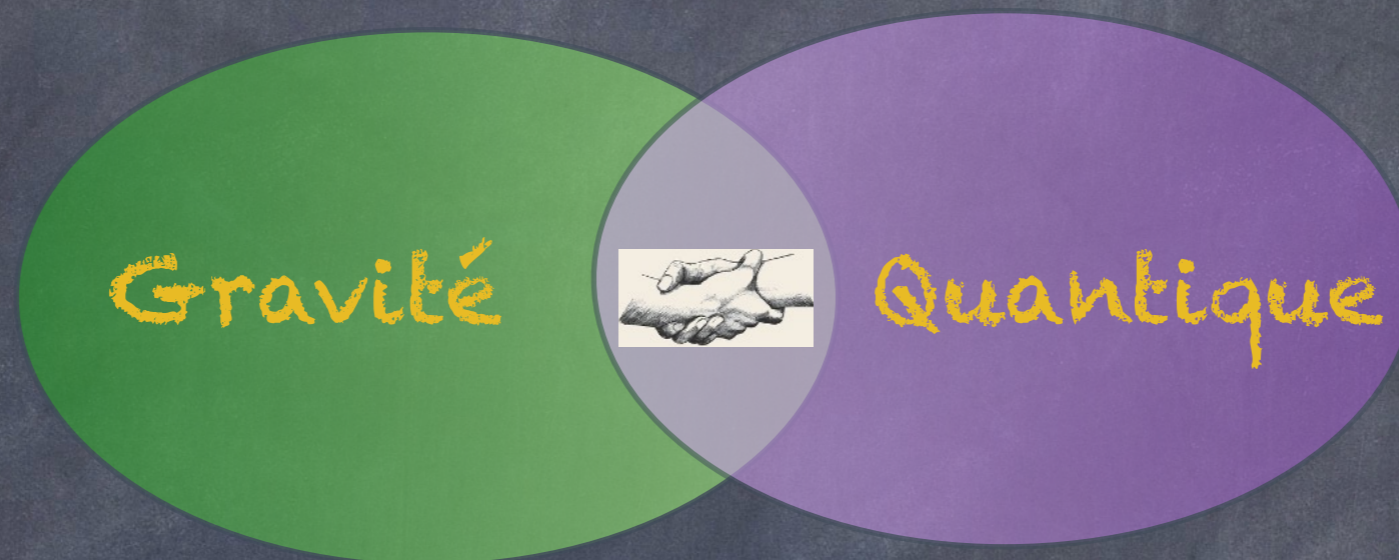
Cosmologie :  
Expansion de l'Univers,  
formation des Structures

Mécanique  
Quantique :  
Physique atomique,  
superposition quantique,  
fonction d'onde

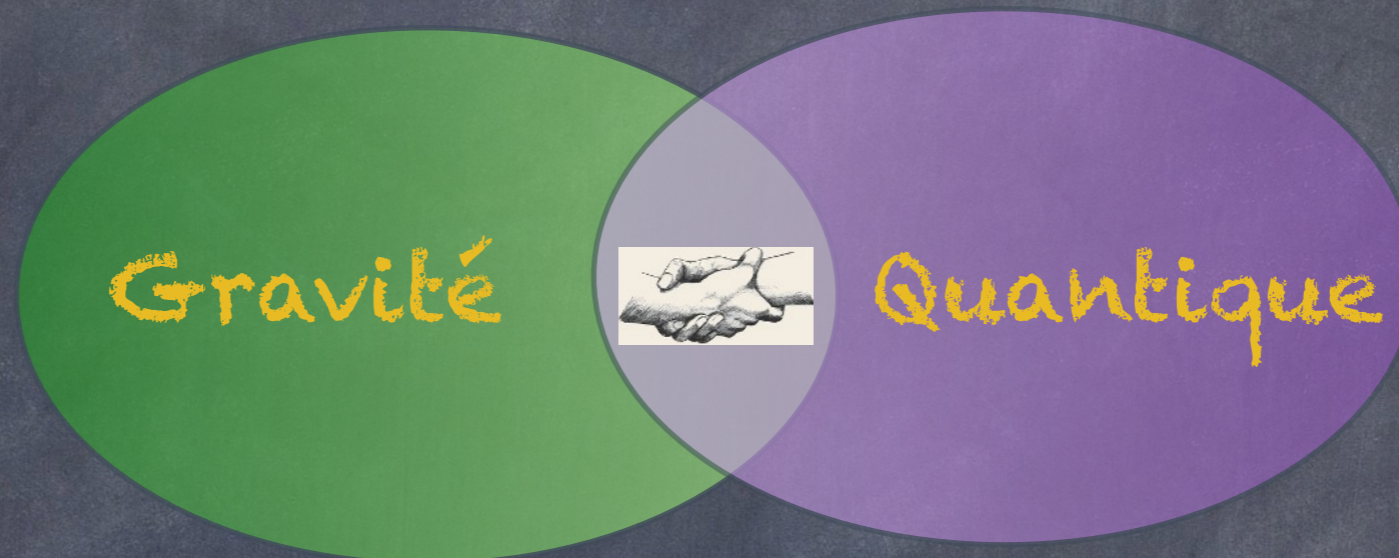




Notre univers mêle élégamment  
Gravitation et Quantique

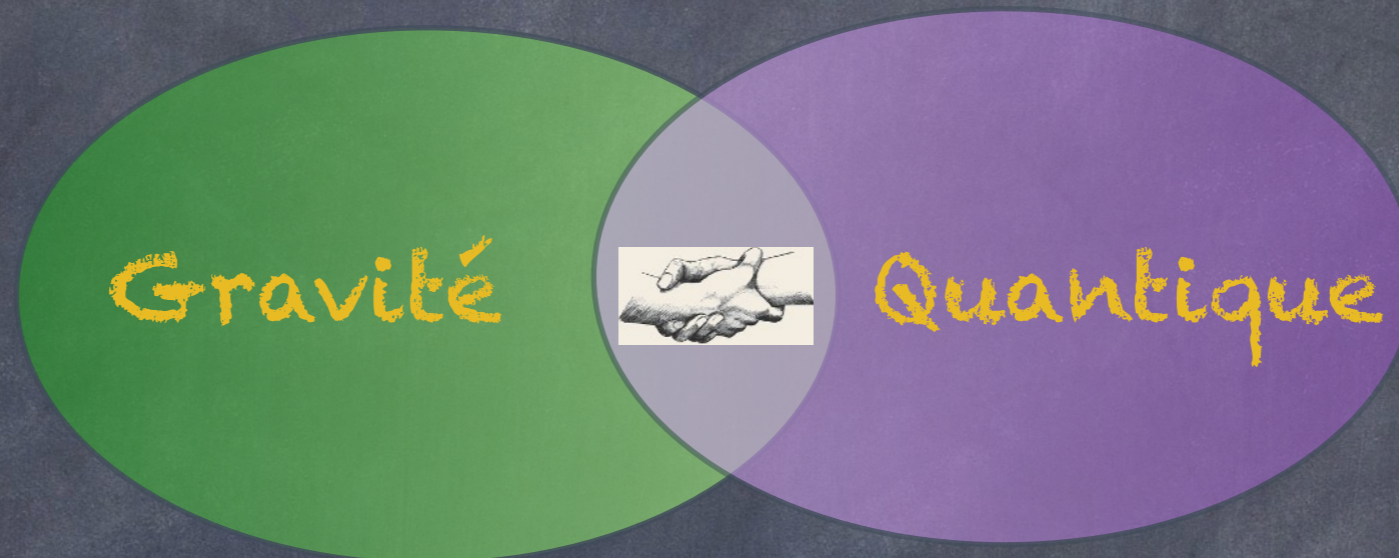


Notre univers mêle élégamment  
Gravitation et Quantique

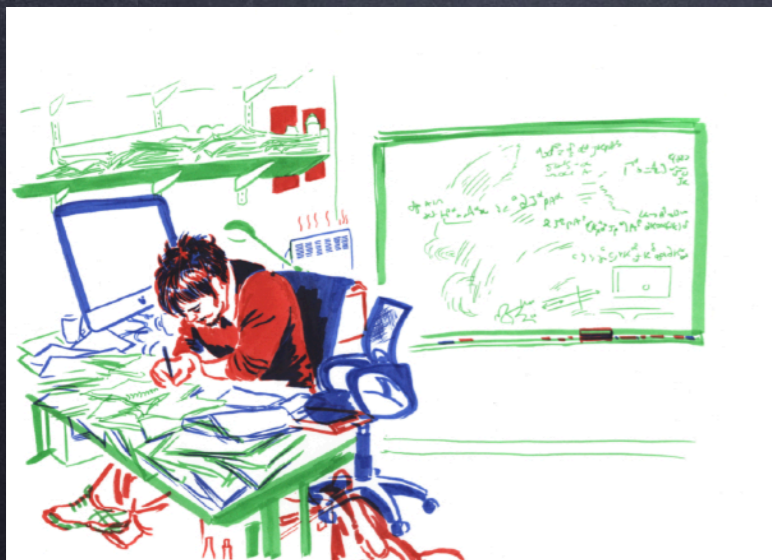


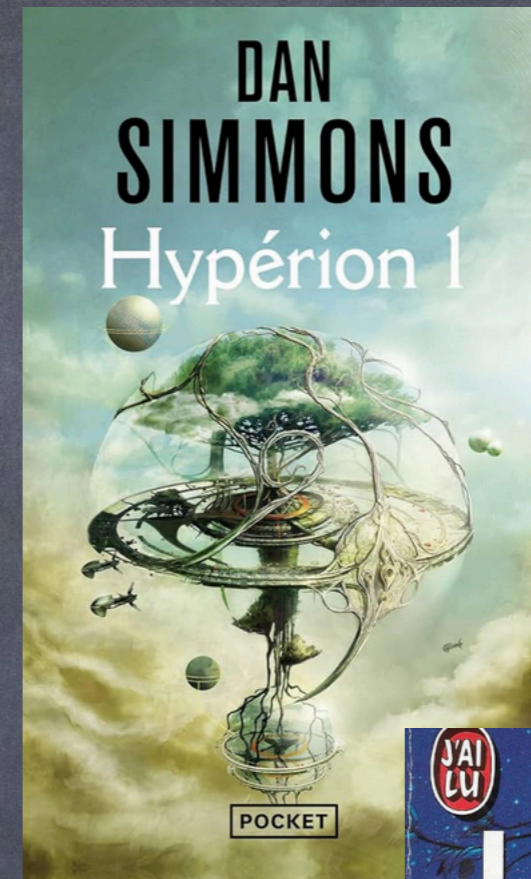
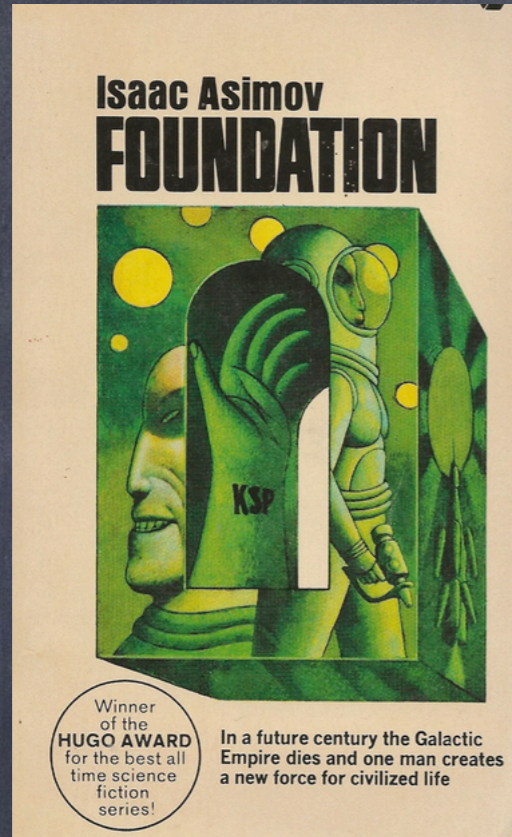
Reste à comprendre comment !!

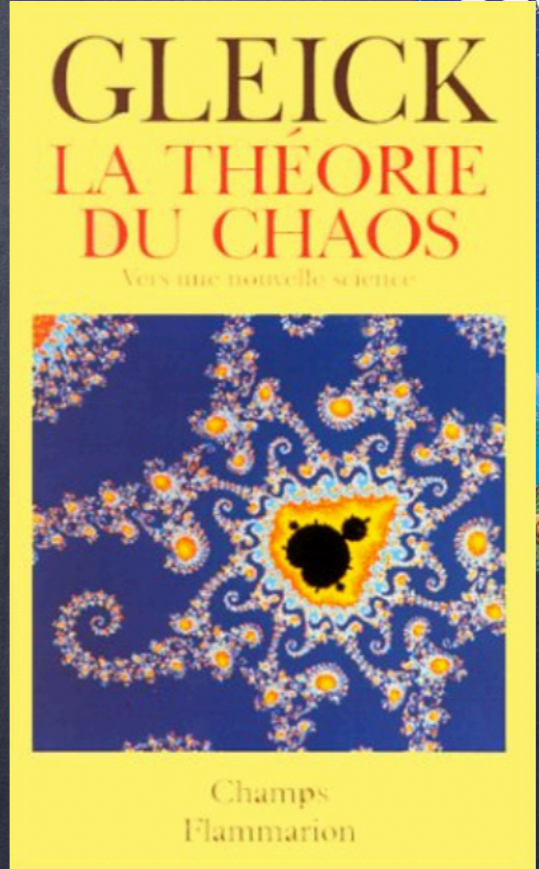
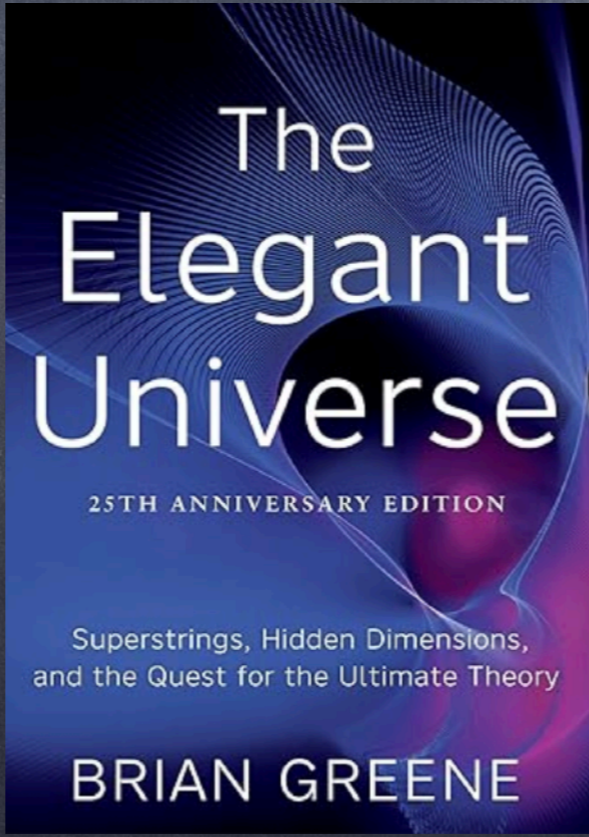
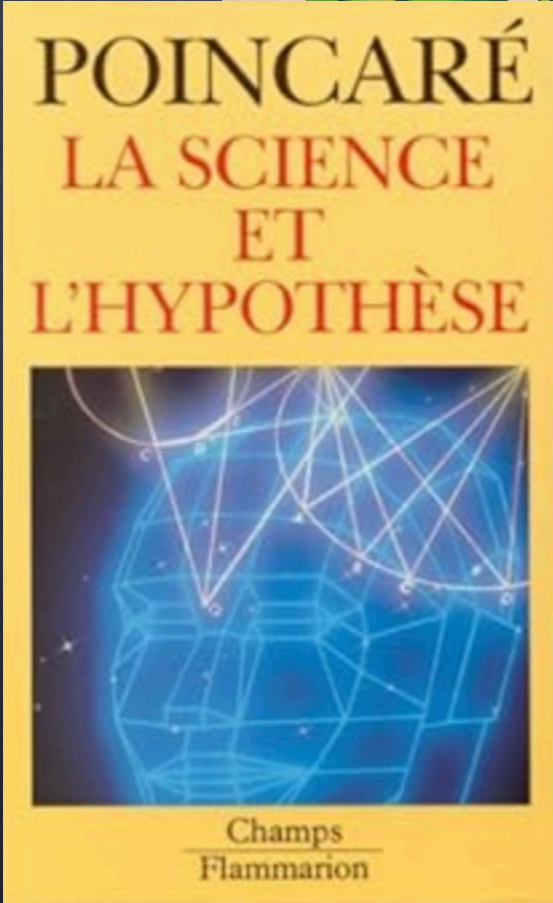
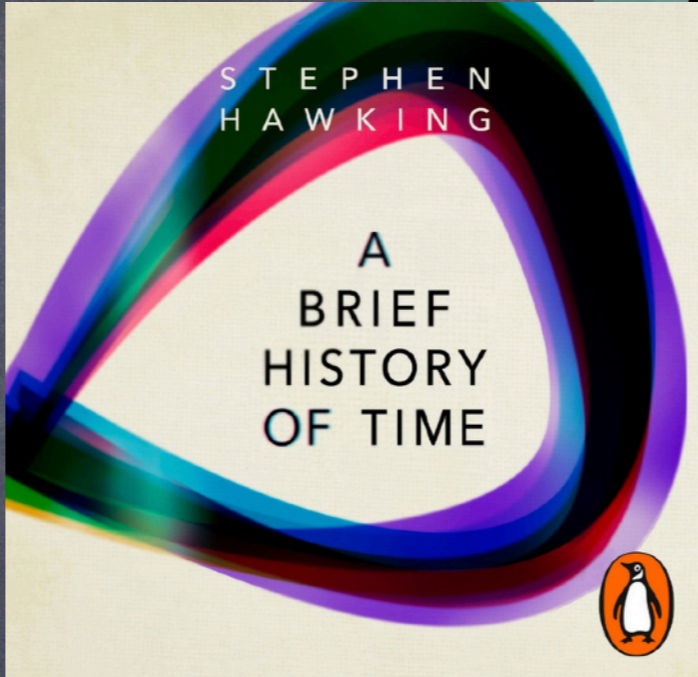
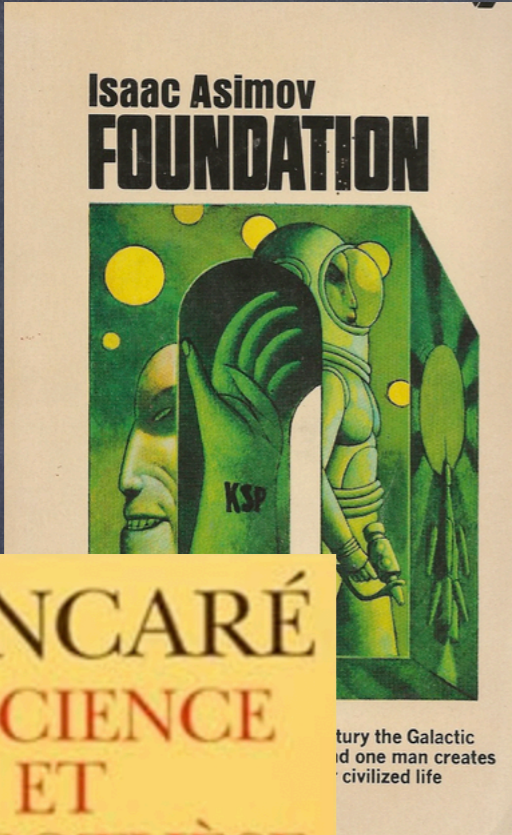
# Notre univers mêle élégamment Gravitation et Quantique



Reste à comprendre comment !!







Comprendre la  
structure de l'univers,  
de l'espace et du temps



Comprendre la  
structure de l'univers,  
de l'espace et du temps

Et pourquoi pas ...

Trouver une nouvelle loi de la nature,  
Inventer une nouvelle particule,  
Unifier les forces,  
Construire un super vaisseau spatial,  
Explorer un trou noir, ... ?



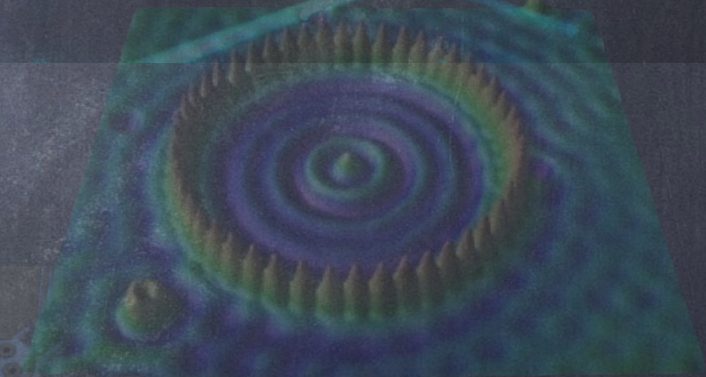
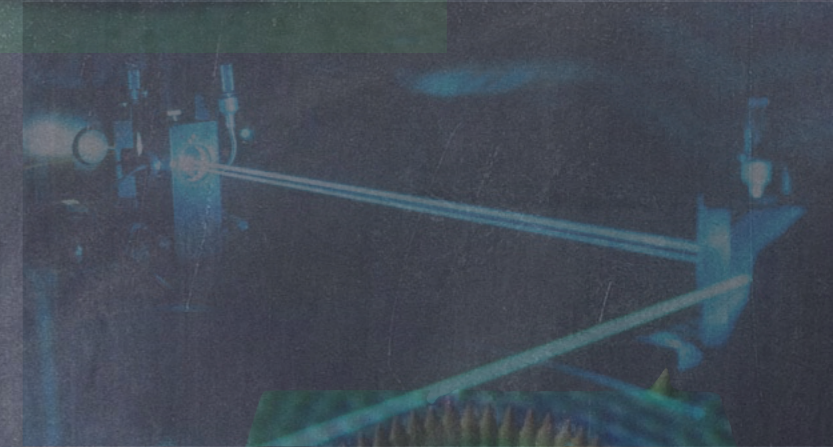
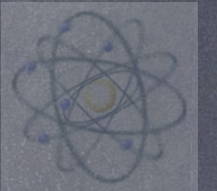




# Gravitation

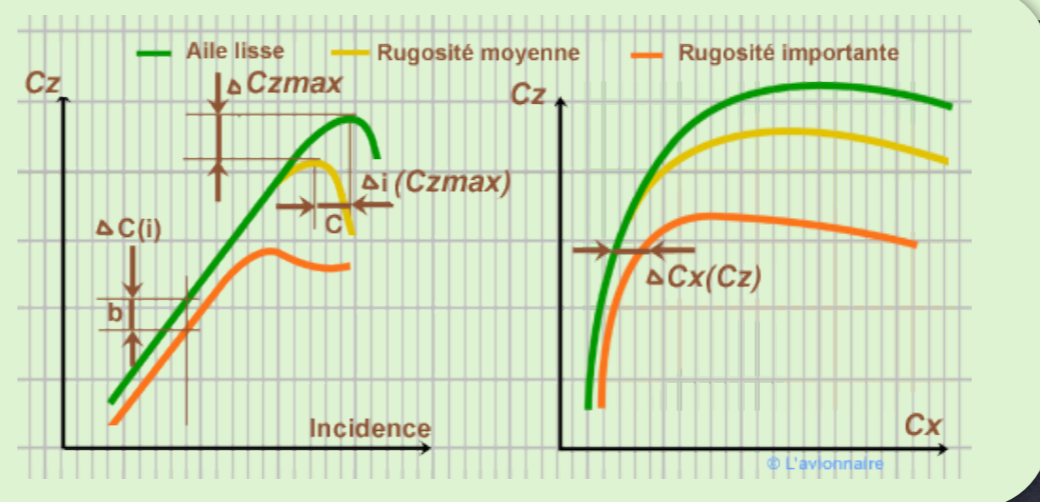
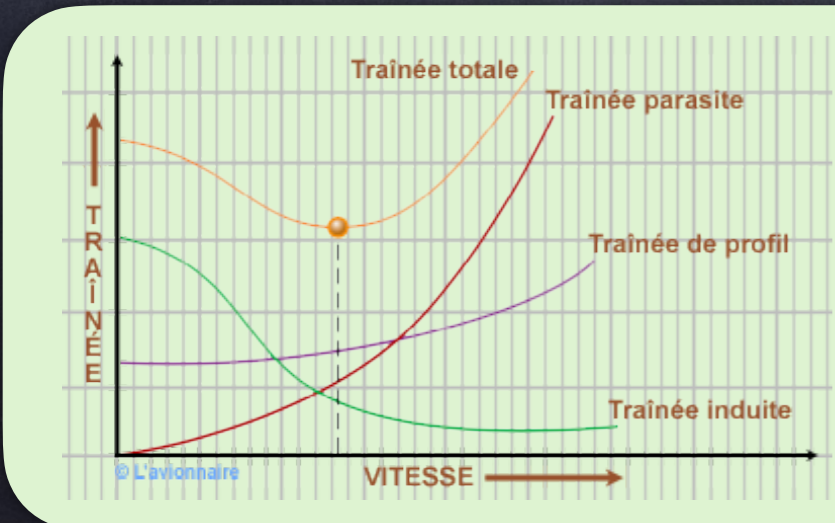
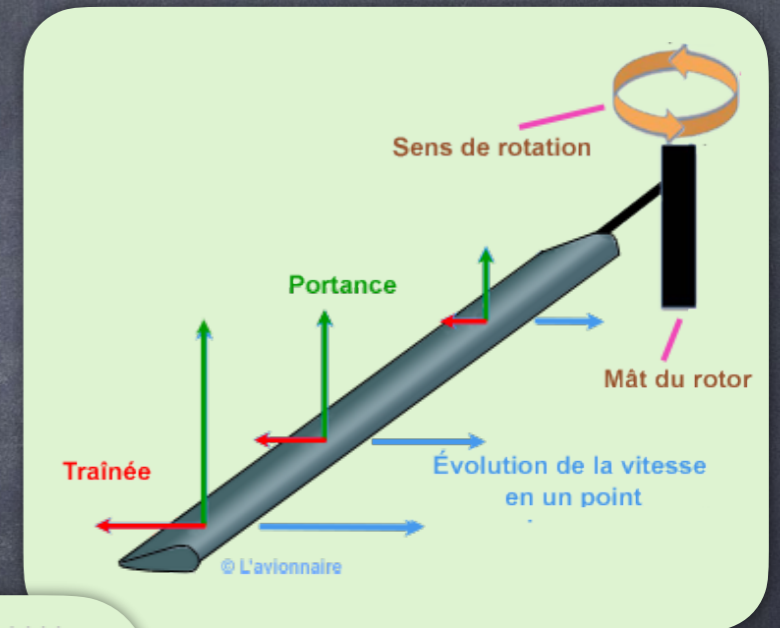
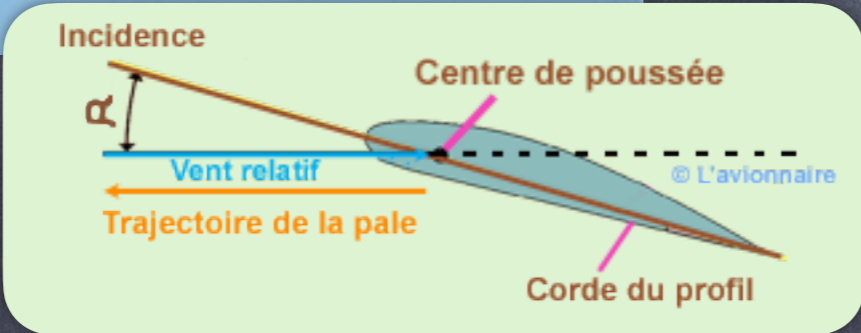
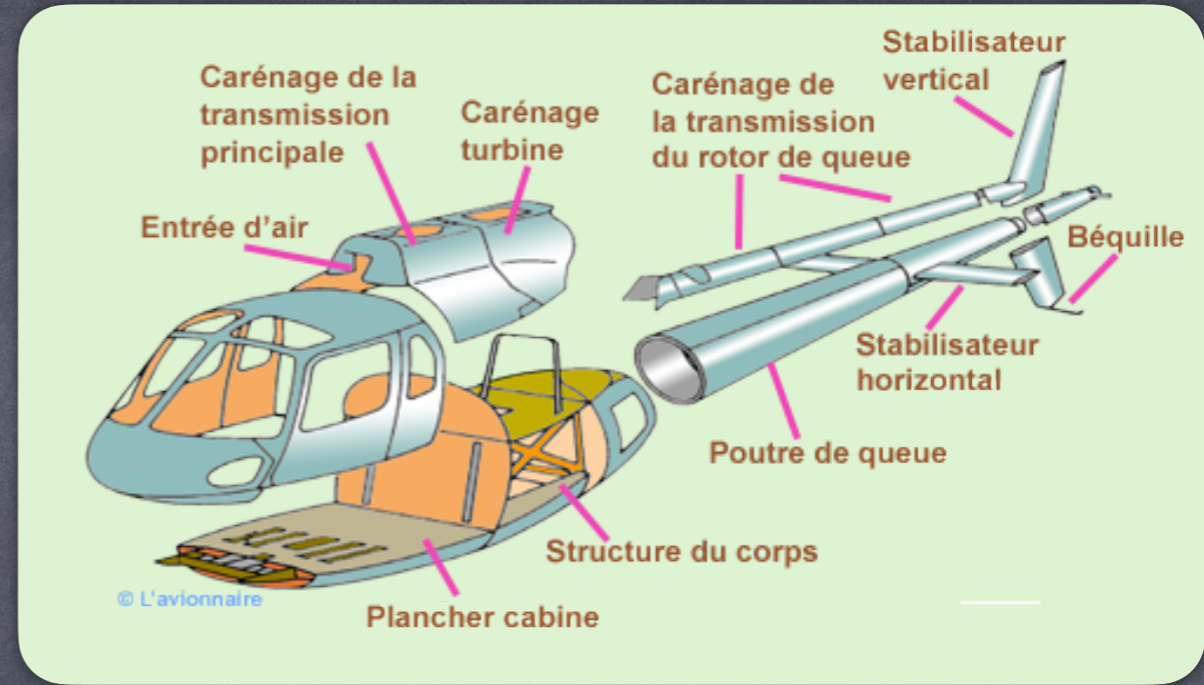


# Quantique



Plongeons dans la Gravitation

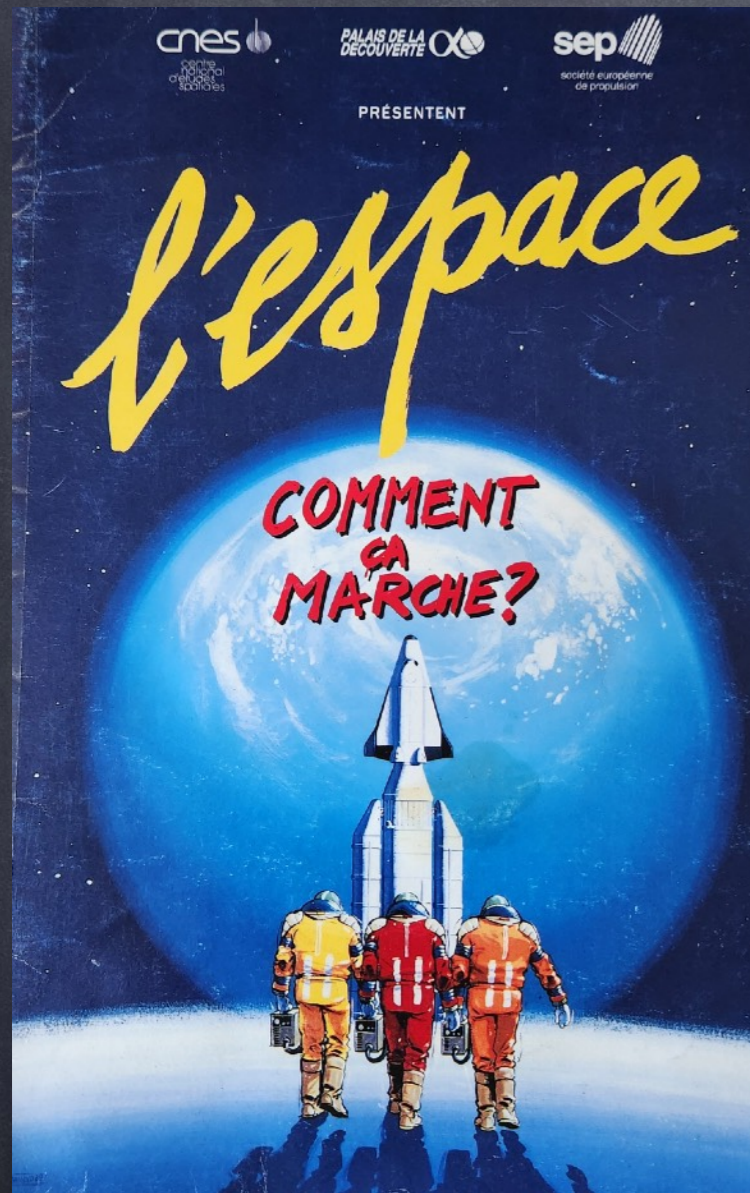
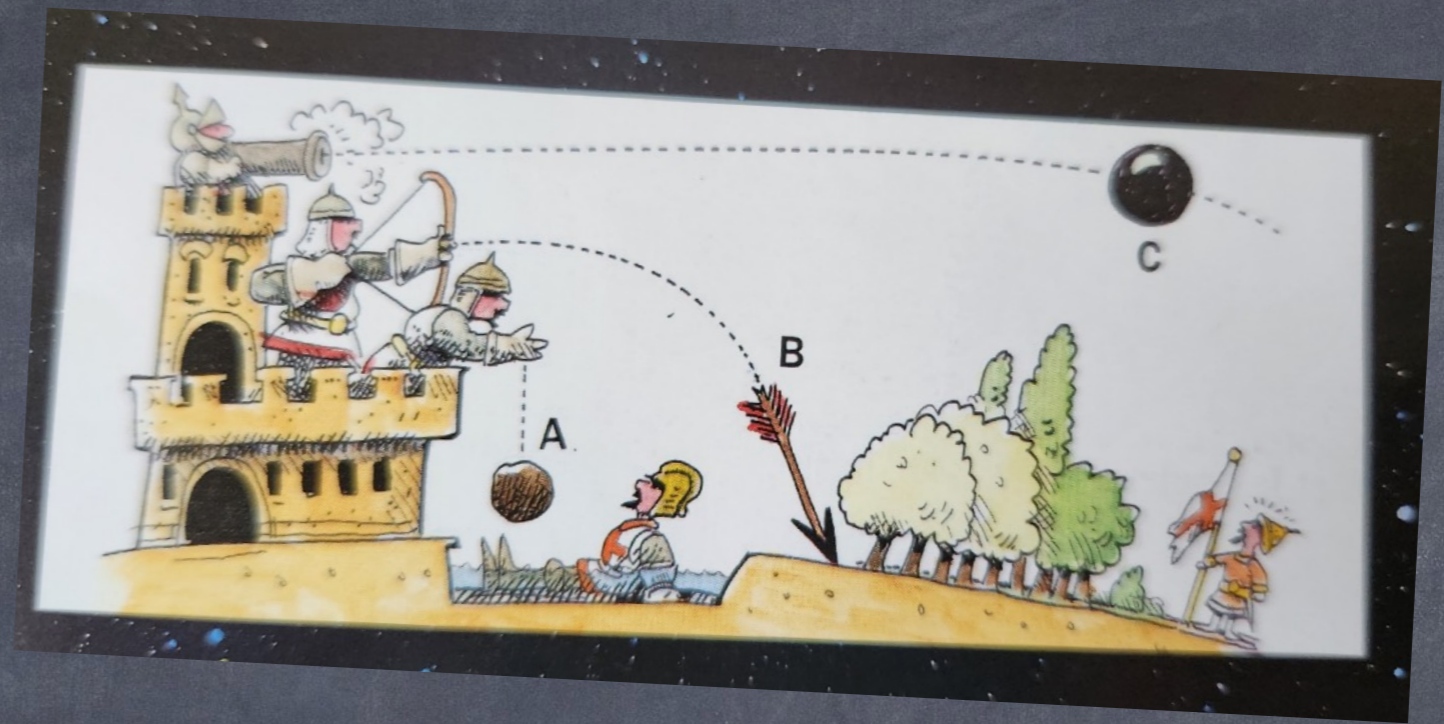
# E. LIVINE



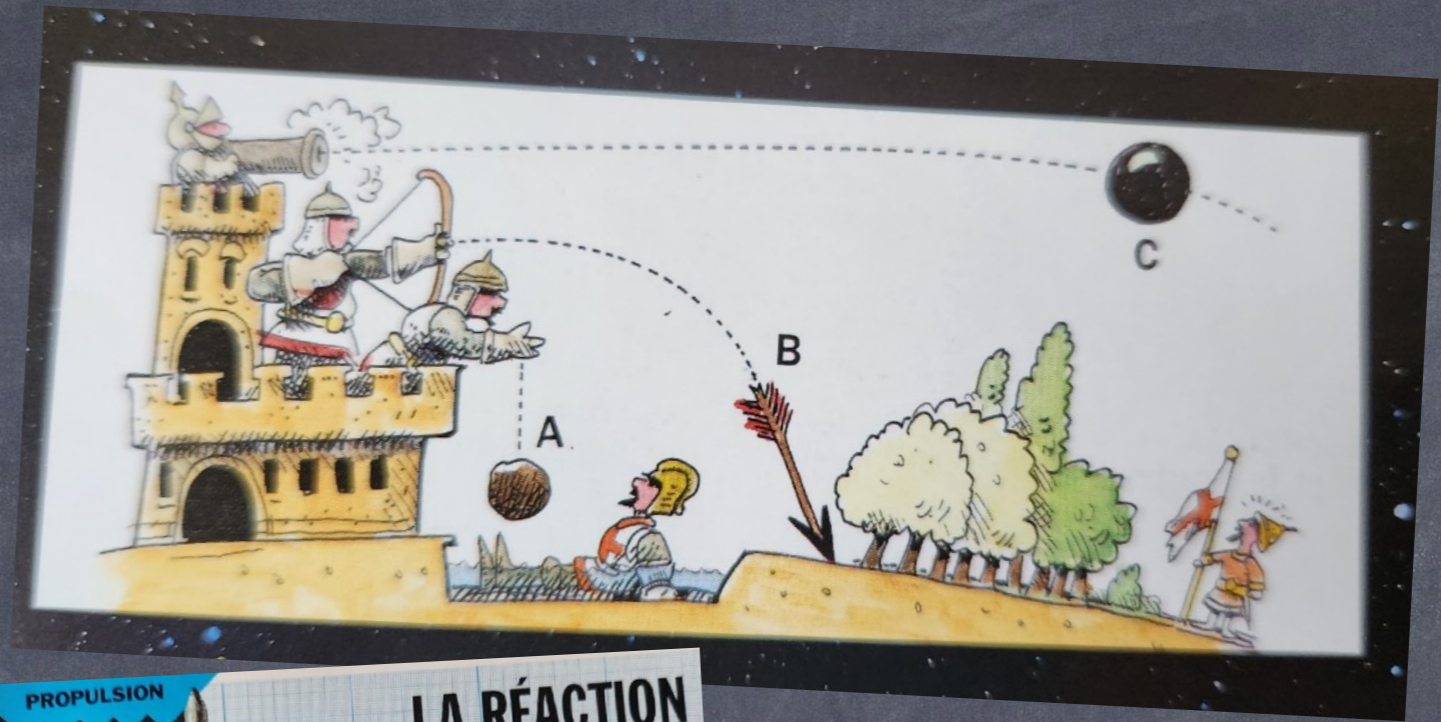
E. LIVINE



E. LIVINE



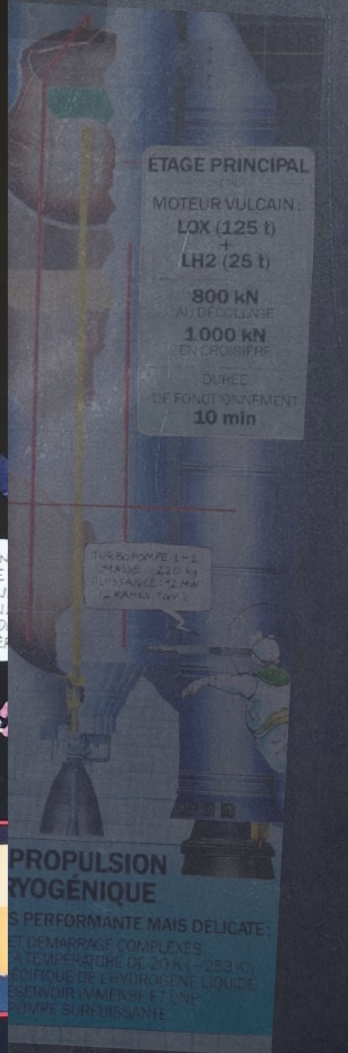
E. LIVINE





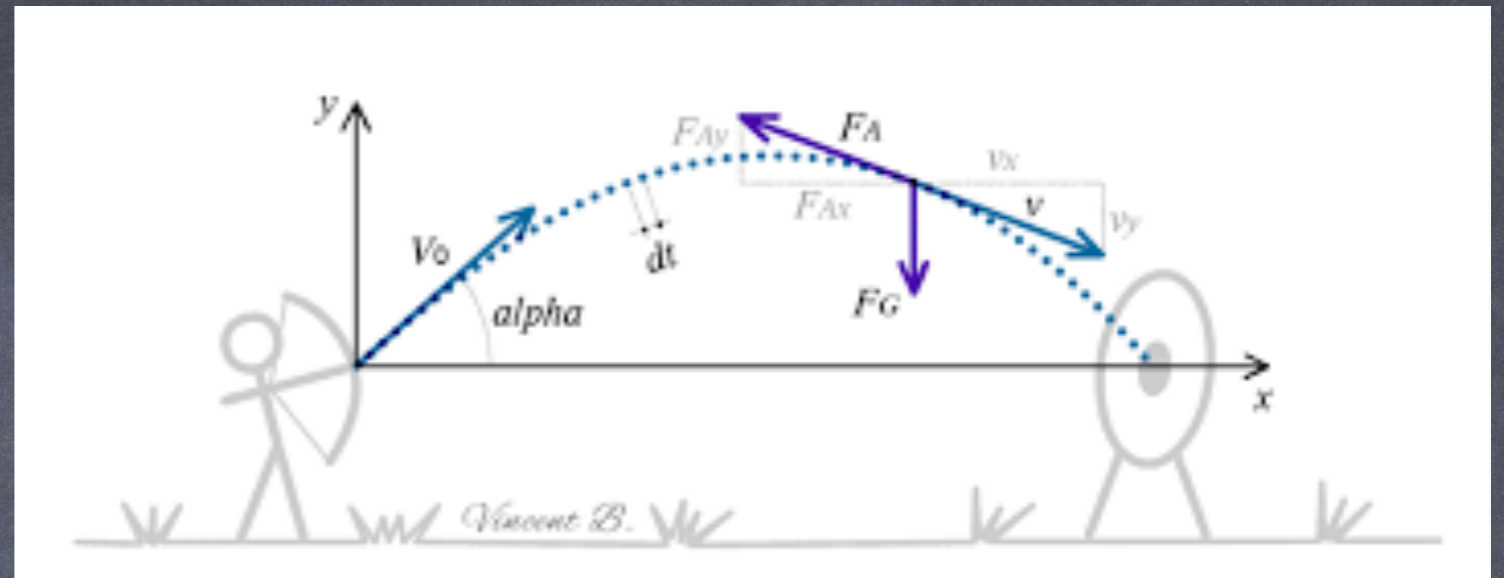
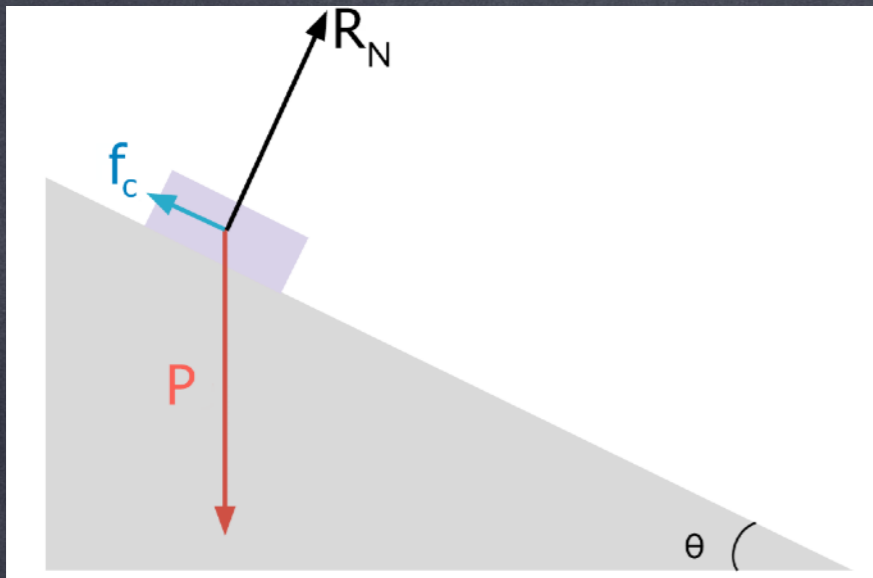


E. LIVINE



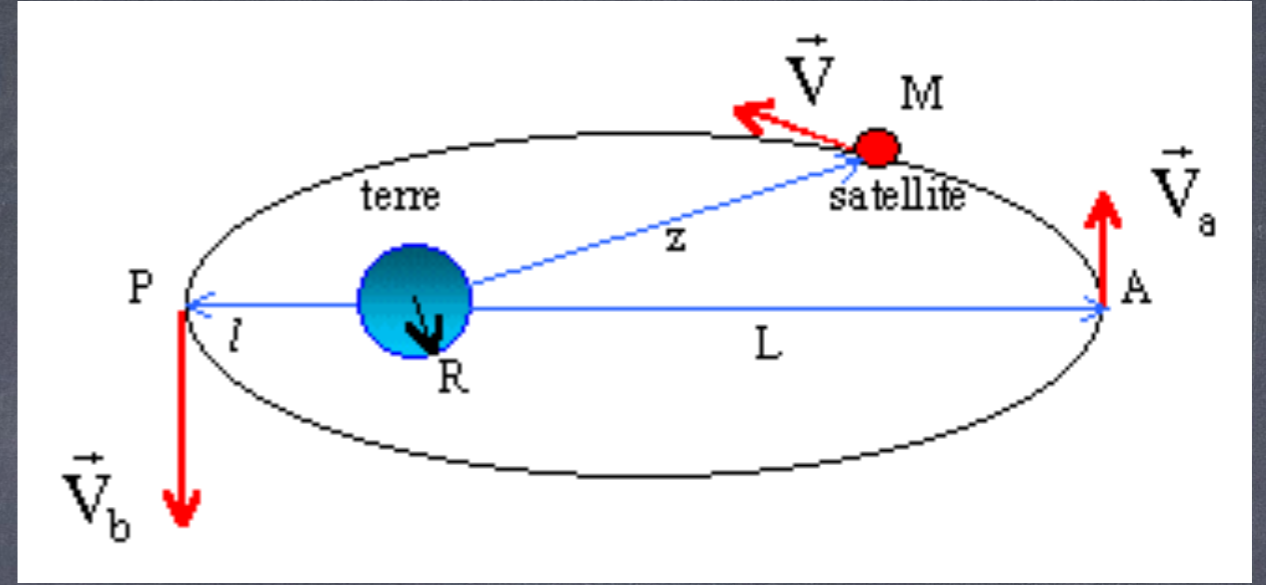
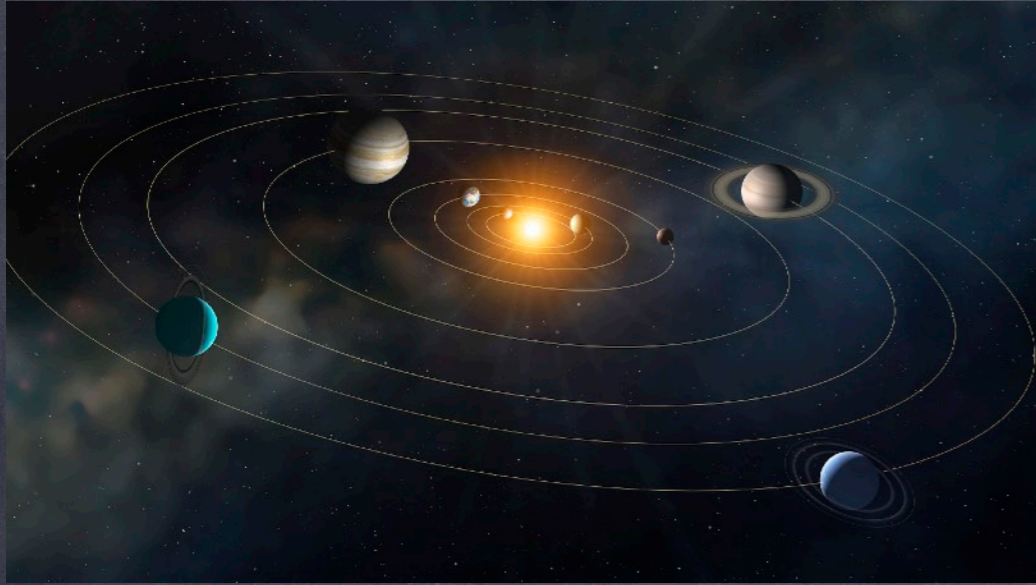
# La Gravitation fait tomber les choses sur Terre



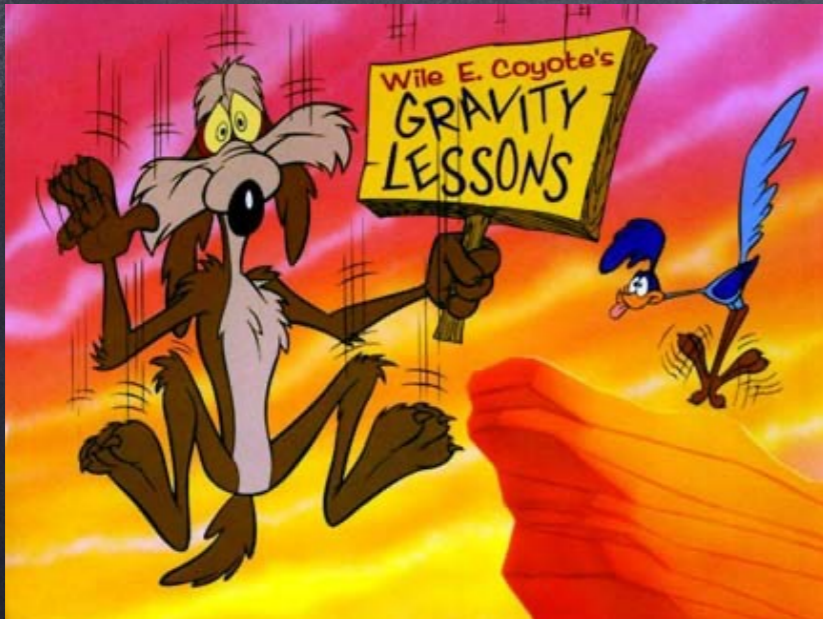


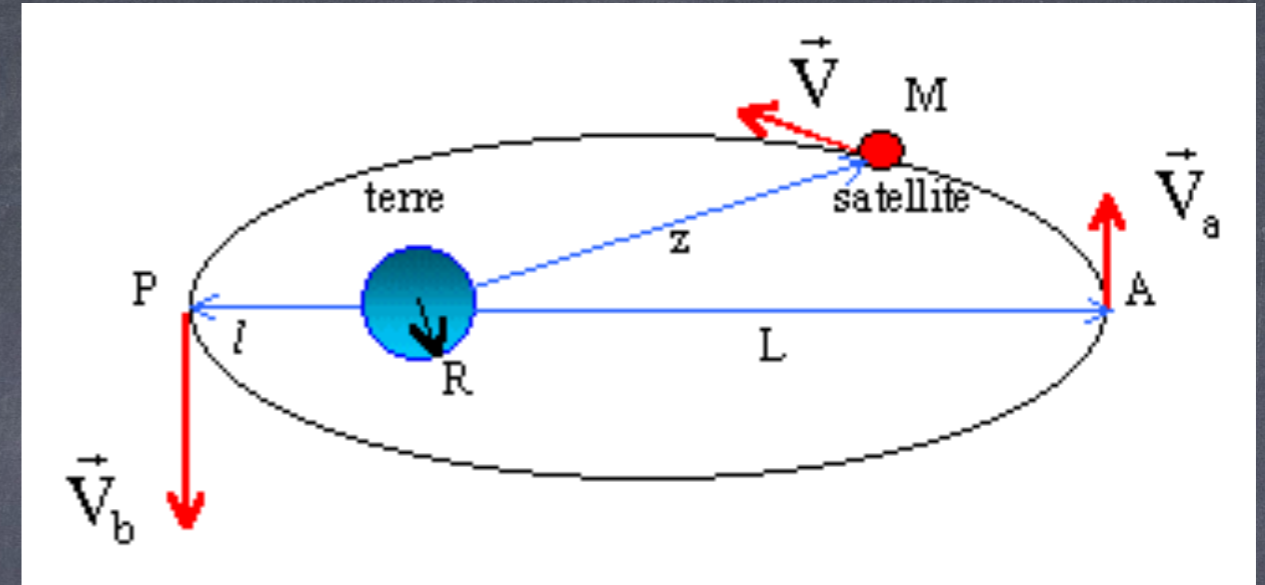
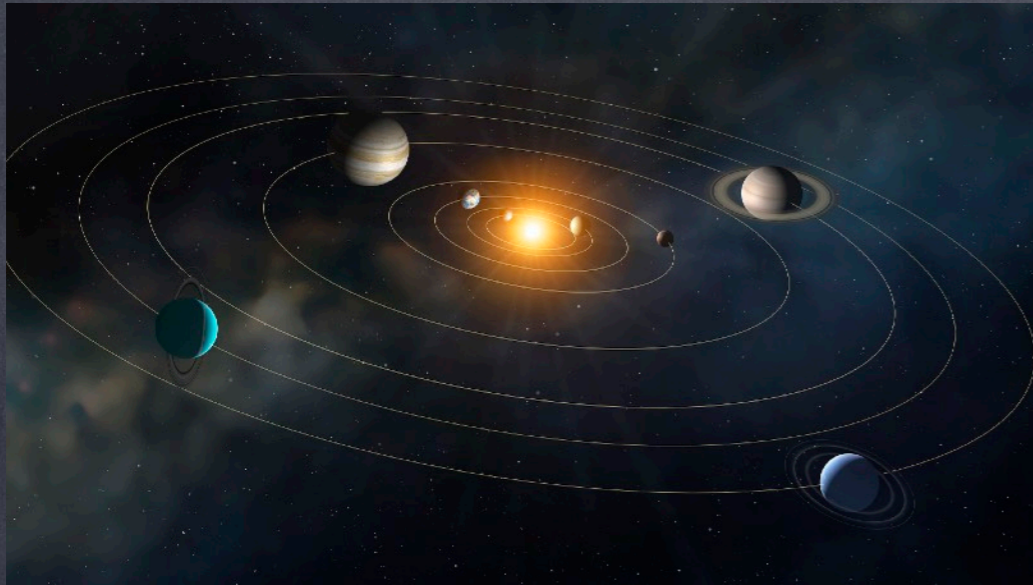
La Gravitation fait tomber les choses sur Terre



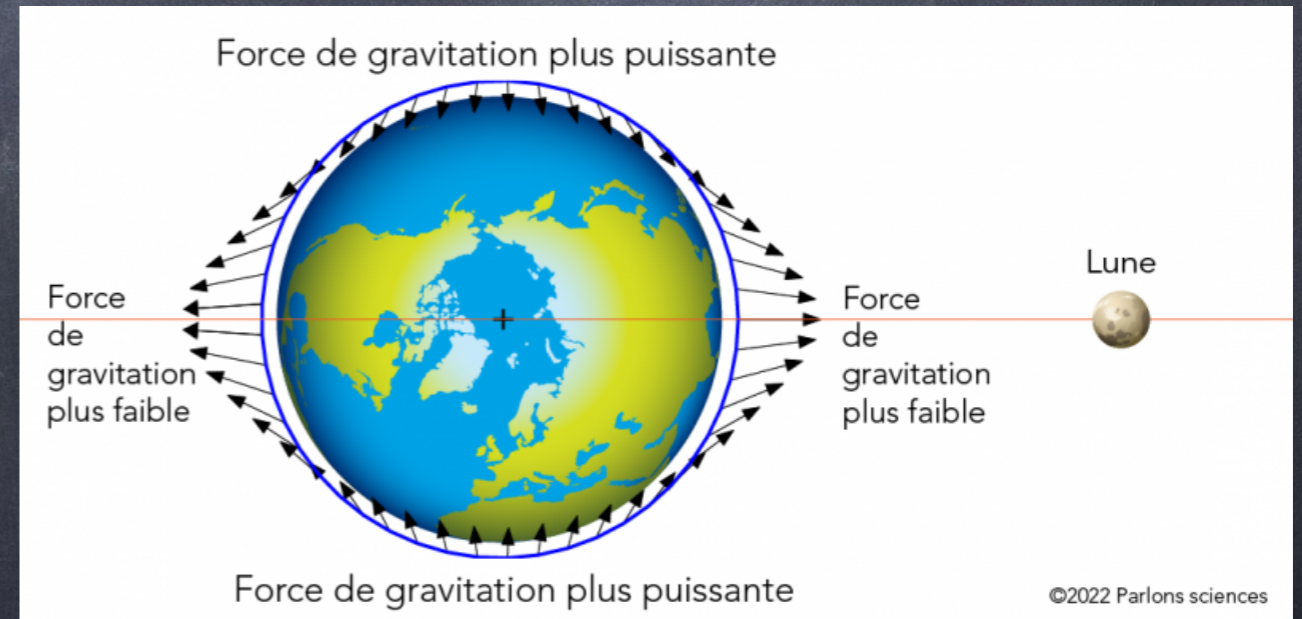


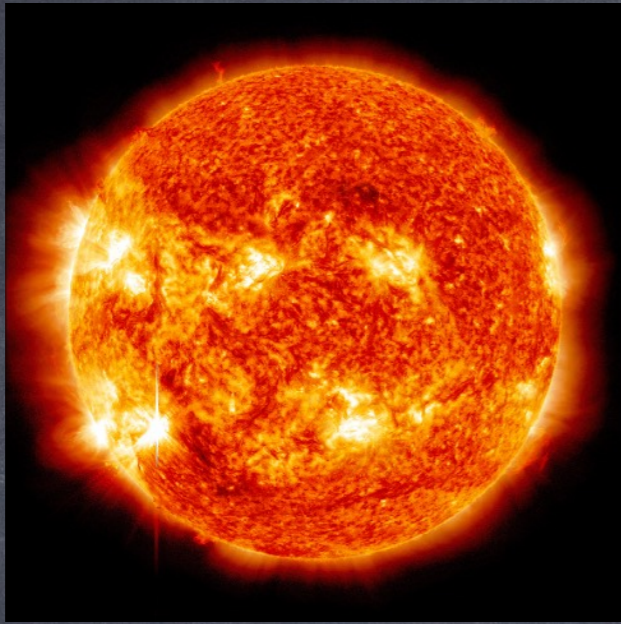
La Gravitation fait tomber les choses sur Terre  
et fait tourner les astres dans le ciel



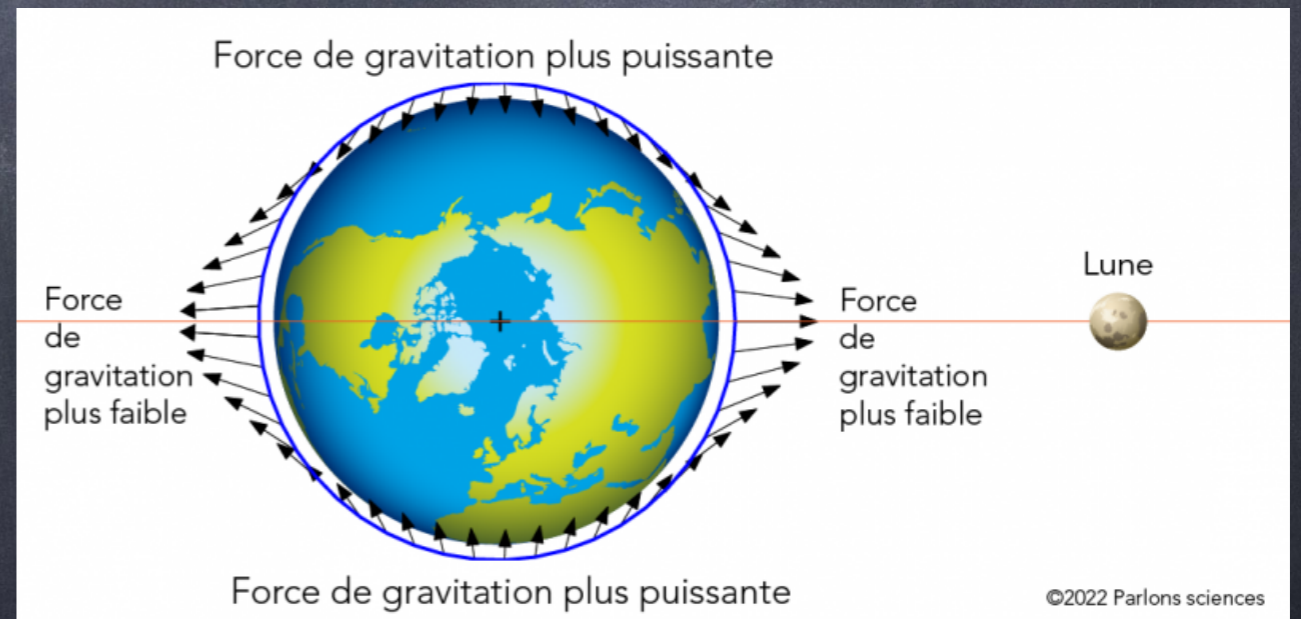


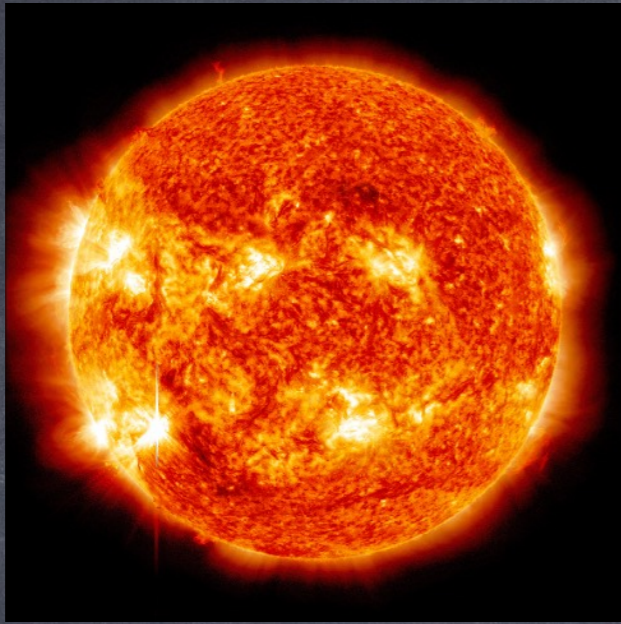
La Gravitation fait tomber les choses sur Terre  
 et fait tourner les astres dans le ciel  
 et encore plein d'autres phénomènes FANTASTIQUES !!



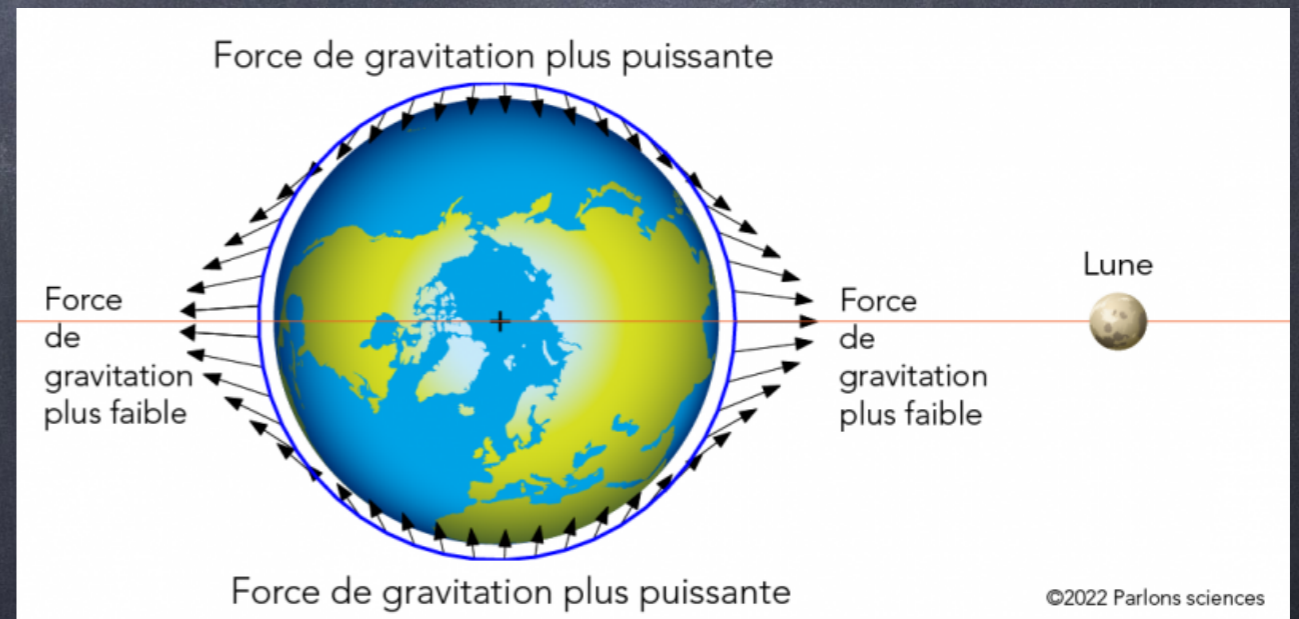


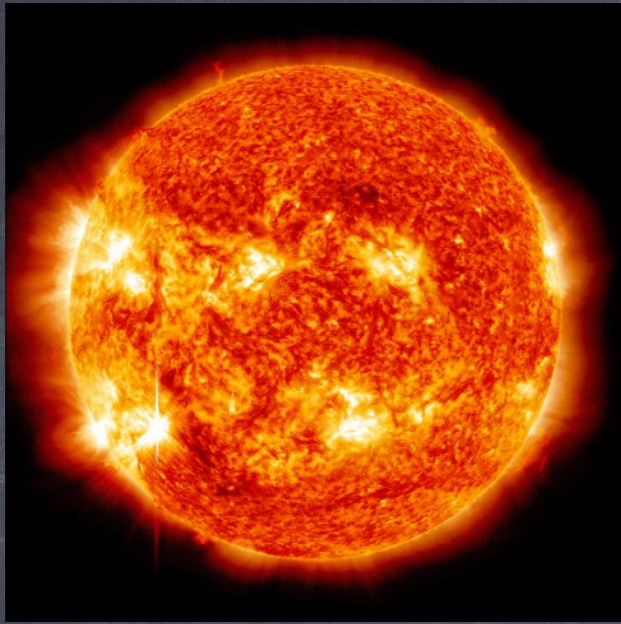
La Gravitation fait tomber les choses sur Terre  
et fait tourner les astres dans le ciel  
et encore plein d'autres phénomènes **FANTASTIQUES !!**



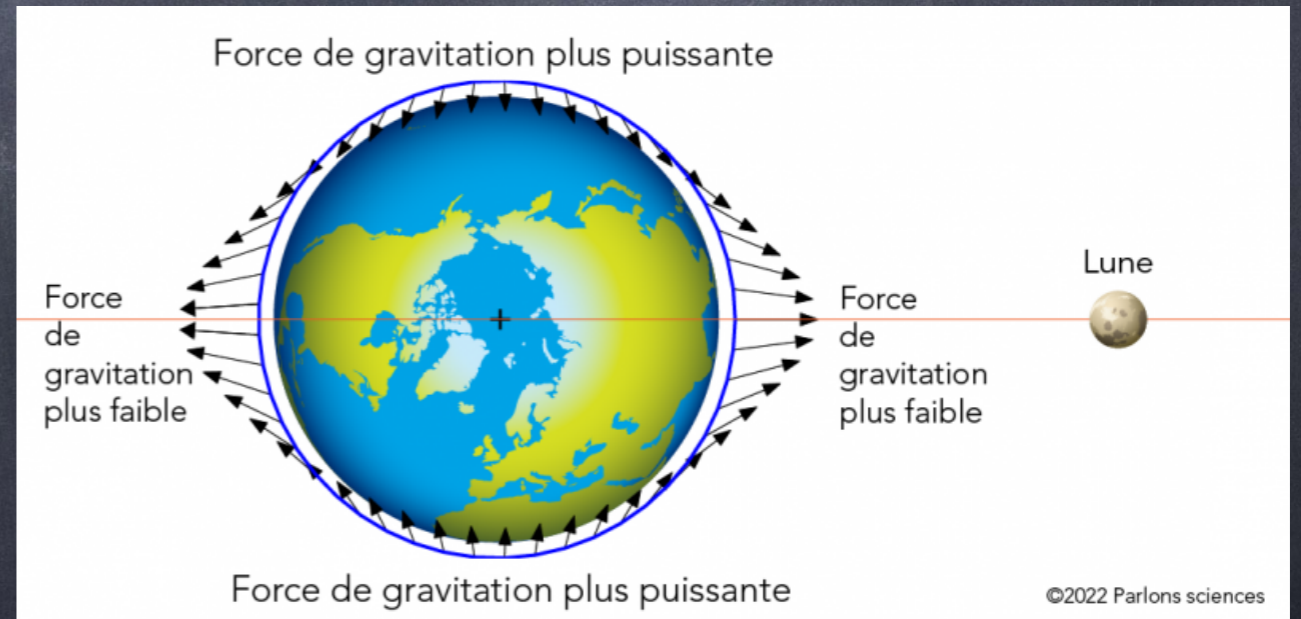


La Gravitation fait tomber les choses sur Terre  
et fait tourner les astres dans le ciel  
et encore plein d'autres phénomènes **FANTASTIQUES !!**





La Gravitation fait tomber les choses sur Terre  
et fait tourner les astres dans le ciel  
et encore plein d'autres phénomènes **FANTASTIQUES !!**

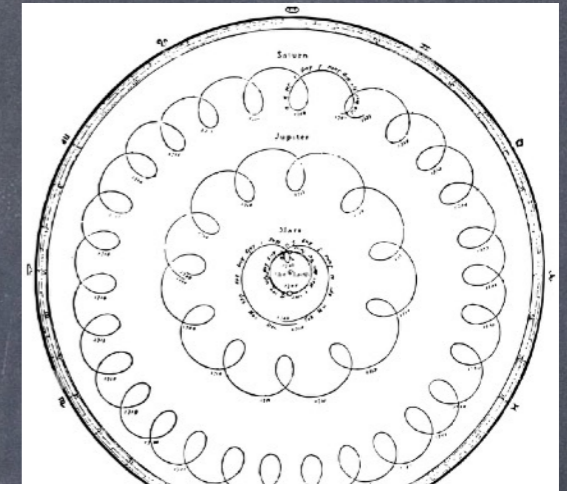
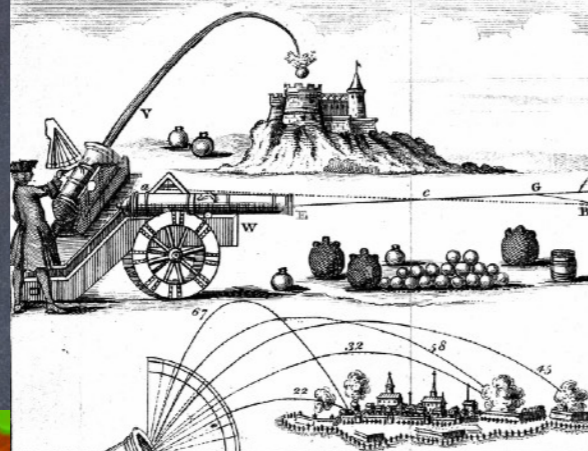
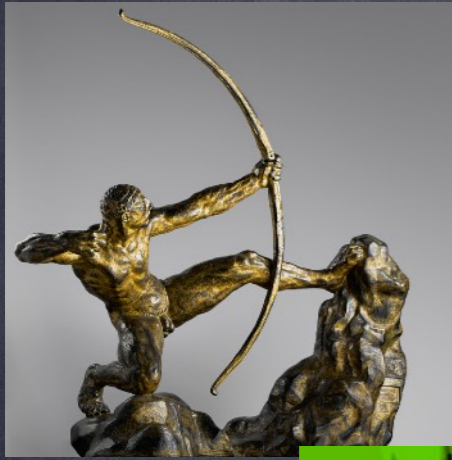




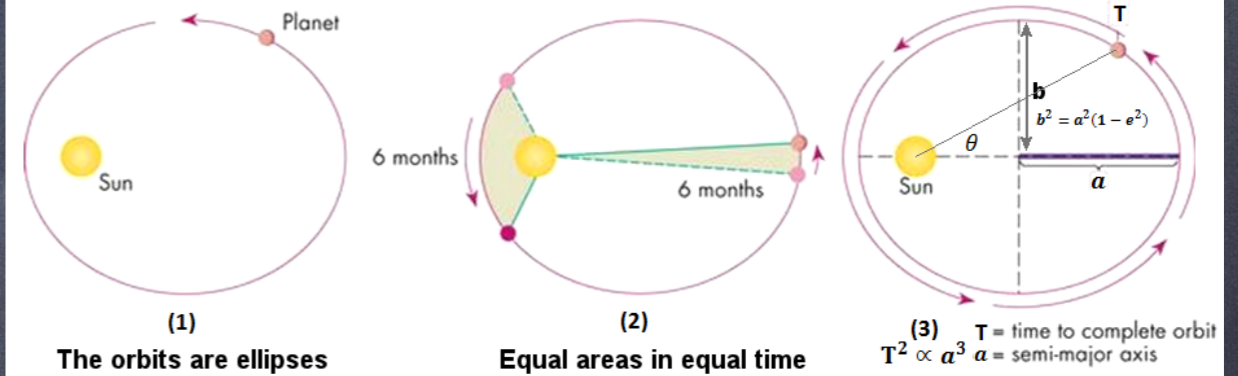
Un peu de théorie

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,



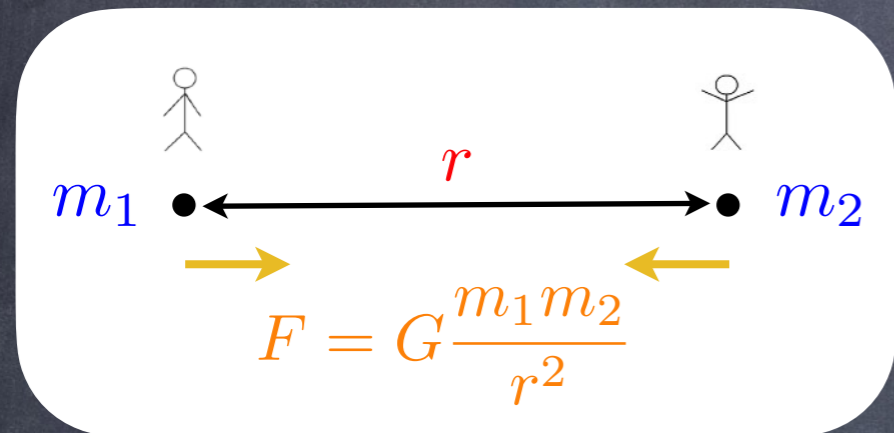
## Kepler's 3 Laws of Planetary Motion



Gravitation = 2 corps massifs s'attirent

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,



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

Une loi pour unifier deux phénomènes

↓  
Pesanteur

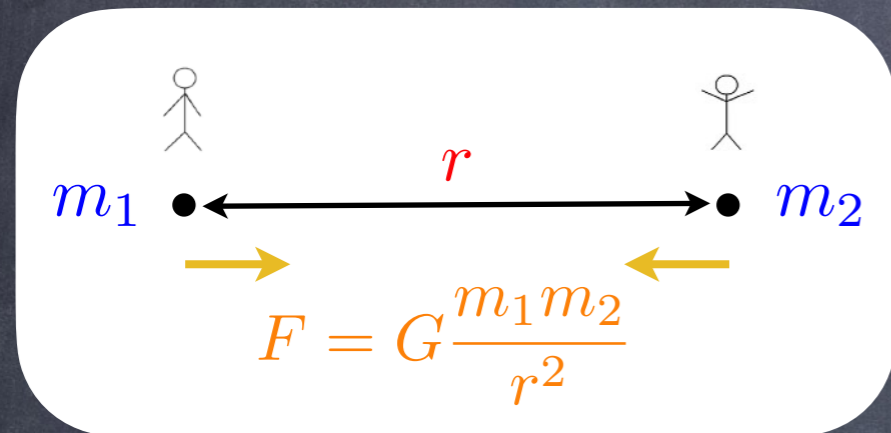
↓  
Mouvements  
célestes

Gravitation = 2 corps massifs s'attirent



# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

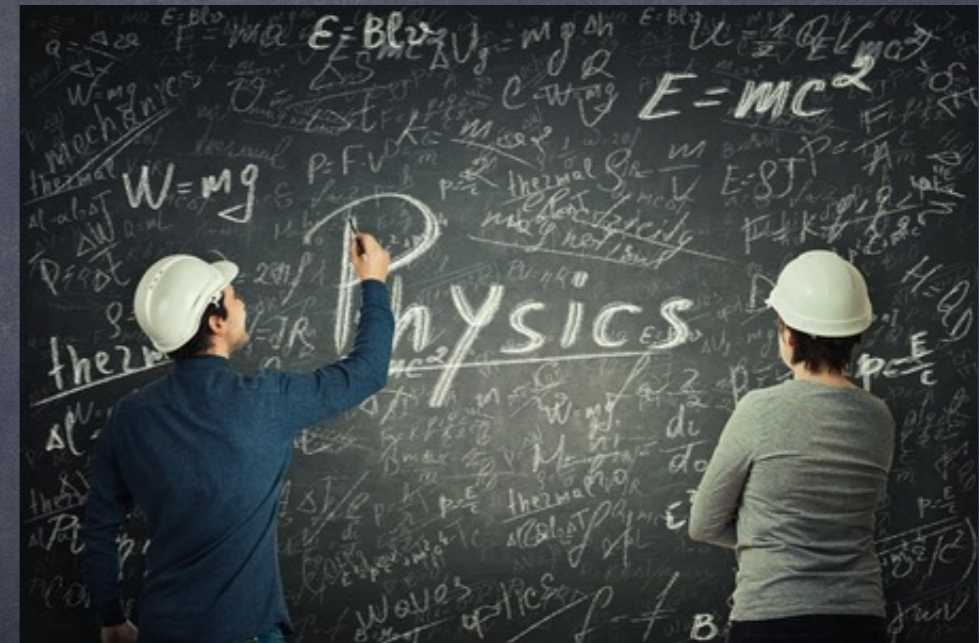
Il était une fois la gravitation Newtonienne,



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

$$E = \frac{1}{2} m v_r^2 + \frac{m L^2}{2 r^2} - \frac{G m M}{r}$$

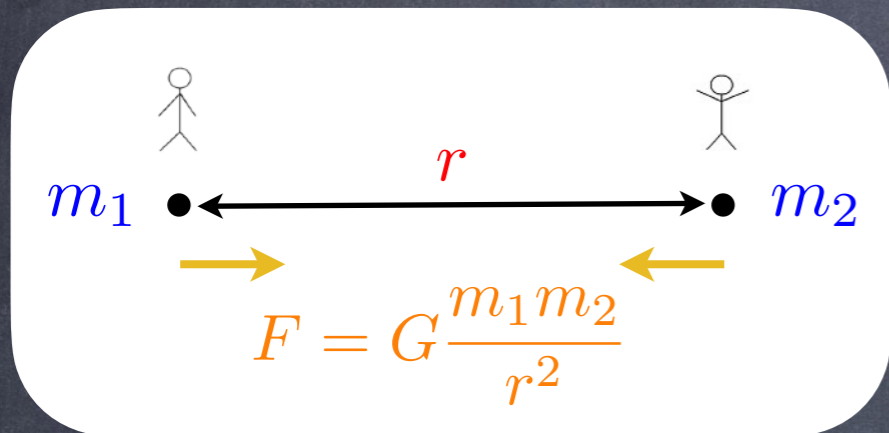
Energie = énergie radiale + force centrifuge + potentiel gravitationnel



Gravitation = 2 corps massifs s'attirent

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

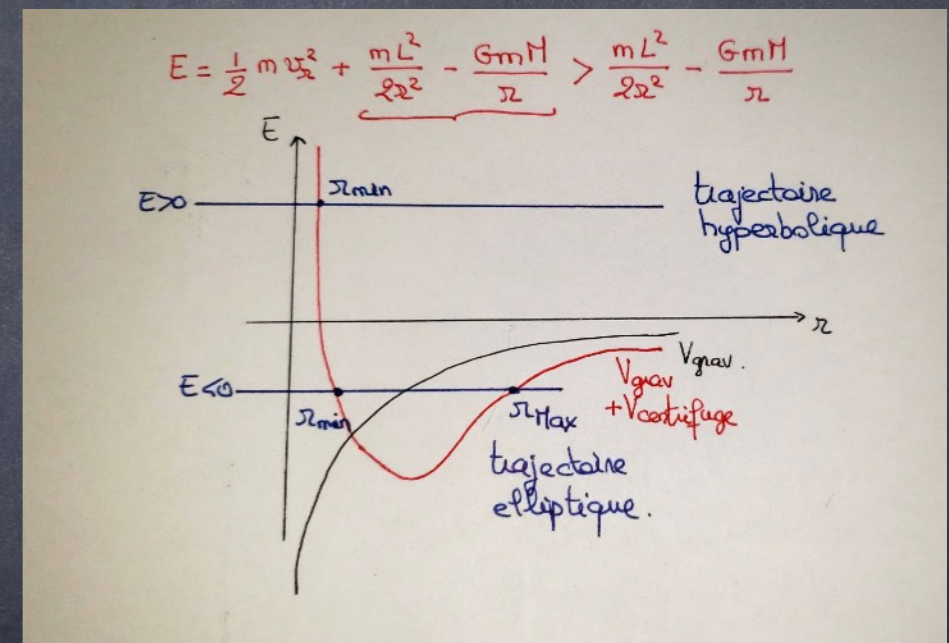
Il était une fois la gravitation Newtonienne,



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

$$E = \frac{1}{2} m v_r^2 + \frac{m L^2}{2 r^2} - \frac{G m M}{r}$$

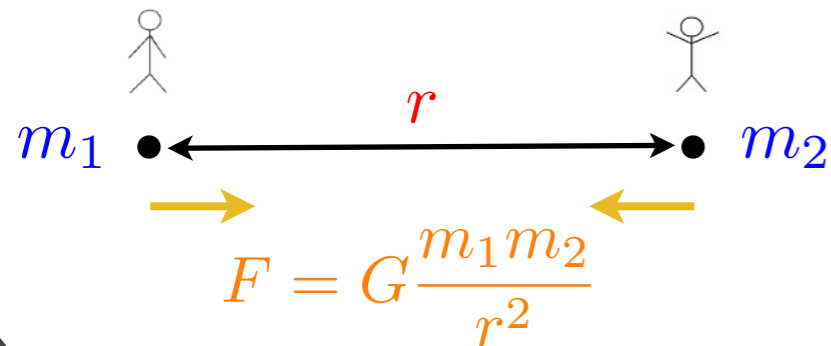
Energie = énergie radiale + force centrifuge + potentiel gravitationnel



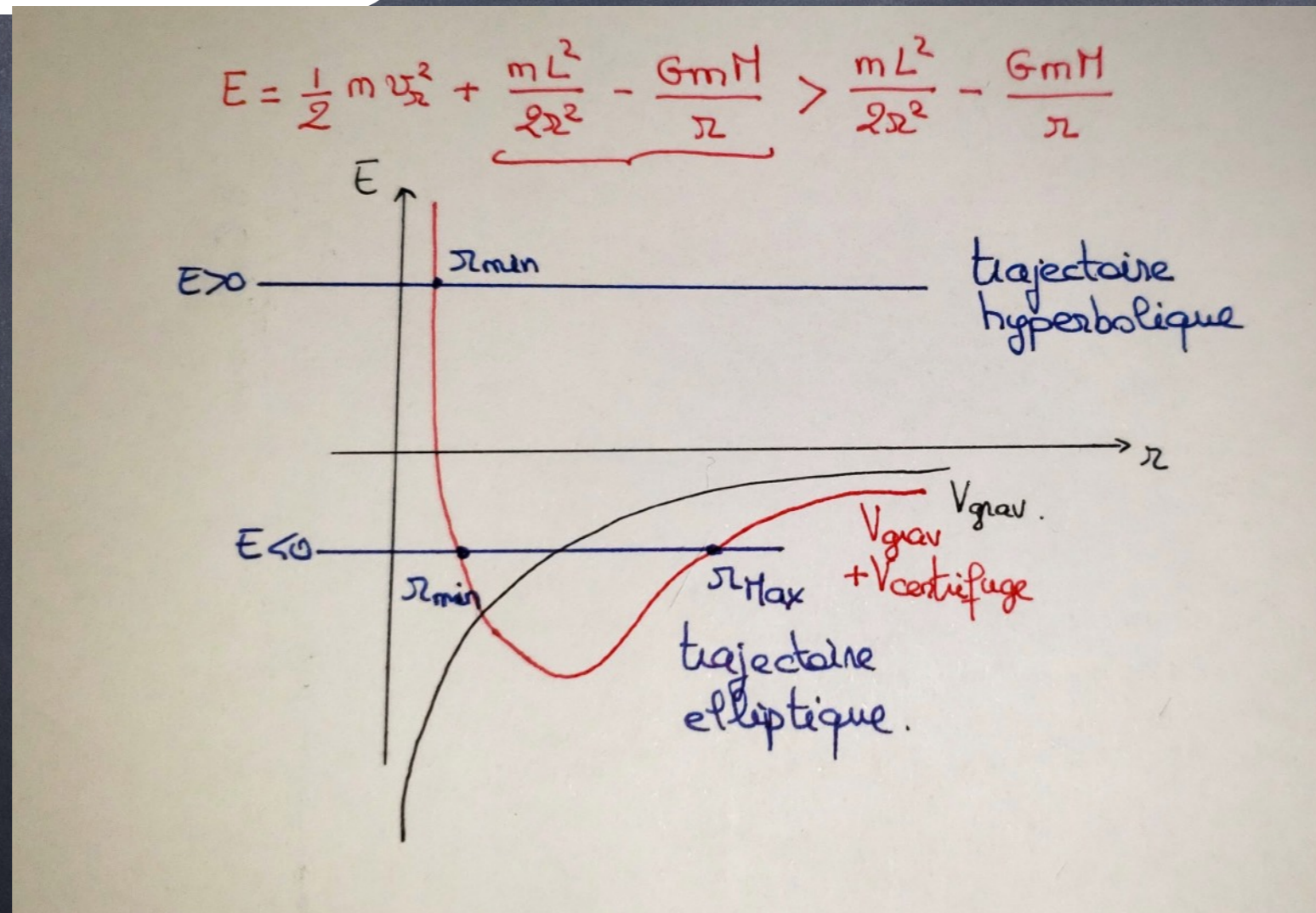
Gravitation = 2 corps massifs s'attirent

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,

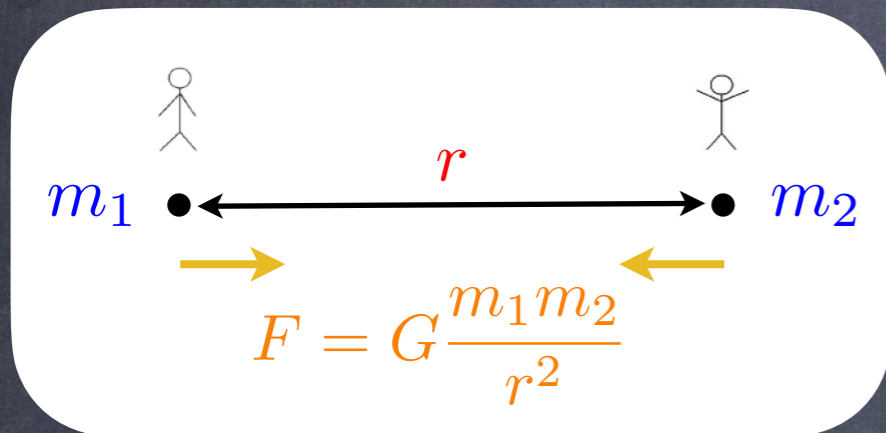


$$G \simeq 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

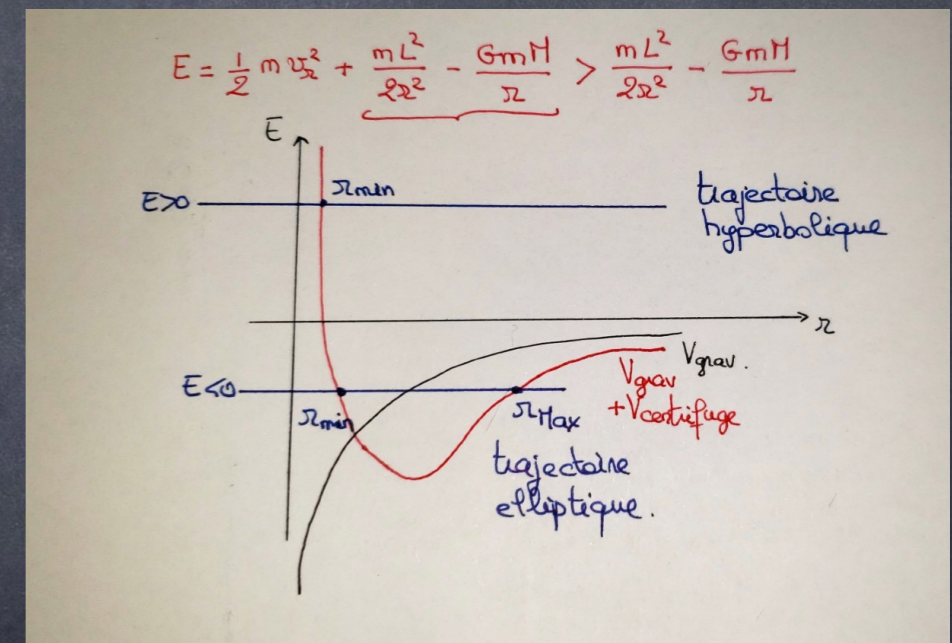
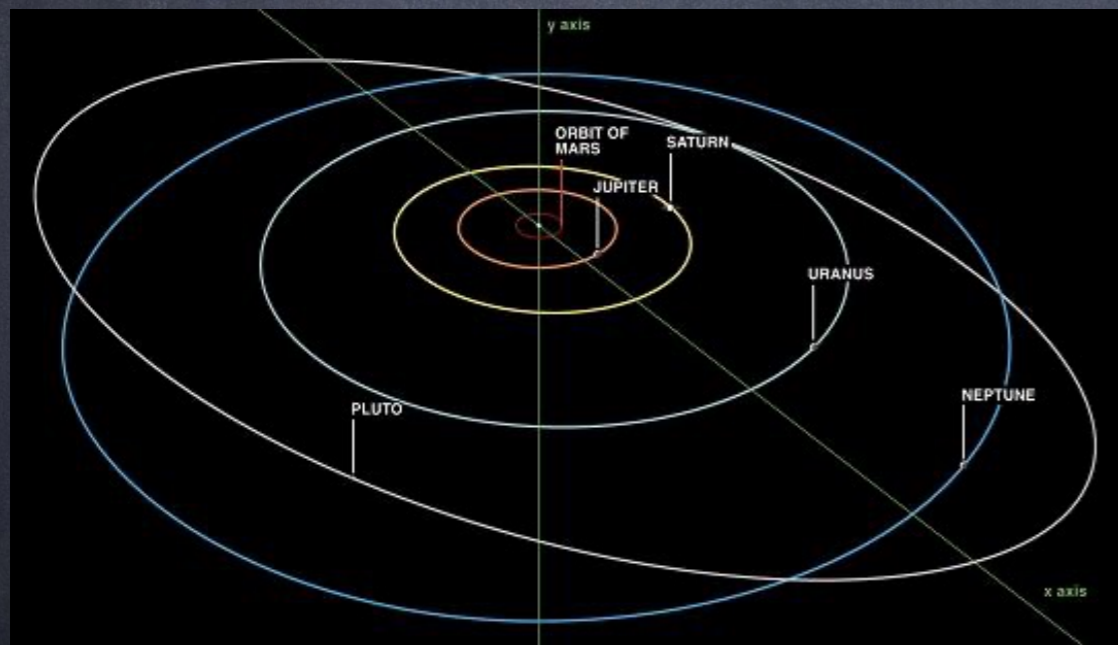


# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,



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

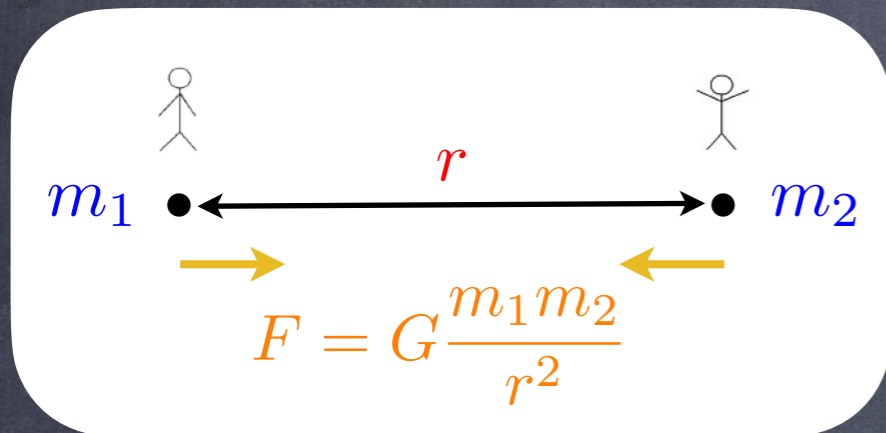


Gravitation = 2 corps massifs s'attirent

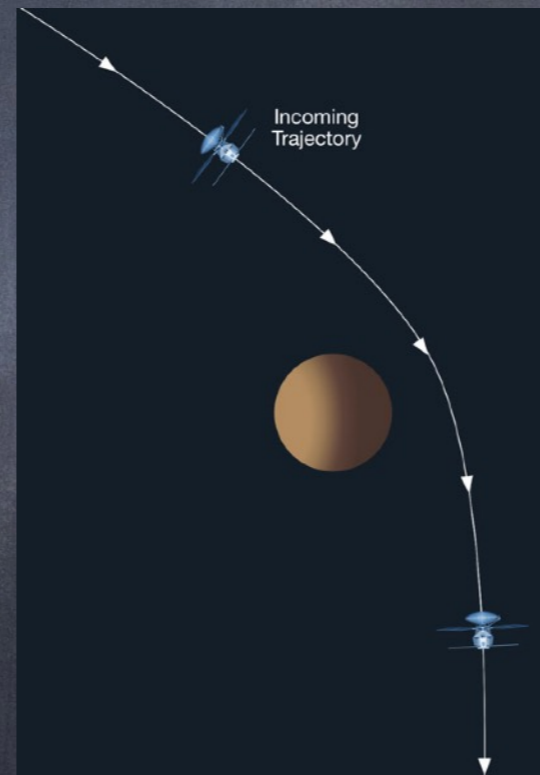
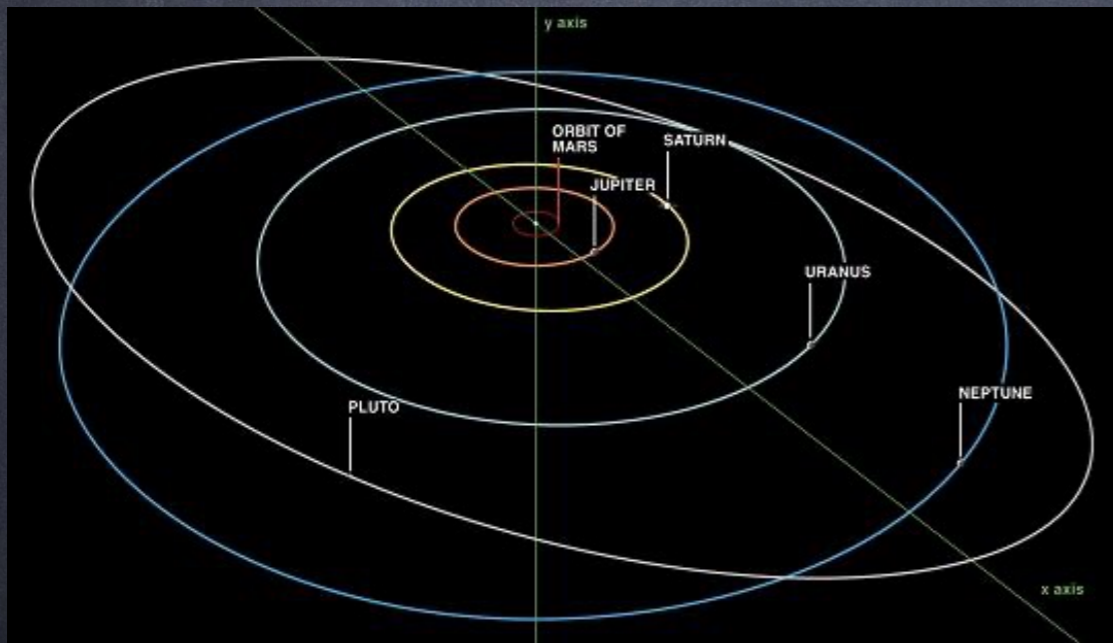


# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,



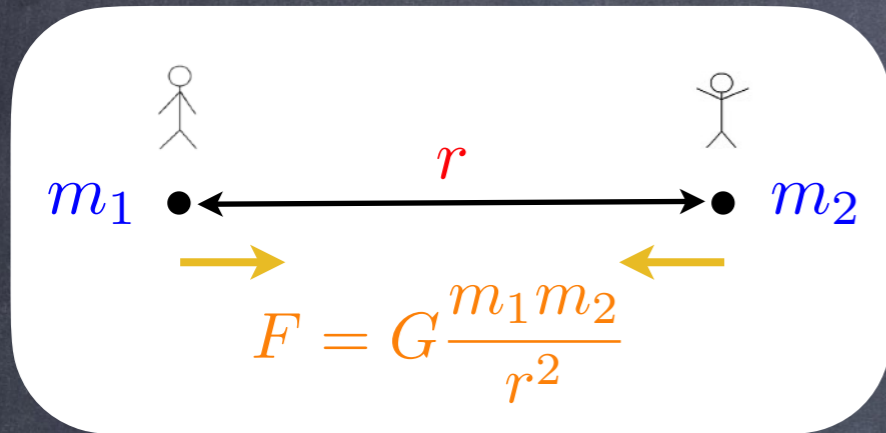
$$G \simeq 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$



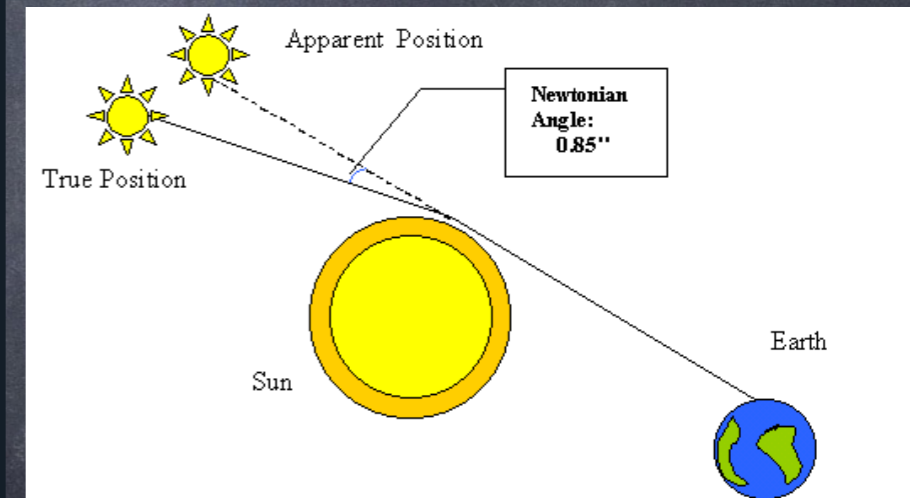
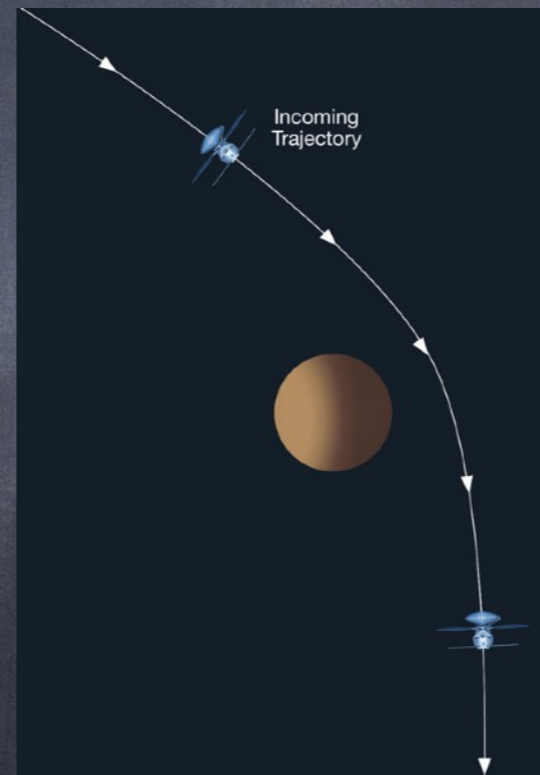
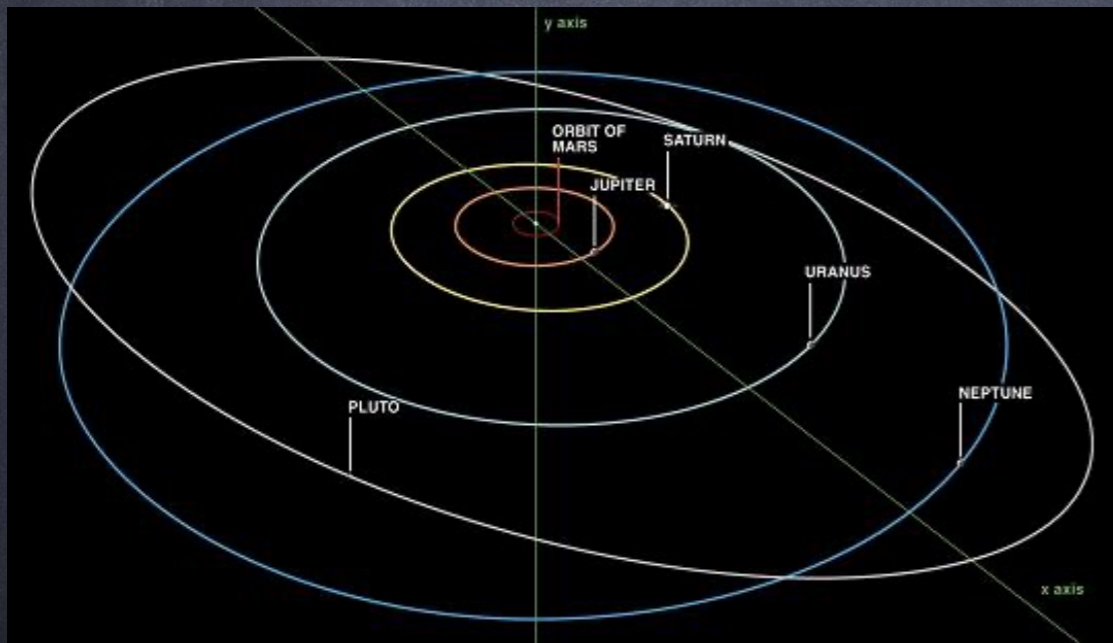
Gravitation = 2 corps massifs s'attirent

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,



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



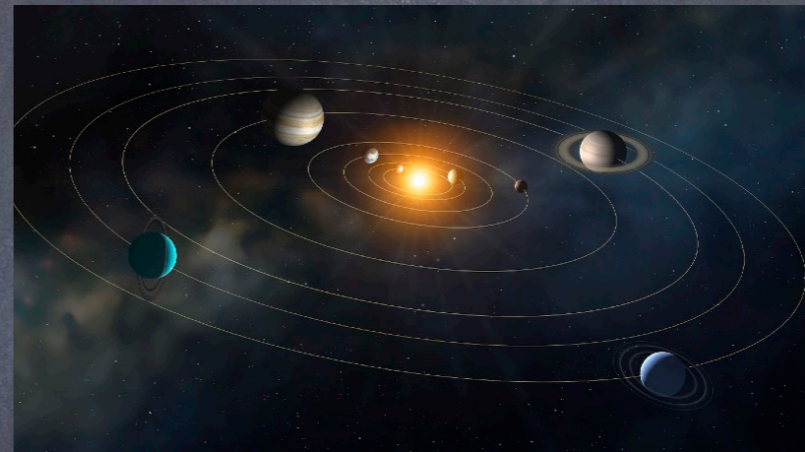
Gravitation = 2 corps massifs s'attirent

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !

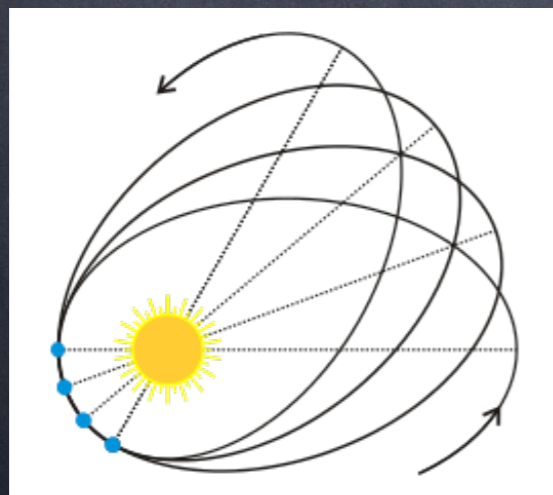
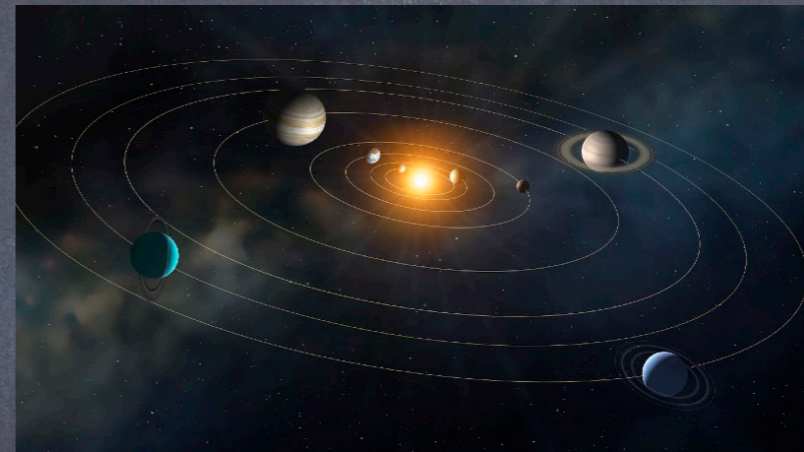
# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !



# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !



Précession  
des planètes

La force en  $1/r^2$  est la seule  
qui produit des orbites  
périodiques en boucle,

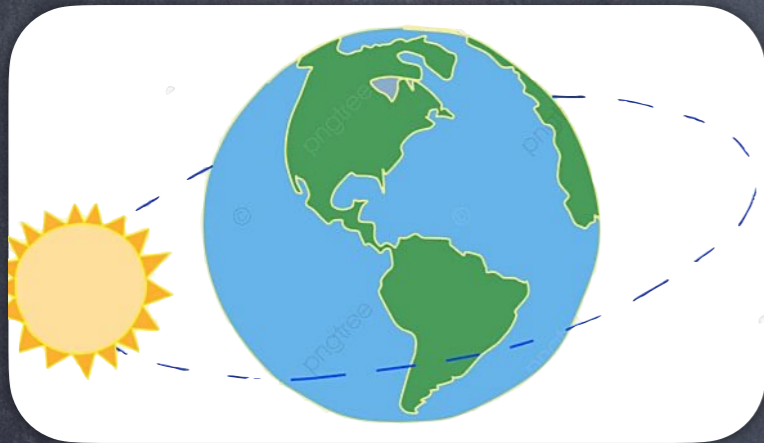
Donc, si précession,  
alors perturbations par  
quelque chose d'autre !



Prédiction de Neptune  
par Le Verrier (1846)

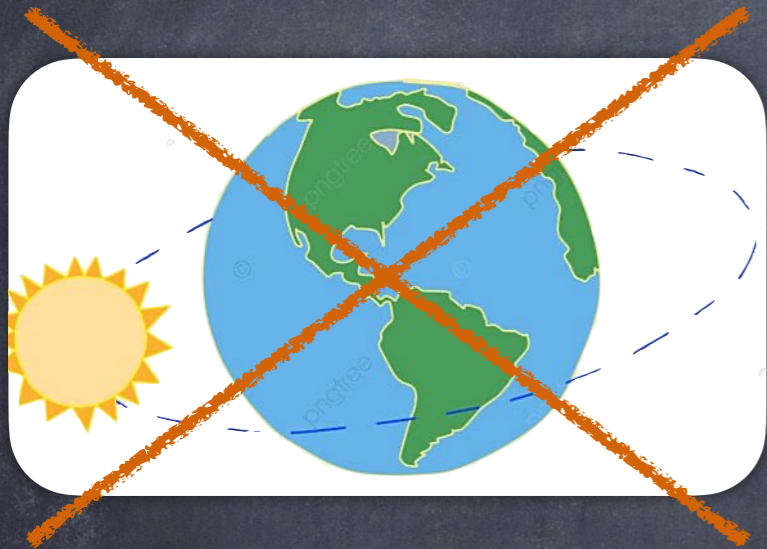
# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !



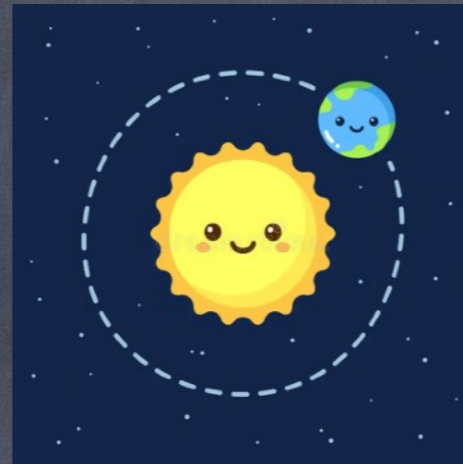
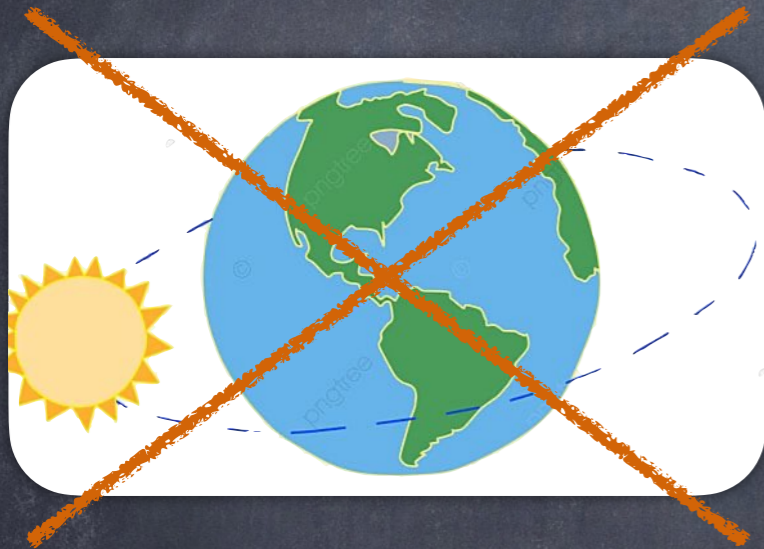
# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !



# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

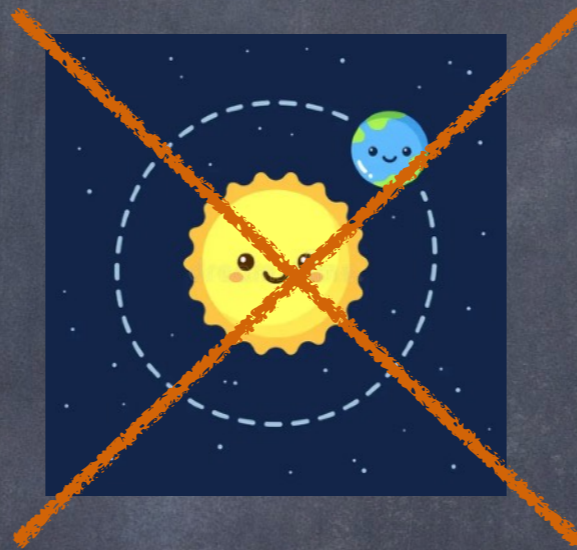
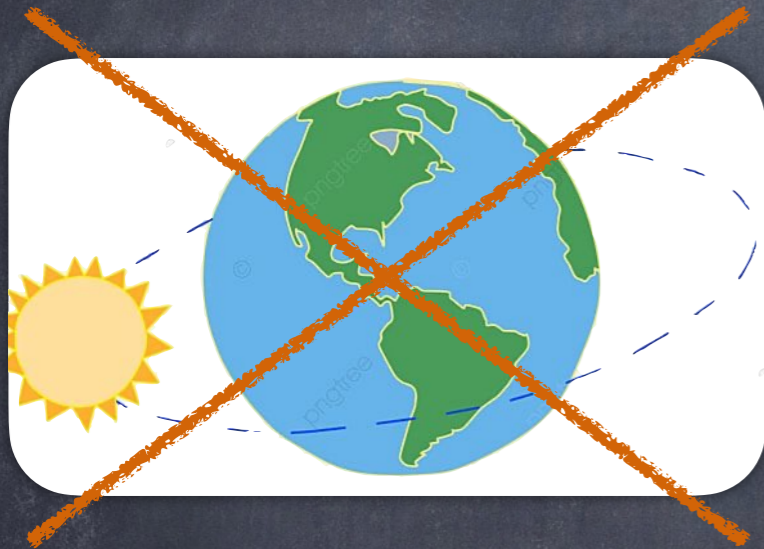
Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !





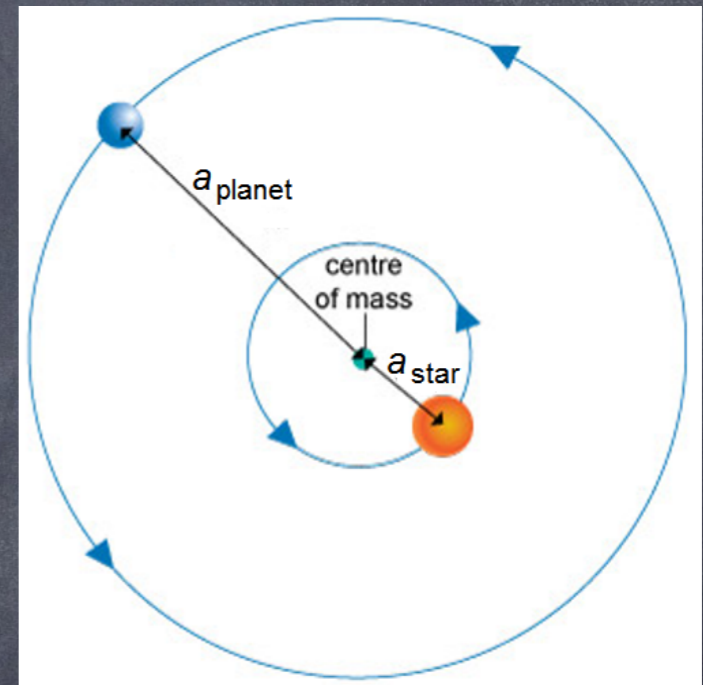
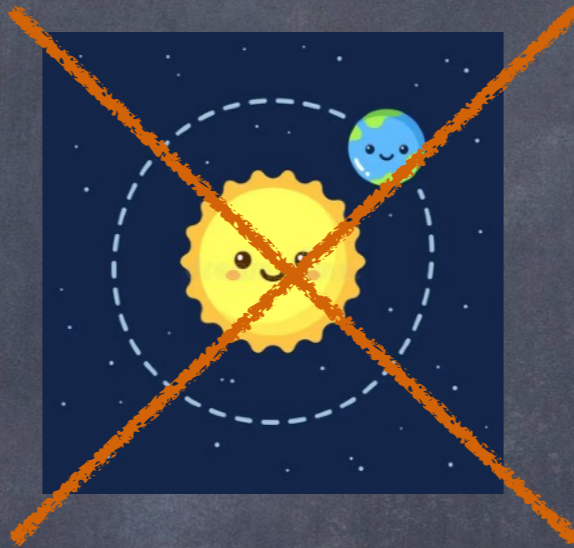
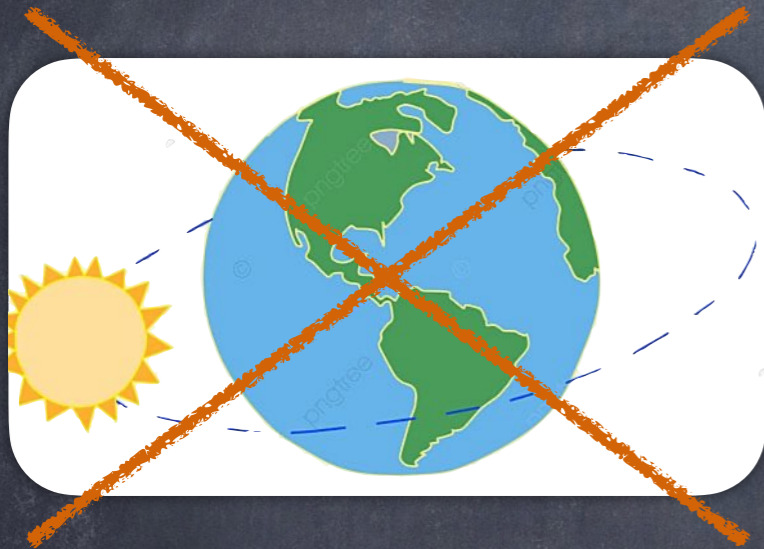
# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !



# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

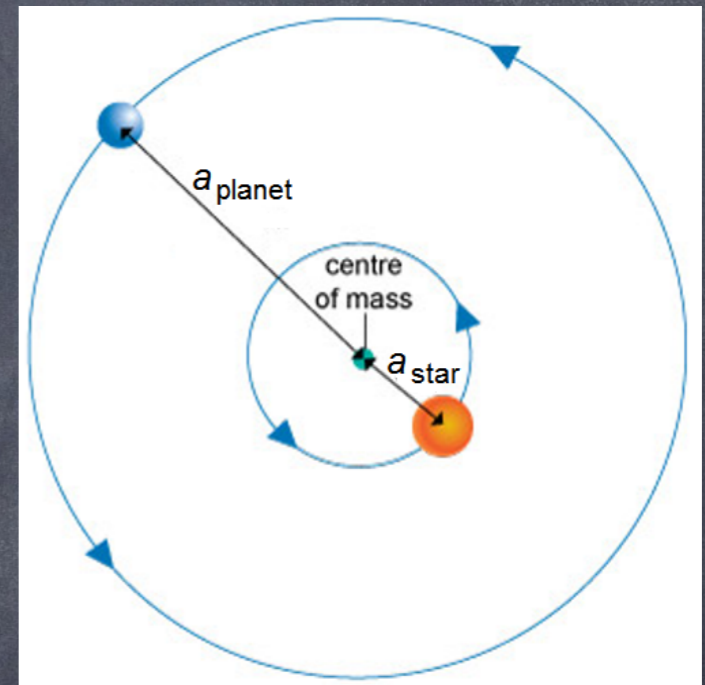
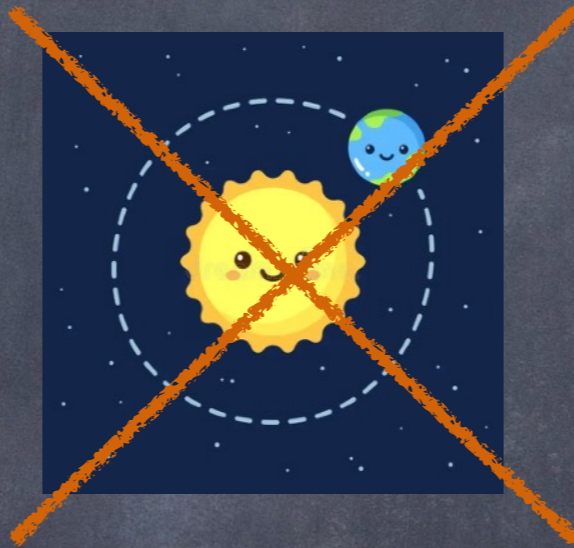
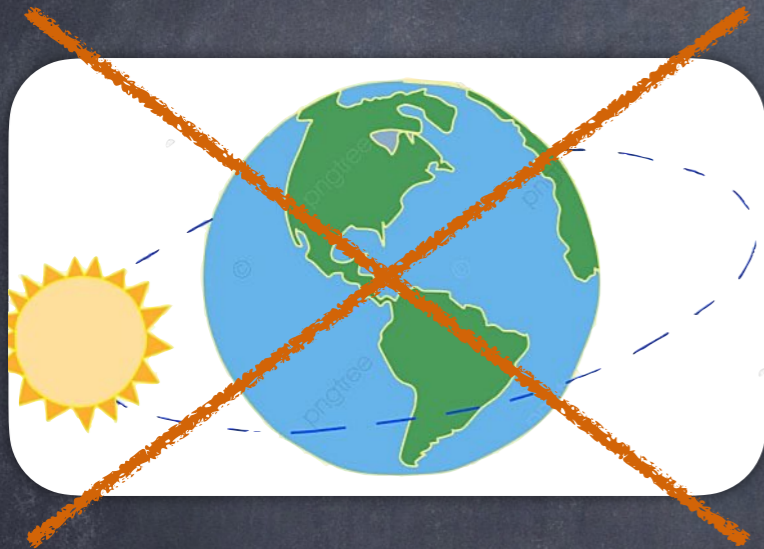
Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !



Mais si on mesure tout par rapport au Soleil,  
comment peut-on voir le Soleil bouger ???

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

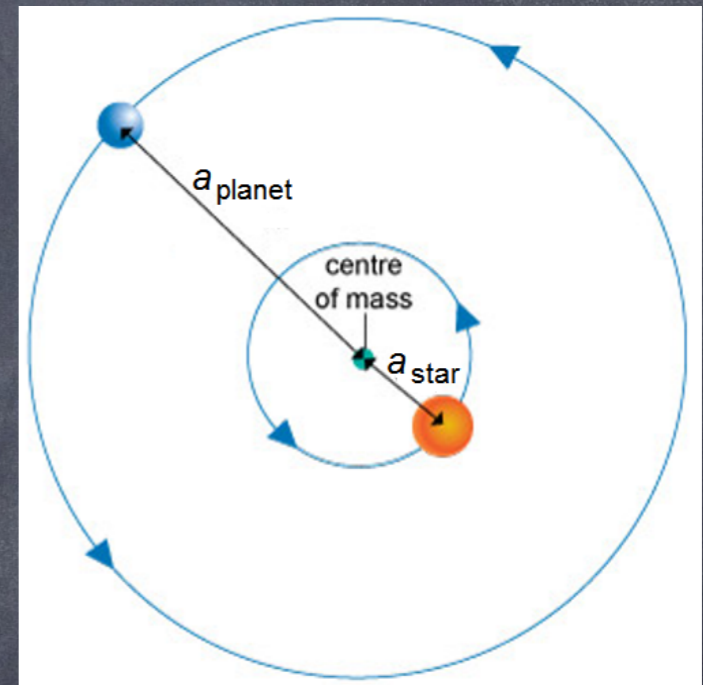
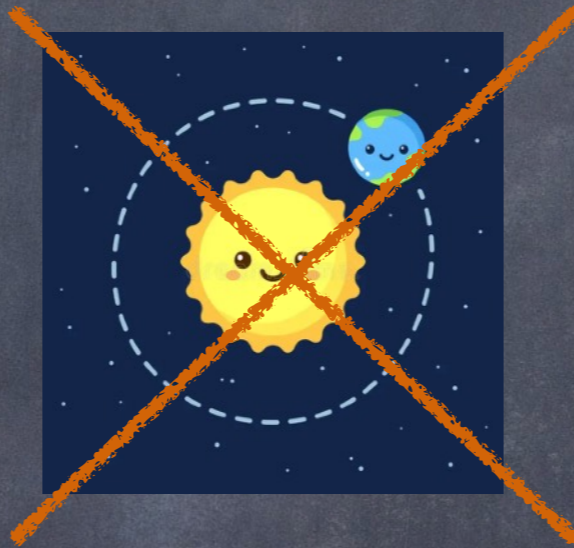
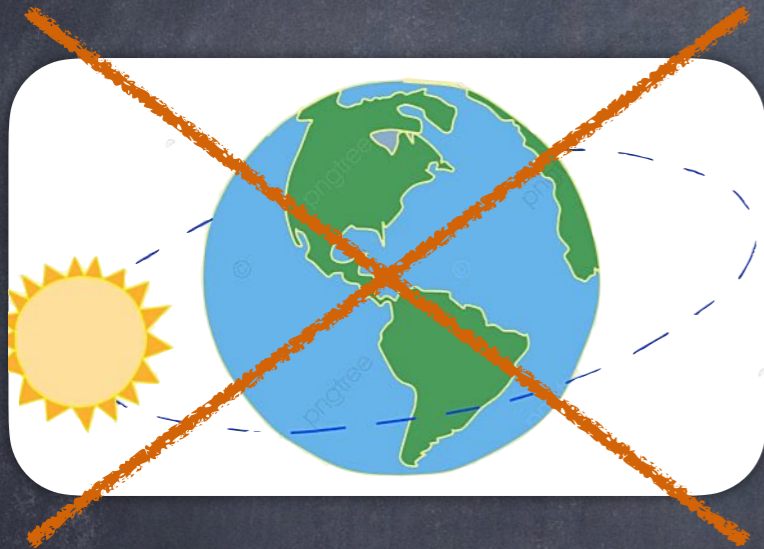
Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !



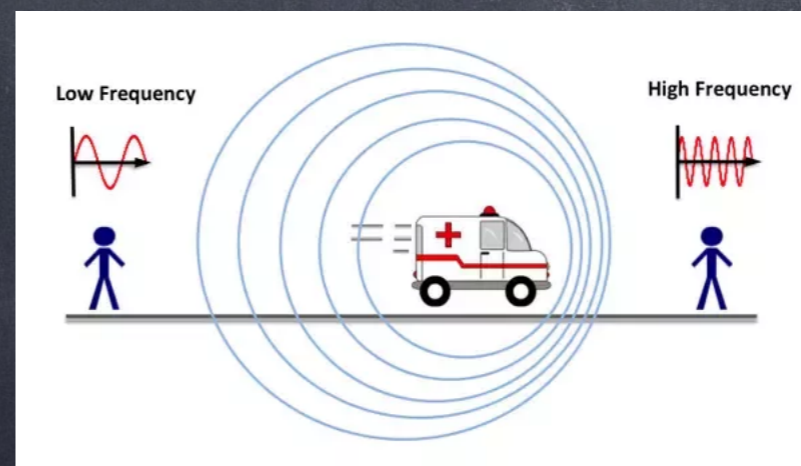
Effet Doppler sur la  
Lumière du Soleil !

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !

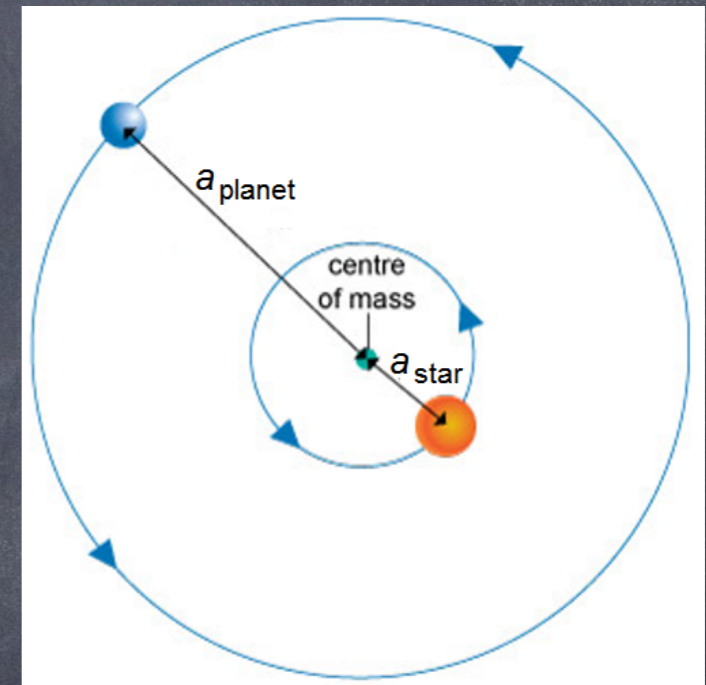
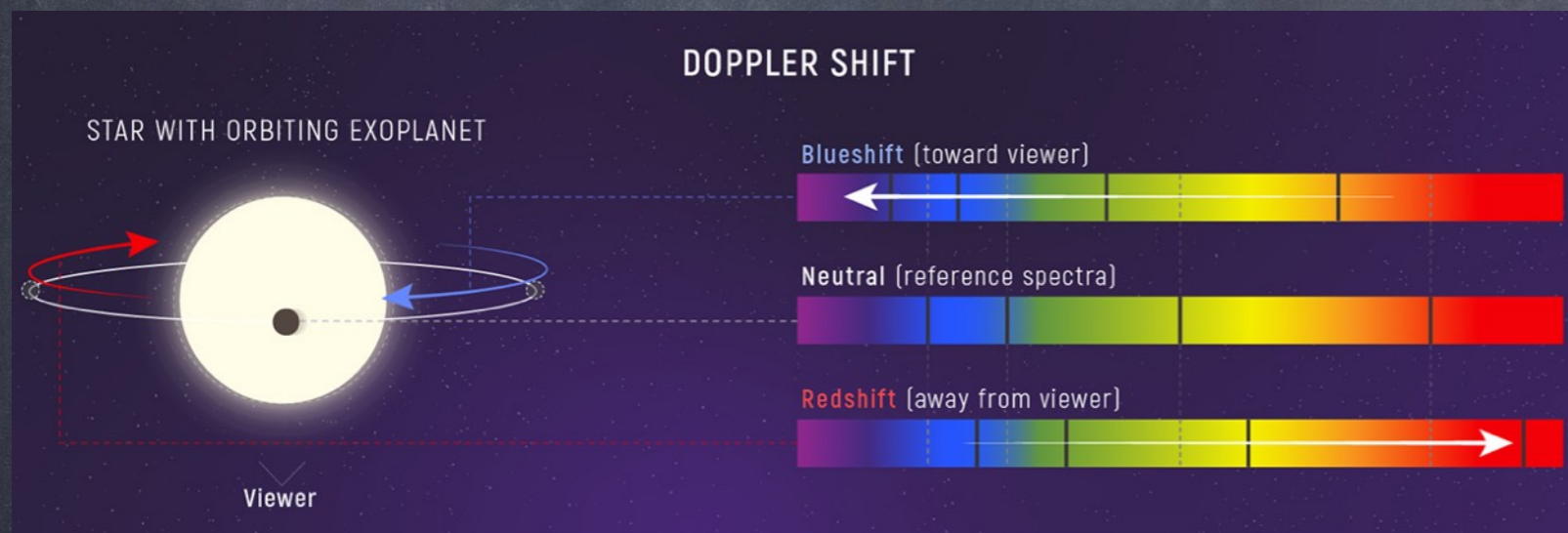


Effet Doppler sur la  
Lumière du Soleil !



# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !

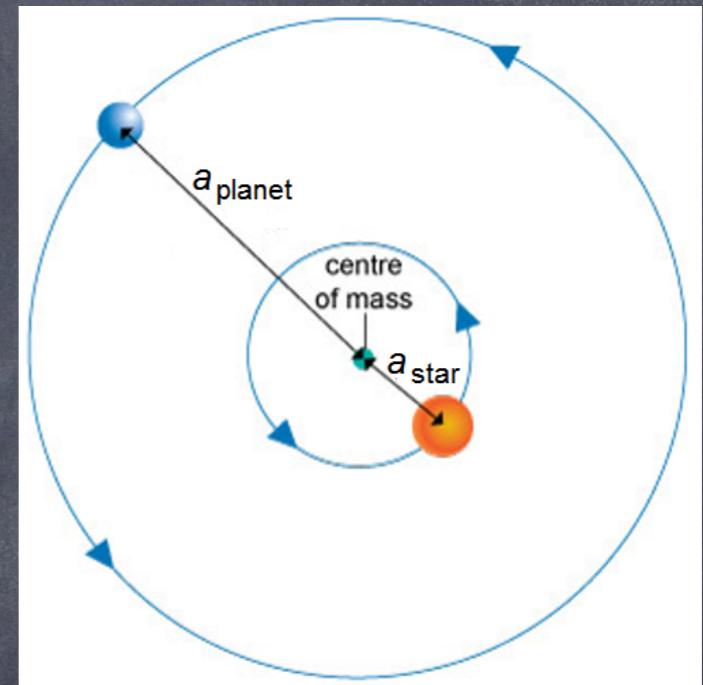
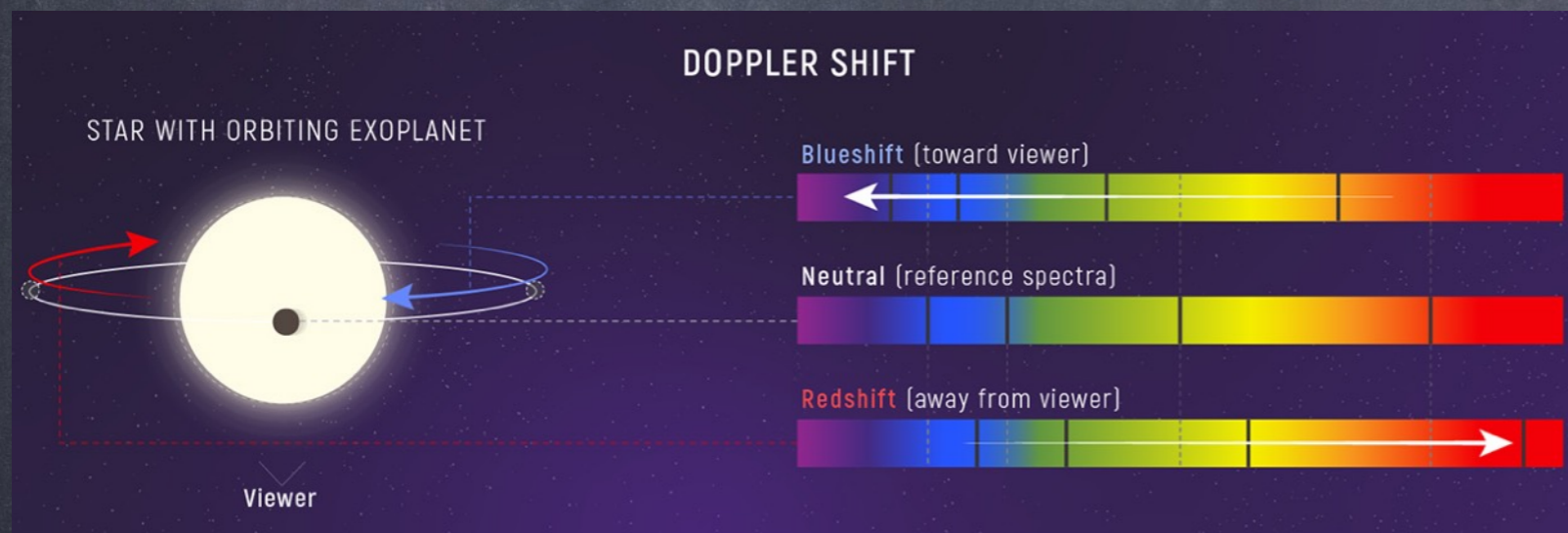


Effet Doppler sur la  
Lumière du Soleil !

On peut voir le mouvement du  
Soleil dans la lumière qu'il émet !

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !



Effet Doppler sur la  
Lumière du Soleil !

Détection d'Exoplanètes  
Mayor-Queloz (Nobel 2019)

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !

Gravitation = 2 corps massifs s'attirent

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !

Gravitation = 2 corps massifs s'attirent

? ? ? ? ? ? ? ? ? ?



# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !

Gravitation = 2 corps massifs s'attirent

? ? ? ? ? ? ? ? ? ?

Loi de Newton



Tout tombe à la même vitesse !



Tout tombe à la même vitesse !

Tout tombe à la même vitesse !

PRINCIPE D'EQUIVALENCE

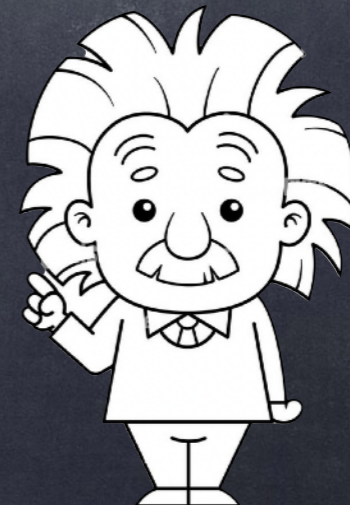


Tout tombe à la même vitesse !

PRINCIPE D'EQUIVALENCE



La Gravitation est une propriété de  
l'espace-temps et non pas des objets



# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !

~~Gravitation = 2 corps massifs s'attirent~~



Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !

~~Gravitation = 2 corps massifs s'attirent~~

Mais on l'a quand même mise de côté !!

Gravitation = une propriété de l'espace-temps

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,  
elle expliqua plein de phénomènes,  
et permis de nouvelles découvertes !

~~Gravitation = 2 corps massifs s'attirent~~

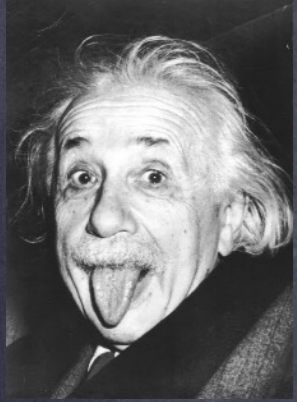
Mais on l'a quand même mise de côté !!

Gravitation = une propriété de l'espace-temps

Relativité  
Générale  
d'Einstein

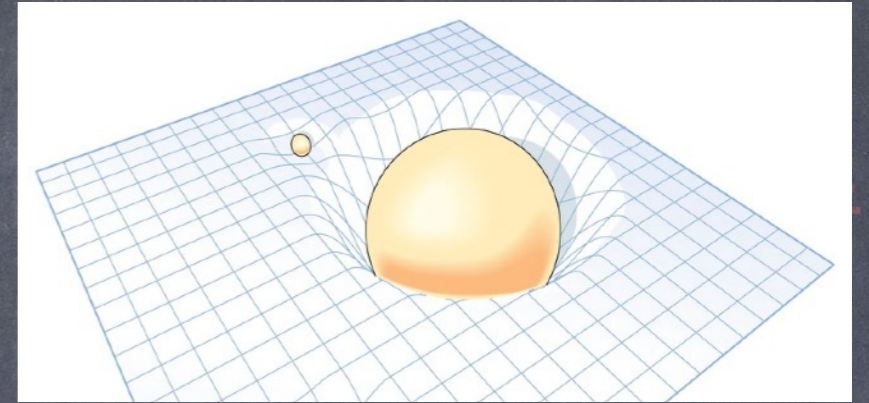
La Gravité même PAS une Force !

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{4\pi G}{3c^4}T_{\mu\nu}$$

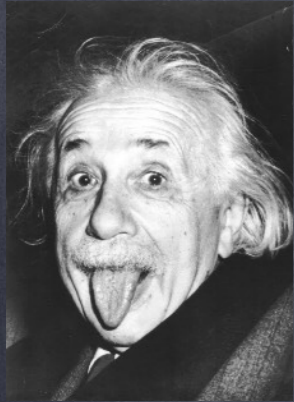
$$G \simeq 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$



Les masses courbent  
l'espace-temps

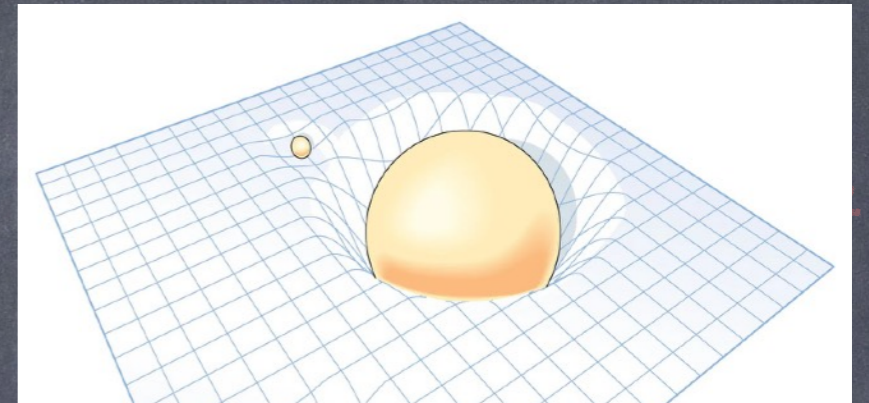


# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

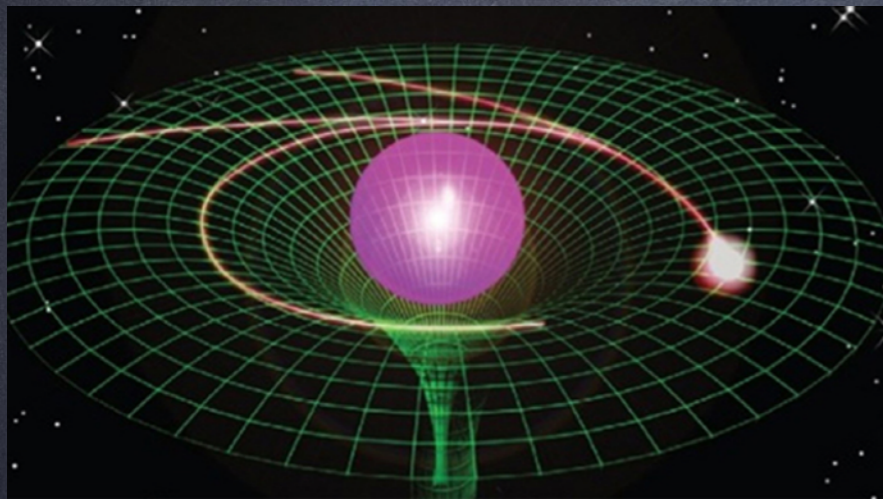


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{4\pi G}{3c^4}T_{\mu\nu}$$

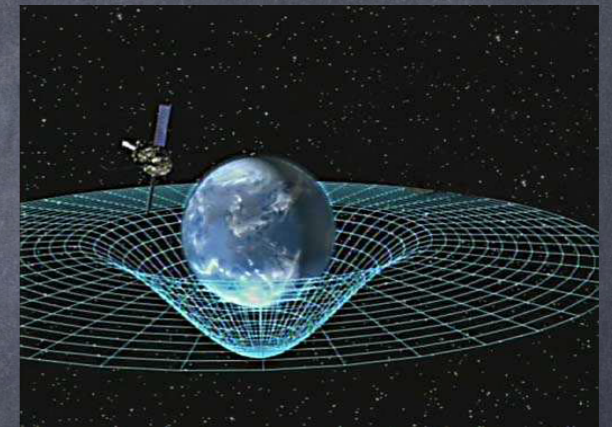
$$G \simeq 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$



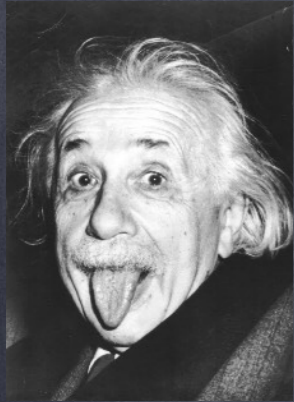
Les masses courbent  
l'espace-temps



Nous suivons des  
lignes droites dans  
une géométrie courbe

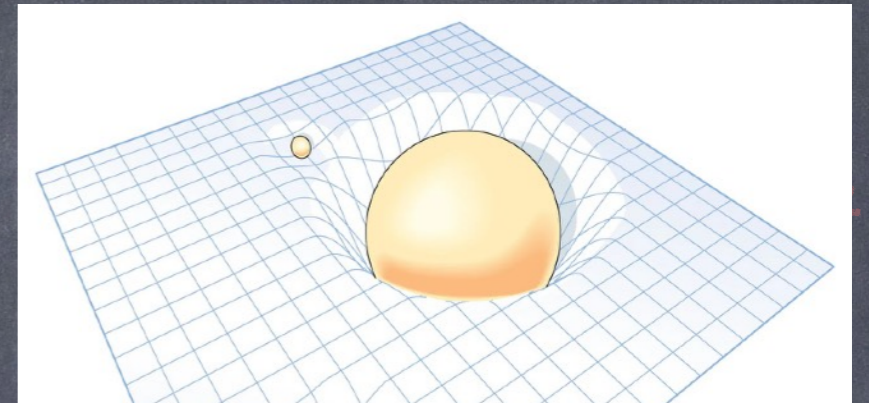


# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

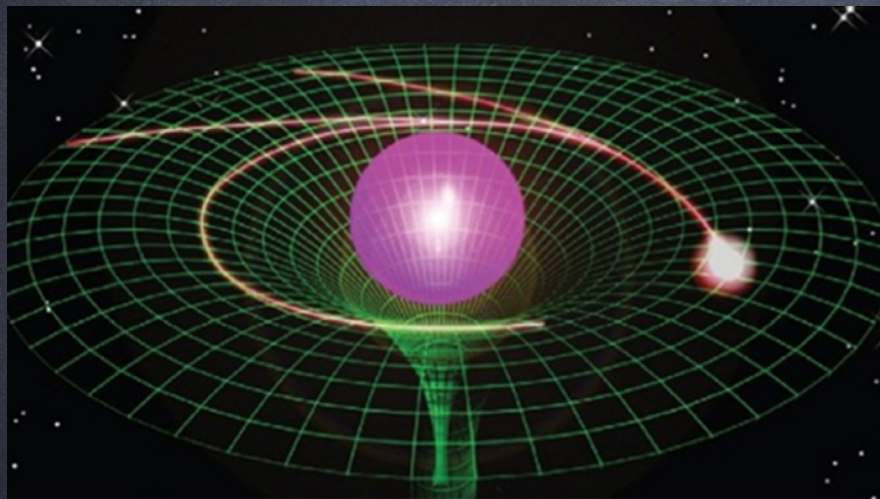


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{4\pi G}{3c^4}T_{\mu\nu}$$

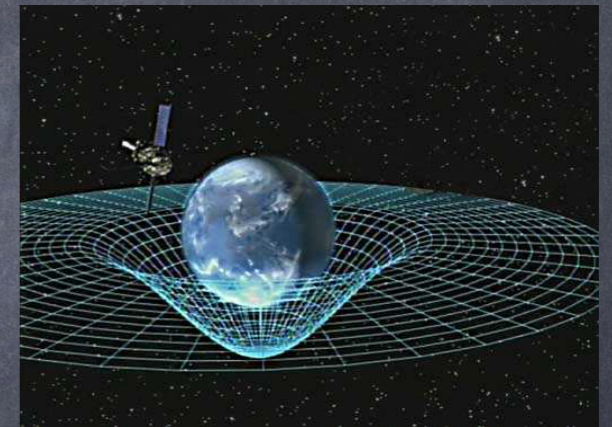
$$G \simeq 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$



Les masses courbent  
l'espace-temps



Nous suivons des  
lignes droites dans  
une géométrie courbe



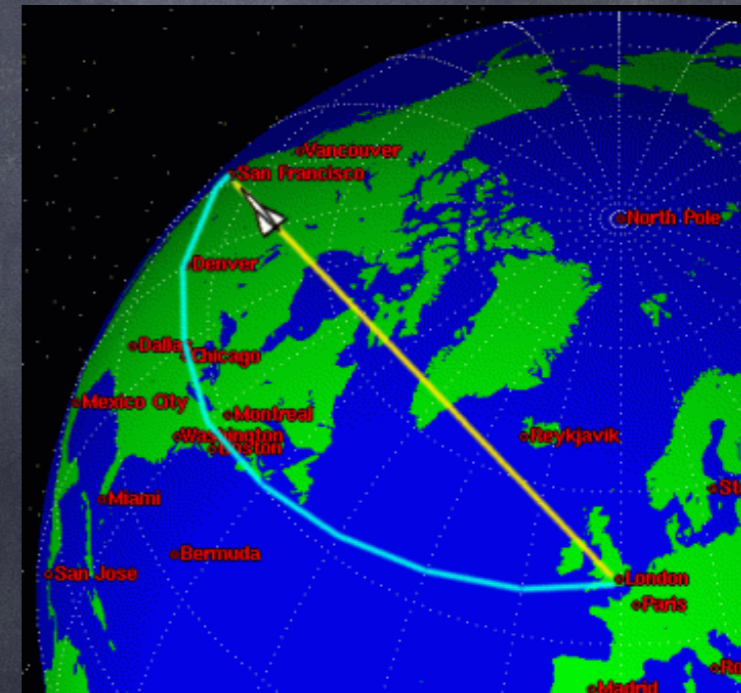
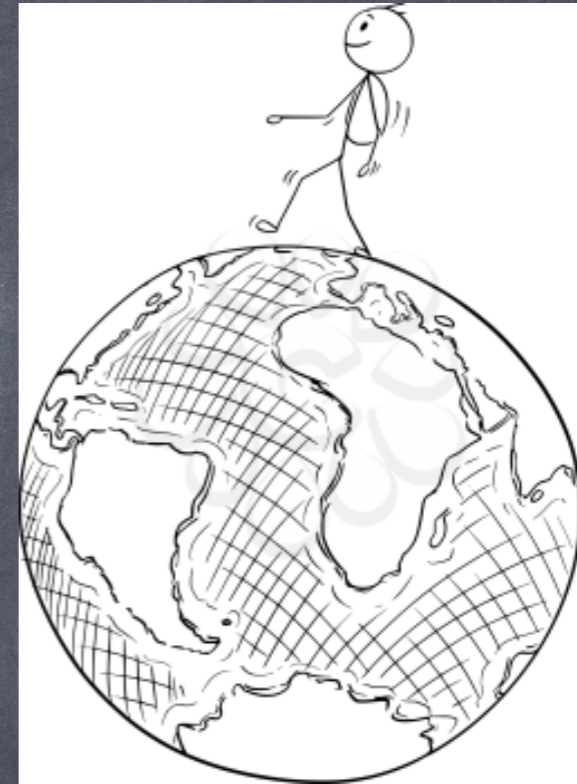
Des lignes droites  
... courbes ???

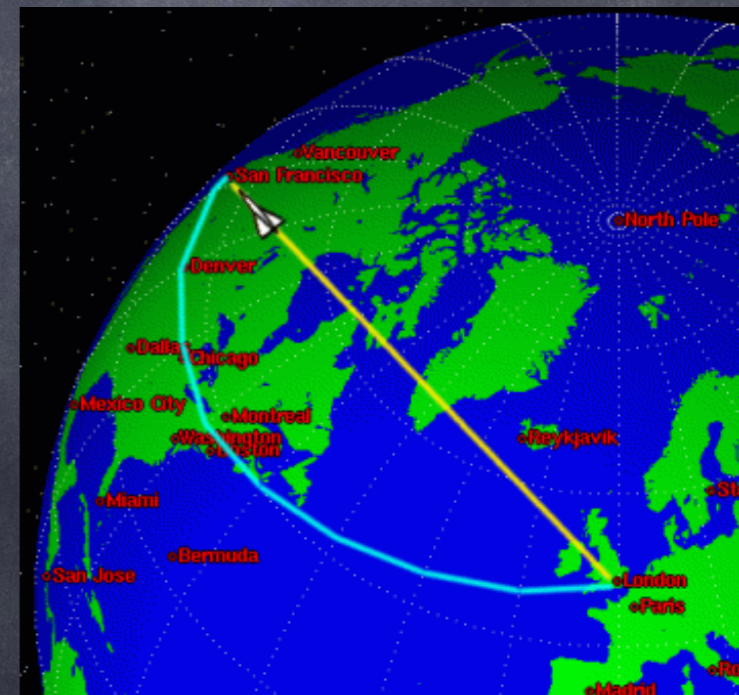
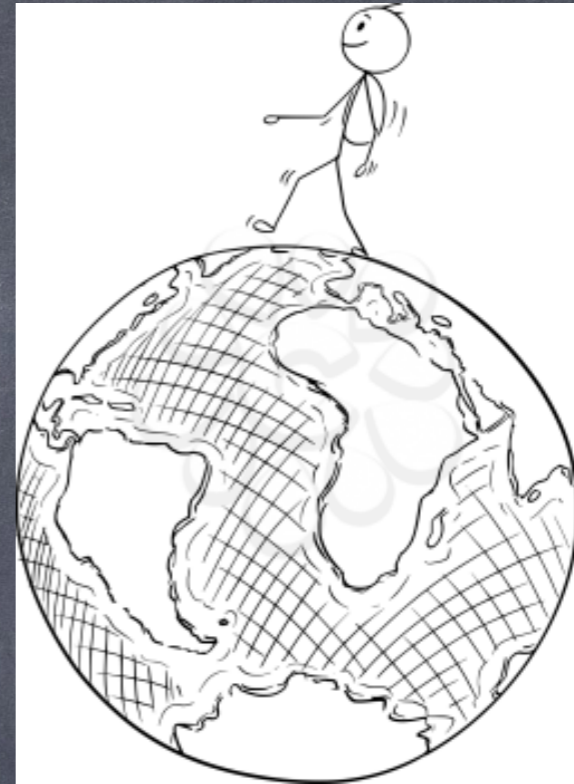
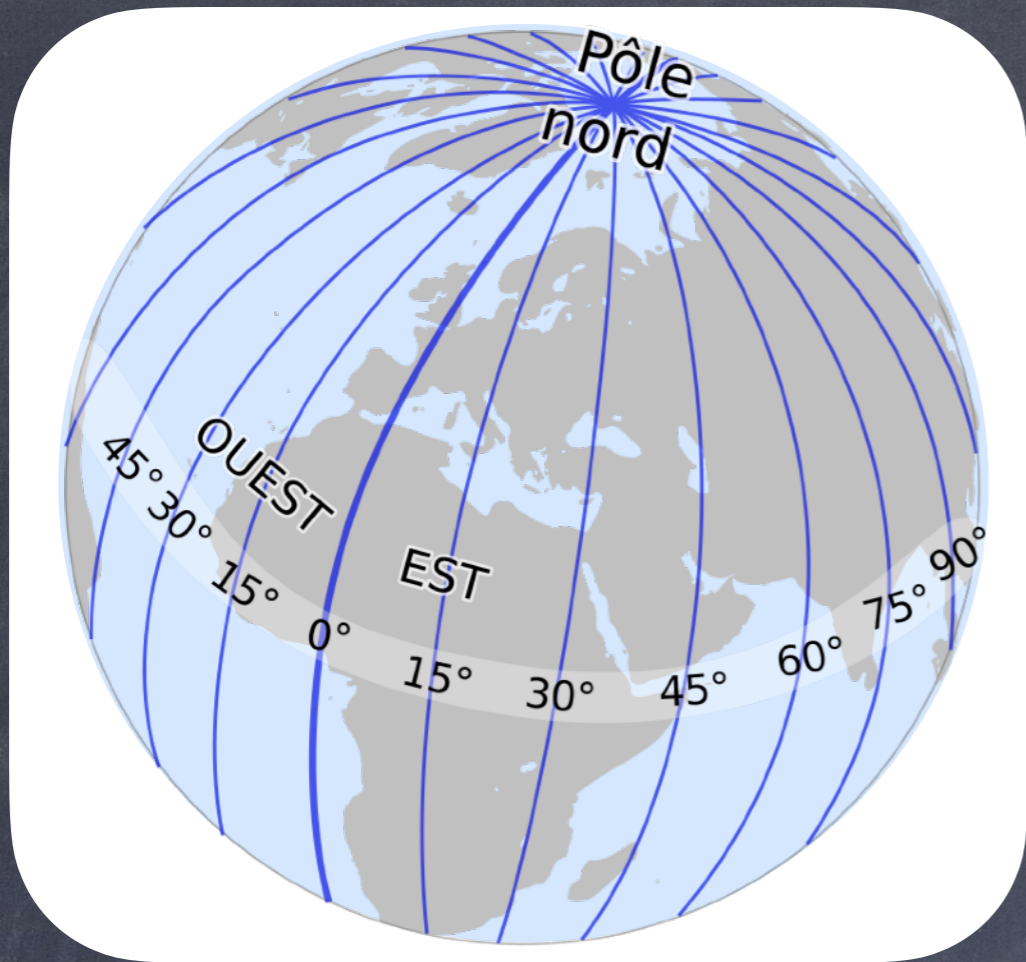


ILS SONT FOUS  
CES PHYSICIENS !



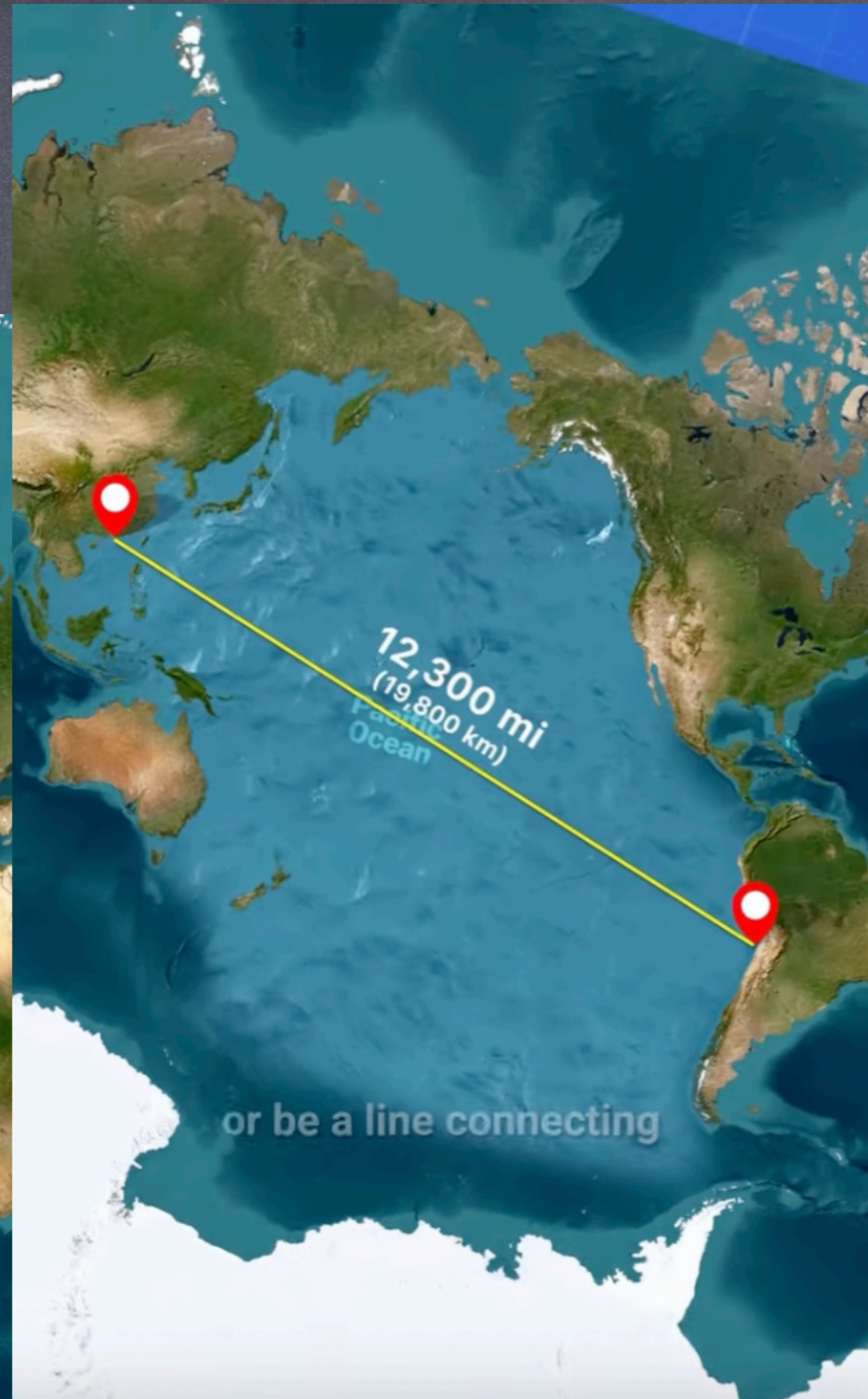




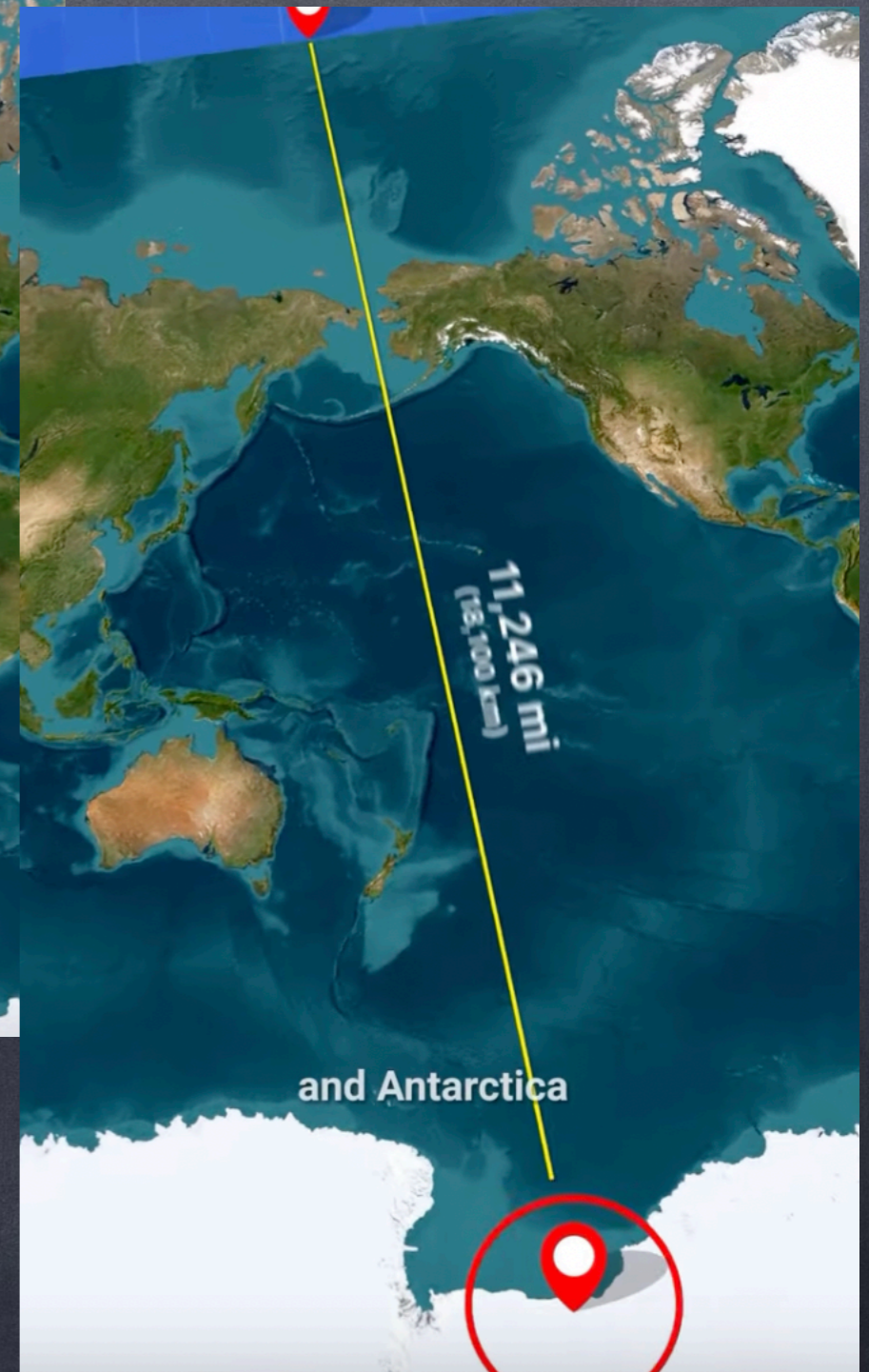
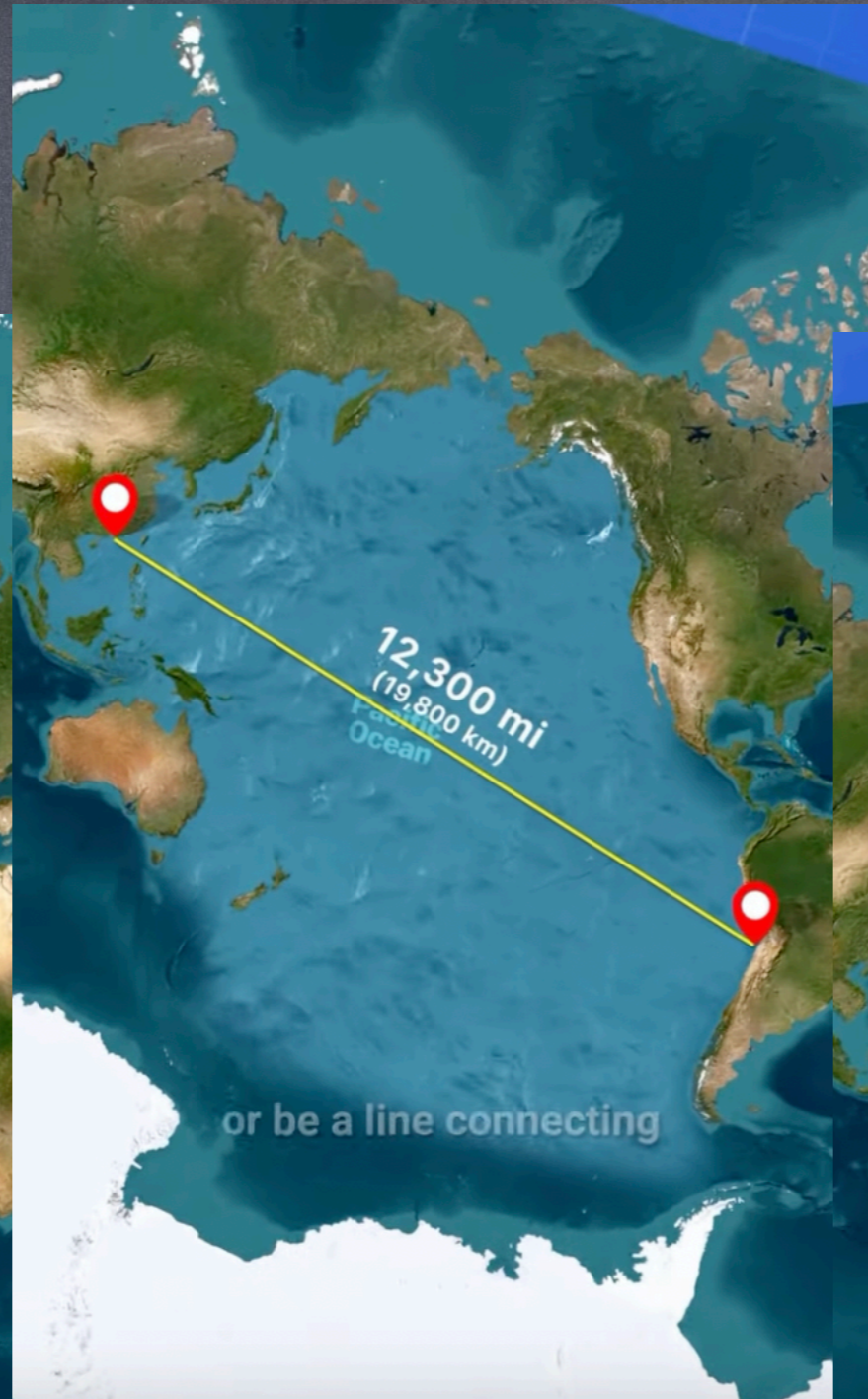




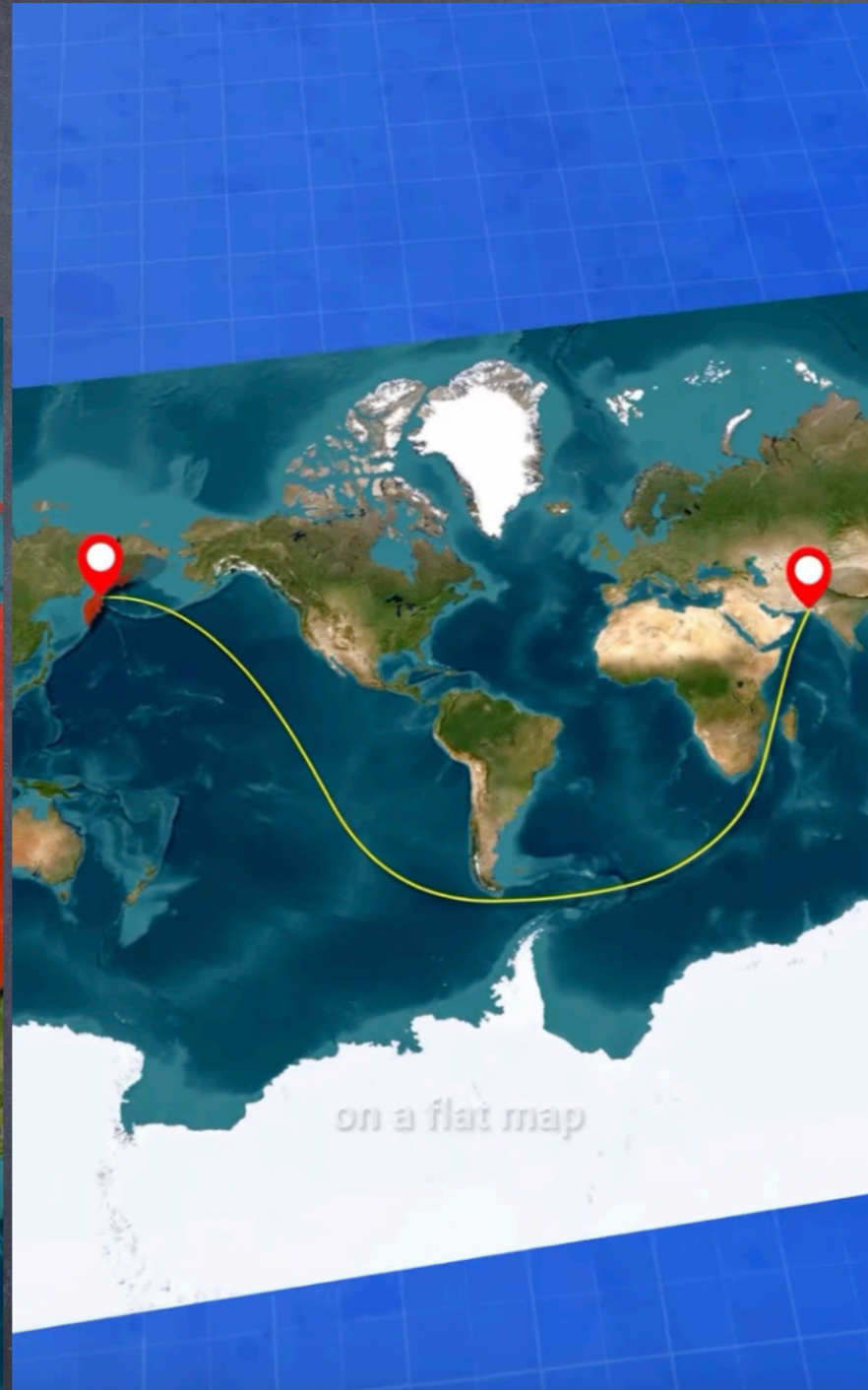
in a straight line

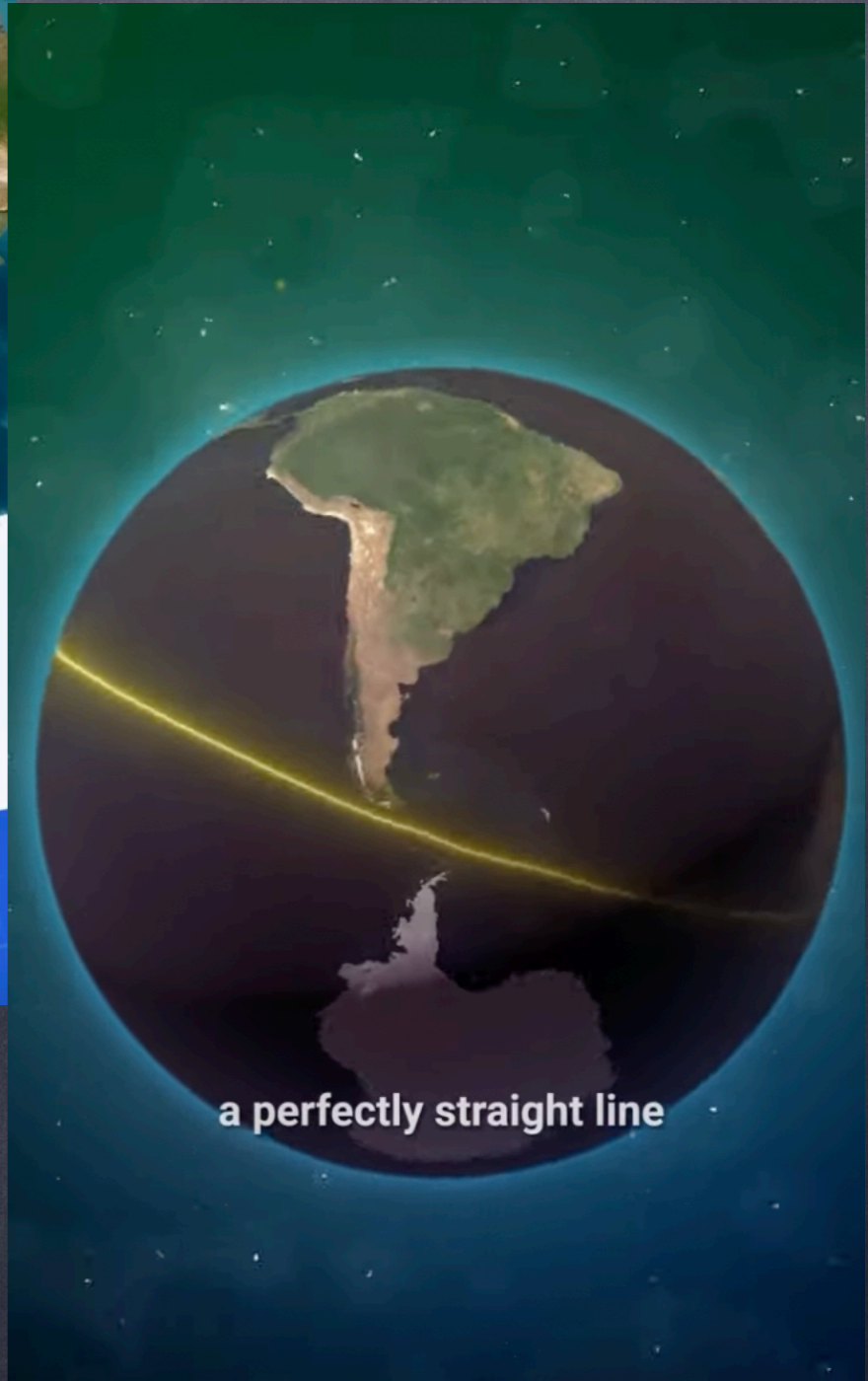
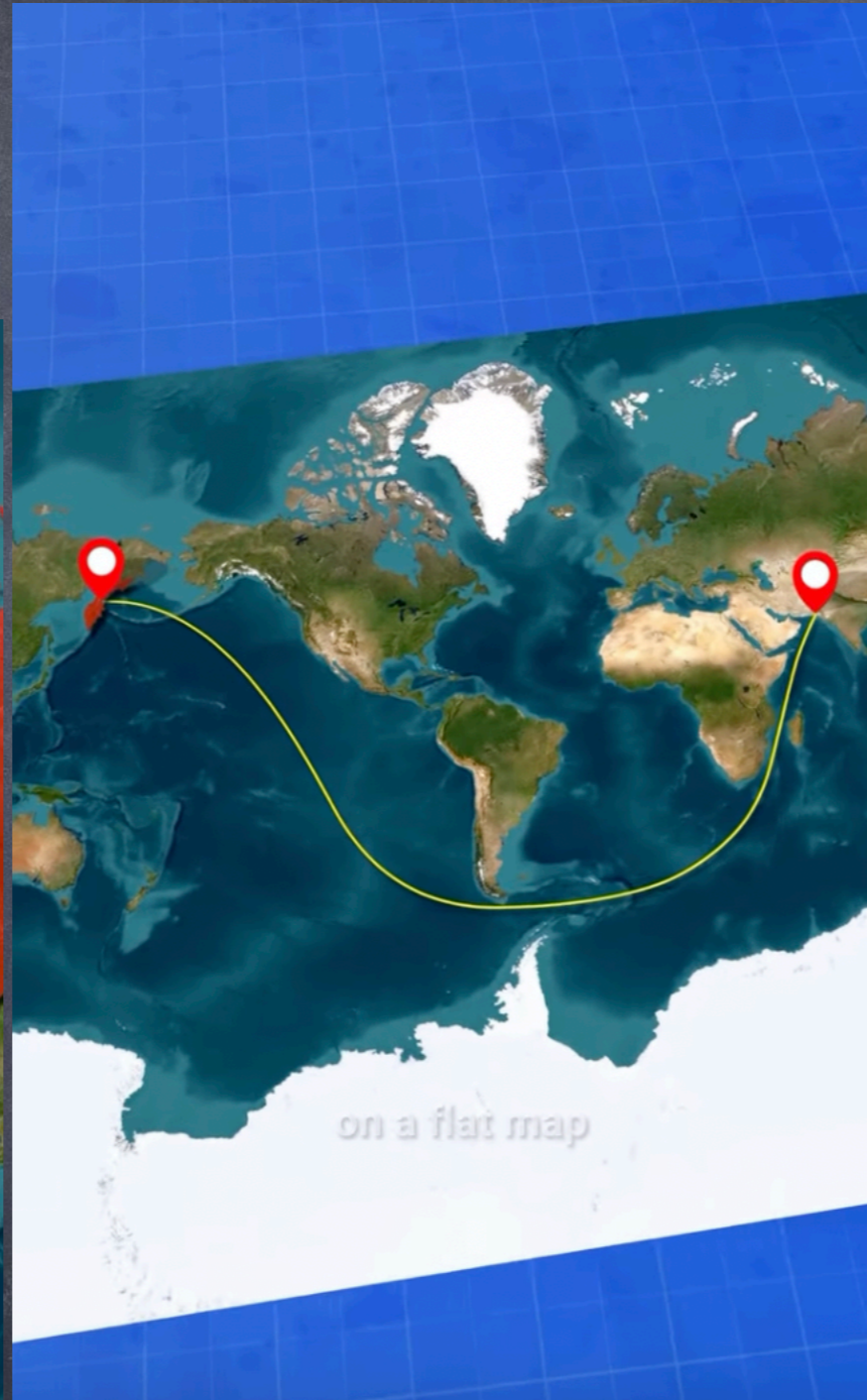










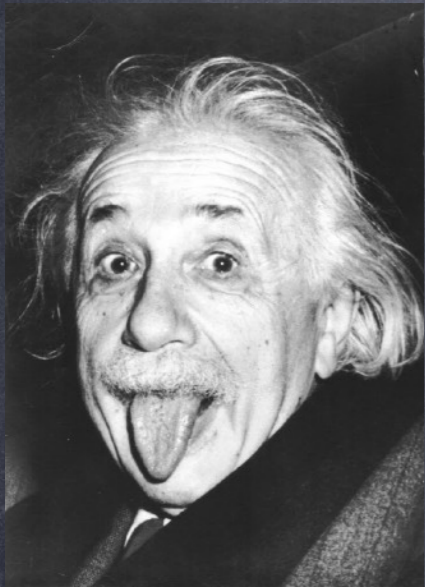


Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,

Et puis, vint la RELATIVITE GENERALE !

Gravitation = une propriété de l'espace-temps



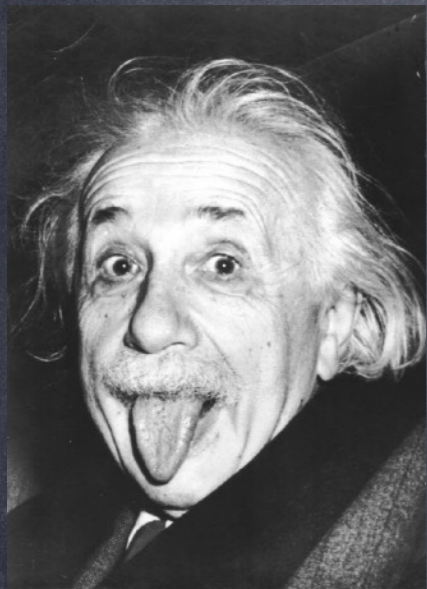
Nous suivons des  
lignes droites dans  
une géométrie courbe  
dans l'espace-temps

# Mais qu'est-ce que la Gravité ?

Il était une fois la gravitation Newtonienne,

Et puis, vint la RELATIVITE GENERALE !

Gravitation = une propriété de l'espace-temps



La géométrie guide l'évolution de la matière



Nous suivons des  
lignes droites dans  
une géométrie courbe  
dans l'espace-temps

La matière courbe la géométrie de l'espace-temps

Et là, la gravitation devient science-fiction !

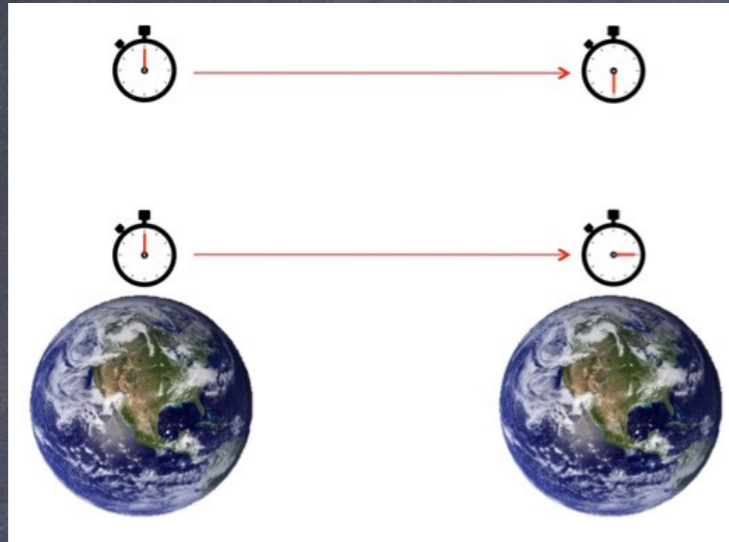
# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

- La gravitation dilate le temps



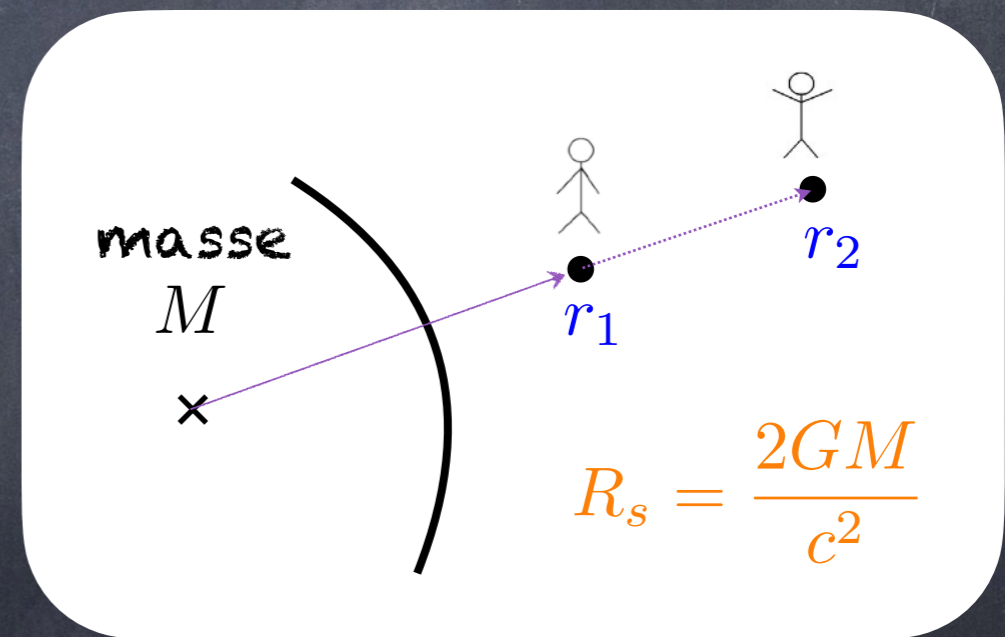
# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Gravitational Time Dilatation**



$$\frac{\Delta\tau_1}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r_1}}} = \frac{\Delta\tau_2}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r_2}}} = \Delta\tau_\infty$$

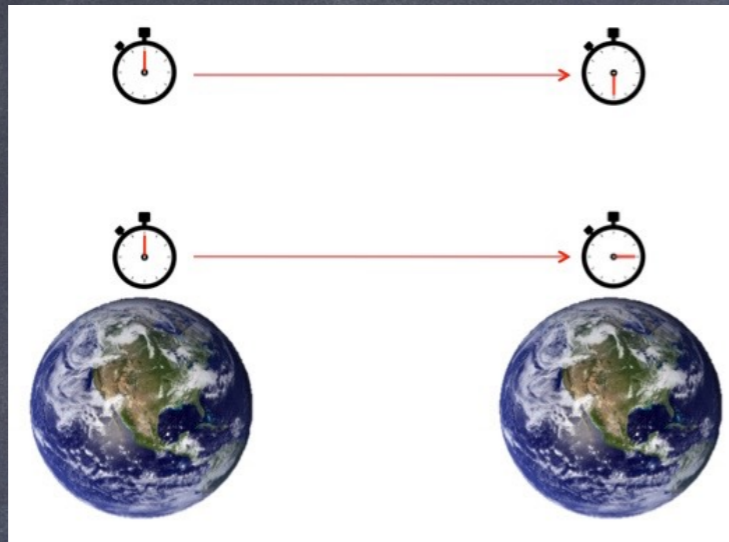
Plus la distance  $r$  est petite,  
plus la gravité est forte,  
plus le temps ralentit !



Rayon de Schwarzschild

# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Gravitational Time Dilatation**



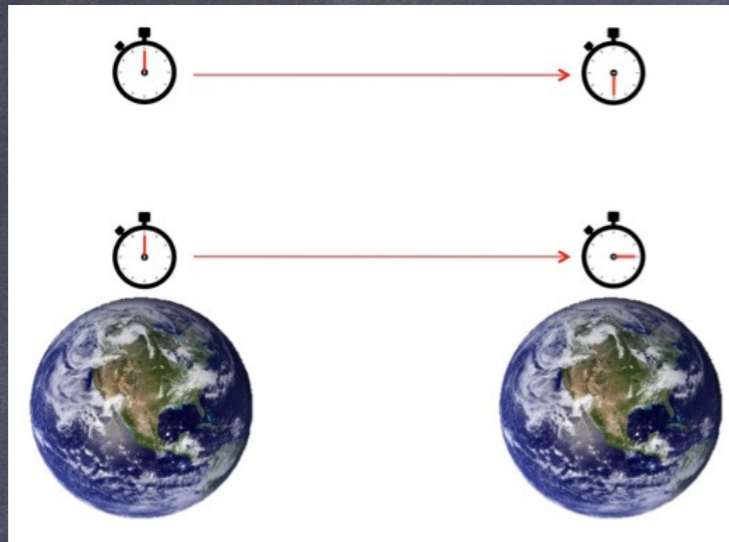
$$\frac{\Delta\tau_1}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r_1}}} = \frac{\Delta\tau_2}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r_2}}} = \Delta\tau_\infty$$

Plus la distance  $r$  est petite,  
plus la gravité est forte,  
plus le temps ralentit !

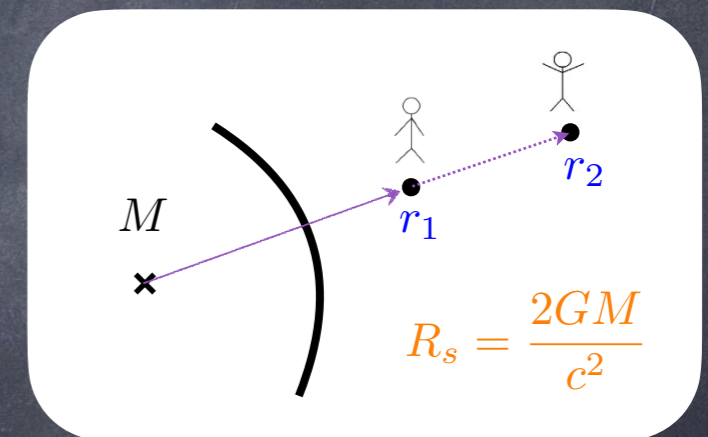


# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Gravitational Time Dilatation**



$$\frac{\Delta\tau_1}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r_1}}} = \frac{\Delta\tau_2}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r_2}}} = \Delta\tau_\infty$$



Pour la Terre :

Rayon de la Terre :

Distance Satellite :

$$R_s = 8.9 \text{ mm}$$

$$r_1 = 6400 \text{ km}$$

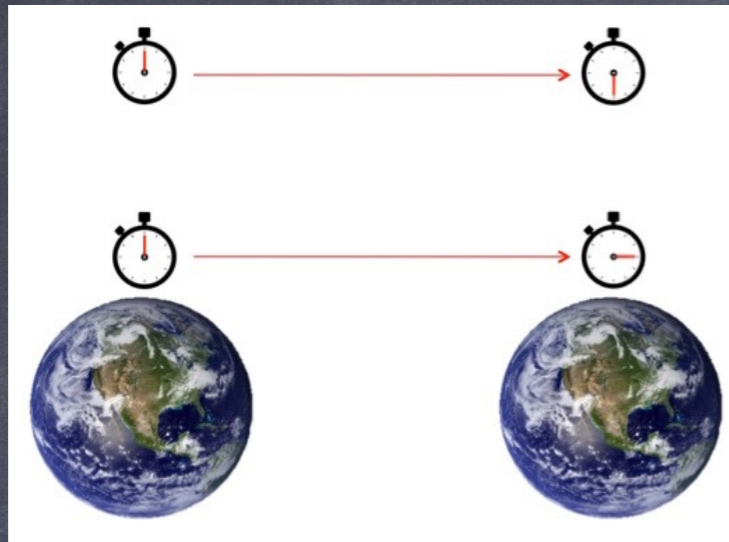
$$r_2 = r_1 + 36000 \text{ km}$$

$$\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2} \sim 1 - 7.10^{-10}$$

Hafele-Keating experiment (1971)

# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

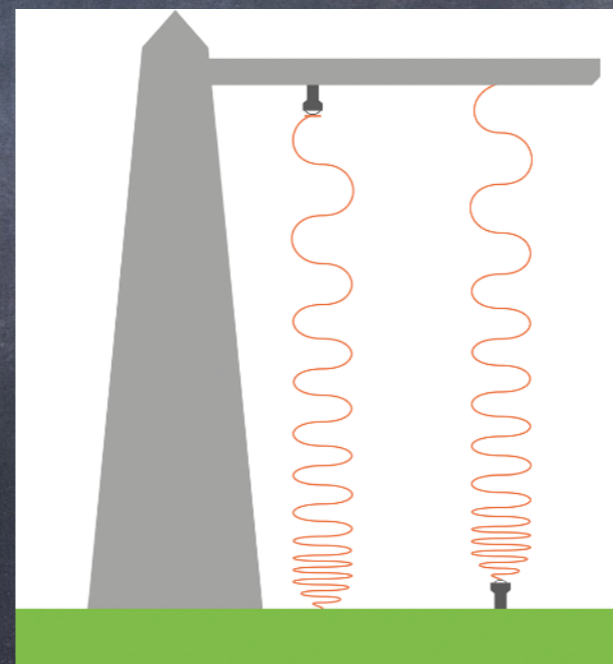
Code name : **Gravitational Time Dilatation**



$$\frac{\Delta\tau_1}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r_1}}} = \frac{\Delta\tau_2}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{r_2}}} = \Delta\tau_\infty$$

Pound-Rebka experiment (1959)

Effet Doppler gravitationnel  
pour une tour de 22 m

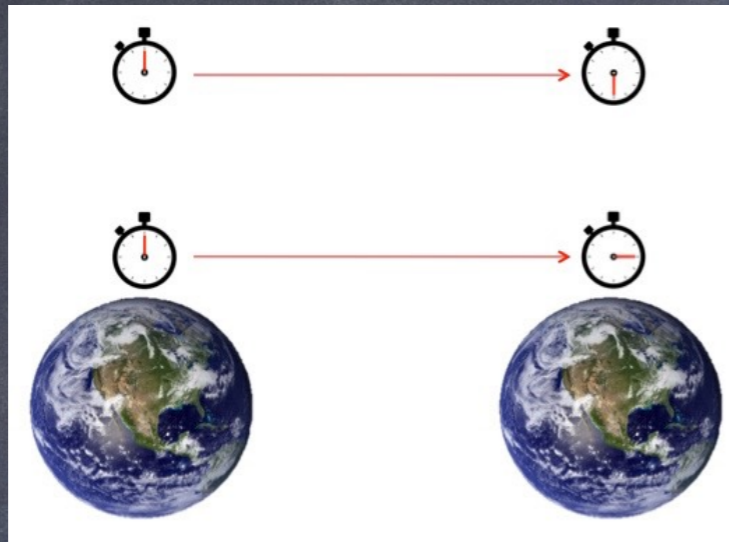


↑ fréquence diminuée

↓ fréquence augmentée

# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Gravitational Time Dilatation**



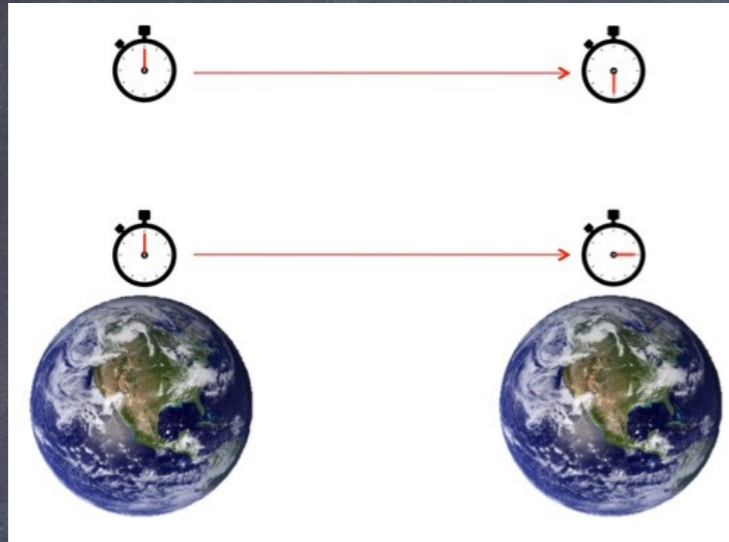
Bizarrerie

ou

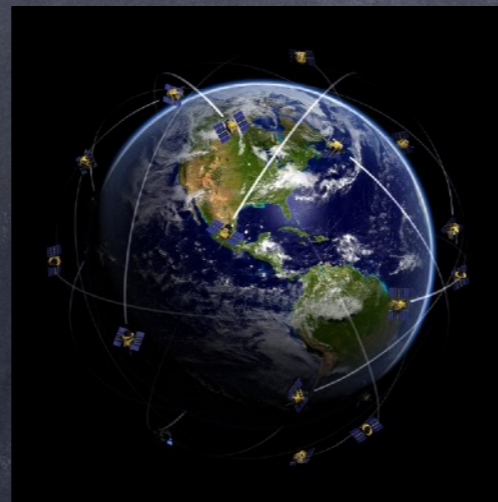
conséquences pratiques ?

# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Gravitational Time Dilatation**



Corrections relativistes de dilatation temporelle  
nécessaire au système GPS !

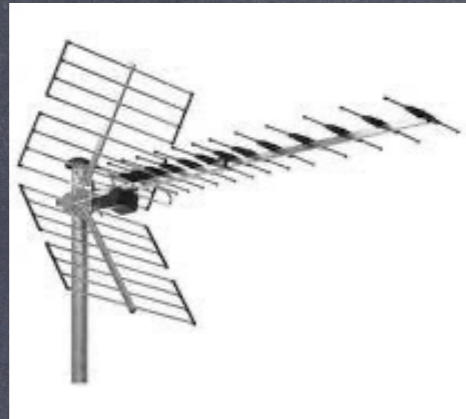


# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

- La gravitation dilate le temps
- La gravitation fait vibrer l'espace-temps

# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : Ondes Gravitationnelles



Vibration de charges



Emission d'ondes  
électromagnétiques



# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

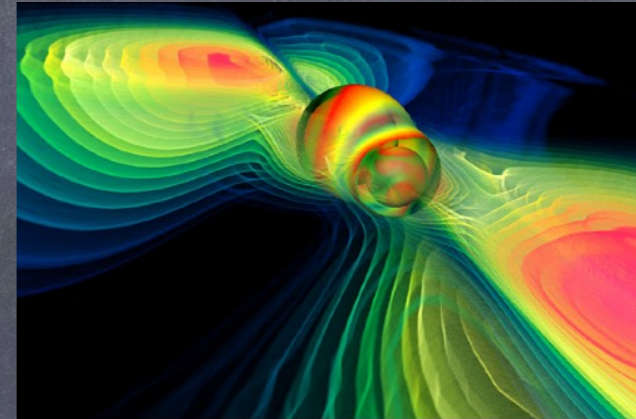
Code name : Ondes Gravitationnelles



Vibration de charges



Emission d'ondes  
électromagnétiques



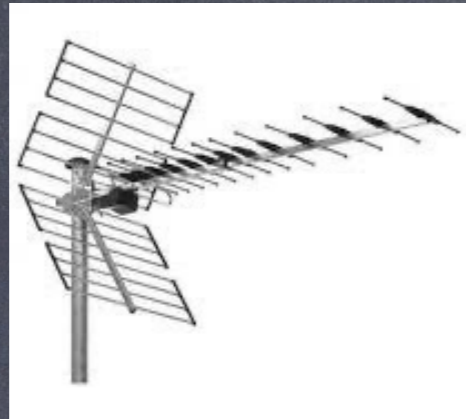
Vibration de masses



Emission d'ondes  
gravitationnelles

# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

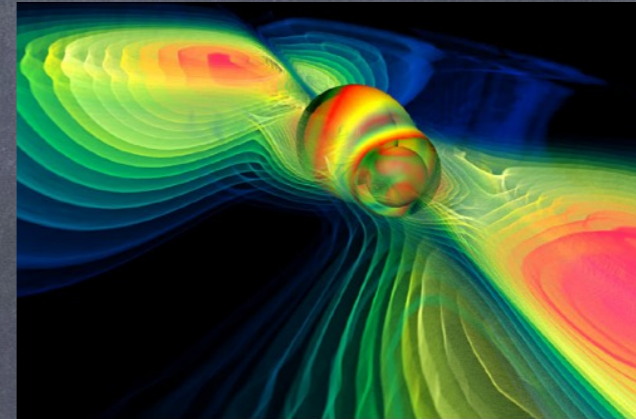
Code name : Ondes Gravitationnelles



Vibration de charges



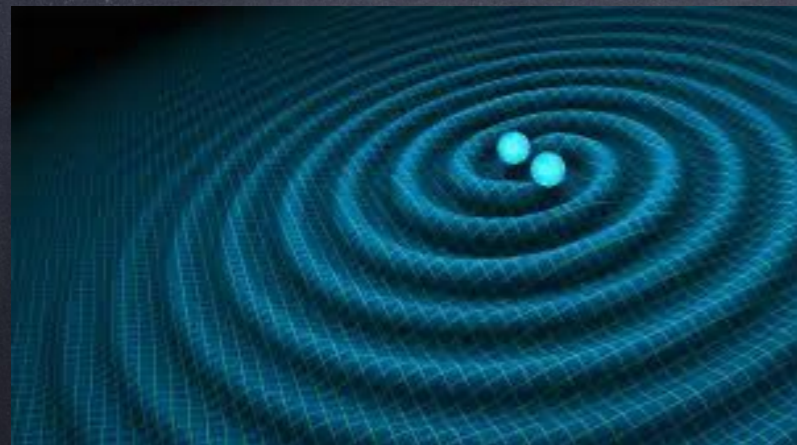
Emission d'ondes  
électromagnétiques



Vibration de masses



Emission d'ondes  
gravitationnelles



Rapprochement  
dû à perte d'énergie  
due à émission d'ondes  
gravitationnelles

Hulse-Taylor binary pulsar 1974  
Nobel Prize 1993

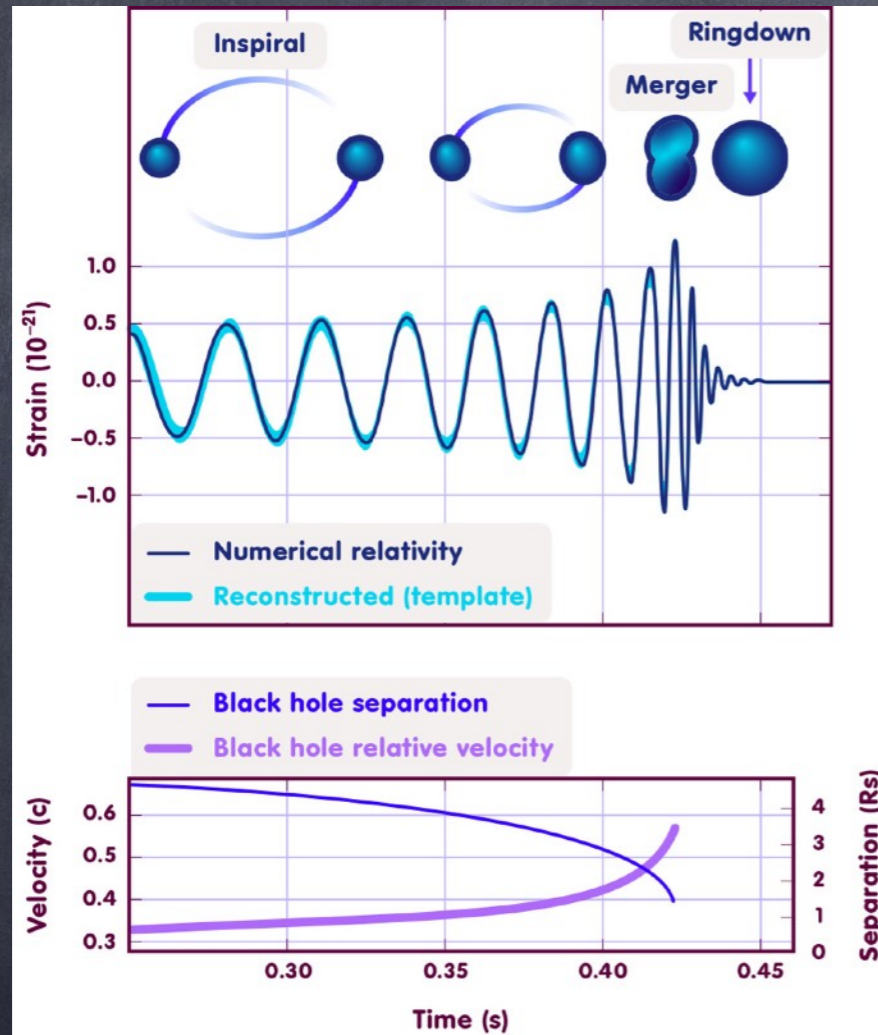


# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Ondes Gravitationnelles**

Et peut-on les voir sur Terre ?

Science-fiction réalité



# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

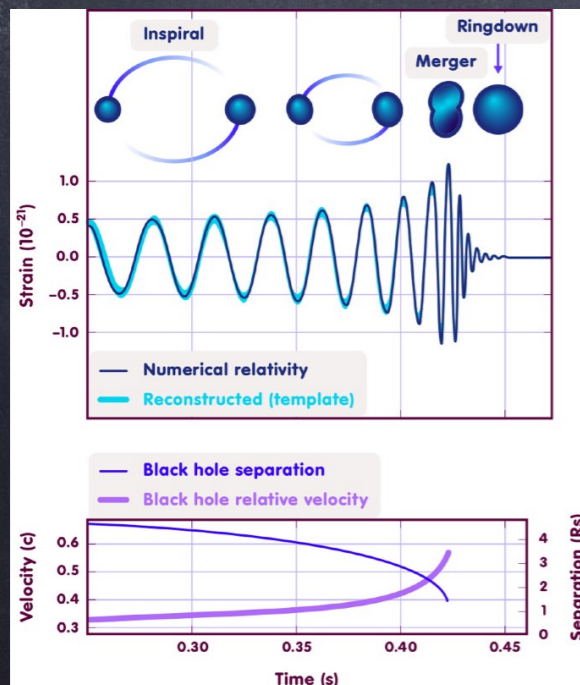
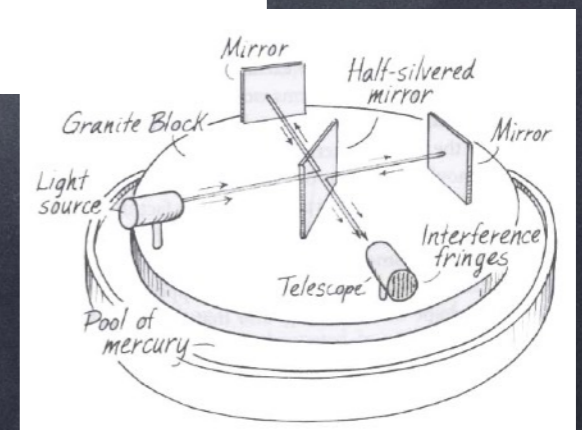
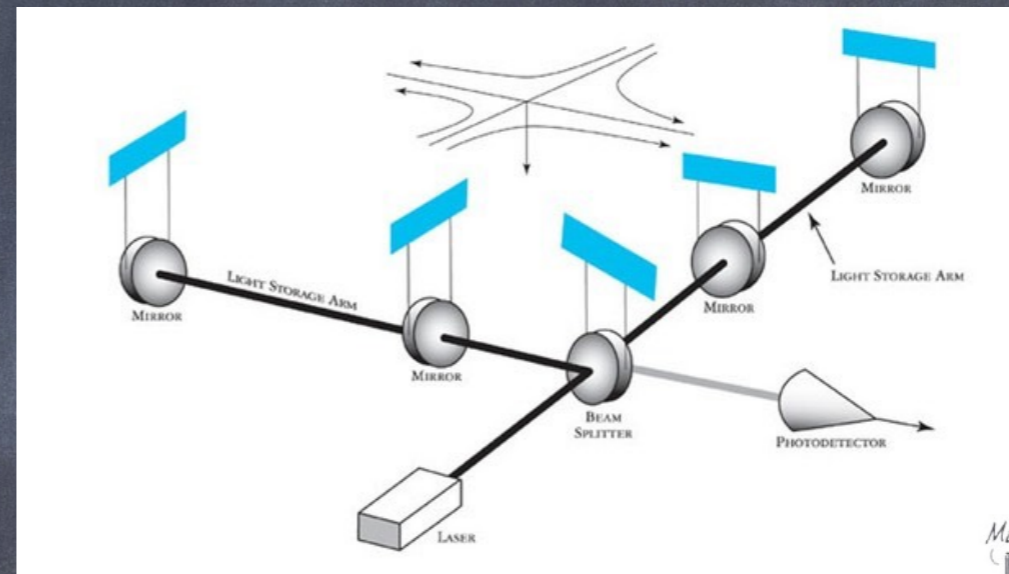
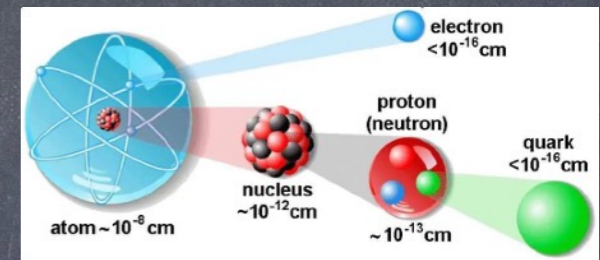
Code name : **Ondes Gravitationnelles**

Et peut-on les voir sur Terre ?

Science-fiction réalité



Distortions de  $10^{-20} m$



Nobel Prize 2017



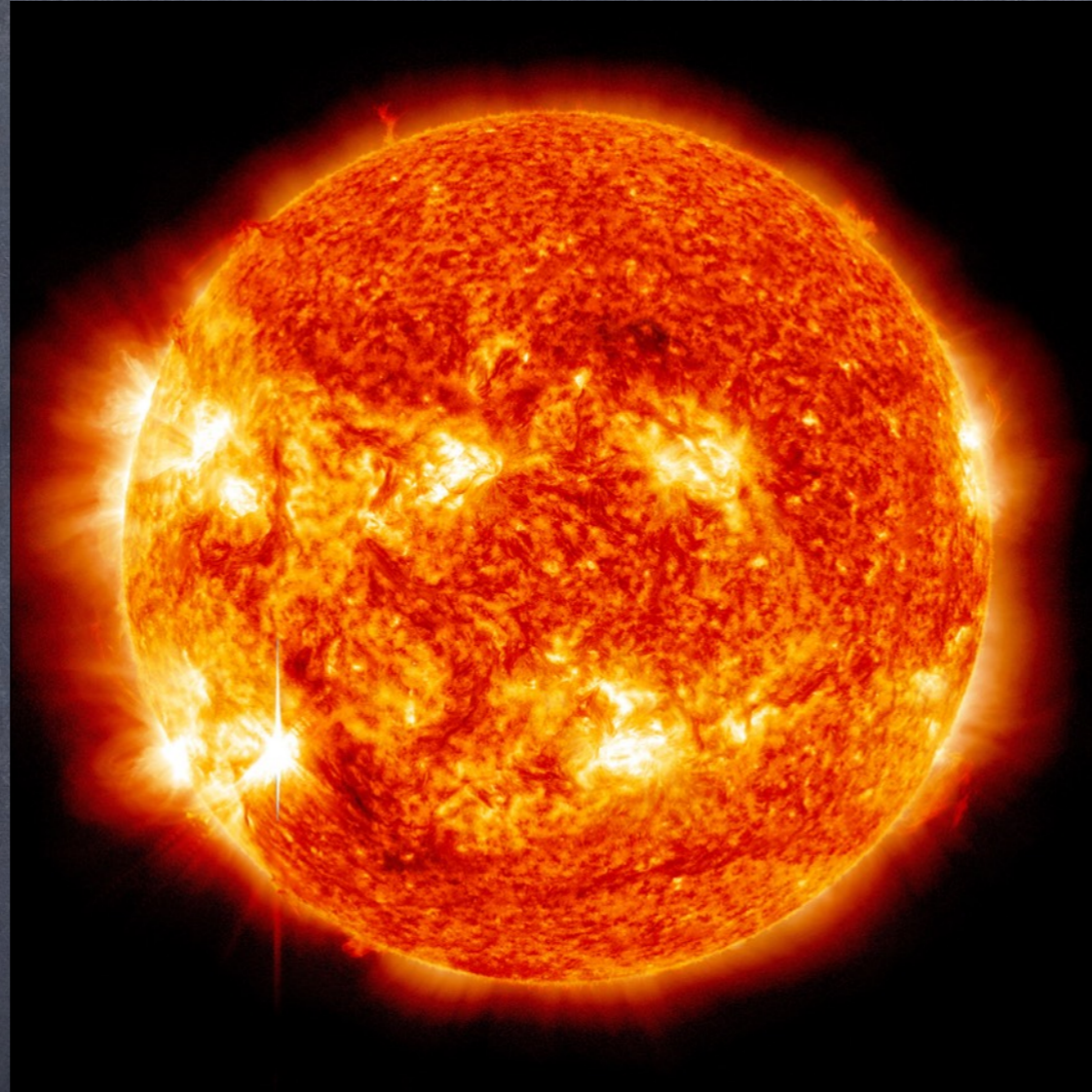
Mickelson & Morley  
 Nobel Prize 1907

# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

- La gravitation dilate le temps
- La gravitation fait vibrer l'espace-temps
- La gravitation effondre les étoiles

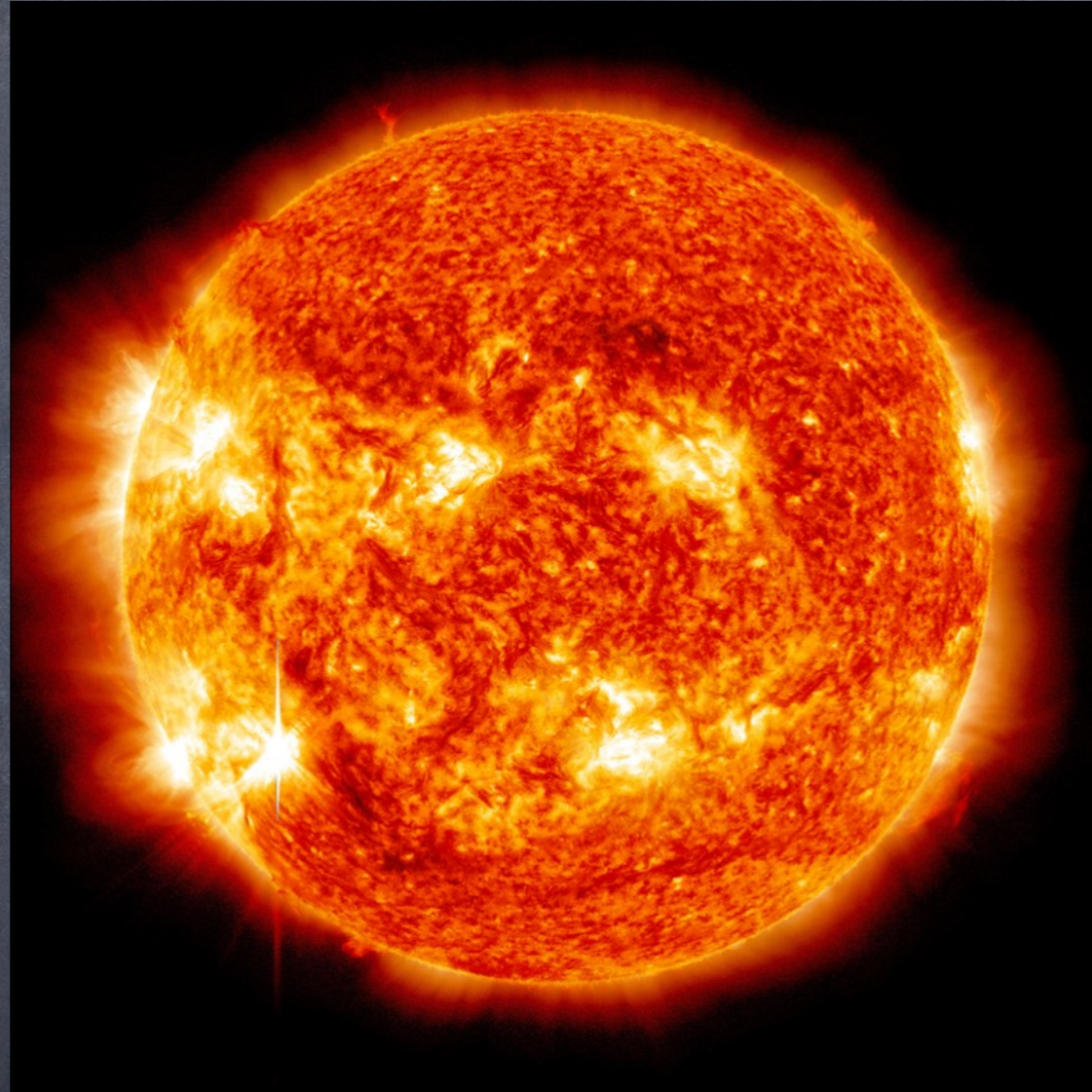
# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Soleil**



# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Soleil**



Un peu chaud, oui  
mais pas vraiment extrême !

# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Naine Blanche**



40 Eridani B, Sirius B, ...

Etoile effondrée, qui ne brûle plus d'H

Stabilisée par la pression de dégénérescence quantique entre électrons (principe d'exclusion de Pauli) !

Masse d'un Soleil, taille de la Terre

Densité: 1 tonne/cm<sup>3</sup>

Une énorme boule de Carbone et d'Oxygène



# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Naine Blanche**



40 Eridani B, Sirius B, ...

Etoile effondrée, qui ne brûle plus d'H

Stabilisée par la pression de dégénérescence quantique entre électrons (principe d'exclusion de Pauli) !

Masse d'un Soleil, taille de la Terre

Densité: 1 tonne/cm<sup>3</sup>

Une énorme boule de Carbone et d'Oxygène

Code name : **Etoile à neutron (pulsar)**



PSR B1919+21, ...

Etoile effondrée, stabilisée par la pression quantique entre neutrons

Masse d'un Soleil dans 20-40km

Densité:  $10^7 - 10^{13}$  kg/cm<sup>3</sup>

Un énorme noyau atomique avec un intense champs magnétique et un couche super-fluide en surface

# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Naine Blanche**

Code name : **Etoile à neutron (pulsar)**



# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

Code name : **Naine Blanche**



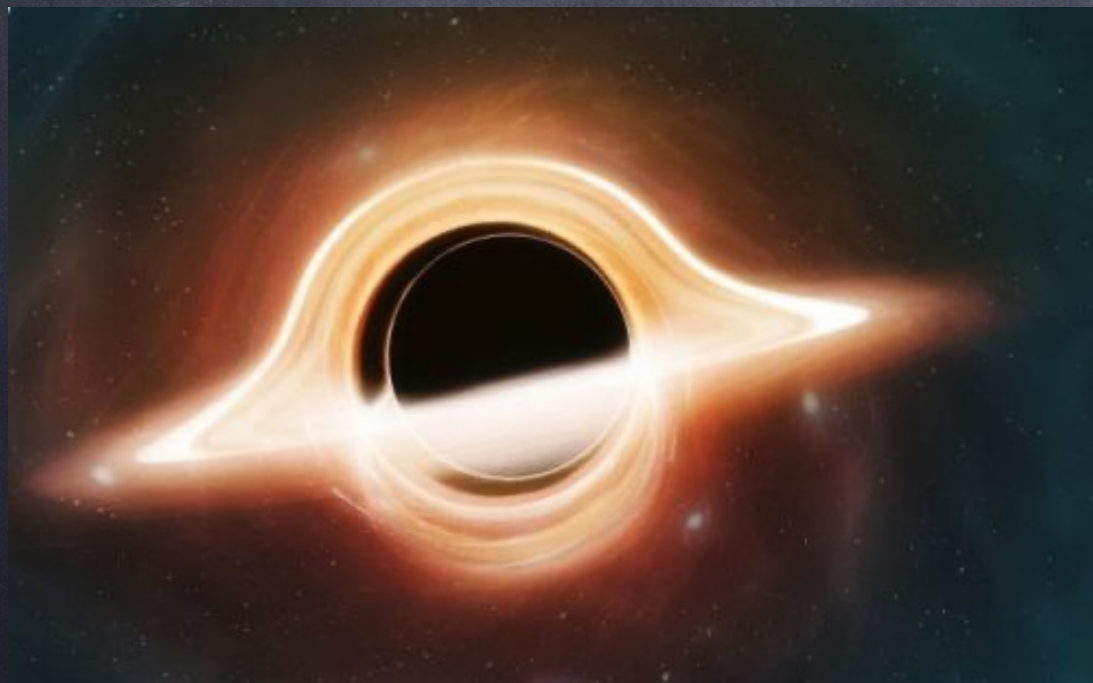
Code name : **Etoile à neutron (pulsar)**



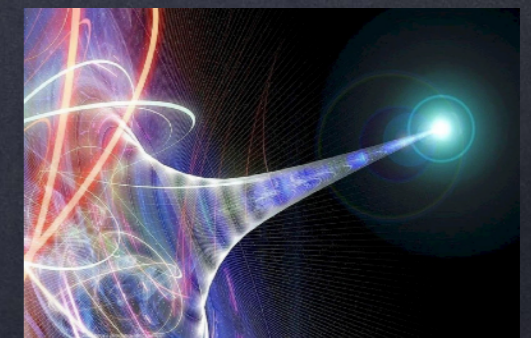
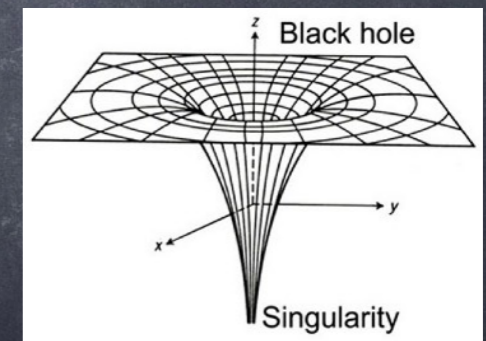
Code name : **Black Hole**

Stade ultime de l'effondrement gravitationnel

Plus rien ne résiste à la gravitation !



Sagittarius A\*, ...

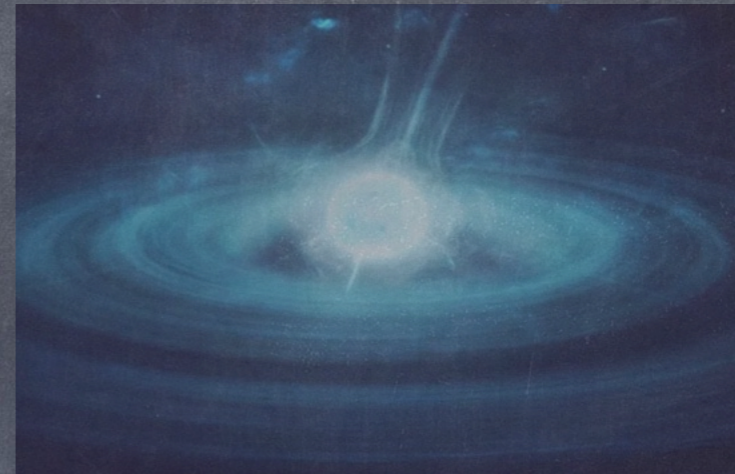


# Relativité Générale: des Phénomènes Extrêmes

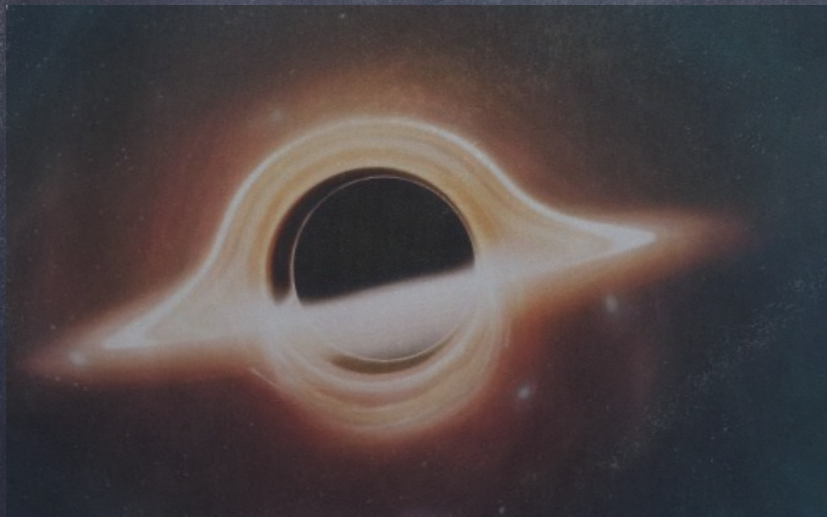
Code name : **Naine Blanche**



Code name : **Etoile à neutron (pulsar)**



Code name : **Black Hole**



Sagittarius A\*, ...

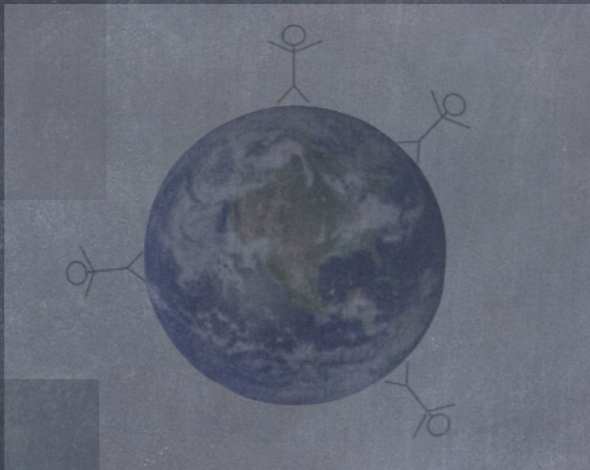


Et là, on rentre dans  
le domaine **quantique** !

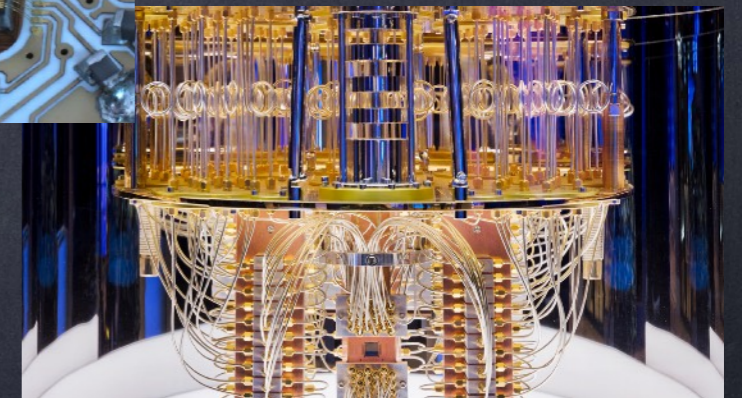
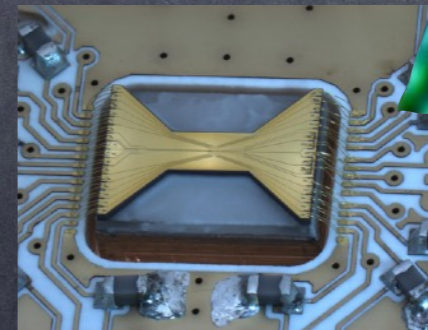
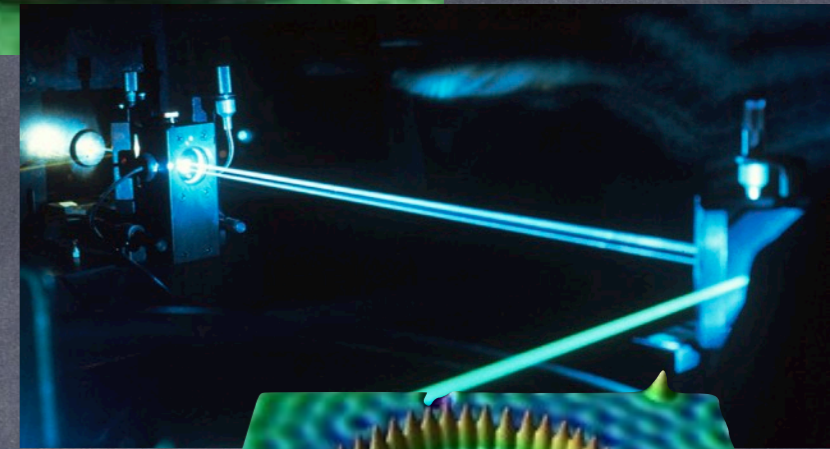
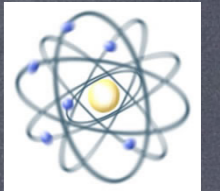
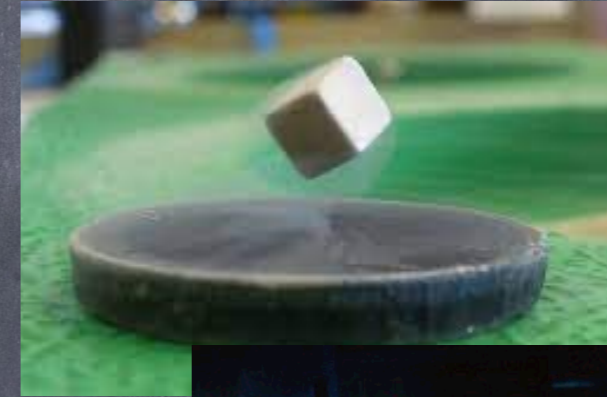


Allo,  
la mécanique  
quantique ?

# Gravitation



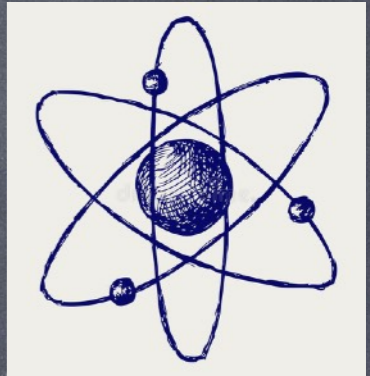
# Quantique



Bienvenue dans La Physique Quantique

# Spectre de l'atome d'hydrogène

Inventée pour stabiliser les atomes !



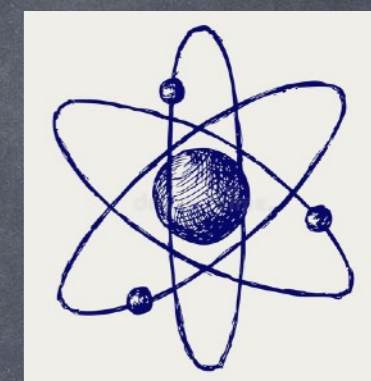
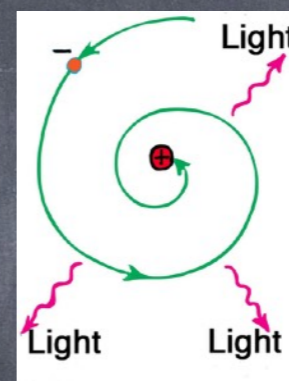


# Spectre de l'atome d'hydrogène

Inventée pour stabiliser les atomes !

Dans la théorie classique:

L'électron est accéléré, il rayonne, il perd de l'énergie, et il se crash !!

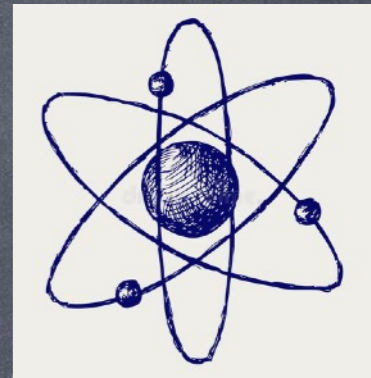
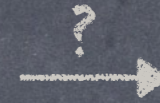
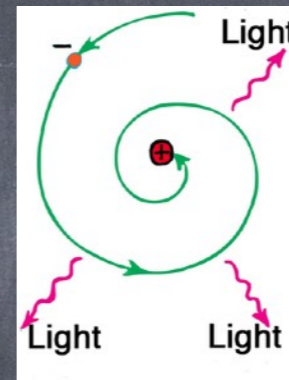


# Spectre de l'atome d'hydrogène

Inventée pour stabiliser les atomes !

Dans la théorie classique:

L'électron est accéléré, il rayonne, il perd de l'énergie, et il se crash !!

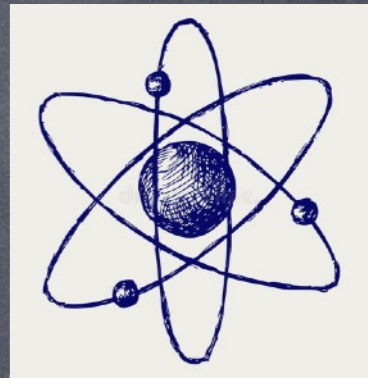
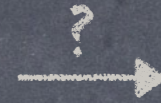
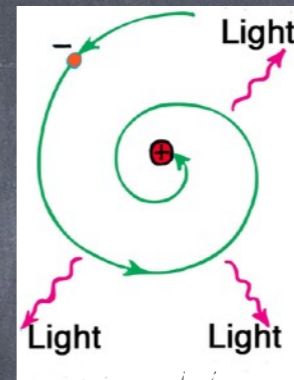


# Spectre de l'atome d'hydrogène

Inventée pour stabiliser les atomes !

Dans la théorie classique:

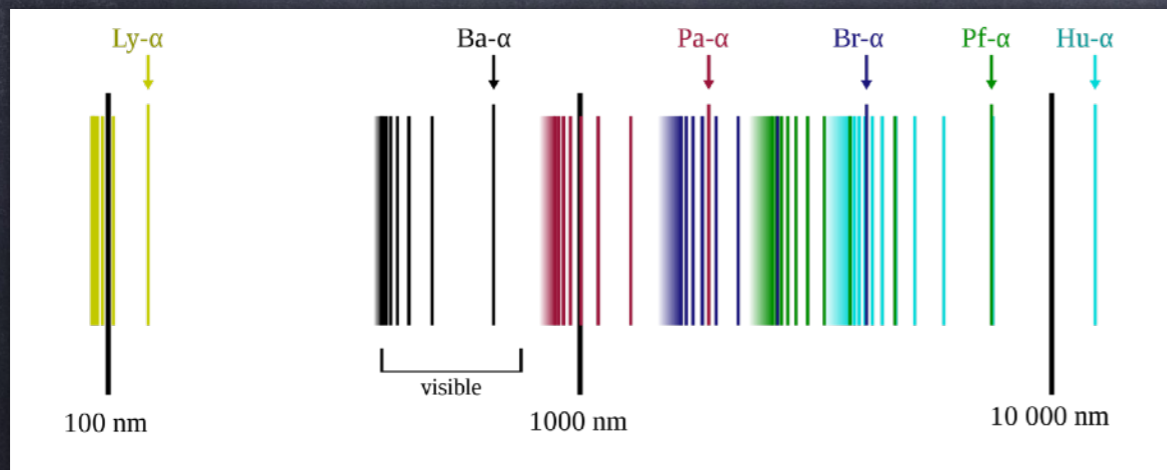
L'électron est accéléré, il rayonne, il perd de l'énergie, et il se crash !!



Expérimentalement:

C'est TOUT Faux ! Les atomes sont stables

et émettent des fréquences de lumière bien précises.



Spectre de l'atome d'hydrogène

Balmer (1885), Lyman (1904), Paschen (1908), ...

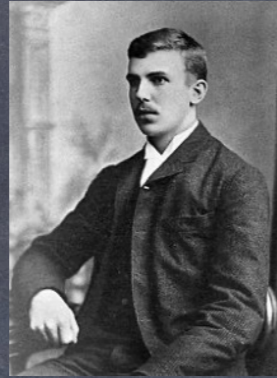
# Spectre de l'atome d'hydrogène

Modélisé par Bohr & Rutherford

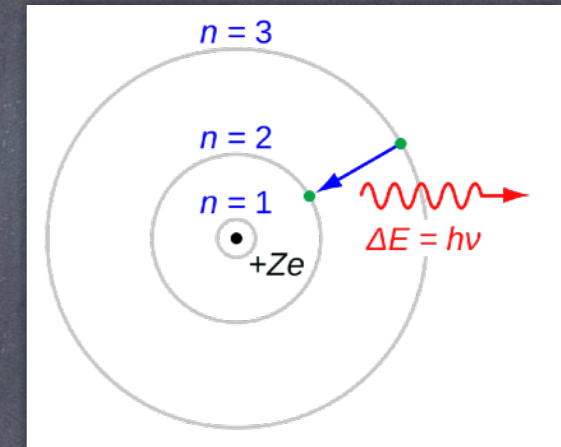
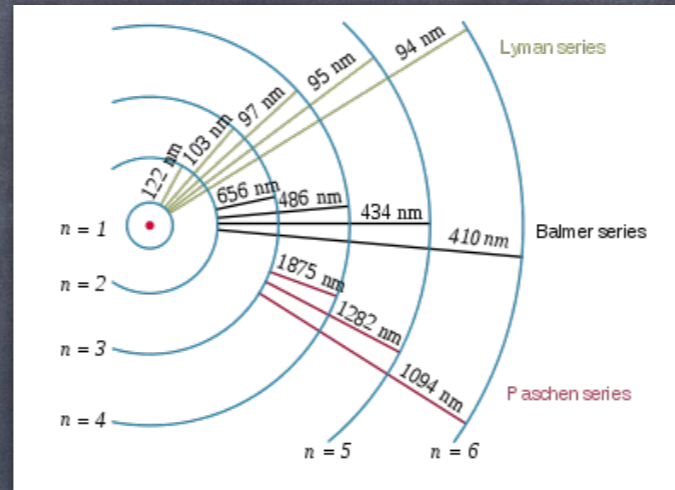
Des électrons qui tournent autour d'un noyau mais des orbites précises !



Nobel 1922



Nobel 1908



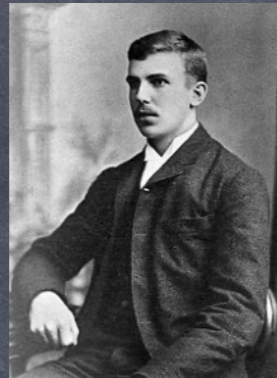
# Spectre de l'atome d'hydrogène

Modélisé par Bohr & Rutherford

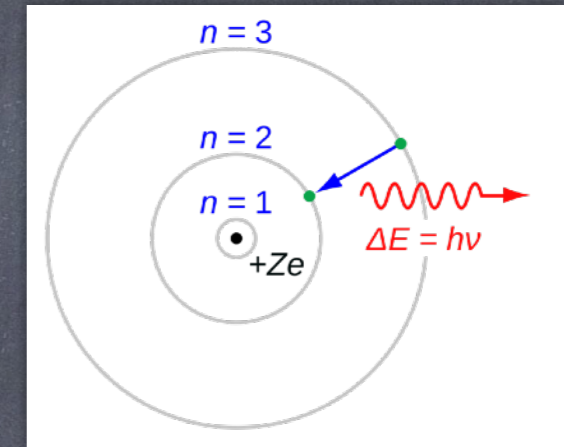
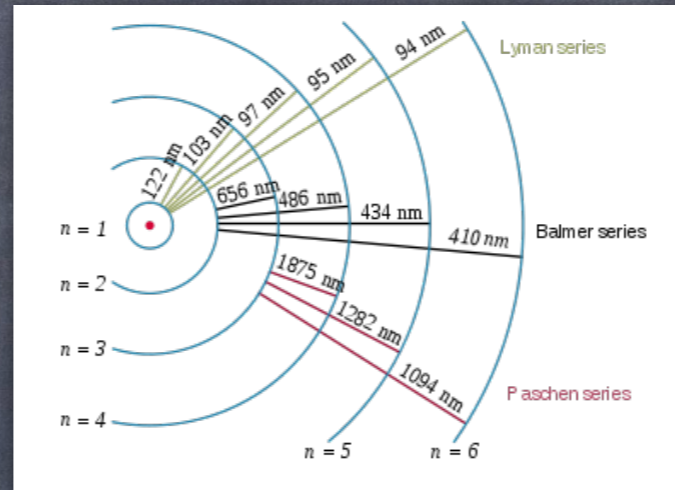
Des électrons qui tournent autour d'un noyau mais des orbites précises !



Nobel 1922



Nobel 1908



Mais pourquoi seulement certaines orbites sont permises ??

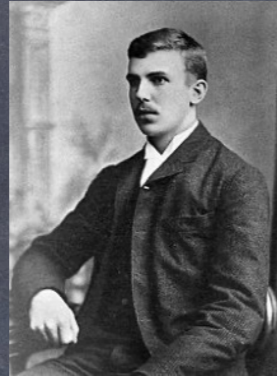
# Spectre de l'atome d'hydrogène

Modélisé par Bohr & Rutherford

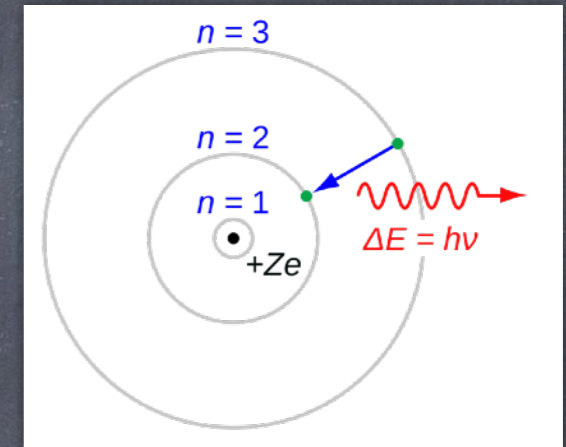
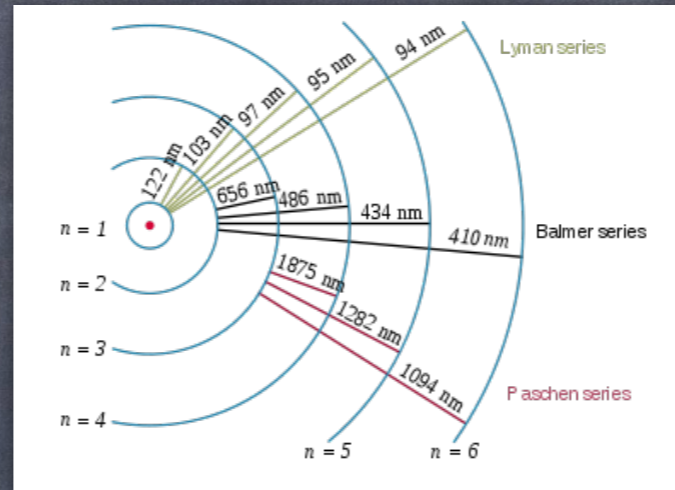
Des électrons qui tournent autour d'un noyau mais des orbites précises !



Nobel 1922

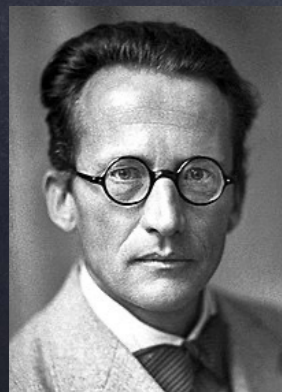


Nobel 1908



Mais pourquoi seulement certaines orbites sont permises ??

Théorisé par Schrödinger



Nobel 1933

L'électron ne se comporte pas comme une particule, mais comme un nuage autour du noyau: une onde de probabilité

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi - V\psi = 0$$

Des solutions discrètes labelées par un entier n !!!

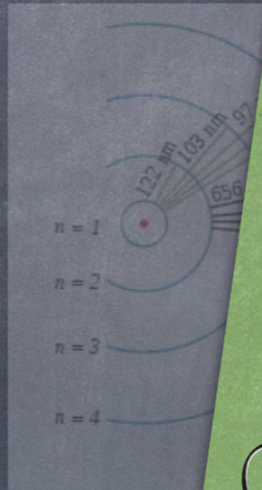
# Spectre de l'atome d'Hydrogène

Modélisé par Bohr & Rutherford

Des électrons qui tournent autour d'un noyau central!



Nobel



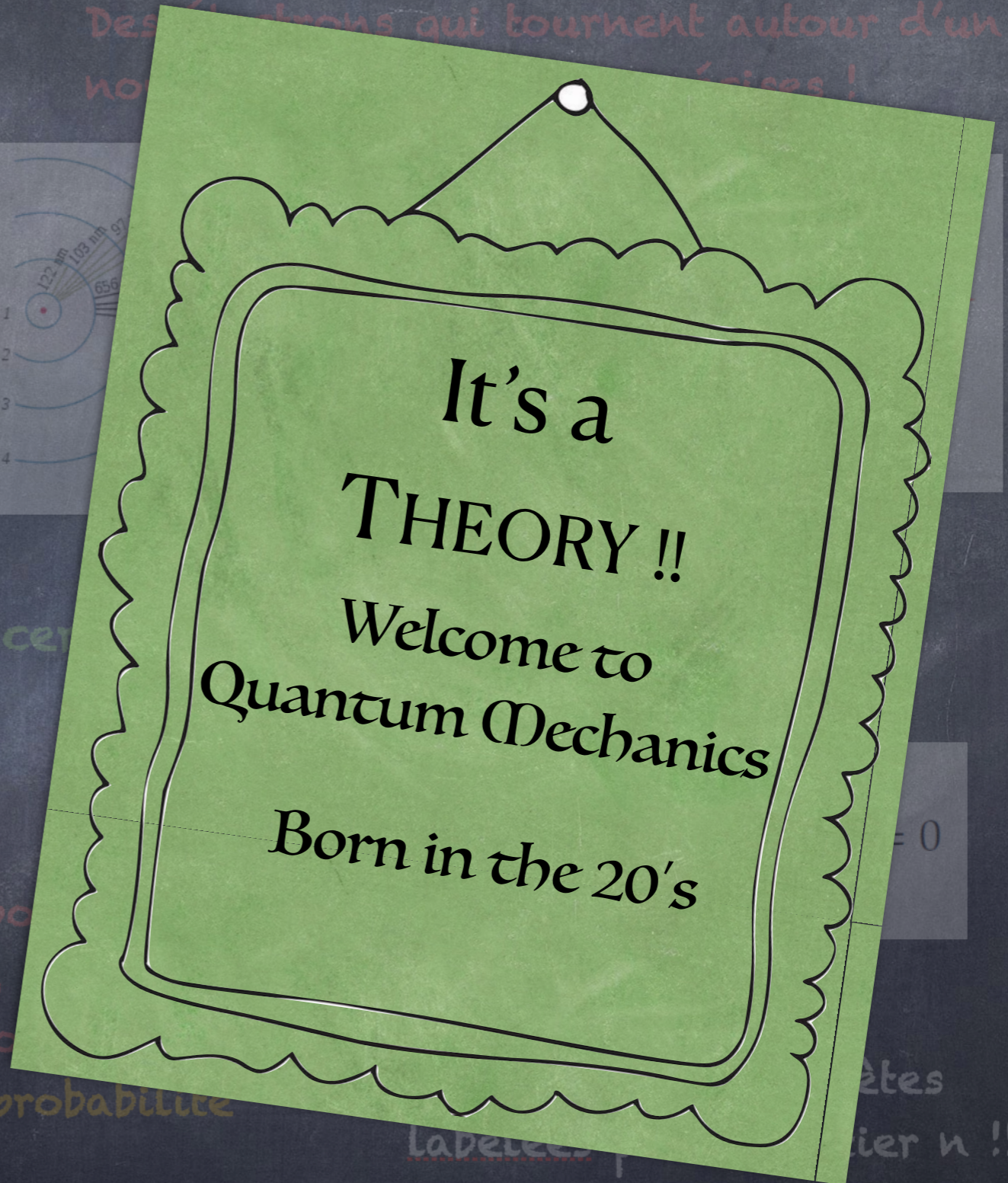
Modèle de l'atome de Bohr

Théorisé par Schrödinger



Nobel 1933

L'électron ne se comporte pas comme une particule, mais comme un nuage autour du noyau: une onde de probabilité

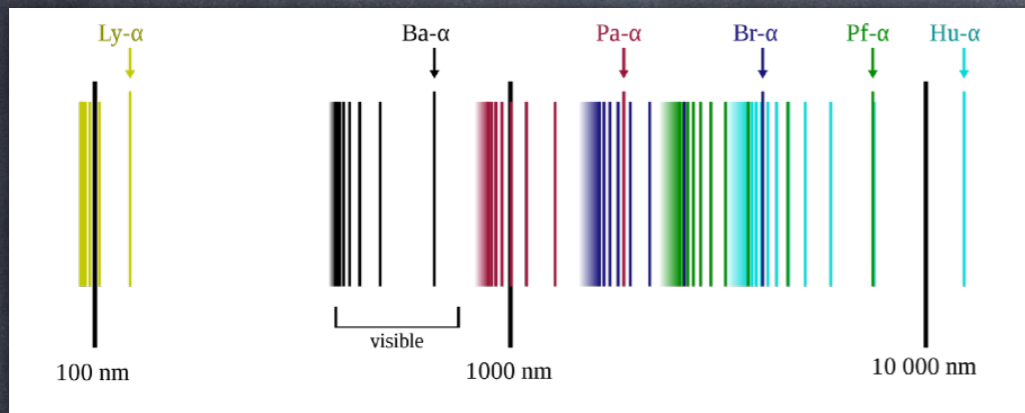


$E = 0$

à l'état n !!!

# Spectre de l'atome d'Hydrogène

Et des applications ?



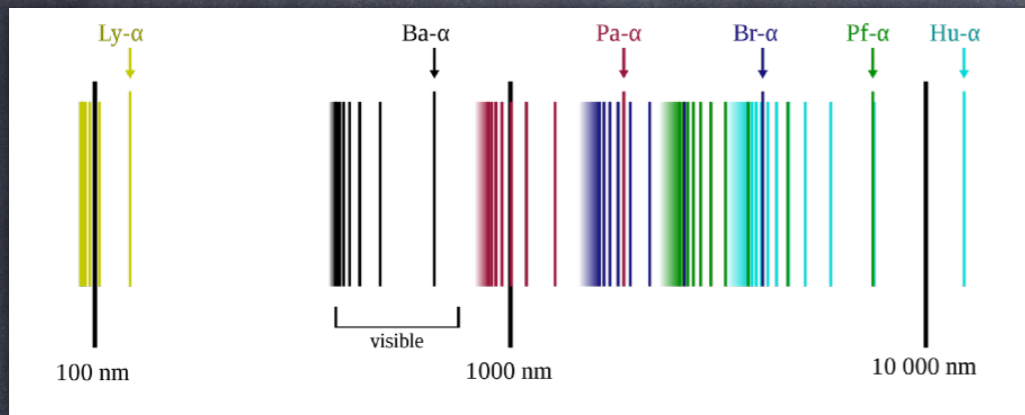
Des faisceaux de lumières émises à une seule fréquence bien précise

sélectionnée par une transition atomique bien choisie



# Spectre de l'atome d'Hydrogène

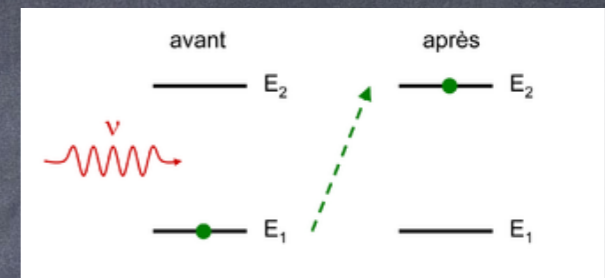
Et des applications ?



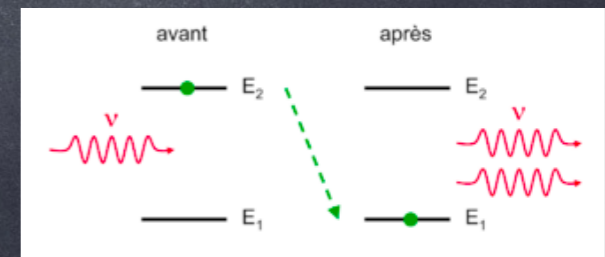
Des faisceaux de lumières émises à une seule fréquence bien précise

sélectionnée par une transition atomique bien choisie

pompage optique



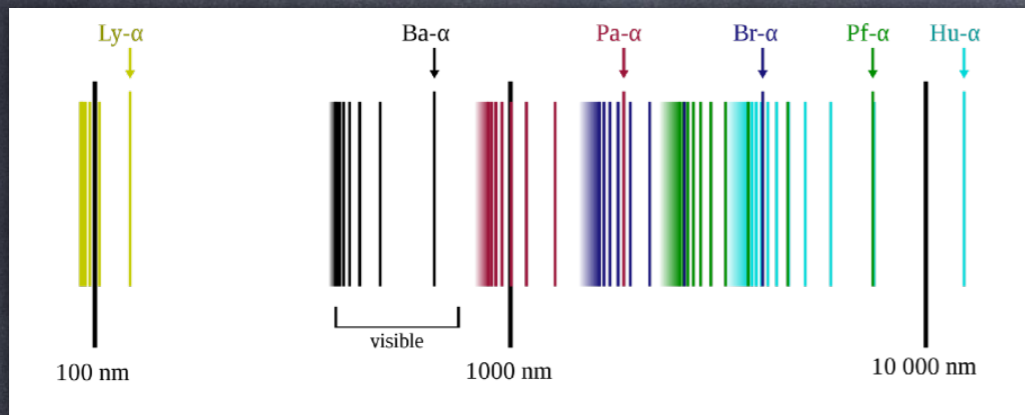
absorption



émission stimulée

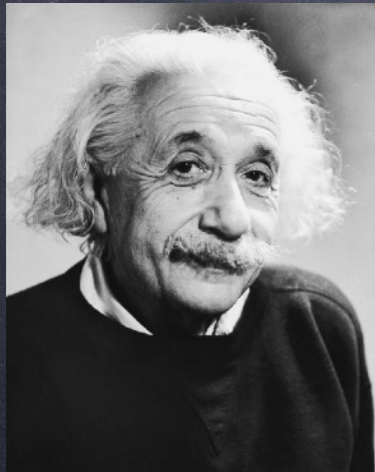
# Spectre de l'atome d'Hydrogène

Et des applications ?



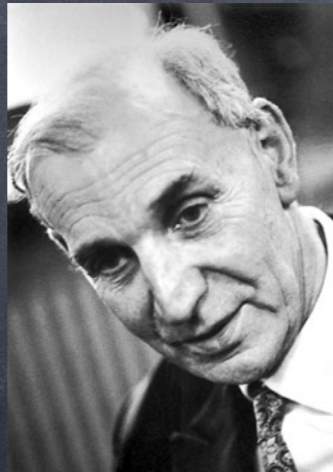
Des faisceaux de lumières émises à une seule fréquence bien précise

sélectionnée par une transition atomique bien choisie



Emission stimulée

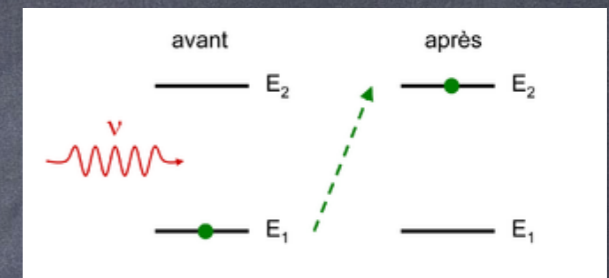
Et oui, encore lui!



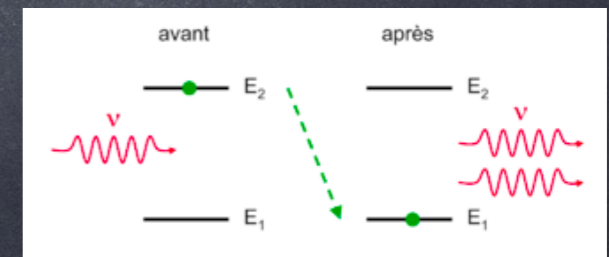
Pompage Optique

Kastler  
Nobel 1966

pompage  
optique



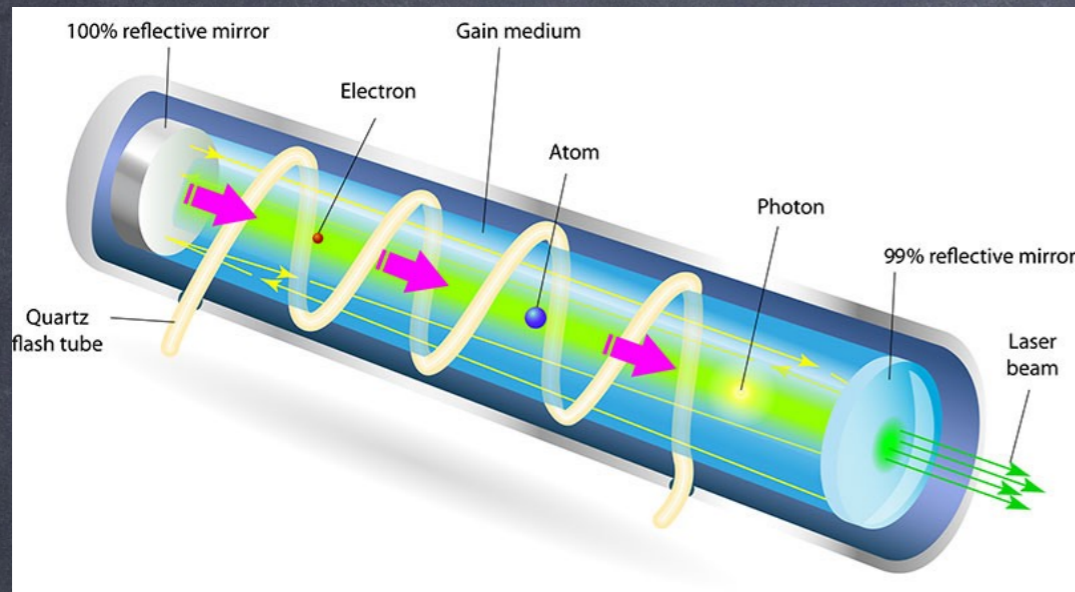
absorption



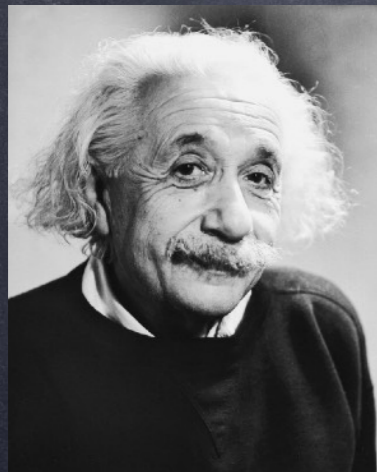
émission stimulée

# Spectre de l'atome d'hydrogène

Et des applications ?

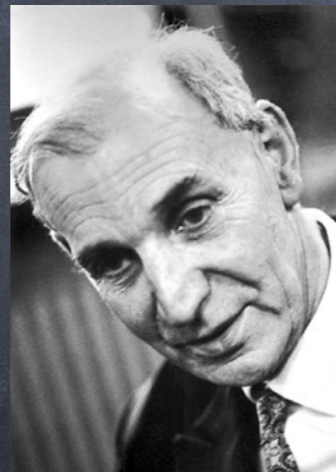


Le LASER !!



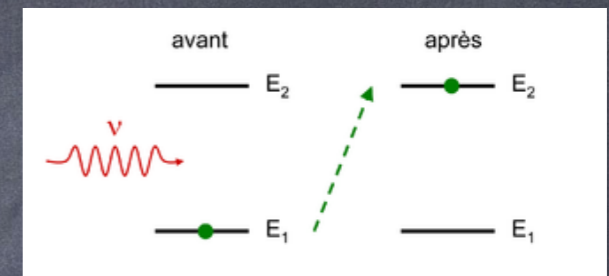
Emission stimulée

Et oui, encore lui!

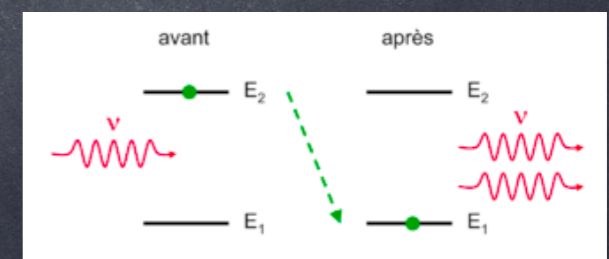


Pompage Optique

Kastler  
Nobel 1966



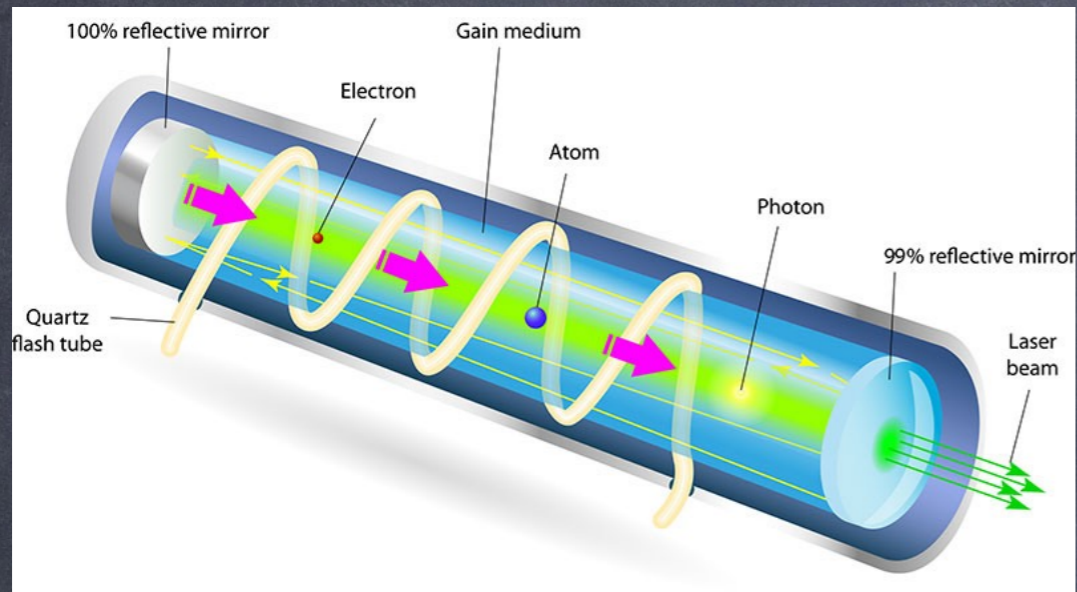
absorption



émission stimulée

# Spectre de l'atome d'hydrogène

Et des applications ?



## Le LASER !!

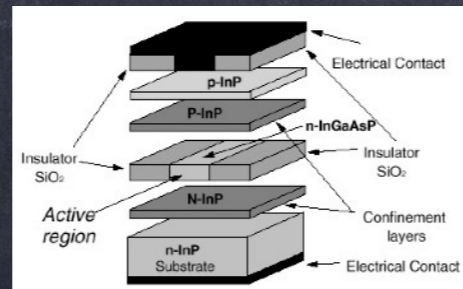
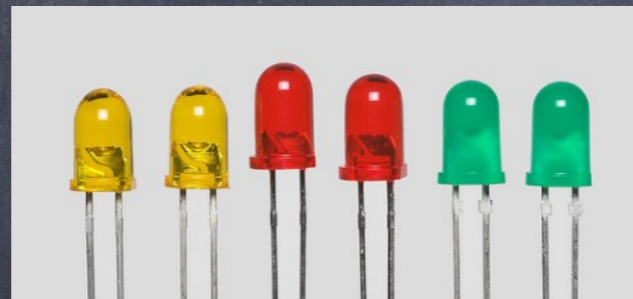
Une bizarrerie de la physique

Un modèle, une théorie

De nouveaux processus

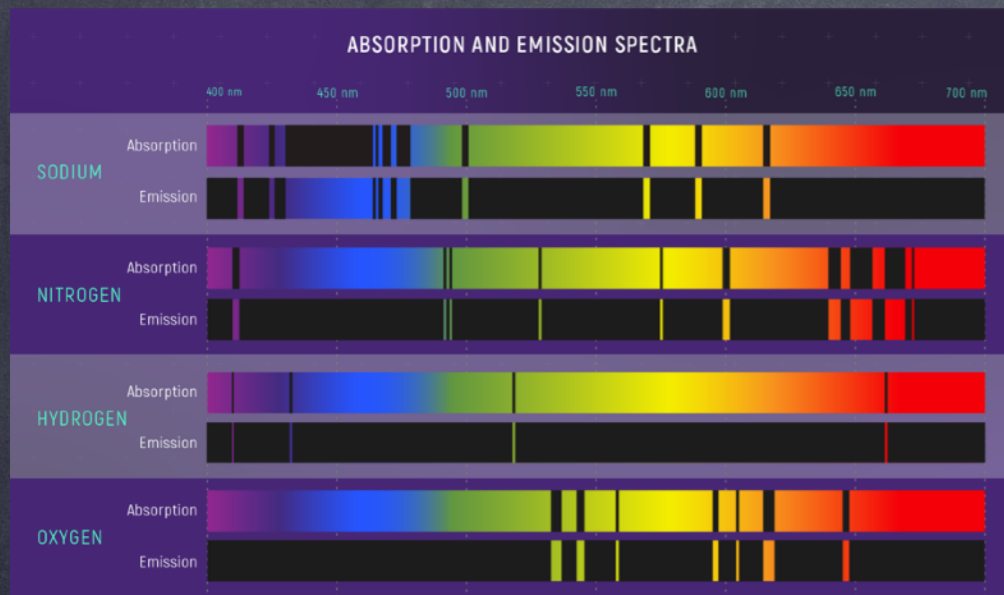
Une expérience reproductible

Des technologies de la vie de tous les jours



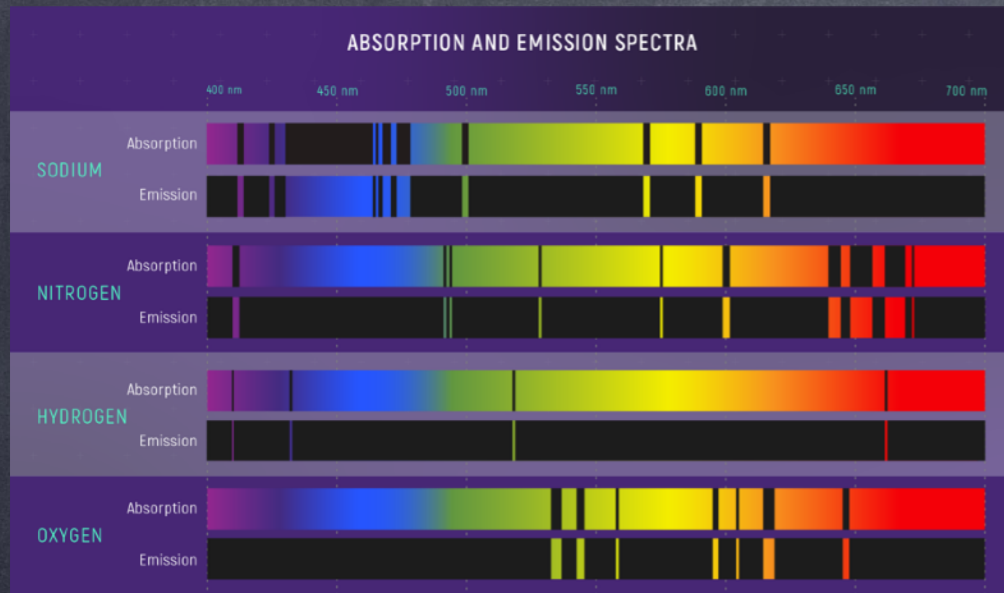
Gravité  $\leftrightarrow$  Quantique: First date

# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: First date



Spectres prédits par la méca Q  
=  
carte d'identité pour les atomes

# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: First date



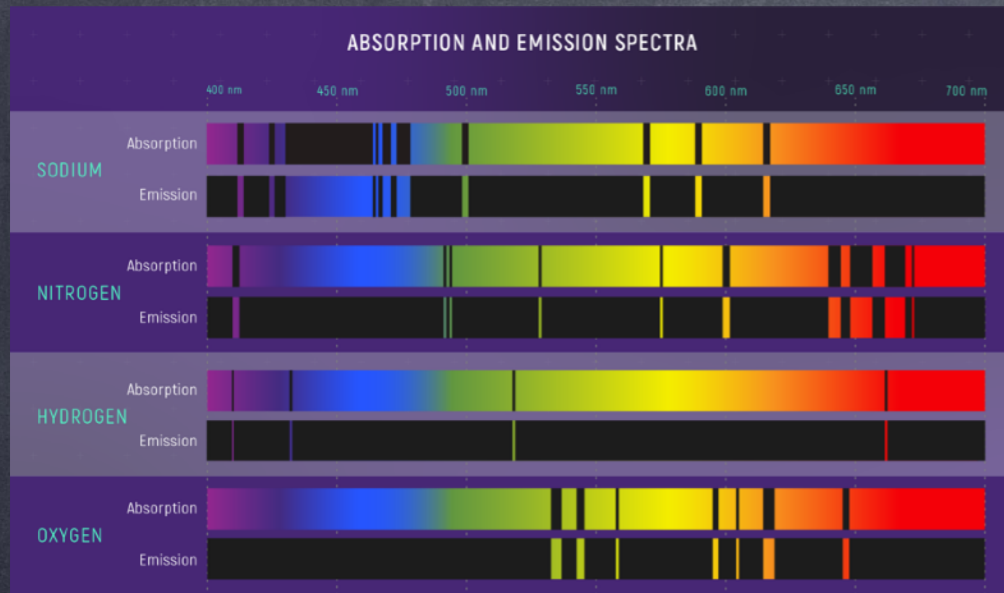
Spectres prédits par la méca Q

=

carte d'identité pour les atomes

Alors de quoi sont composés les étoiles ?

# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: First date



Spectres prédits par la méca Q

=

carte d'identité pour les atomes

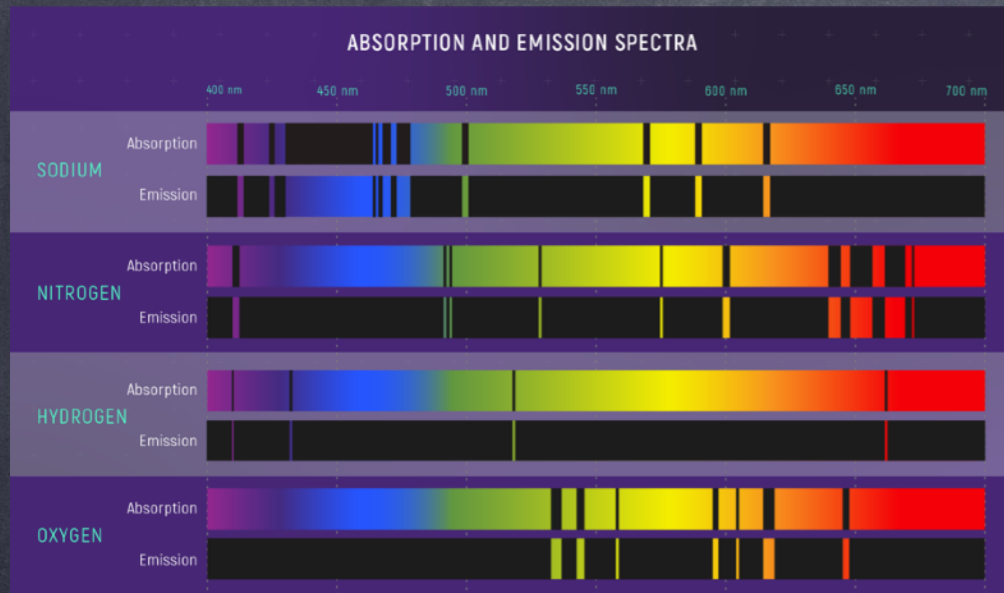
Alors de quoi sont composés les étoiles ?



On ne reconnaît rien...



# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: First date



Spectres prédits par la méca Q

=

carte d'identité pour les atomes

Alors de quoi sont composés les étoiles ?

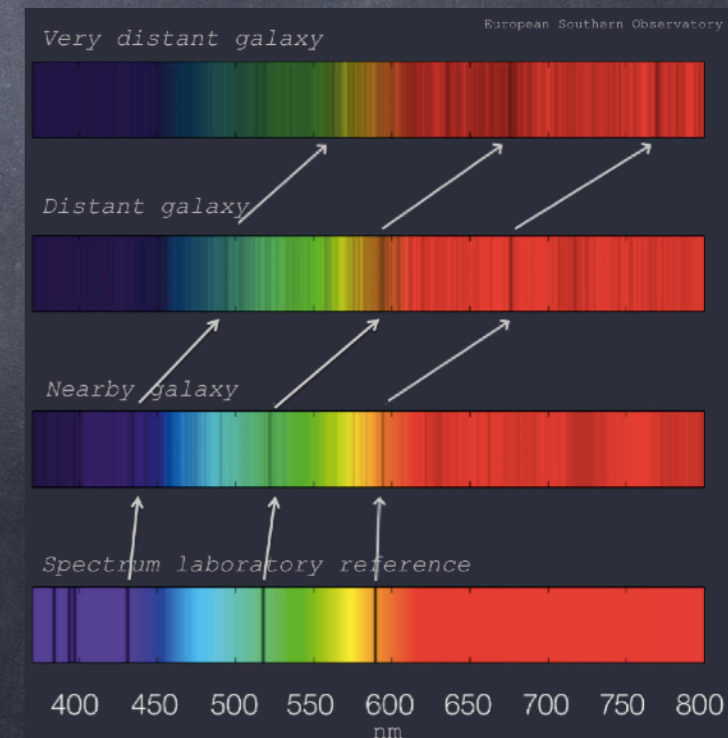
On ne reconnaît rien...

C'est l'effet DOPPLER !!!

Au niveau de  
L'Univers Entier !!

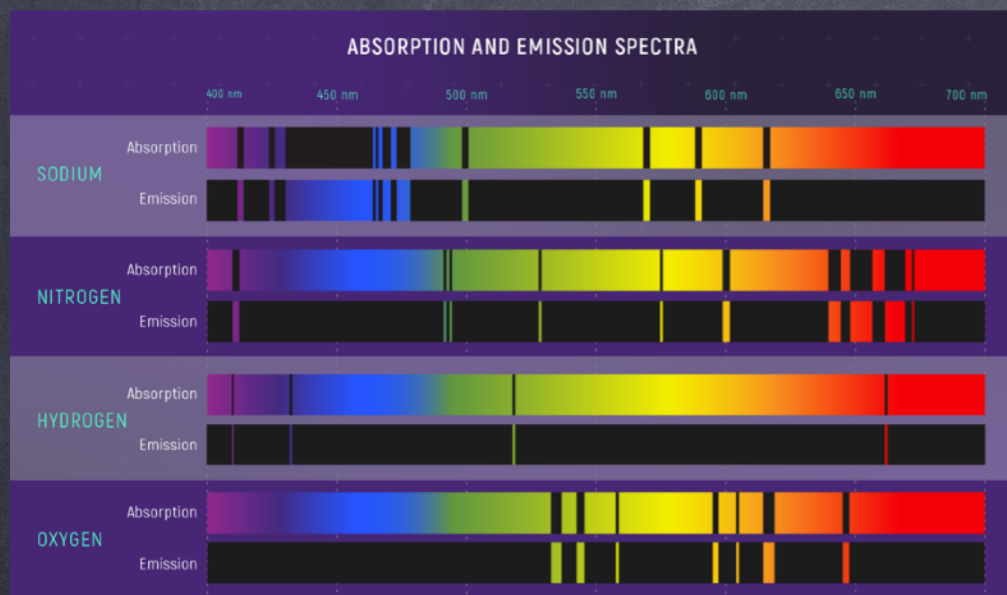


Edwin Hubble 1929



# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: First date

## Découverte de l'expansion de l'univers



Spectres prédits par la méca Q

=

carte d'identité pour les atomes

Alors de quoi sont composés les étoiles ?

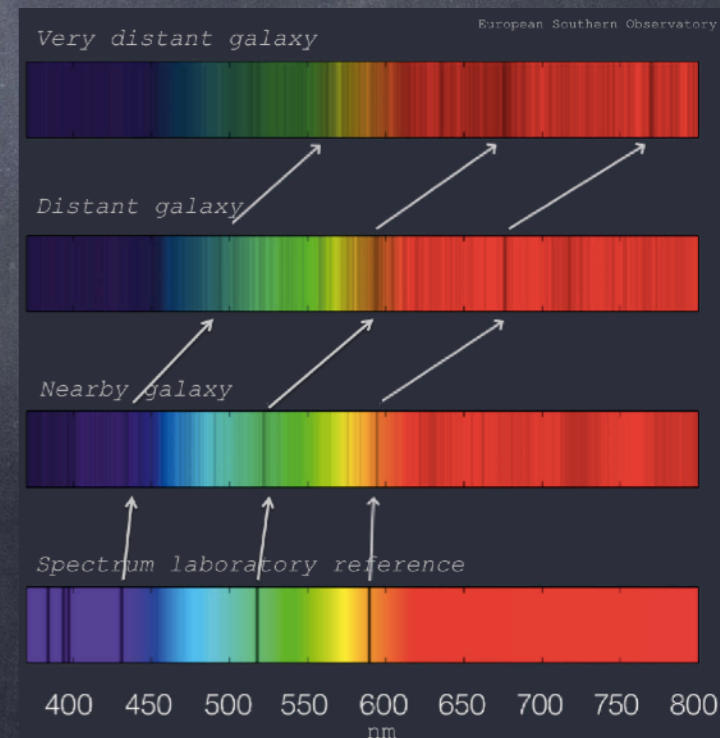
On ne reconnaît rien...

C'est l'effet DOPPLER !!!

Au niveau de  
l'Univers entier !!

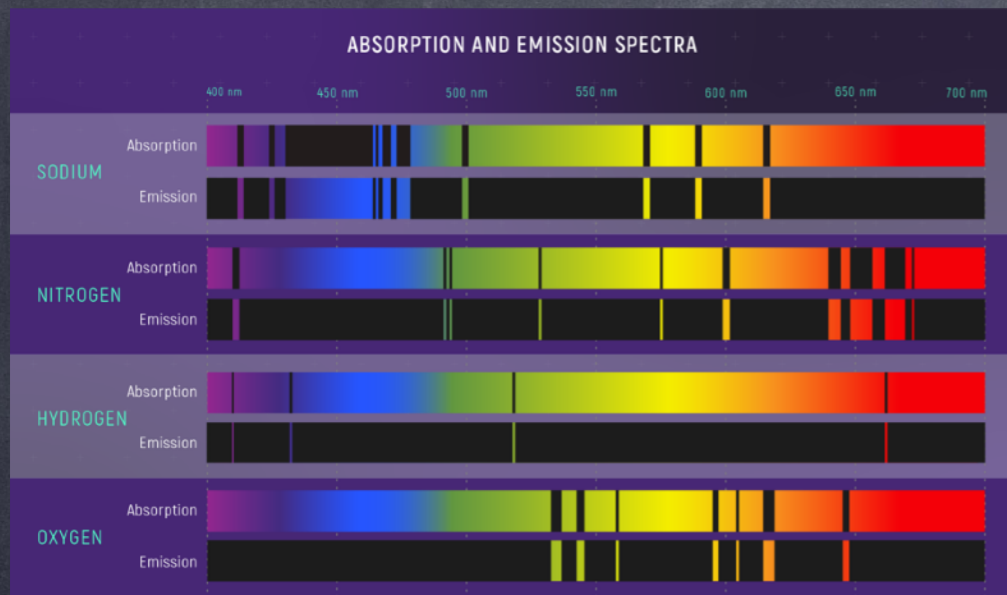


Edwin Hubble 1929



# Gravité ↔ Quantique: First date

## Découverte de l'expansion de l'univers



Spectres prédits par la méca Q

=

carte d'identité pour les atomes

Alors de quoi sont composés les étoiles ?

Conclusion:

plus une galaxie est lointaine,  
plus elle s'éloigne vite

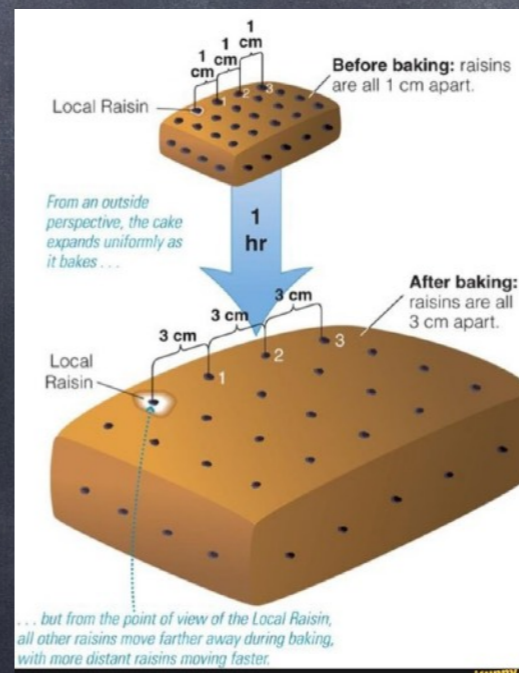
$$v = H \times d$$

loi de Hubble

vitesse

constante  
de Hubble

distance



Expansion de  
l'univers



Big Bang

Gravité  $\leftrightarrow$  Quantique: First date

Découverte de l'expansion de l'univers

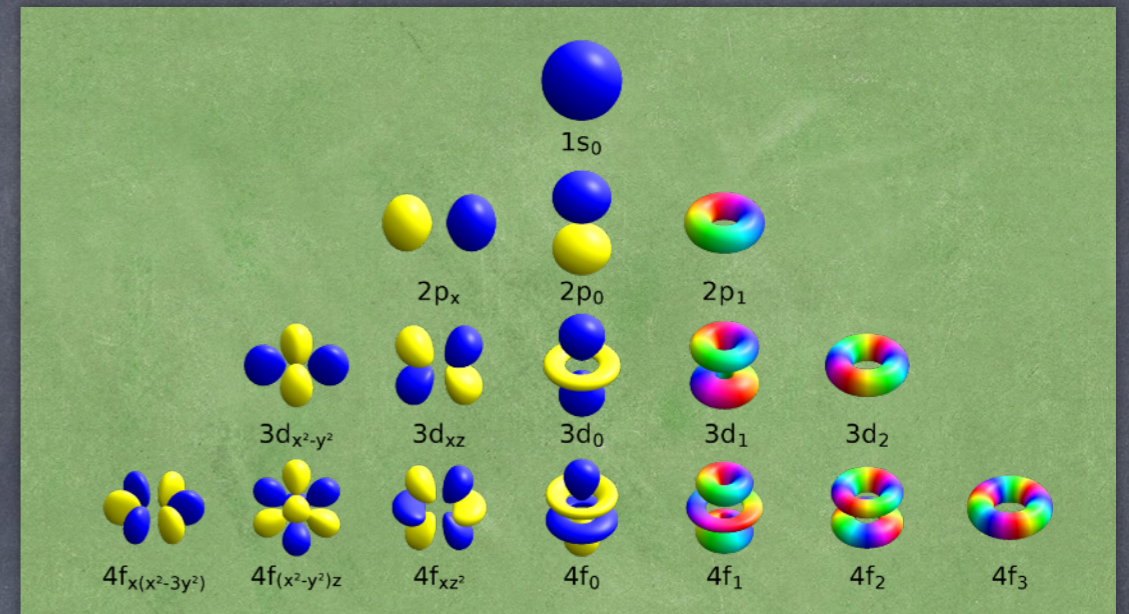
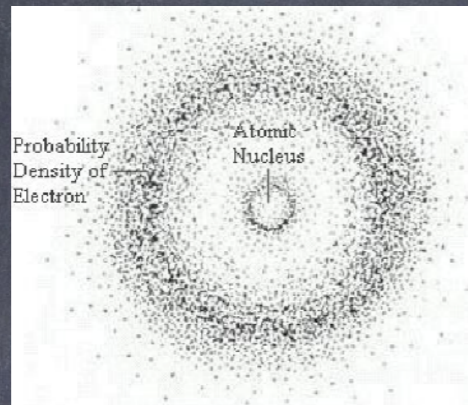


On se reverra ?

Le Quantique, comment ça marche ?

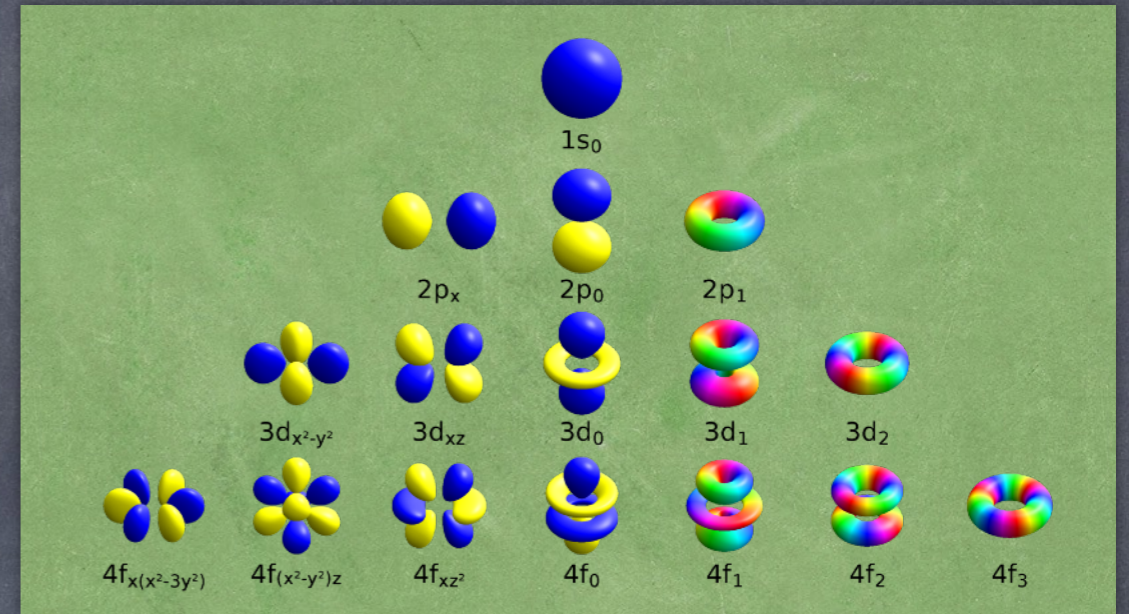
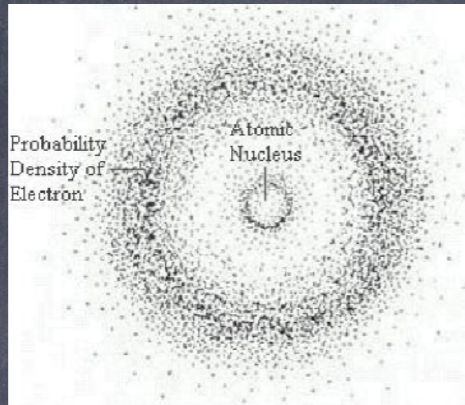
# Le Quantique, comment ça marche ?

L'électron est délocalisé autour du noyau

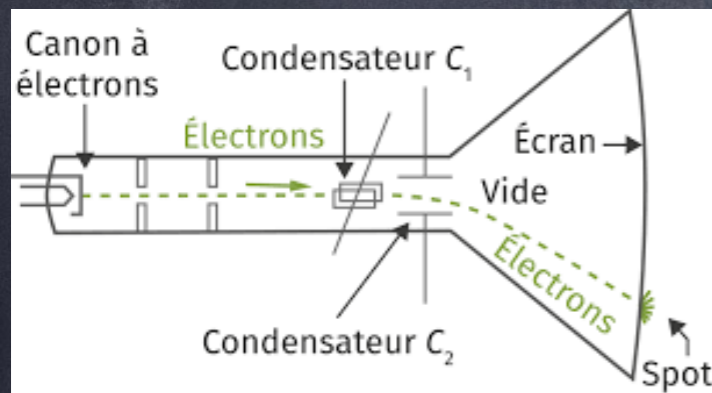


# Le Quantique, comment ça marche ?

L'électron est délocalisé autour du noyau

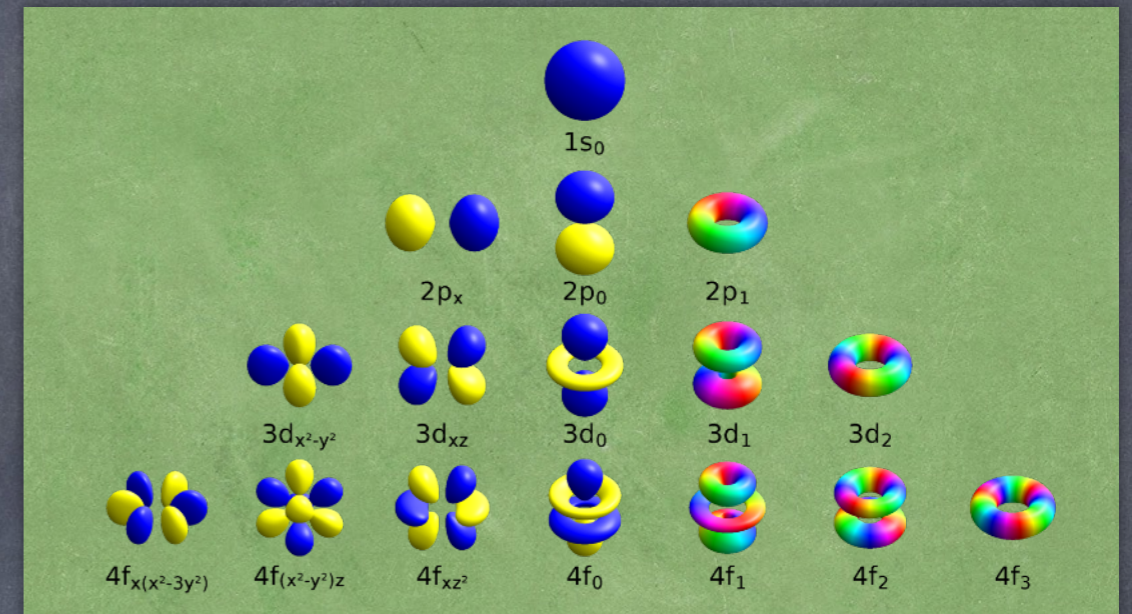
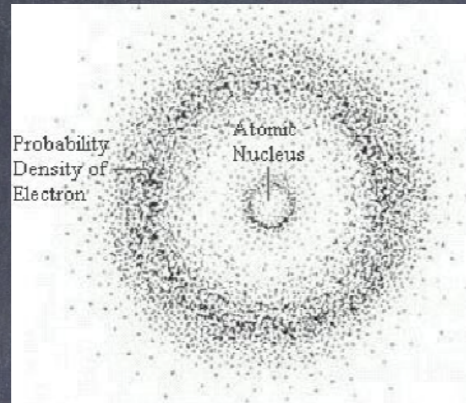


Et pourtant, c'est bien une particule !



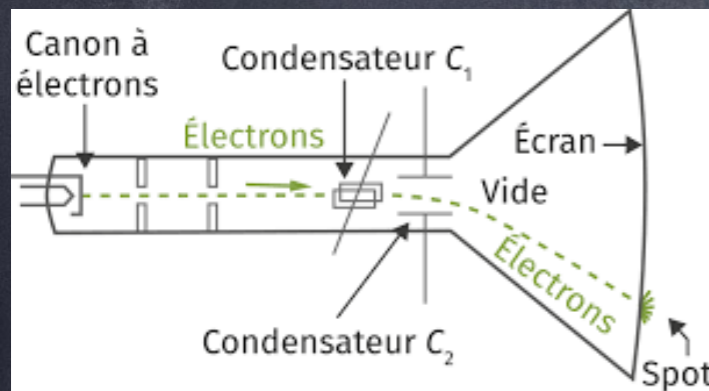
# Le Quantique, comment ça marche ?

L'électron est délocalisé autour du noyau



Et pourtant, c'est bien une particule !

Alors onde ou particule ?



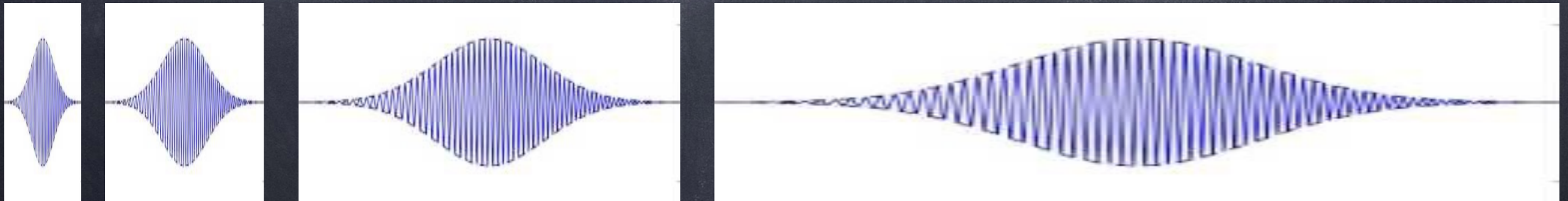
C'est la  
Superposition  
Quantique !





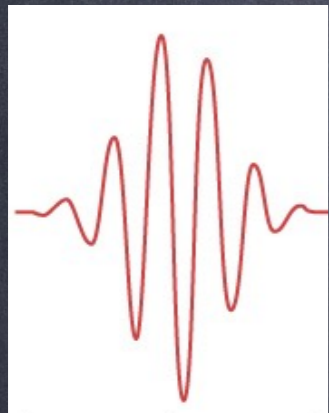
# Superposition Quantique

une particule est  
un paquet d'onde

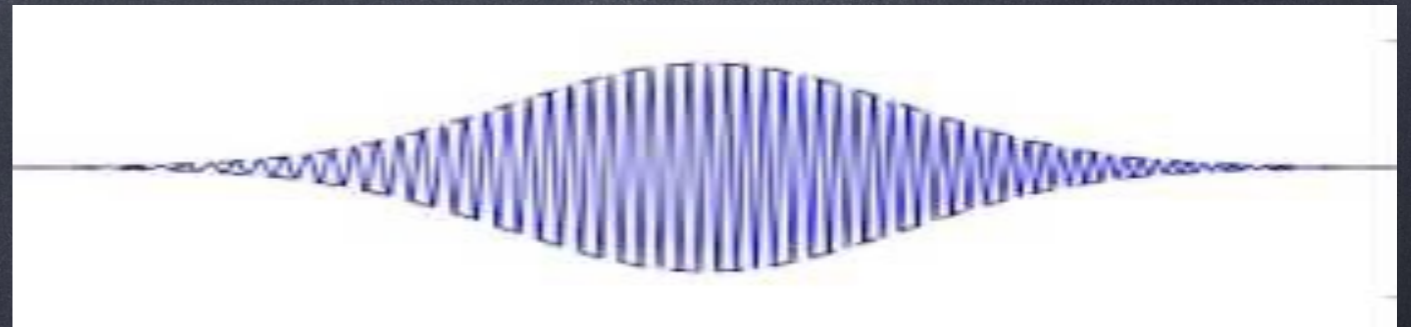
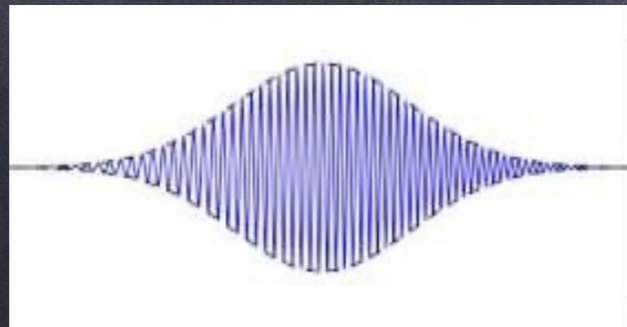
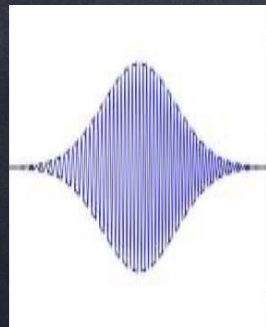
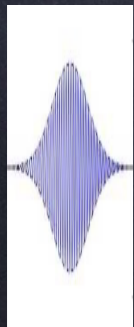


# Superposition Quantique

une particule est  
un paquet d'onde



particule localisée  
en même temps à  
différents endroits



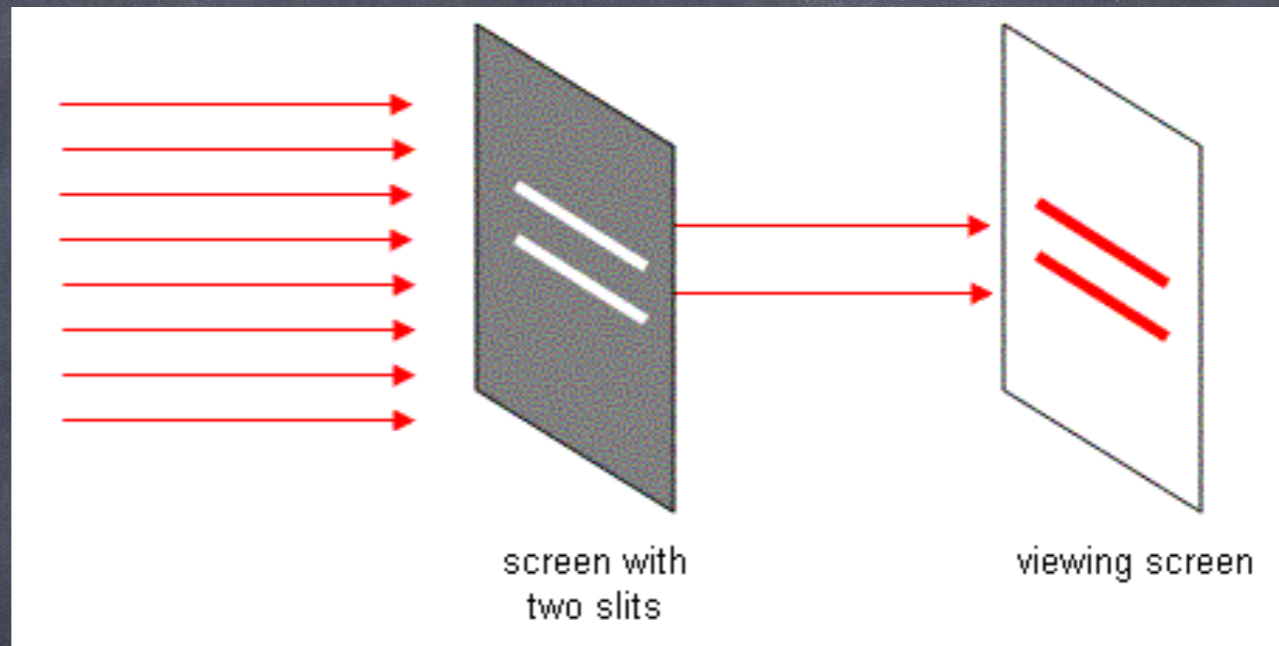
# Interference

Alors la matière est-elle onde ou particule ?

# Interference

Alors la matière est-elle onde ou particule ?

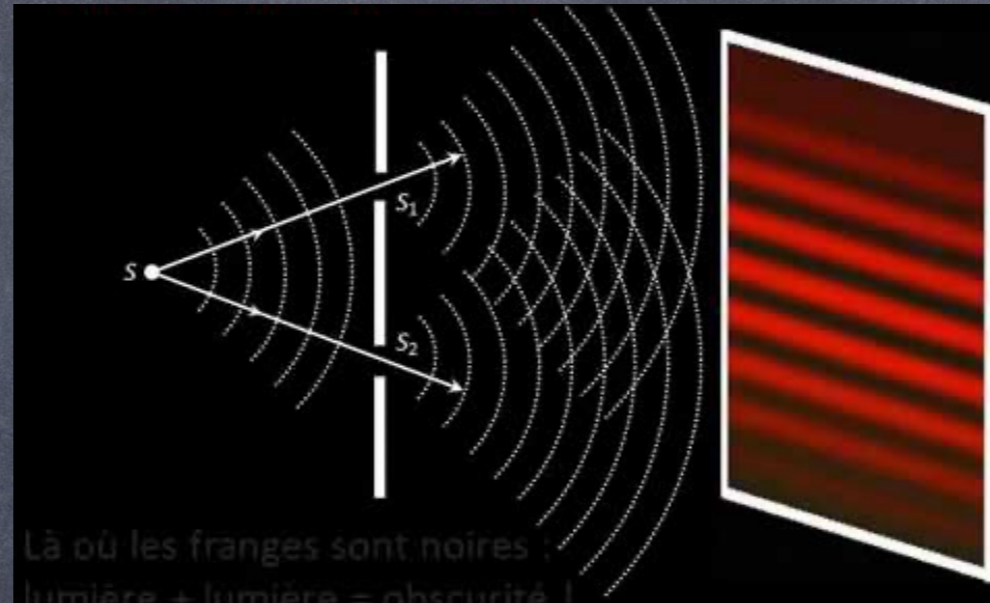
Expérience des fentes de Young



# Interference

Alors la matière est-elle onde ou particule ?

Expérience des fentes de Young



Franges d'interférence !

Donc la lumière est une onde !

# Interference



# Particule guidée par son onde de probabilité



Yves Couder  
ENS Paris

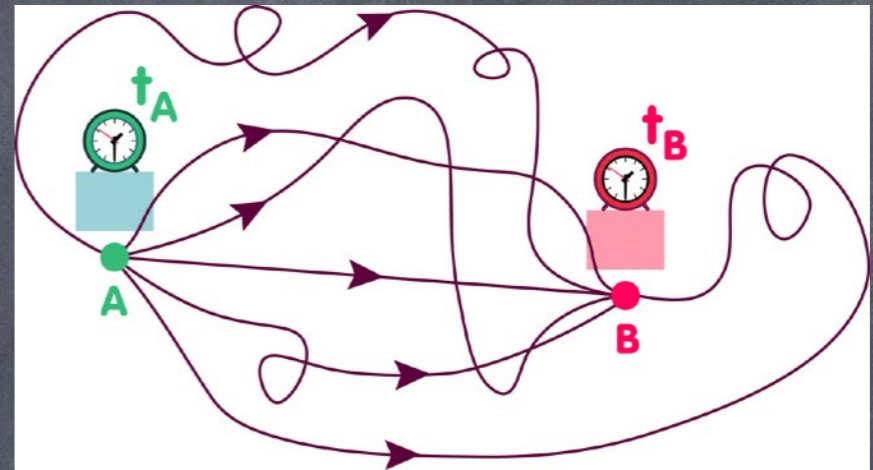
Comme des gouttelettes qui surfent sur leur propre vague !!

# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



tous les chemins possibles





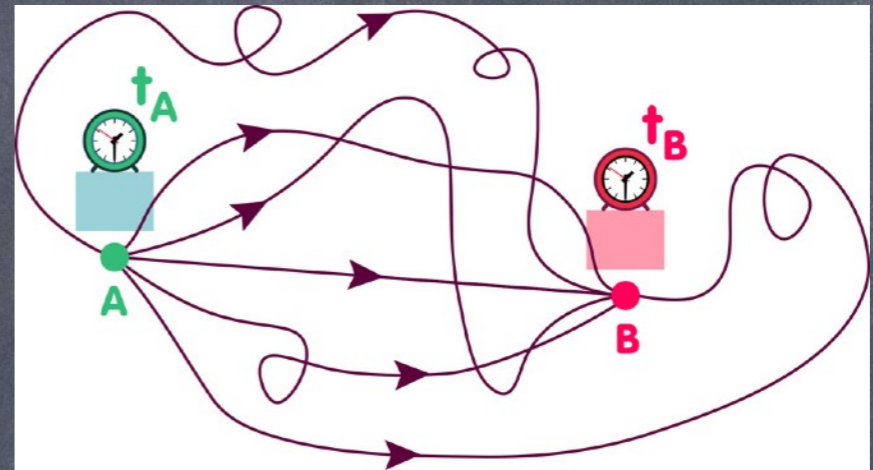
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable



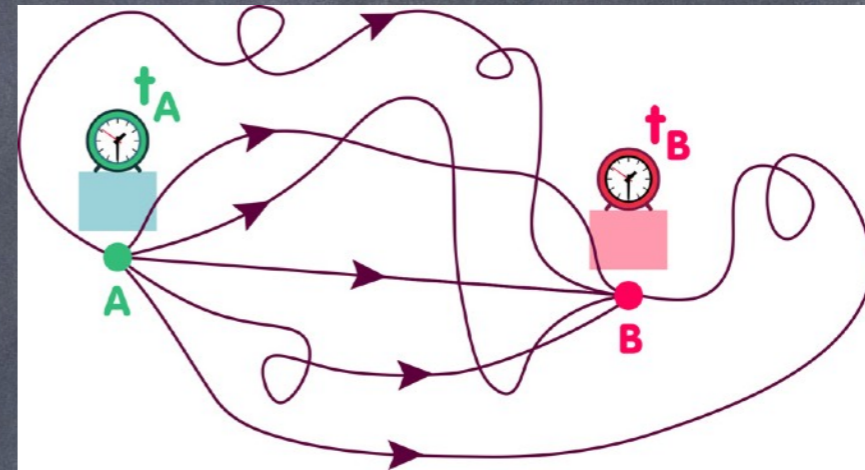
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état

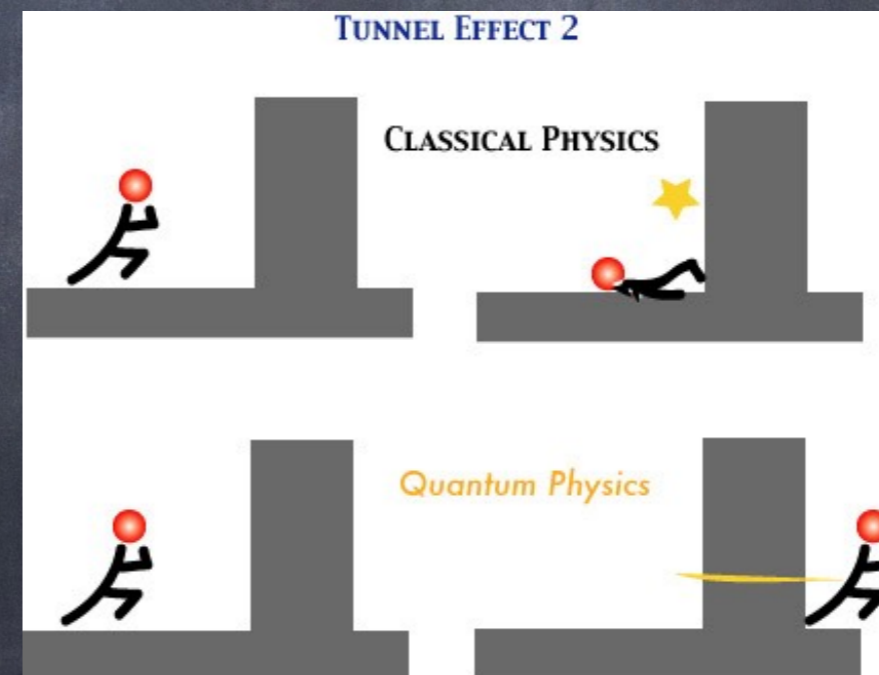
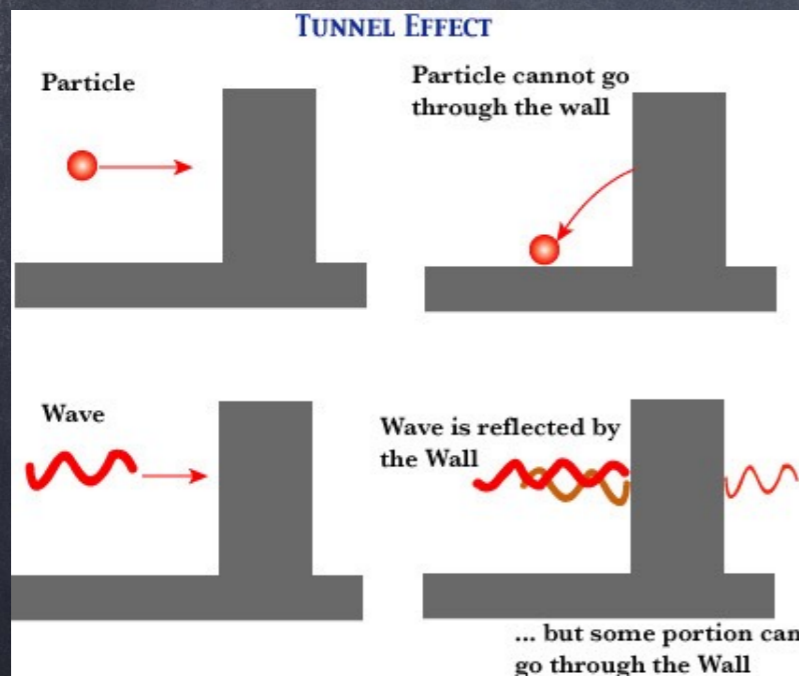


tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable

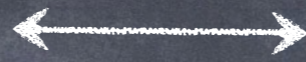


effet tunnel



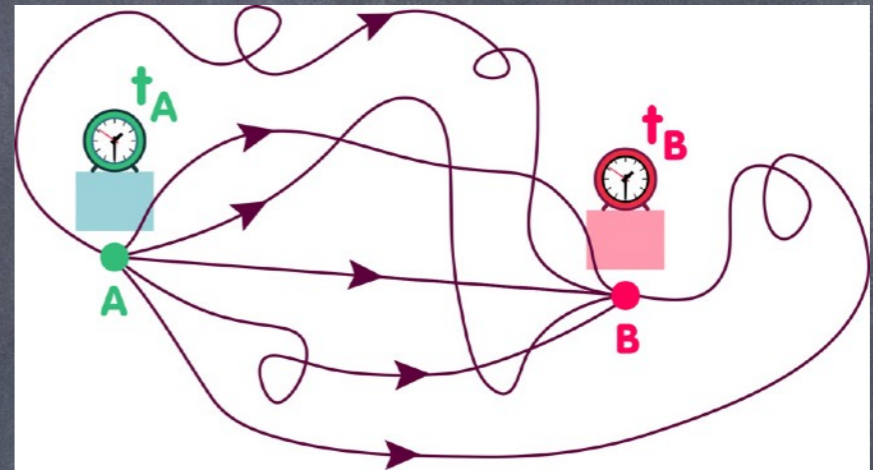
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



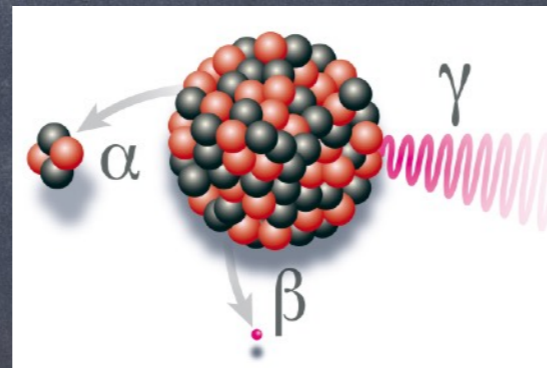
tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable

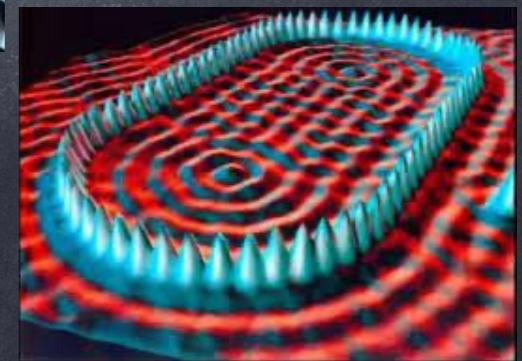
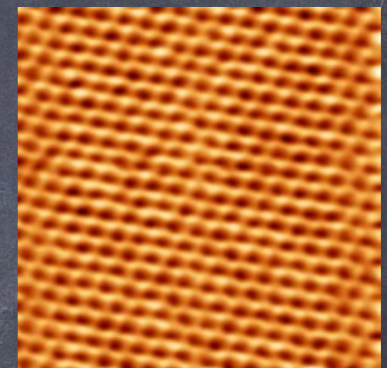
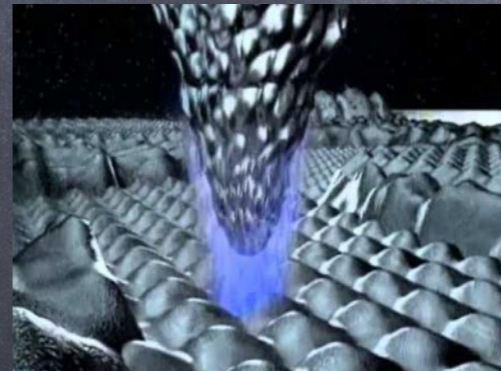
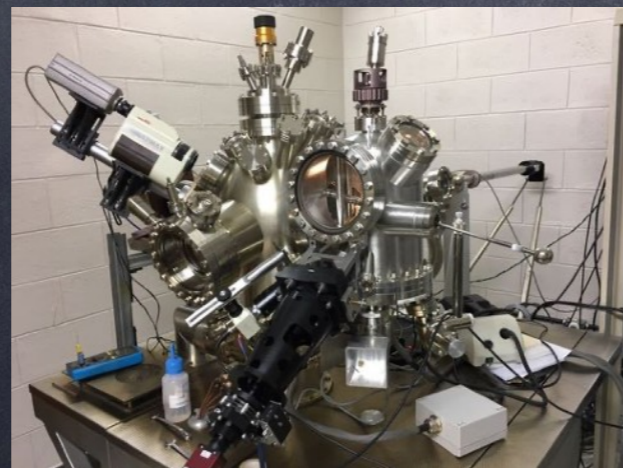


effet tunnel

radioactivité



microscopie  
au niveau atomique



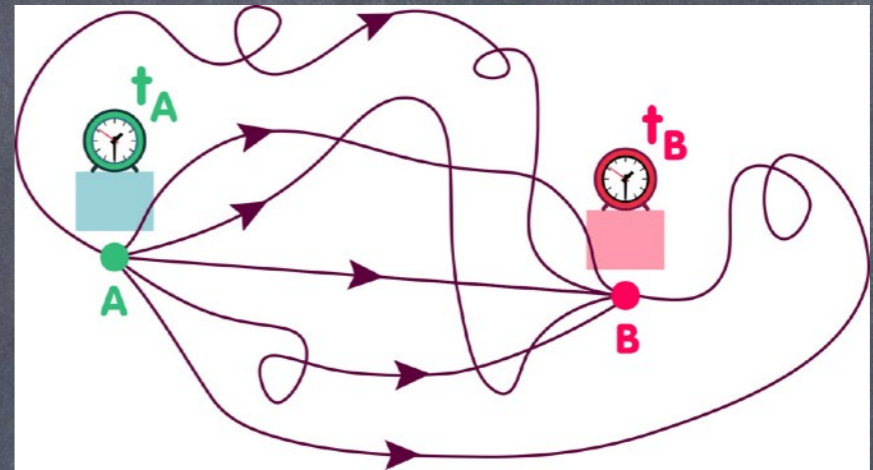
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable



effet tunnel

radioactivité

contextualité

microscopie

au niveau atomique

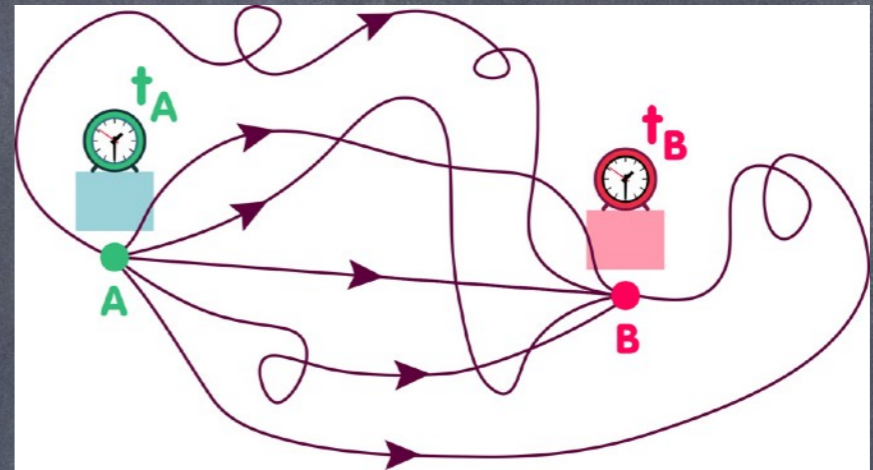
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable

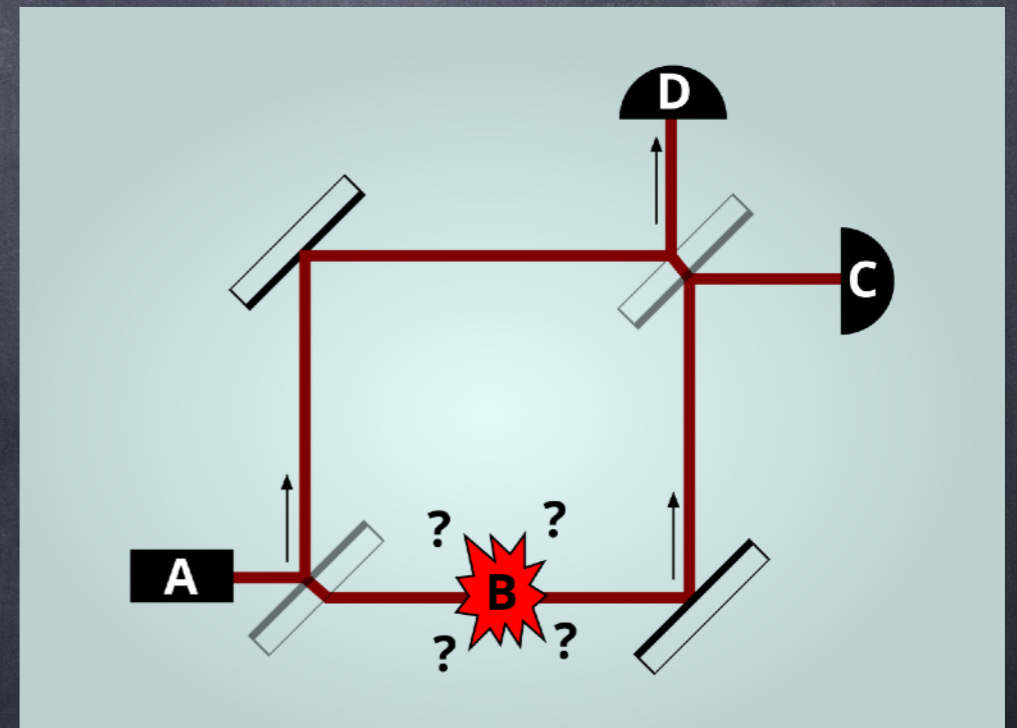


effet tunnel

radioactivité

contextualité

microscopie  
au niveau atomique



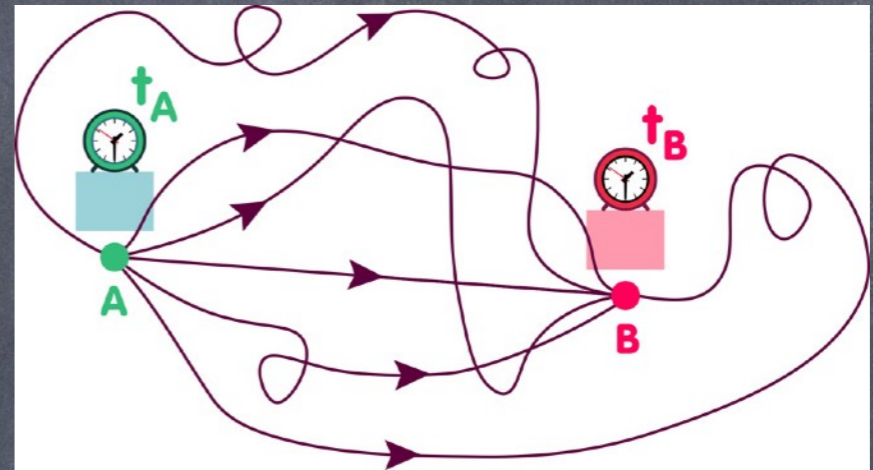
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable

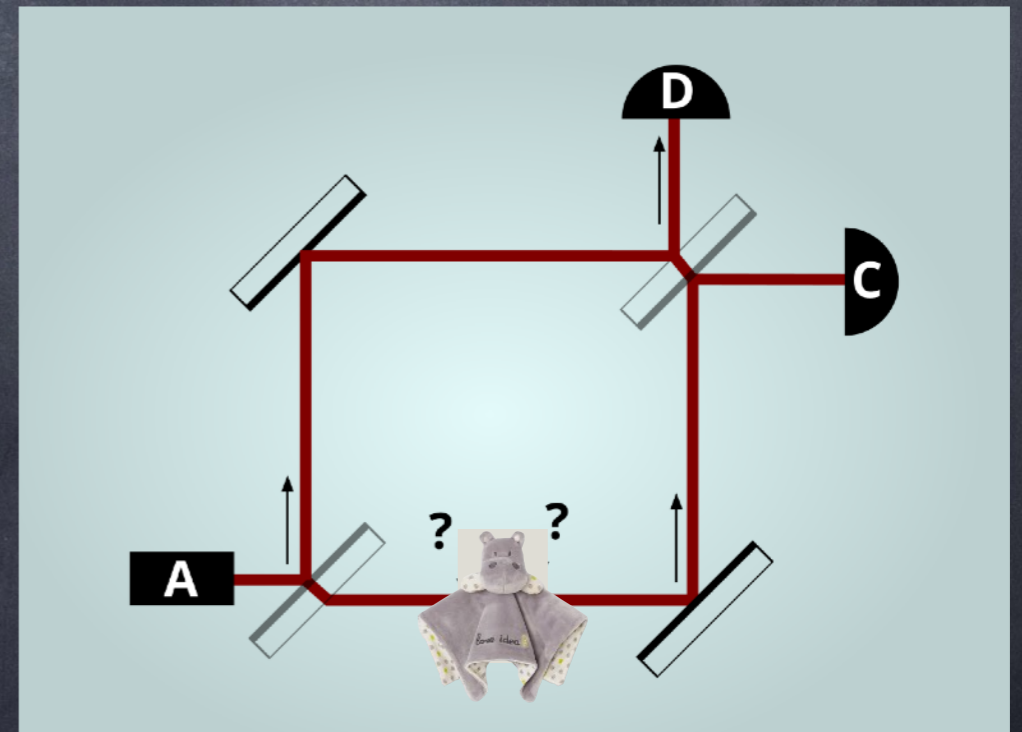


effet tunnel

radioactivité

contextualité

microscopie  
au niveau atomique



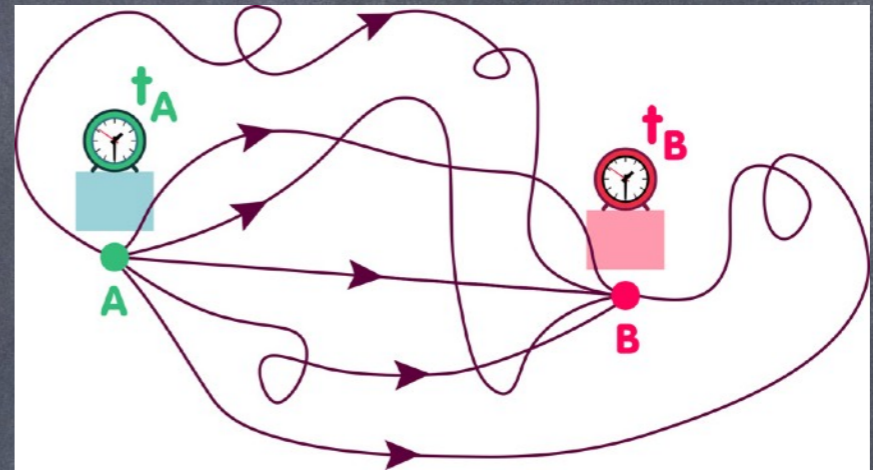
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable



effet tunnel

radioactivité

microscopie  
au niveau atomique

contextualité

intrication  
quantique

téléportation  
quantique

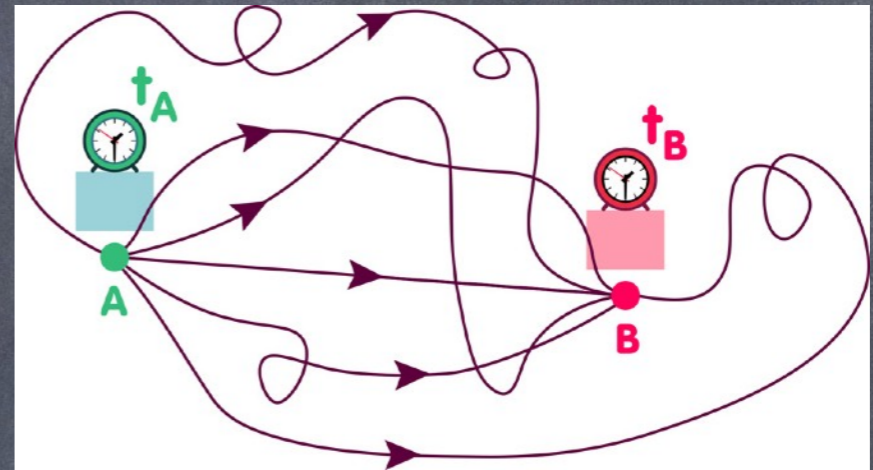
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable



effet tunnel

radioactivité

microscopie  
au niveau atomique

contextualité

intrication  
quantique

téléportation  
quantique

contrafactuelité



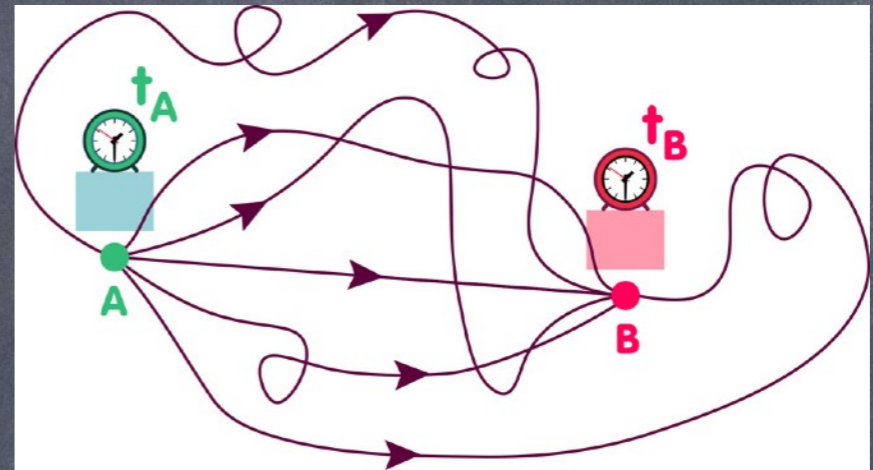
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable



effet tunnel

radioactivité

microscopie  
au niveau atomique

contextualité

intrication  
quantique

téléportation  
quantique

contrafactuelité



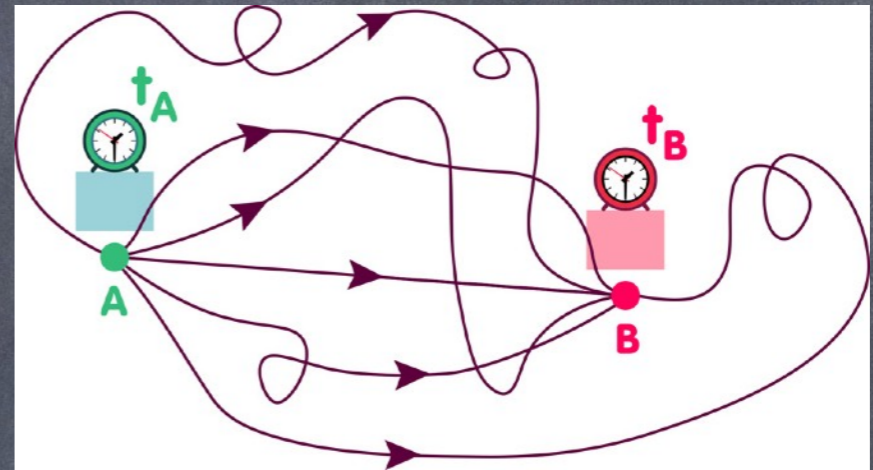
# Principe de la mécanique quantique

La superposition d'état



tous les chemins possibles

La trajectoire classique n'est que le chemin le plus probable



effet tunnel

radioactivité

microscopie  
au niveau atomique

contextualité

intrication  
quantique

téléportation  
quantique

contrafactuelité

suprématie  
quantique

Utiliser le pouvoir  
du possible !

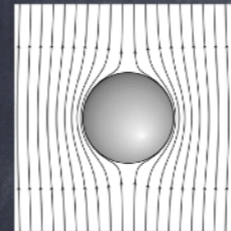
# Plein de choses quantiques fantastiques !

## Supra-Conductivité

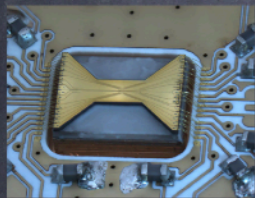
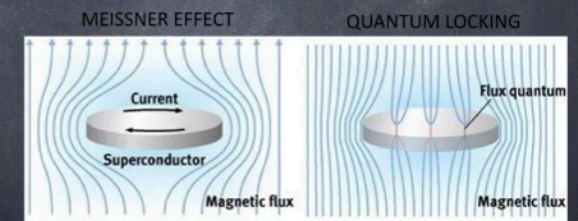
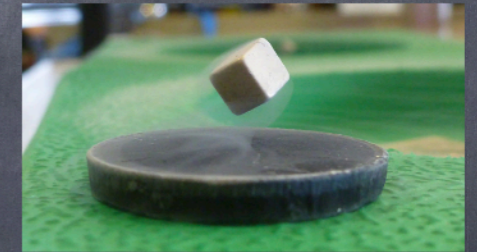
Superconductivité



Lévitacion quantique



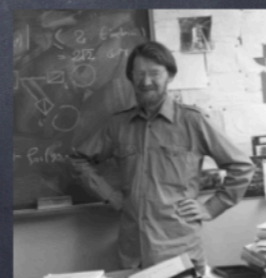
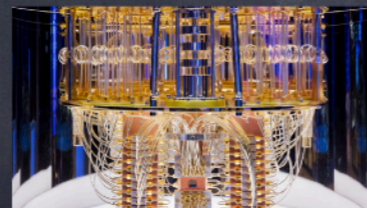
Repousse toutes les lignes de champs magnétiques



0 et 1 en même temps !! Du calcul en parallèle, Un ordinateur dans un seul qubit !

Mais quand on le mesure, c'est de nouveau juste 0 ou 1 ...  
Néanmoins, possible de montrer quantique > classique

et on construit des ordinateurs quantiques !



inégalité de Bell

# Plein de choses quantiques fantastiques !

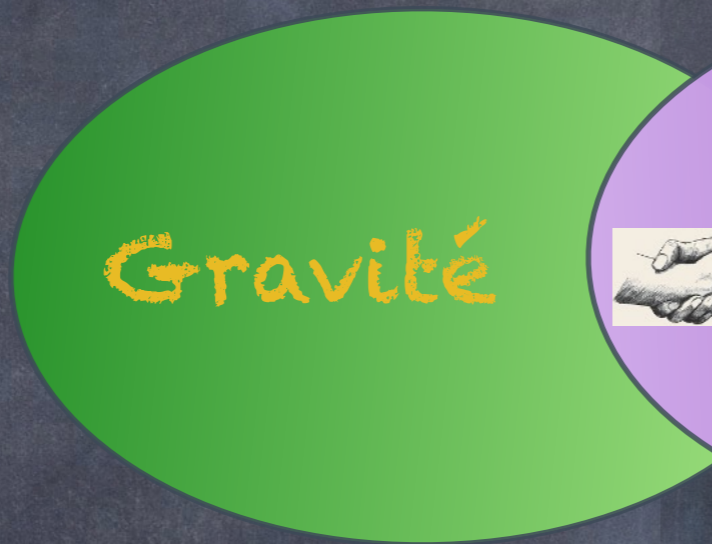
## Supra-Conductivité

Superconductivité

Effet Meissner

Lévitacion quantique

Repousse toutes les lignes  
des champs magnétiques



Quantique

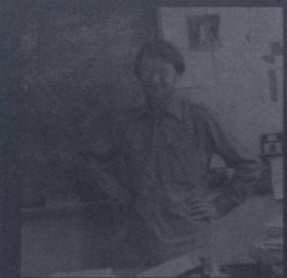
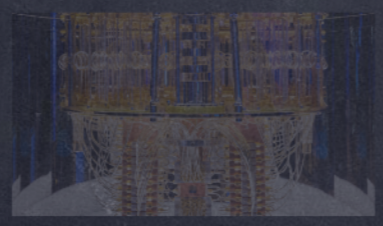


0 et 1 en même temps !! Du calcul en parallèle, Un ordinateur dans un seul qubit !

Mais quand on le mesure, c'est de nouveau juste 0 ou 1 ...  
Néanmoins, possible de montrer quantique > classique



et on construit des ordinateurs quantiques !

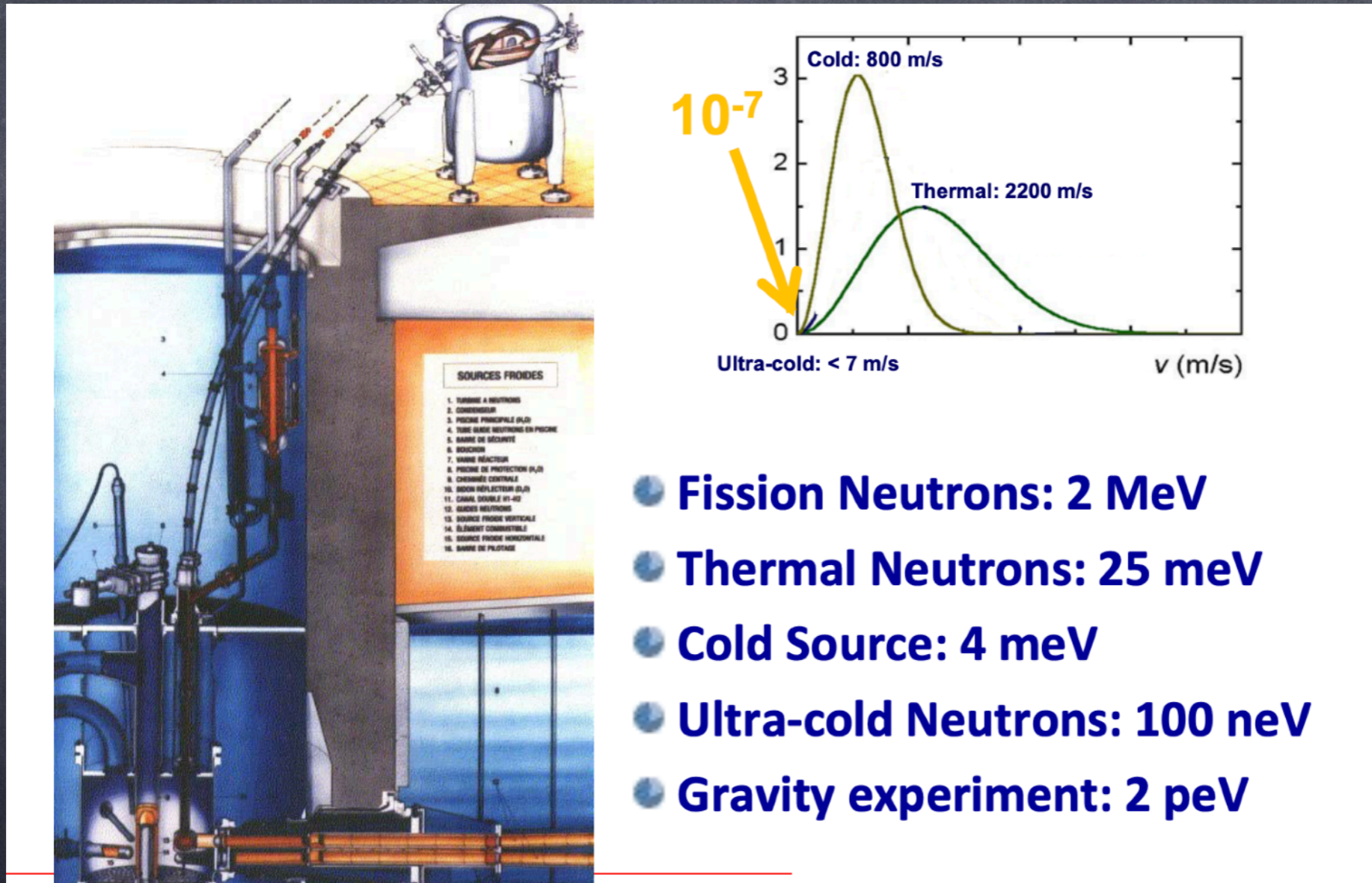


inégalité de Bell

Gravité  $\leftrightarrow$  Quantique: 2nd date

# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: 2nd date

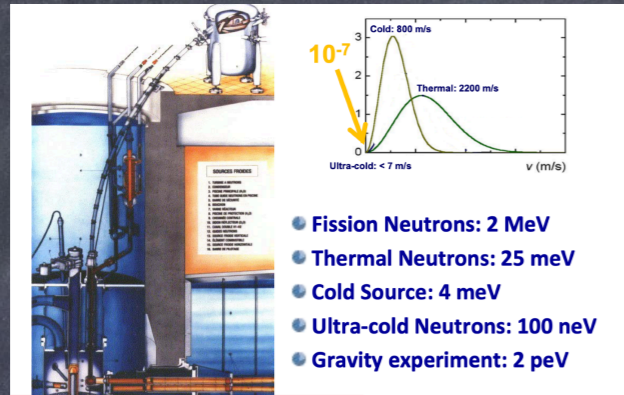
## Refroidissons des neutrons



Réalisé à Institut Paul Langevin (Grenoble) 2002-03

# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: 2nd date

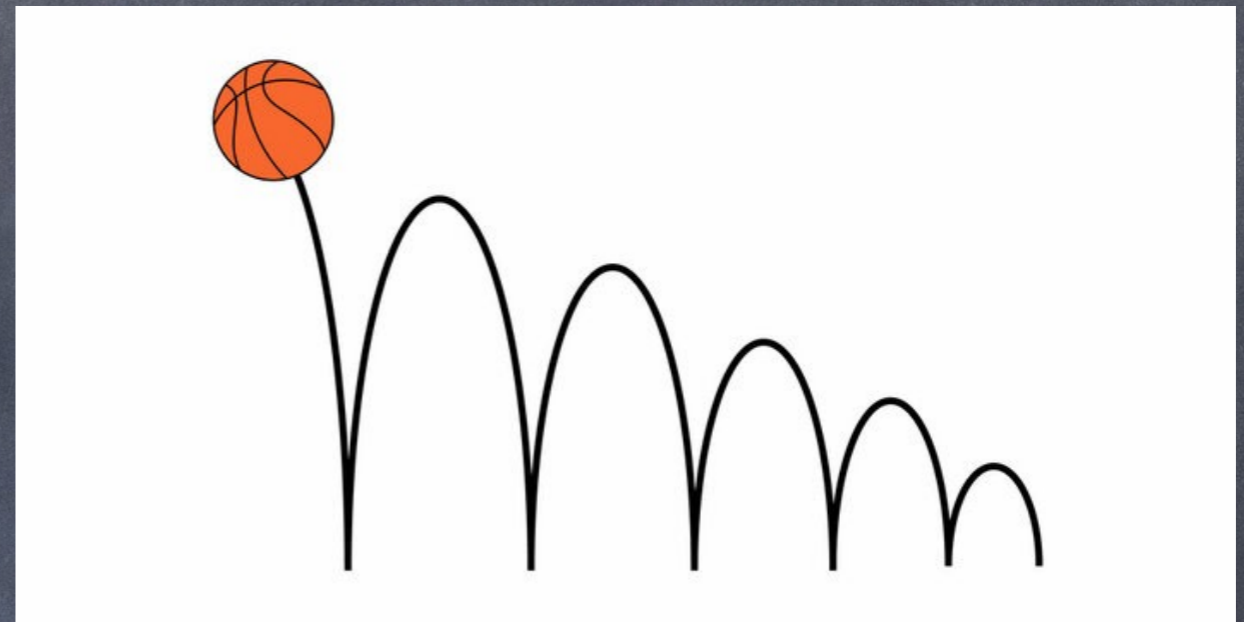
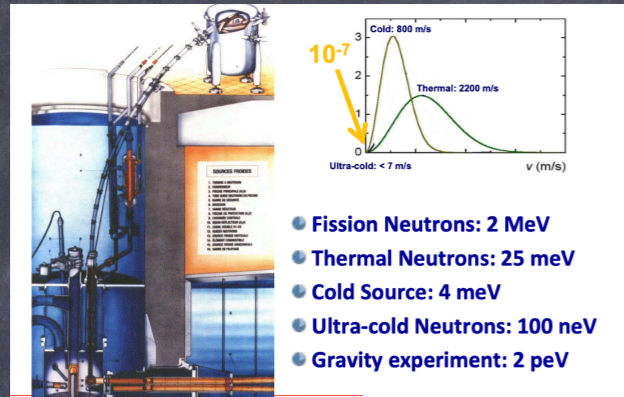
## Refroidissons des neutrons



Et ils tombent dans  
la gravité terrestre !

# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: 2nd date

## Refroidissons des neutrons



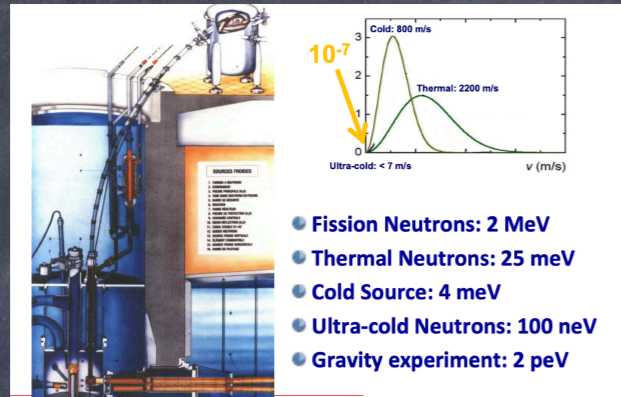
Et ils tombent dans  
la gravité terrestre !

Alors on les fait rebondir sur un miroir !

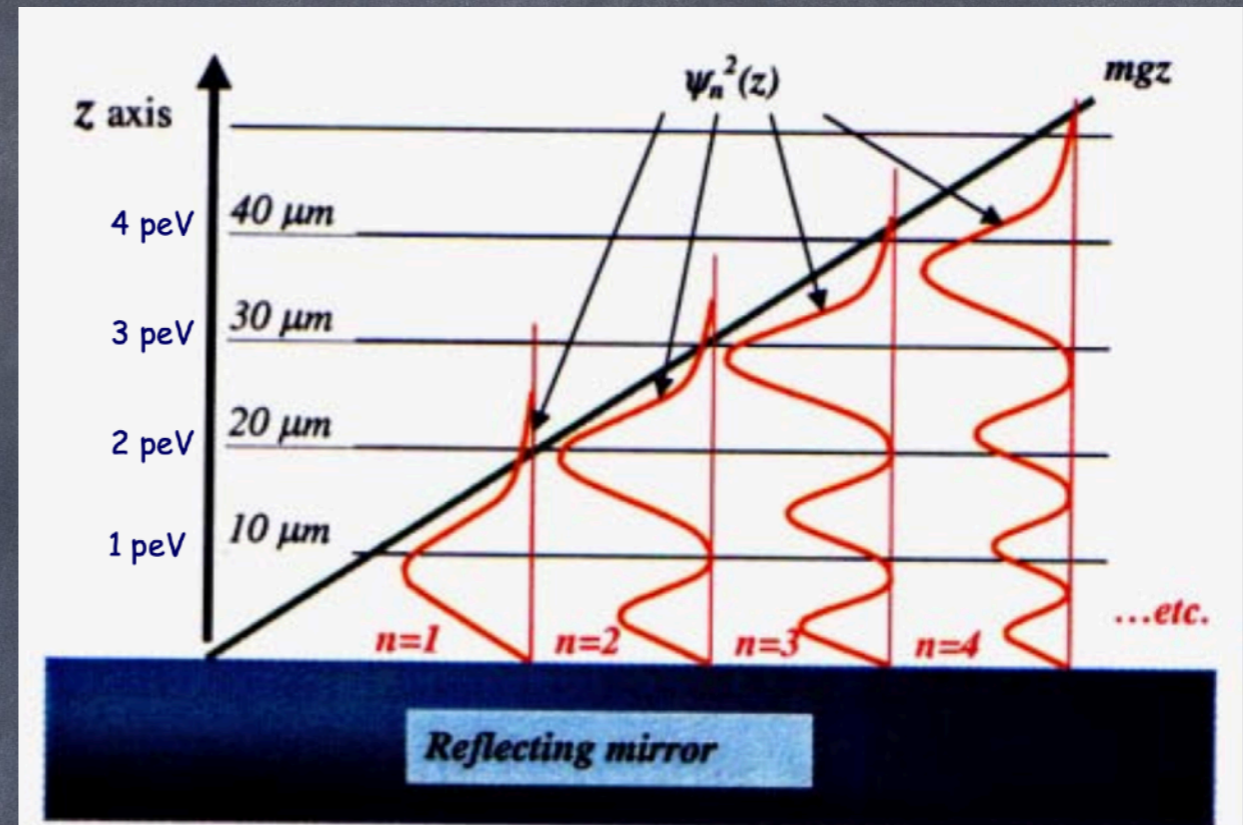


# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: 2nd date

## Refroidissons des neutrons



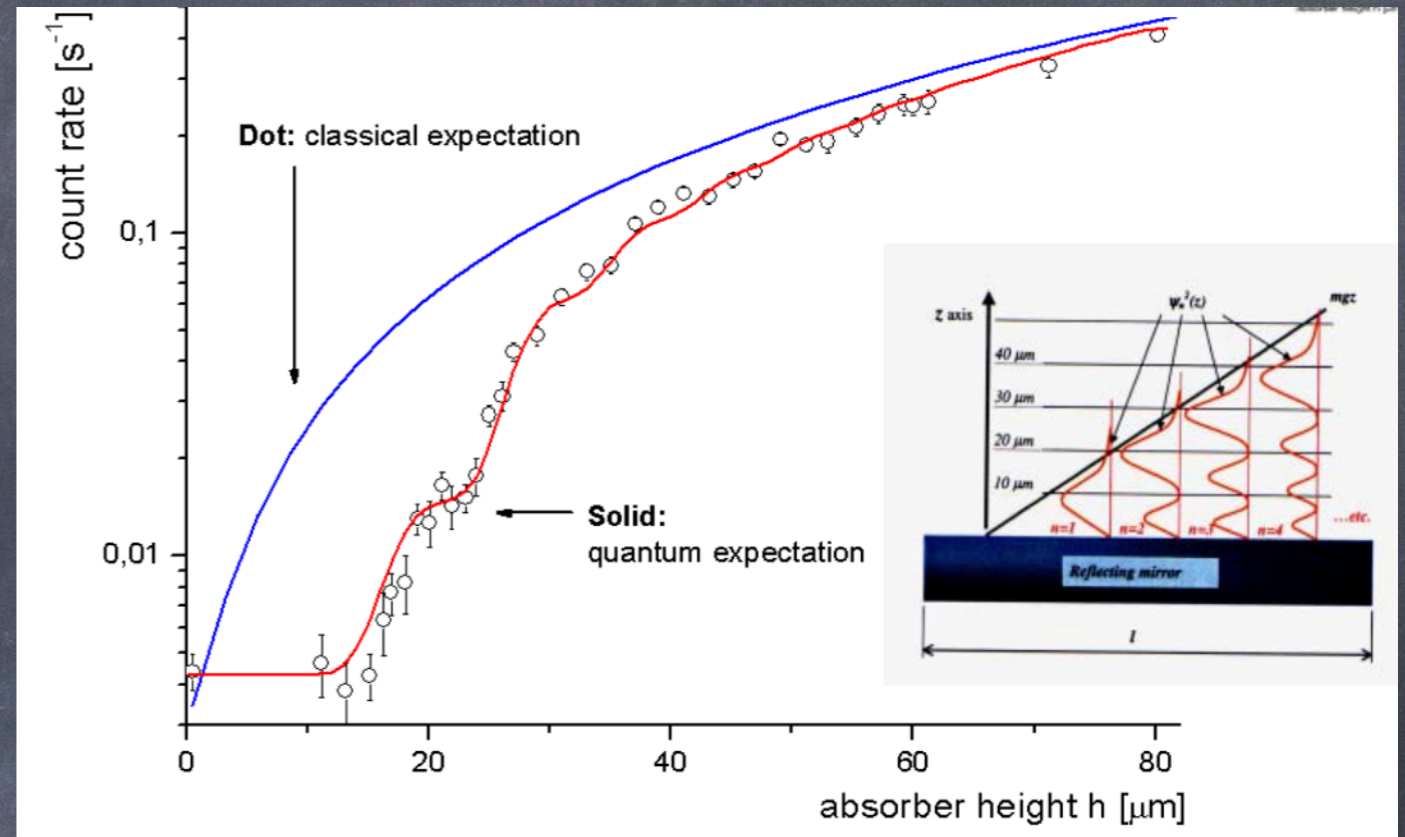
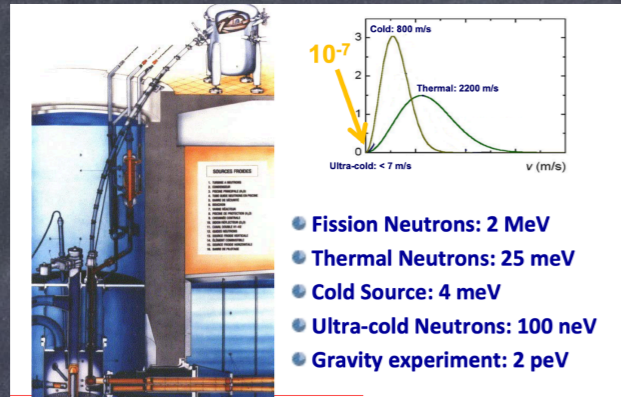
Et ils tombent dans la gravité terrestre !



Alors on les fait rebondir sur un miroir !

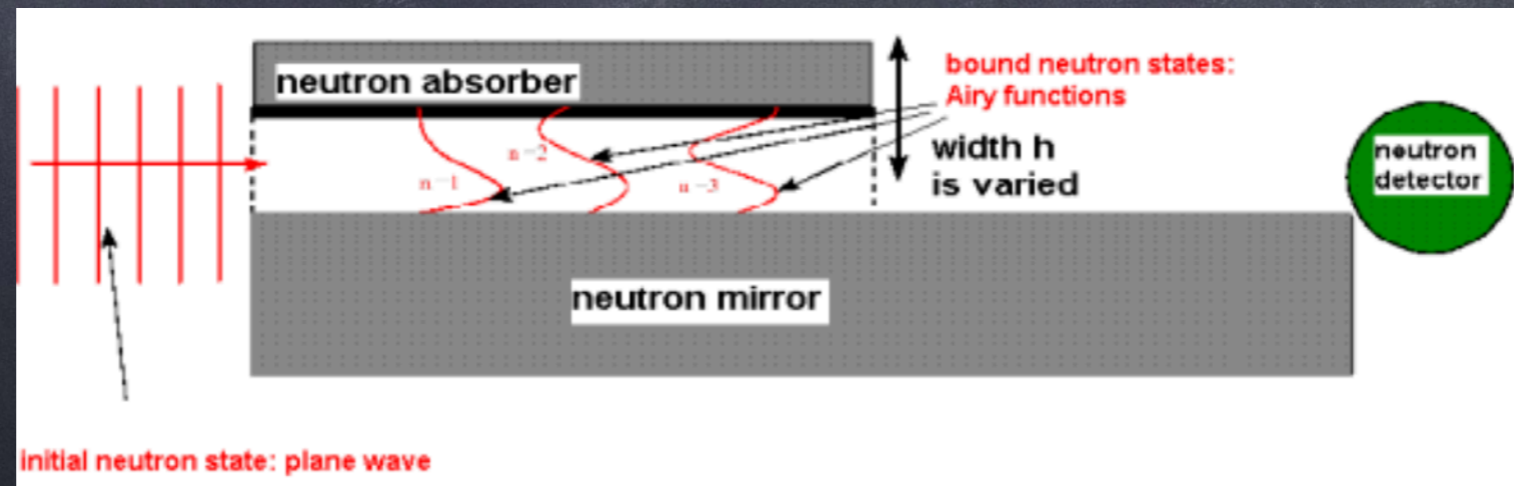
# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: 2nd date

## Refroidissons des neutrons

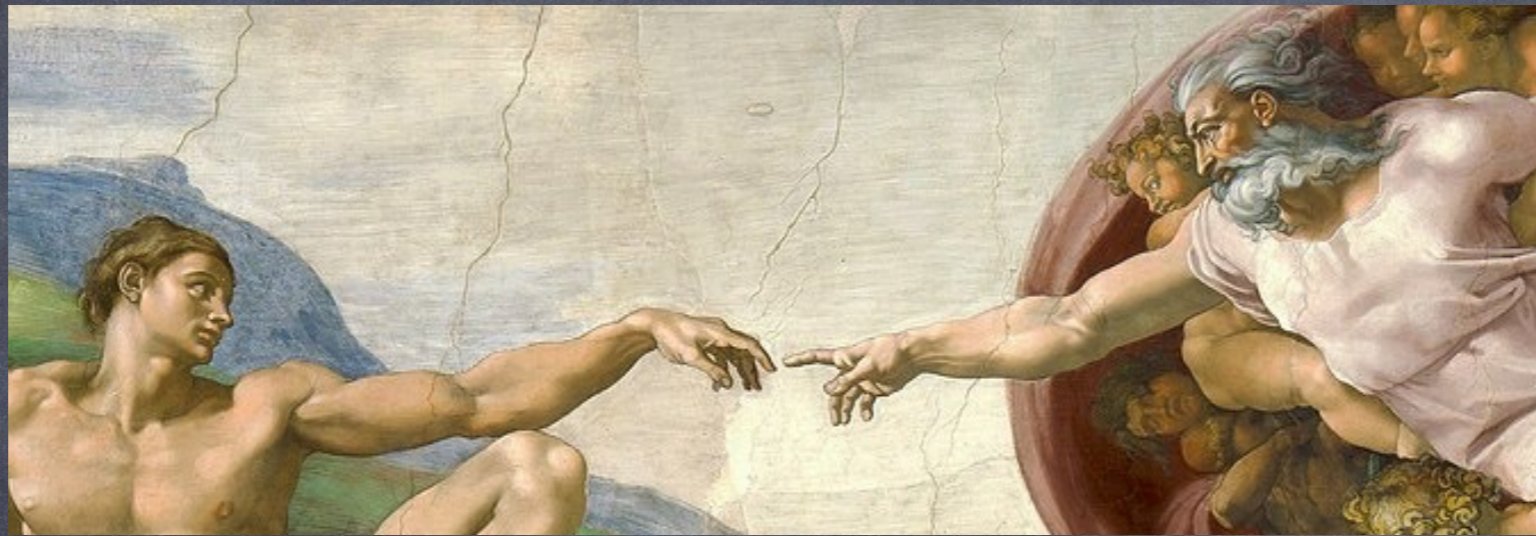


DES REBONDS ...

... QUANTIFIES !



# Gravité $\leftrightarrow$ Quantique: 2nd date



La gravité et la méca Q se touchent du bout des doigts

D'autres jolies histoires Gravité  $\leftrightarrow$  Quantique ?



ALLONS maintenant visiter le régime de gravité forte !

# Le problème fondamental

La gravité explose l'espace-temps

# Le problème fondamental

La gravité explose l'espace-temps

3 constantes fondamentales:

- la constante universelle de la gravitation de Newton

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

- la vitesse de la lumière

$$c \simeq 300\,000 \text{ km s}^{-1}$$

- la constante de Planck

$$\hbar \simeq 1,05 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$$

# Le problème fondamental

La gravité explose l'espace-temps

3 constantes fondamentales:

- la constante universelle de la gravitation de Newton

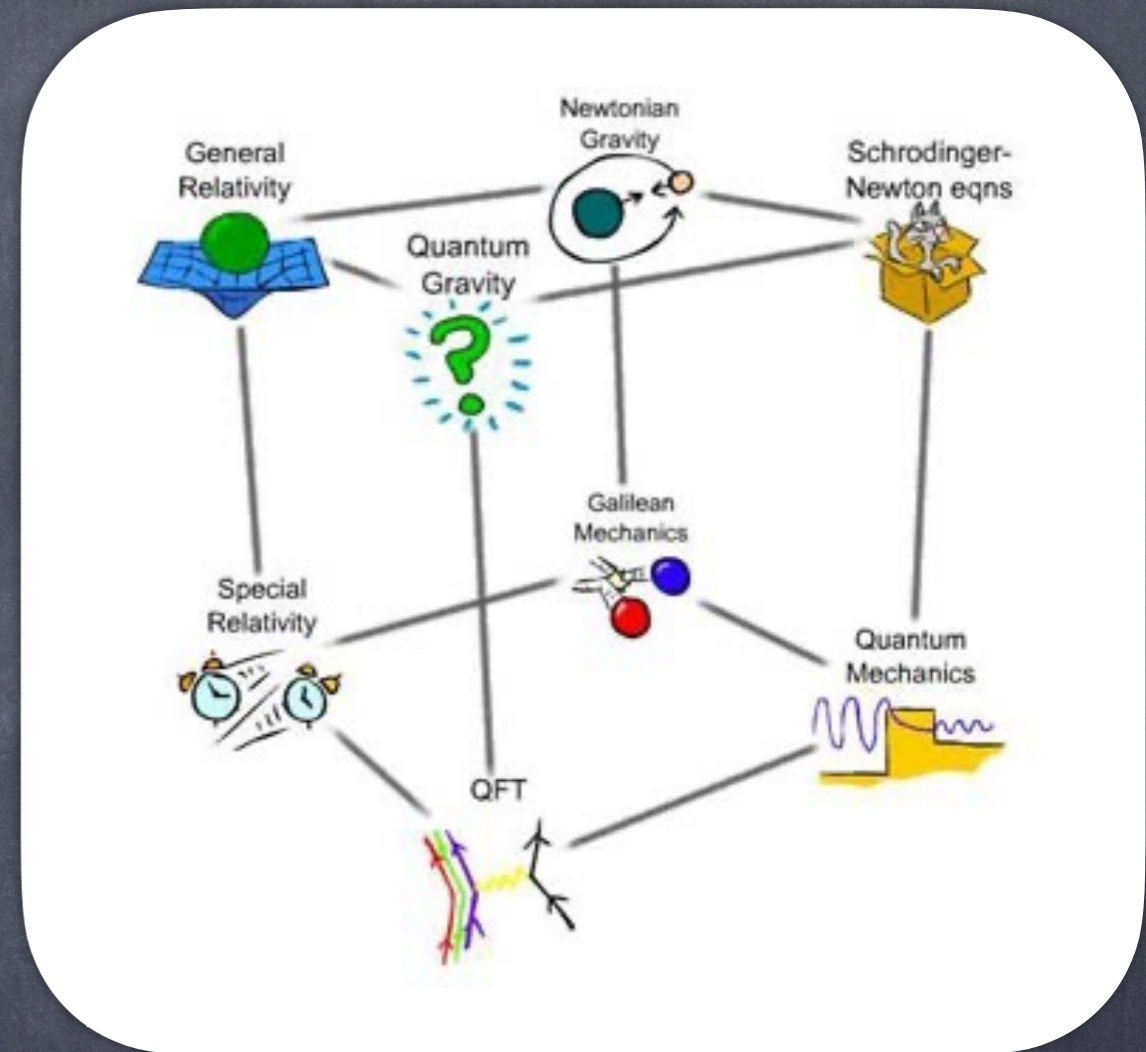
$$G \simeq 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

- la vitesse de la lumière

$$c \simeq 300\,000 \text{ km s}^{-1}$$

- la constante de Planck

$$\hbar \simeq 1,05 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$$



Bronstein

# Le problème fondamental

La gravité explose l'espace-temps

3 constantes fondamentales:

- la constante universelle de la gravitation de Newton

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

- la vitesse de la lumière

$$c \simeq 300\,000 \text{ km s}^{-1}$$

- la constante de Planck

$$\hbar \simeq 1,05 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$$



3 unités fondamentales:

- Temps de Planck

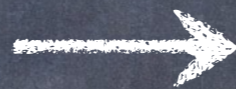
$$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \simeq 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

- Longueur de Planck

$$l_P = ct_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \simeq 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

- Masse de Planck

$$m_P = \frac{\hbar}{cl_P} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \simeq 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$





# Le problème fondamental

La gravité explose l'espace-temps

Essayons de localiser  
un objet de taille

# Le problème fondamental

La gravité explose l'espace-temps

Essayons de localiser  
un objet de taille  $\delta l$

On l'illumine pour le voir !



# Le problème fondamental

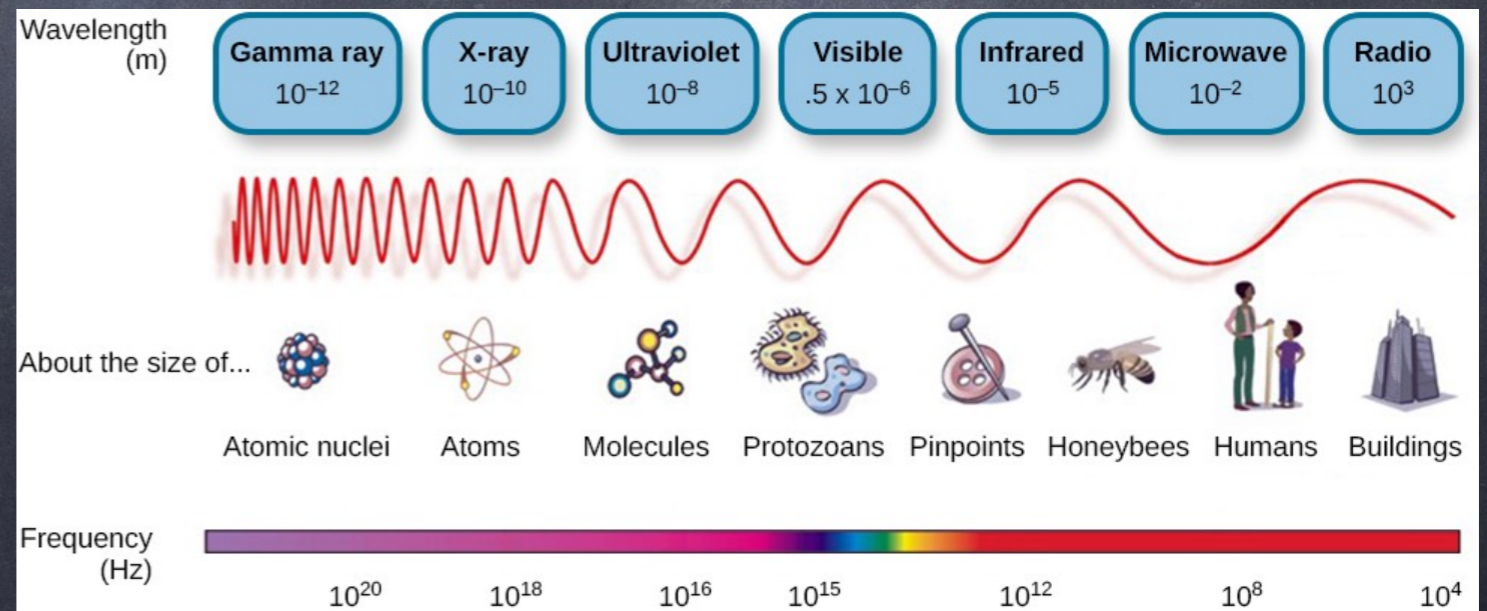
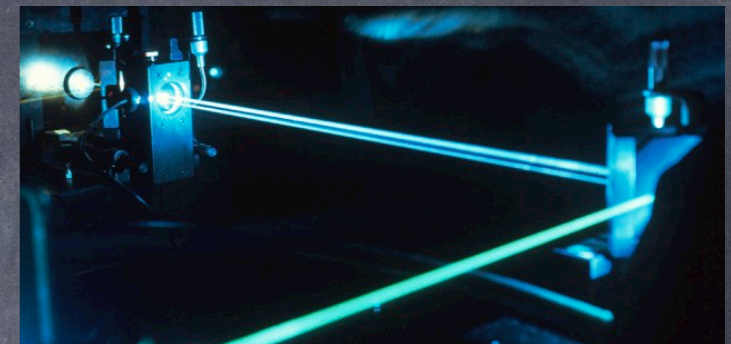
La gravité explose l'espace-temps

Essayons de localiser un objet de taille  $\delta l$

On l'illumine pour le voir !

On a besoin d'un laser (rayon de lumière) dont la longueur d'onde est plus petite que  $\delta l$

$$E = \hbar\omega = \frac{\hbar c}{\lambda} \geq \frac{\hbar c}{\delta l}$$

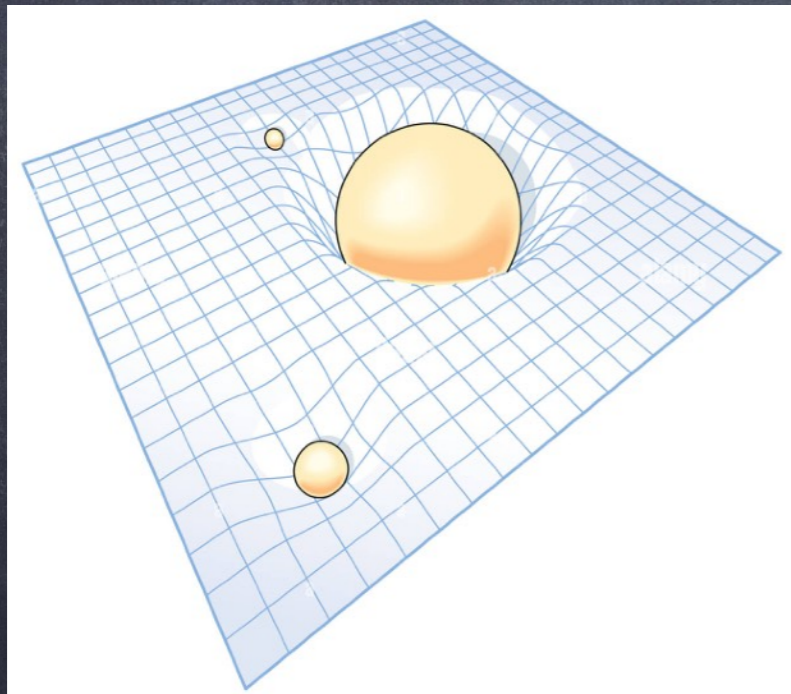


# Le problème fondamental

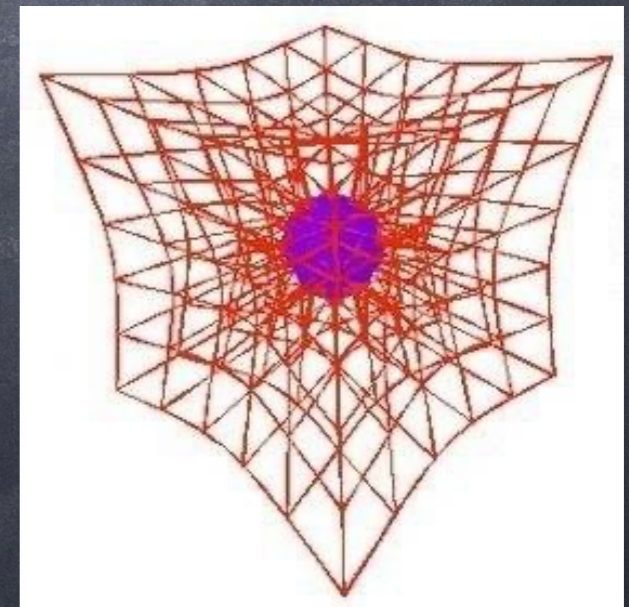
La gravité explose l'espace-temps

Essayons de localiser  
un objet de taille  $\delta l$

$$\frac{\hbar c}{\delta l} \leq E \leq \frac{c^4 \delta l}{G}$$



Plus on a d'énergie, plus  
on modifie l'espace-temps  
autour de nous !



# Le problème fondamental

La gravité explose l'espace-temps

Essayons de localiser  
un objet de taille  $\delta l$

$$\frac{\hbar c}{\delta l} \leq E \leq \frac{c^4 \delta l}{G}$$



Plus on a d'énergie, plus  
on modifie l'espace-temps  
autour de nous !

Quand le rayon lumineux  
devient trop « lourd », il  
pourrait créer un trou noir !

# Le problème fondamental

La gravité explose l'espace-temps

Essayons de localiser  
un objet de taille  $\delta l$

$$\frac{\hbar c}{\delta l} \leq E \leq \frac{c^4 \delta l}{G}$$



$$\delta l \geq \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = l_{Planck}$$

On ne peut rien  
mesurer de plus petit  
que la longueur de  
Planck,

Espace-temps vient par  
morceaux quantiques !

Il n'existe donc rien  
de plus petit que la  
longueur de Planck

Le problème profond

# Le problème profond

Il va falloir plonger de plus haut que La Mécanique Quantique





# Le problème profond

Il va falloir plonger plus loin que la Mécanique Quantique

La matière et les particules sont des ondes ...

# Le problème profond

Il va falloir plonger plus loin que la Mécanique Quantique

La matière et les particules sont des ondes ...

Les forces sont véhiculées par des ondes,

donc deviennent quantiques

et ondes deviennent particules

# Le problème profond

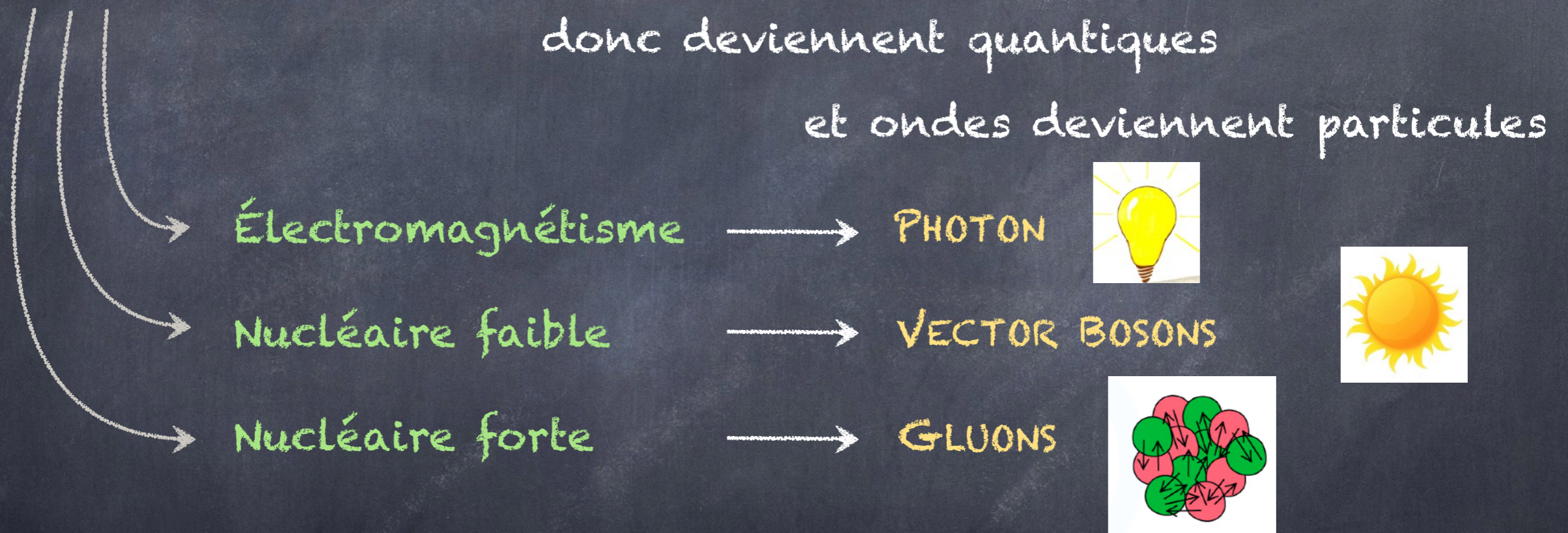
Il va falloir plonger plus loin que La Mécanique Quantique

La matière et les particules sont des ondes ...

Les forces sont véhiculées par des ondes,

donc deviennent quantiques

et ondes deviennent particules



# Le problème profond

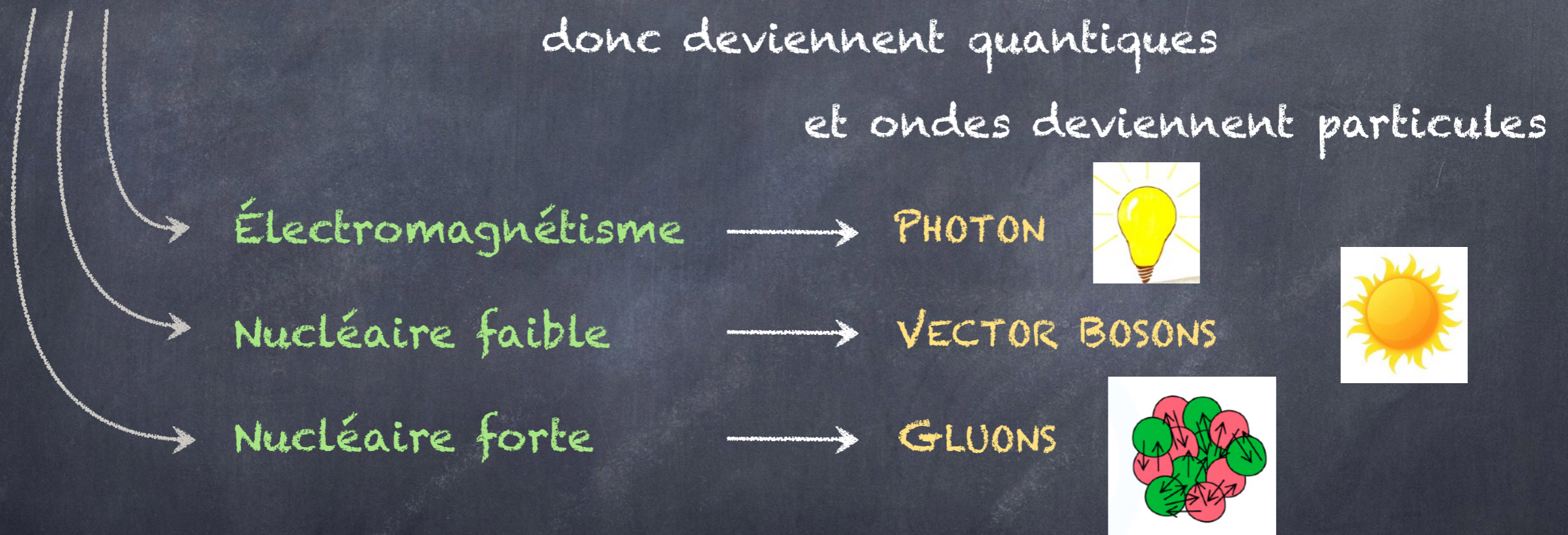
Il va falloir plonger plus loin que La Mécanique Quantique

La matière et les particules sont des ondes ...

Les forces sont véhiculées par des ondes,

donc deviennent quantiques

et ondes deviennent particules



C'est la THEORIE QUANTIQUE des CHAMPS,

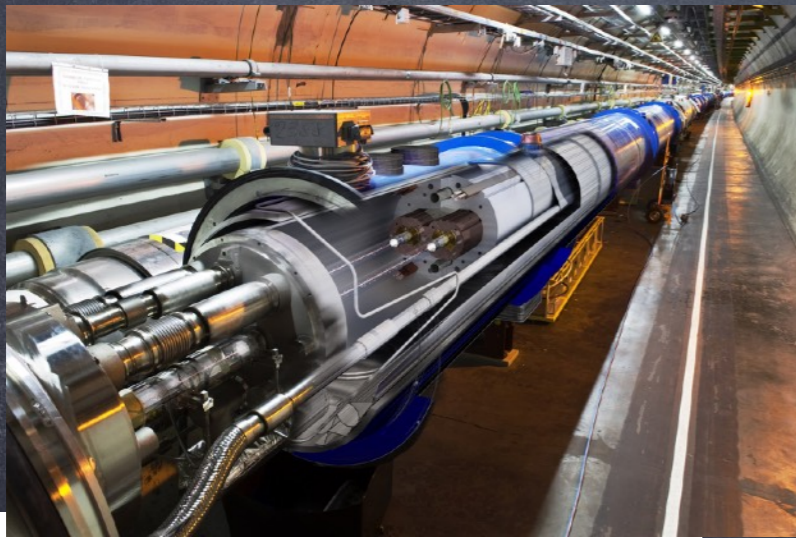
pour la PHYSIQUE des PARTICULES

# Le problème profond

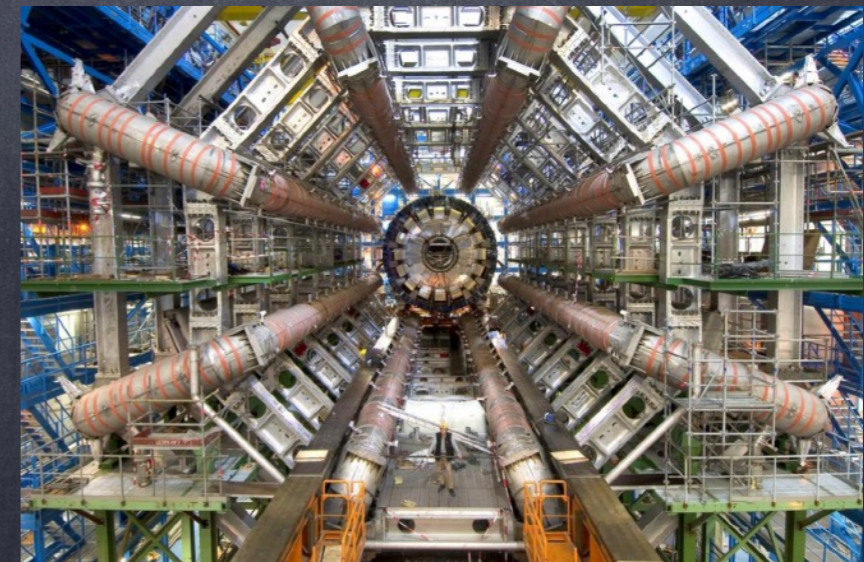
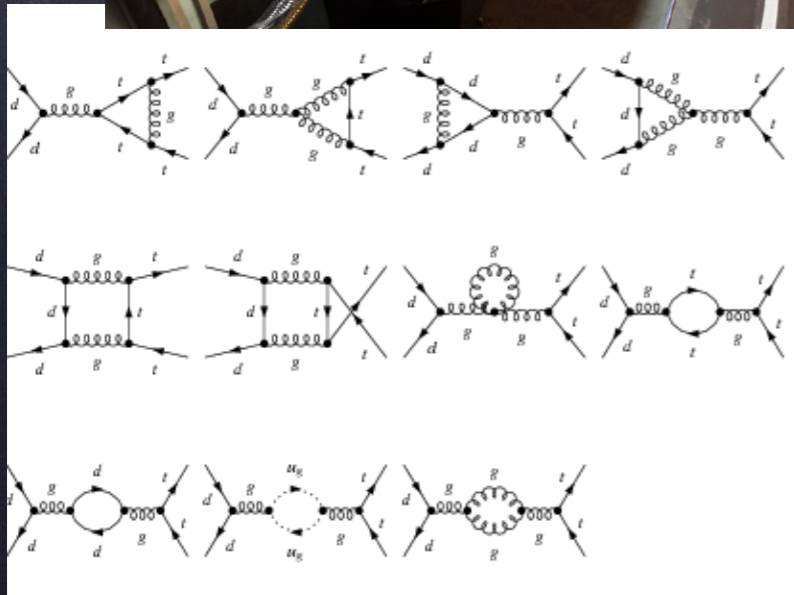
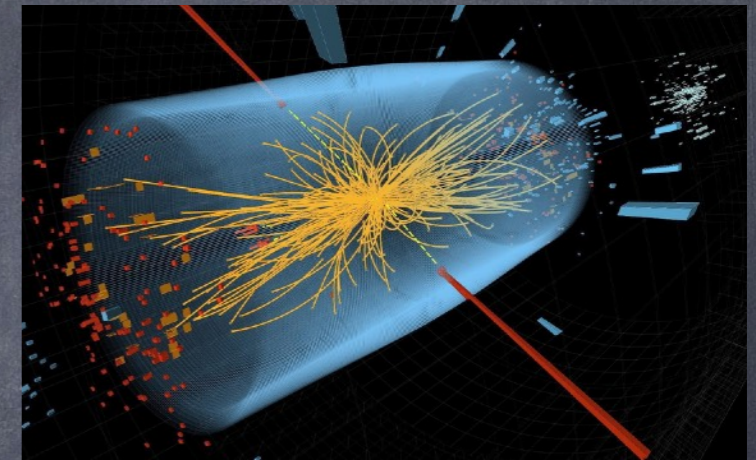
C'est la THEORIE QUANTIQUE des CHAMPS,

pour la PHYSIQUE des PARTICULES

On calcule des probabilités de création de particules  
lors des collisions à très hautes énergies



$$I_D = \int \frac{d^D k_1}{i\pi^{D/2}} \frac{d^D k_2}{i\pi^{D/2}} \frac{1}{(-k_1^2 + i\epsilon)[-(k_1 + p_1)^2 + i\epsilon]} \times \frac{1}{[-(k_1 - p_2)^2 + i\epsilon][-(k_1 + p_1 - k_2)^2 + M_t^2 + i\epsilon]} \times \frac{1}{(-k_2^2 + M_t^2 + i\epsilon)[-(k_2 - p_4)^2 + M_t^2 + i\epsilon]} \times \frac{1}{[-(k_1 + p_1 - k_2 - p_3)^2 + M_t^2 + i\epsilon]}, \quad (27)$$



# Le problème profond

C'est la THEORIE QUANTIQUE des CHAMPS,

pour la PHYSIQUE des PARTICULES

Cela change "tout" ... surtout le RIEN !

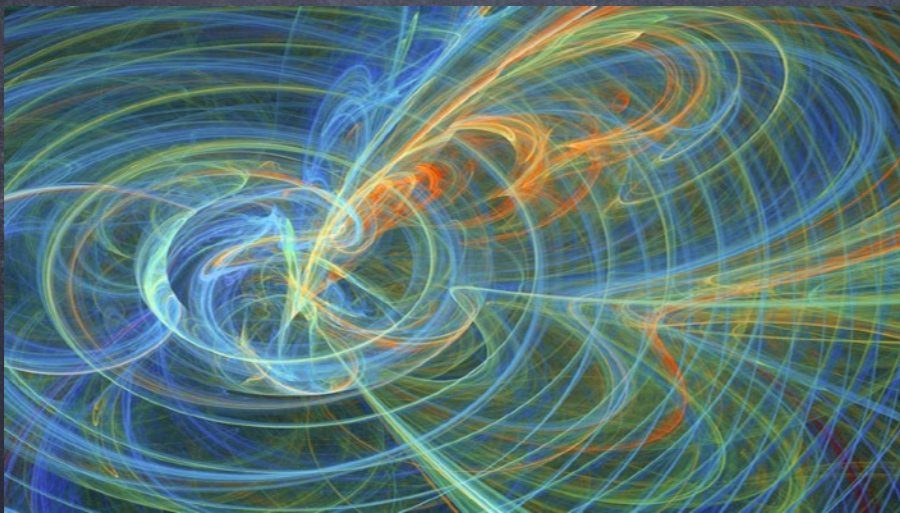
# Le problème profond

C'est la THEORIE QUANTIQUE des CHAMPS,

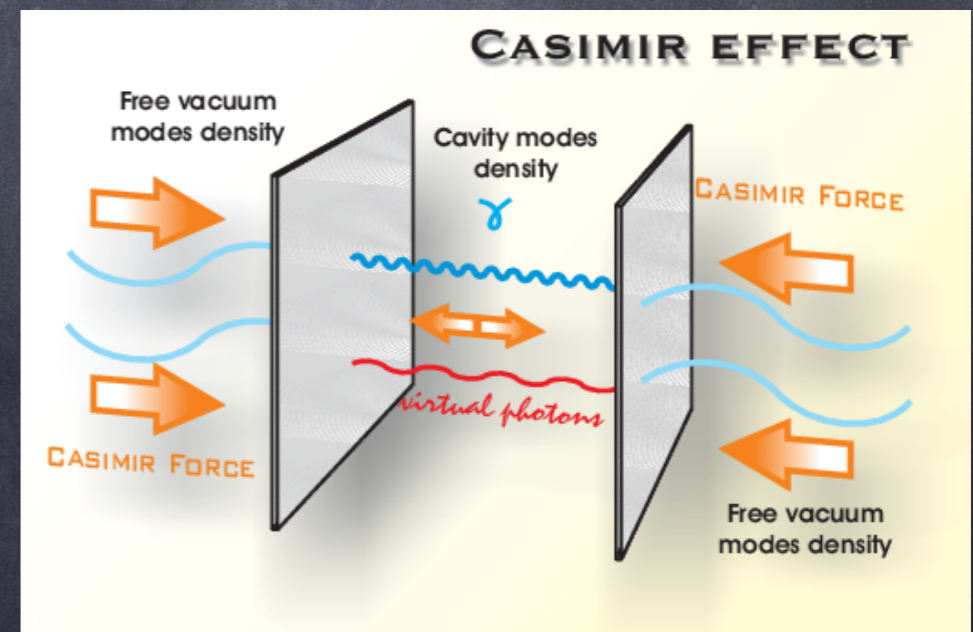
pour la PHYSIQUE des PARTICULES

Cela change "tout" ... surtout le RIEN !

- Le « vide » n'est plus vide, il est rempli de particules virtuelles



ENERGIE DU VIDE



# Le problème profond

C'est la THEORIE QUANTIQUE des CHAMPS,

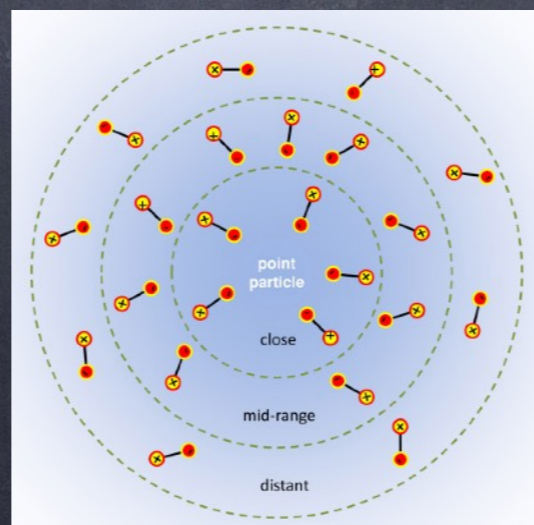
pour la PHYSIQUE des PARTICULES

Cela change "tout" ... surtout le RIEN !

- Le « vide » n'est plus vide, il est rempli de particules virtuelles
- Chaque particule « polarise le vide » autour et est accompagnée d'un nuage de particules virtuelles

## RENORMALISATION

Ce nuage modifie la charge et toutes les propriétés des vraies particules !!





# Le problème profond

C'est la THEORIE QUANTIQUE des CHAMPS,

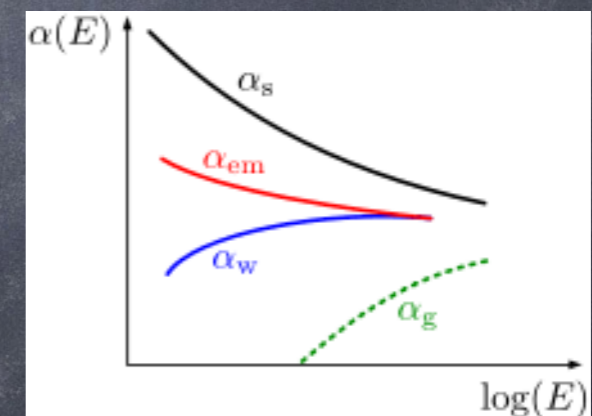
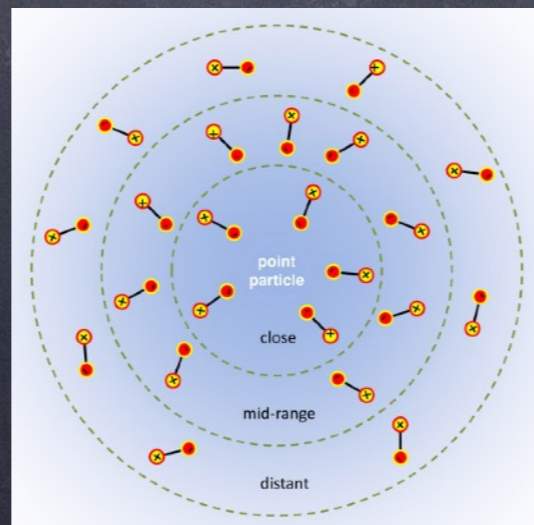
pour la PHYSIQUE des PARTICULES

Cela change "tout" ... surtout le RIEN !

- Le « vide » n'est plus vide, il est rempli de particules virtuelles
- Chaque particule « polarise le vide » autour et est accompagnée d'un nuage de particules virtuelles

## RENORMALISATION

Ce nuage modifie la charge et toutes les propriétés des vraies particules !!



Les CONSTANTES des forces et les charges des particules dépendent de l'échelle d'observation!

# Le problème profond

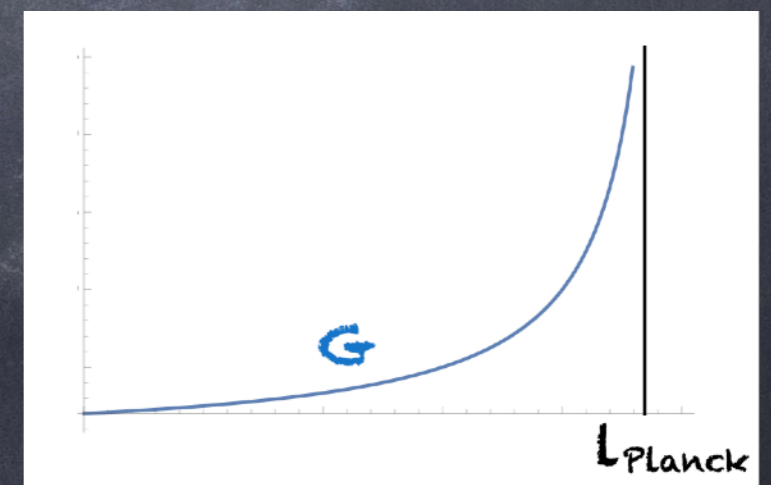
C'est la THEORIE QUANTIQUE des CHAMPS,

pour la PHYSIQUE des PARTICULES

Une masse polarise le vide de l'espace-temps ...



Plus on regarde de près, plus c'est lourd !



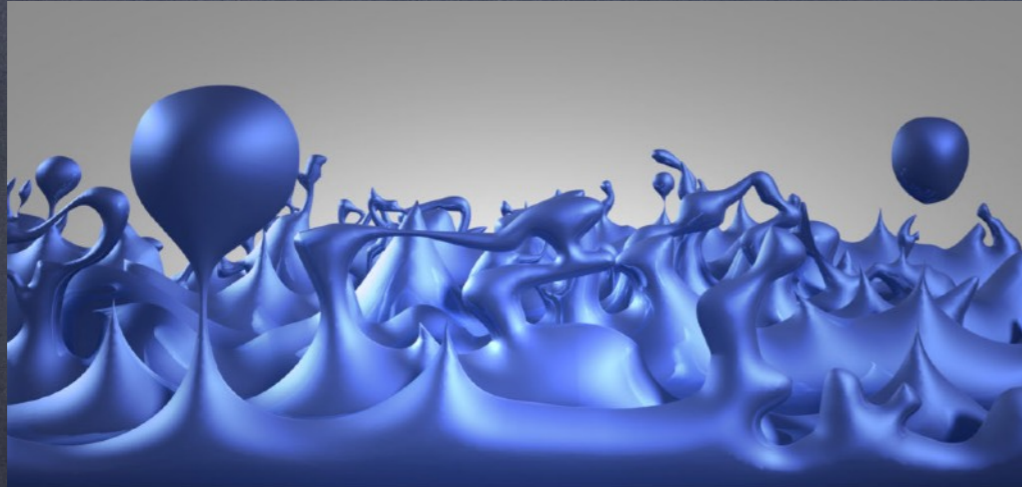
# Le problème profond

La gravitation reflète la géométrie de l'espace-temps,

# Le problème profond

La gravitation reflète la géométrie de l'espace-temps,

Et les fluctuations quantiques font exploser cette géométrie aux très petites distances et très hautes énergies ...

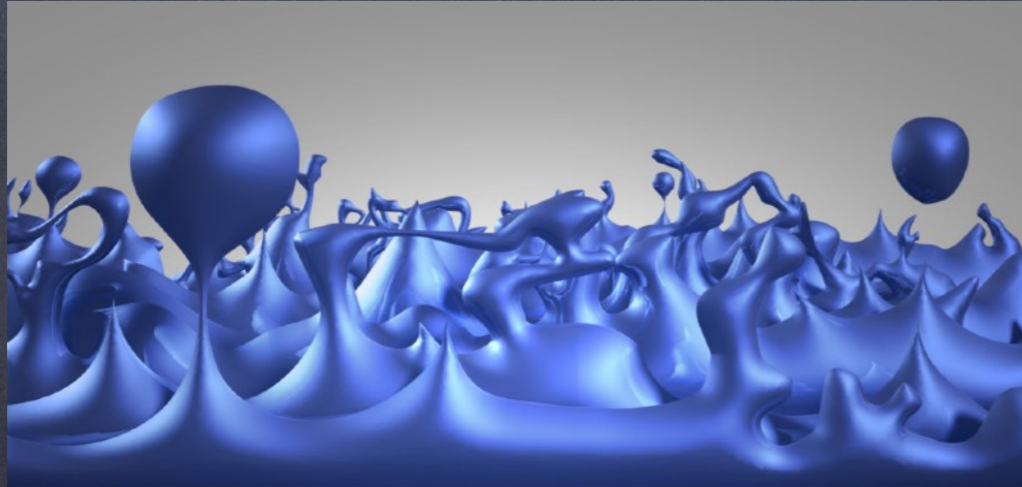


Non-Renormalizable QFT

# Le problème profond

La gravitation reflète la géométrie de l'espace-temps,

Et les fluctuations quantiques font exploser cette géométrie aux très petites distances et très hautes énergies ...



Non-Renormalizable QFT

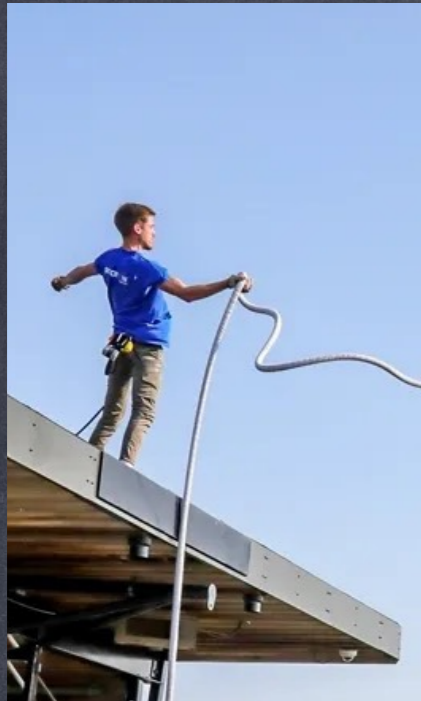
ALORS QUE FAIT-ON ?

Allez, au boulot !

Aller, au boulot !

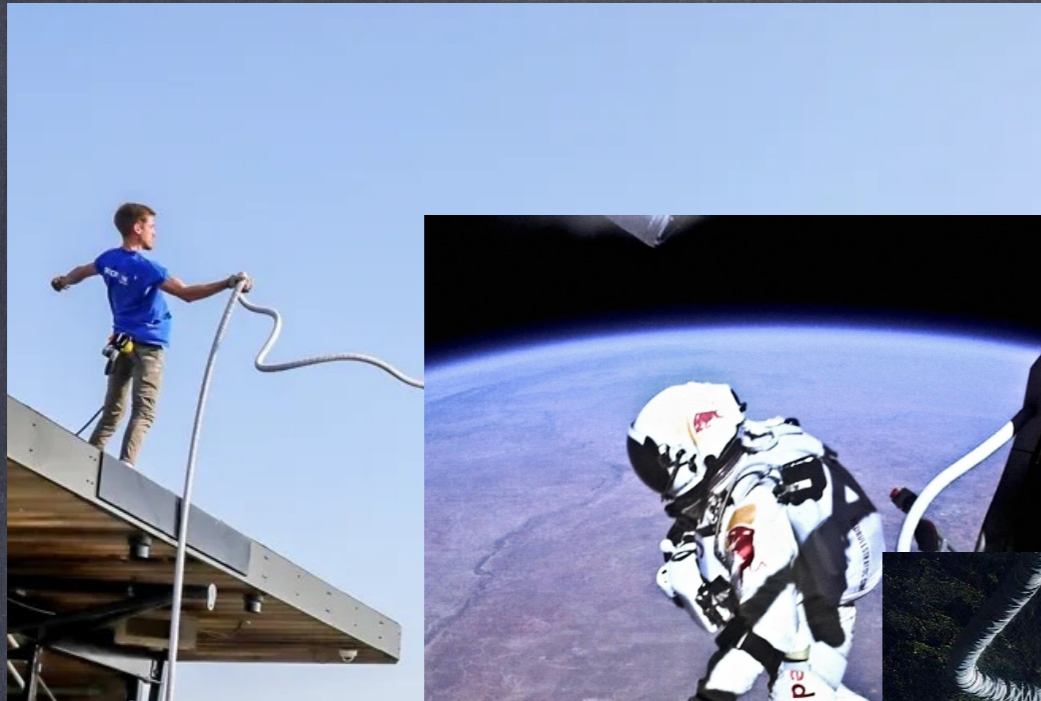


Aller, au boulot !





Allez, au boulot !



# Les Gravités Quantiques

Quantum  
Gravity

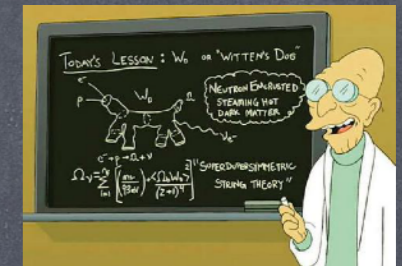
# Les Gravités Quantiques



Quantum  
Gravity

# Les Gravités Quantiques

String  
Theory



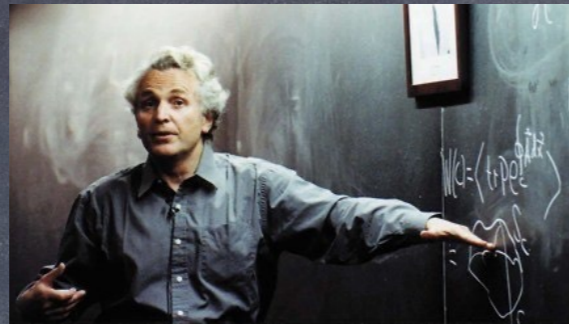
Quantum  
Gravity

# La Théorie des Cordes

Les particules ne sont plus des objets ponctuels, mais de petites cordes ou même des membranes



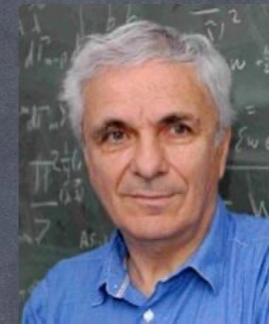
Veneziano



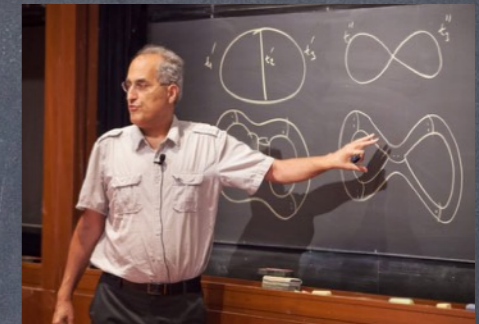
Polyakov



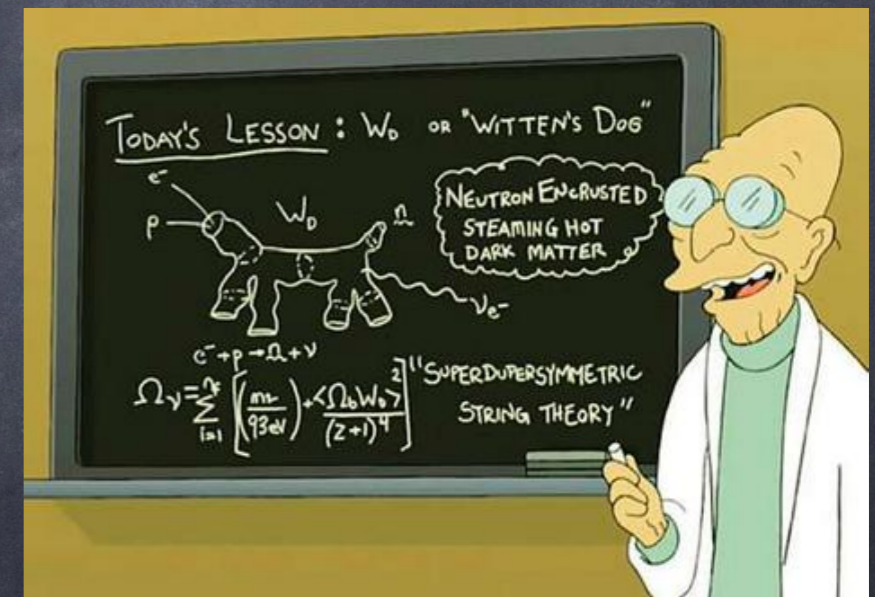
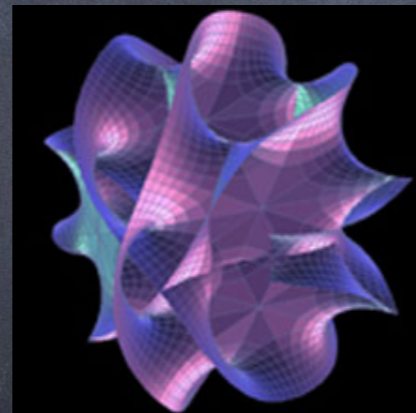
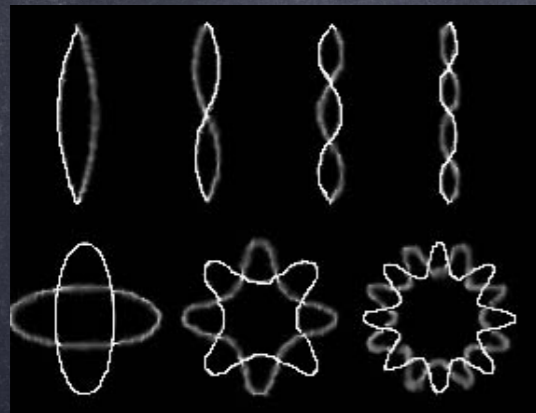
Schwarz



Green

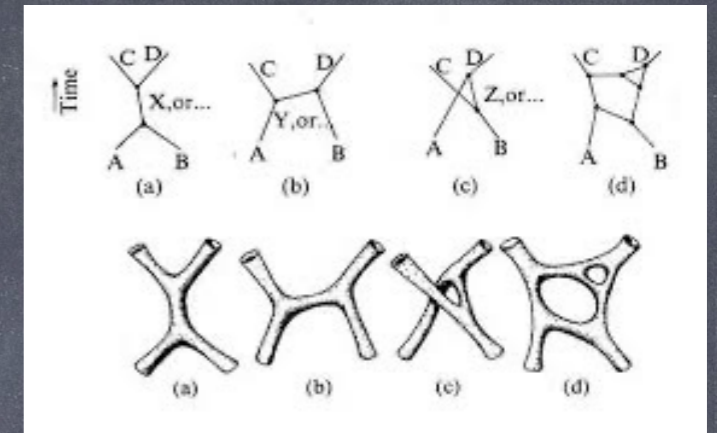
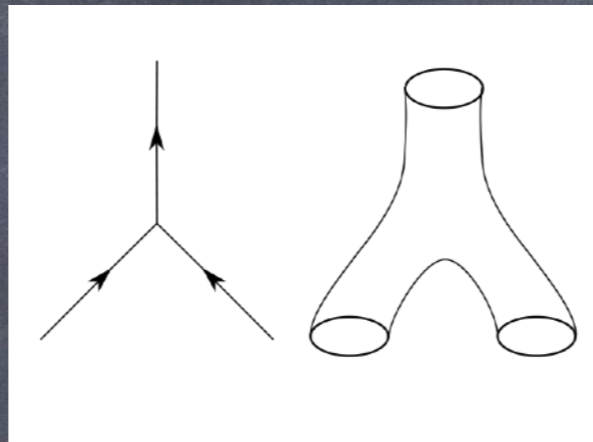
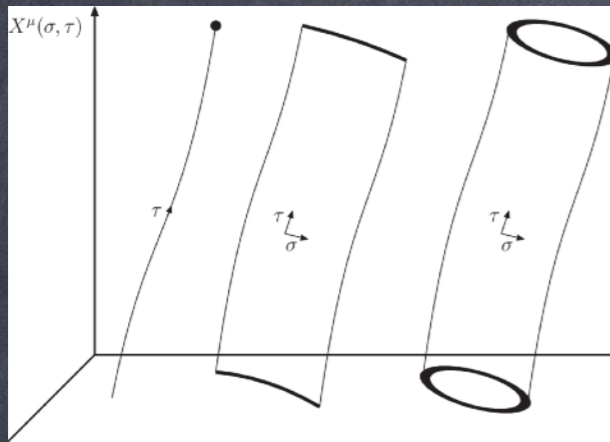


Witten

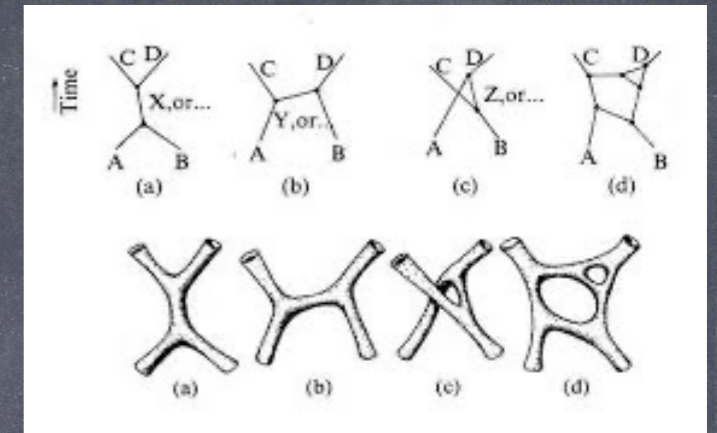
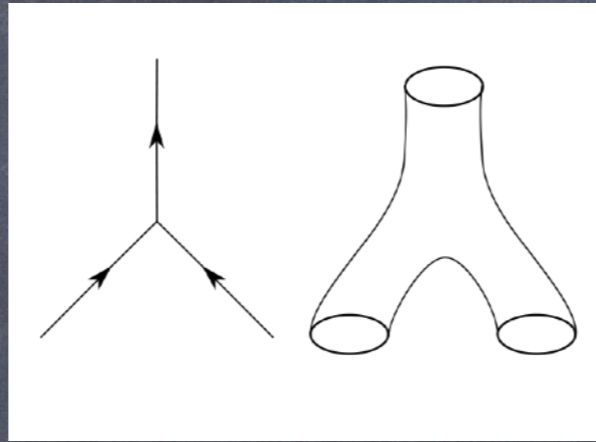
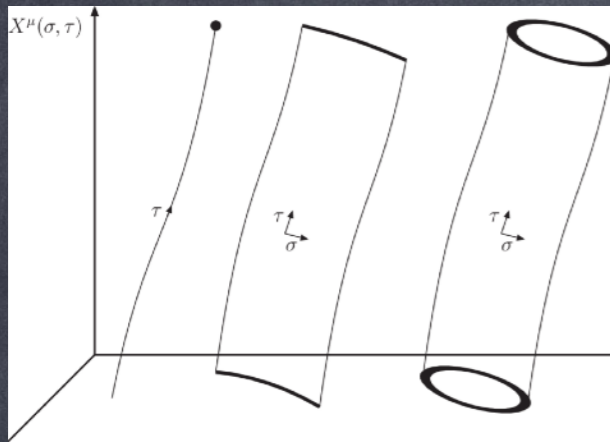


Les modes de vibration définissent les divers types de particules et champs

# La Théorie des Cordes

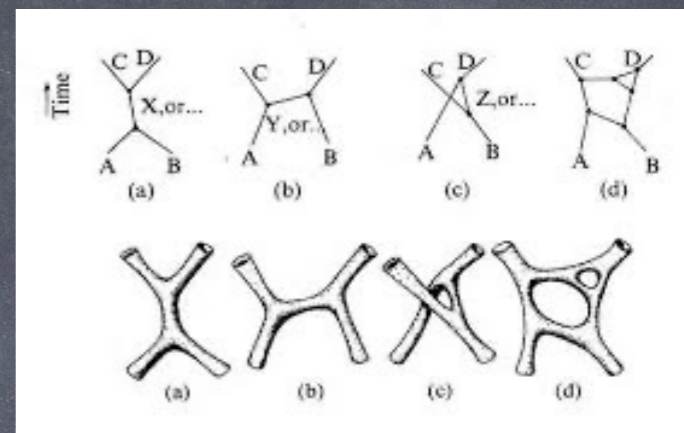
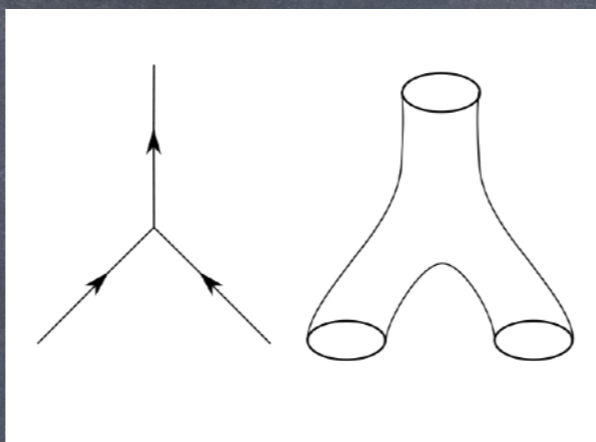
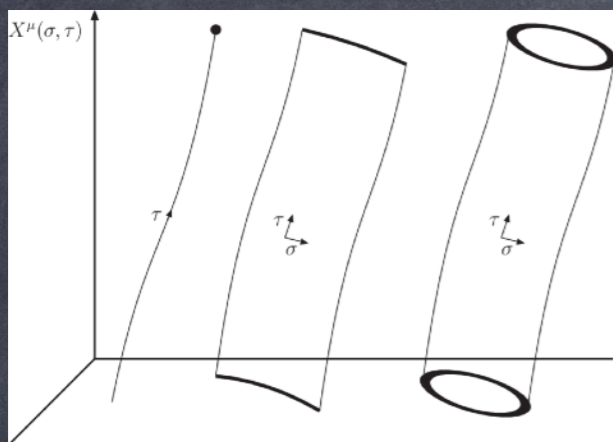


# La Théorie des Cordes



Vibration d'une  
corde créent une  
infinité de particules  
élémentaires

# La Théorie des Cordes



Vibration d'une corde créent une infinité de particules élémentaires

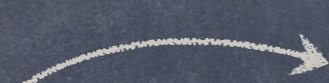
Symétrie de Lorentz préservée seulement en  $dim=26$

Alerte aux tachyons !

Supersymétries préservées en  $dim=10$

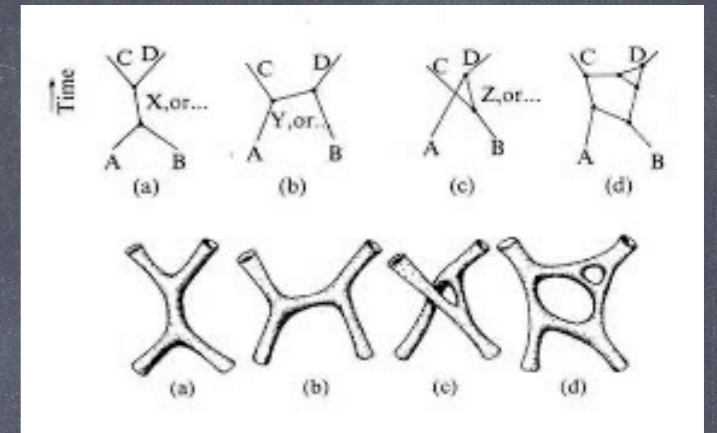
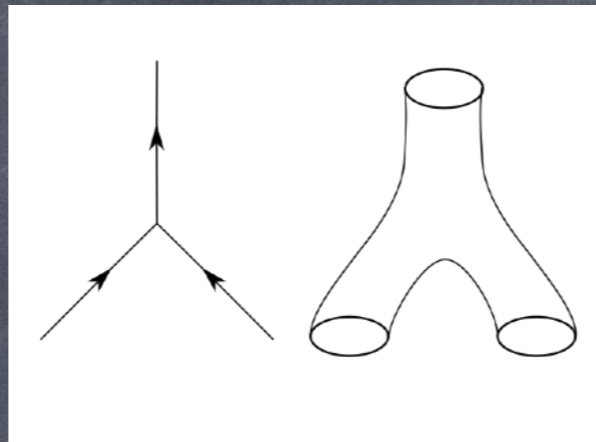
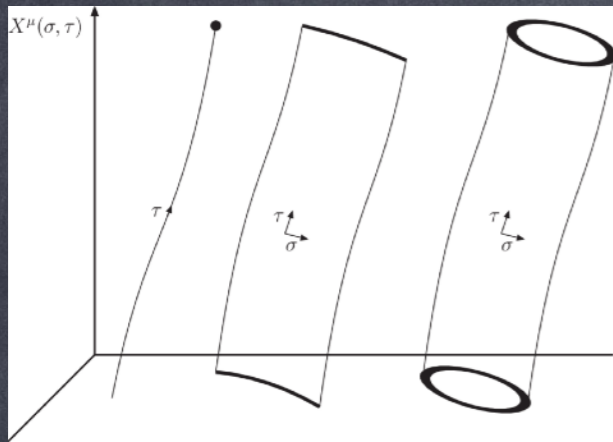
Unification des forces

Supersymétries





# La Théorie des Cordes



Vibration d'une corde créent une infinité de particules élémentaires

Symétrie de Lorentz préservée seulement en  $dim=26$

Il faut des dim supplémentaires !

Supersymétries préservées en  $dim=10$

5 théories des cordes

Faut les compactifier

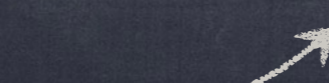
Alerte aux tachyons !

Supergravités

Plein de particules nouvelles

Unification des forces

Supersymétries

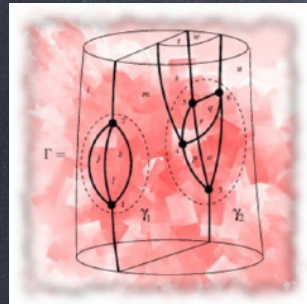


# La Théorie des Cordes

Plein de particules  
nouvelles... YEAH!

Oui, ...  
mais on y trouve  
de la Gravité ??

# Les Gravités Quantiques

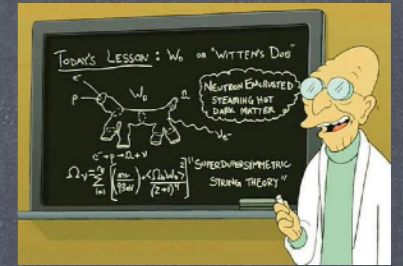
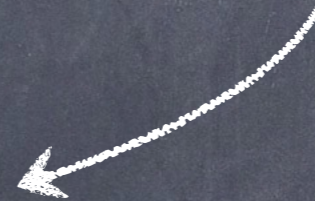


Loop Quantum Gravity



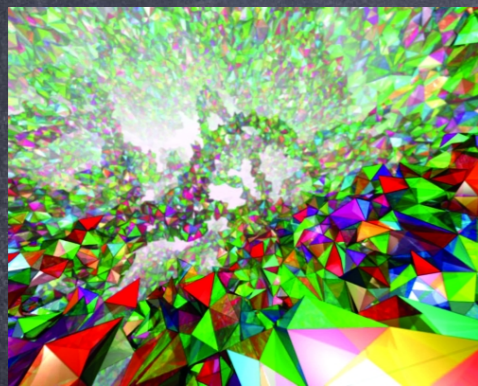
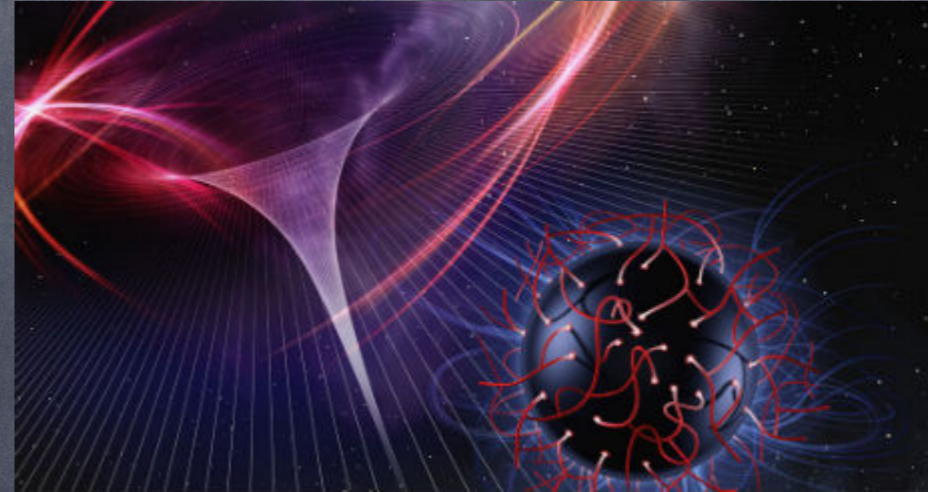
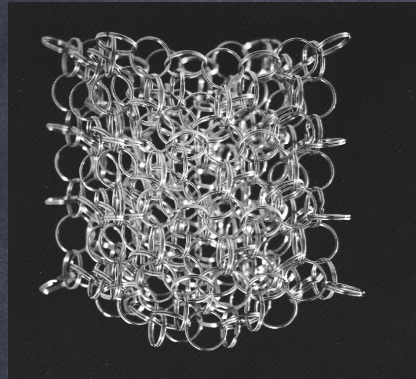
Quantum Gravity

String Theory



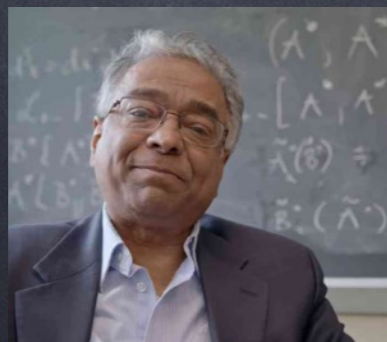
# La Gravitation Quantique à Boucles

Un espace-temps discret qui vient par petits « atomes » d'espace qui évoluent et interagissent dans le temps



Les surfaces d'interaction entre "atomes" 3d ont des aires entières

$$A = n l_{\text{Planck}}^2 \quad n \in \mathbb{N}$$



Ashtekar



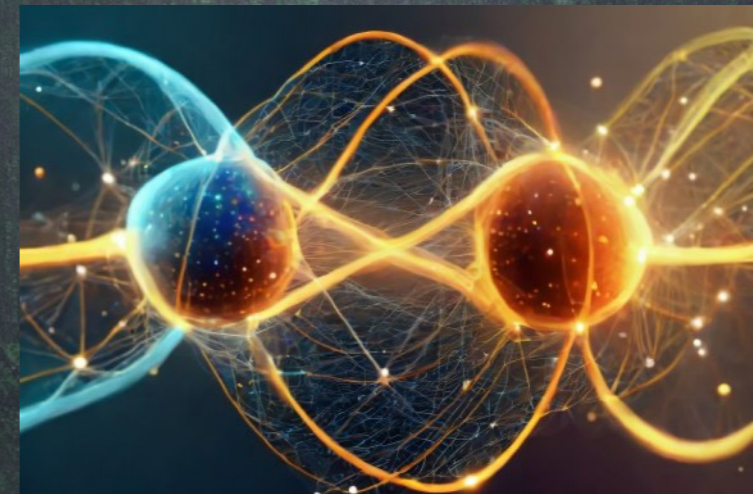
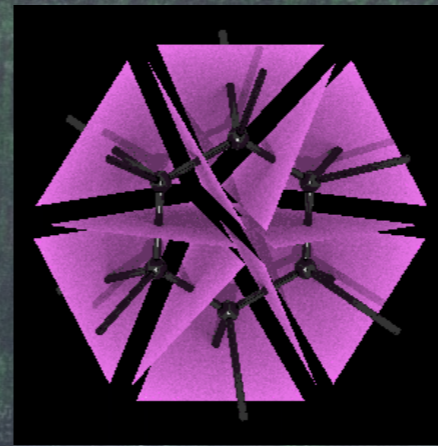
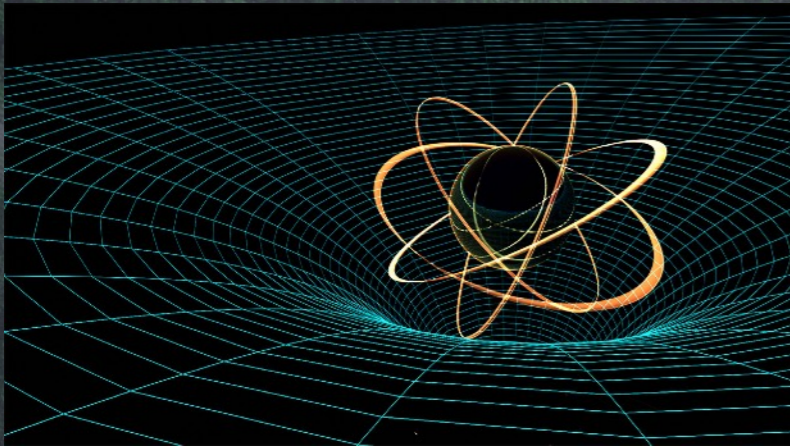
Rovelli



Smolin

# La Gravitation Quantique à Boucles

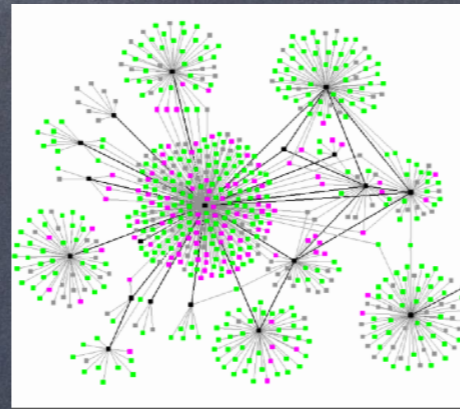
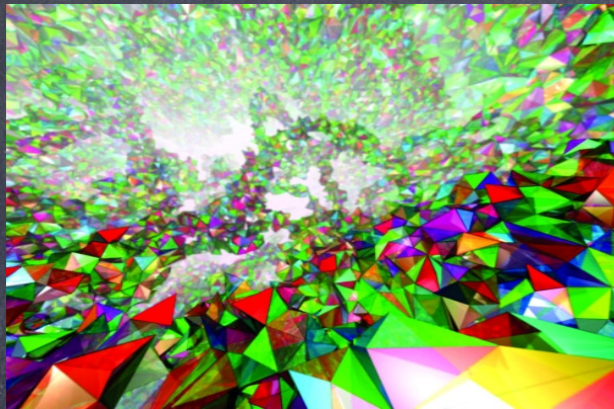
Espace-temps vient par morceaux quantiques



# La Gravitation Quantique à Boucles

Espace-temps vient par morceaux quantiques,

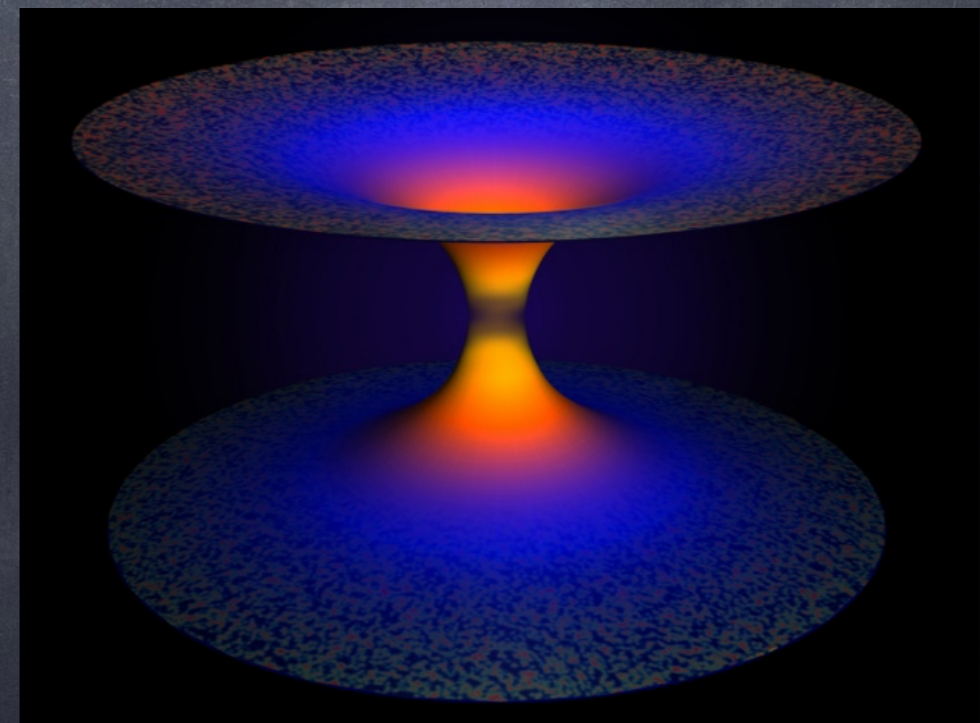
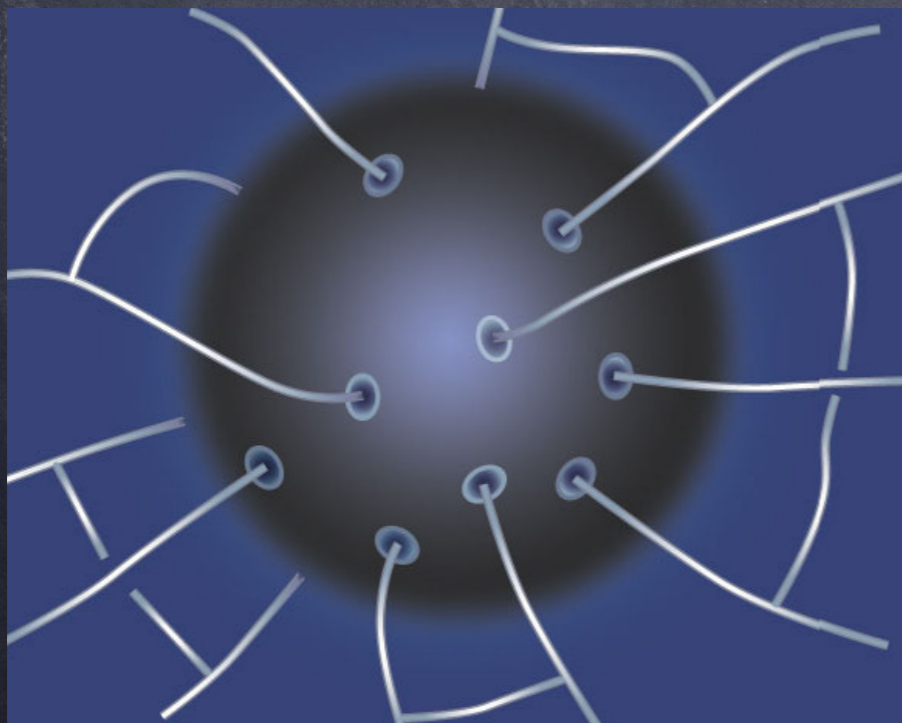
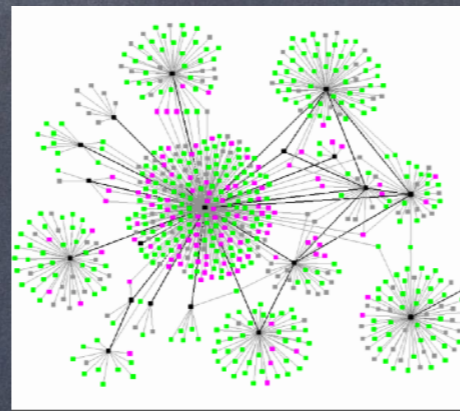
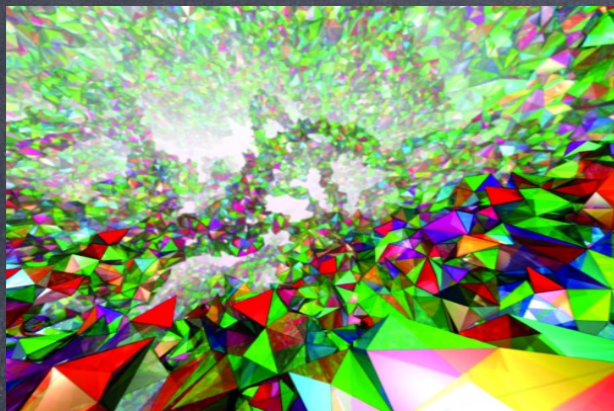
Et évolue comme un réseau dynamique



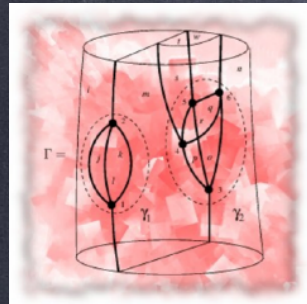
# La Gravitation Quantique à Boucles

Espace-temps vient par morceaux quantiques,

Et évolue comme un réseau dynamique



# Les Gravités Quantiques

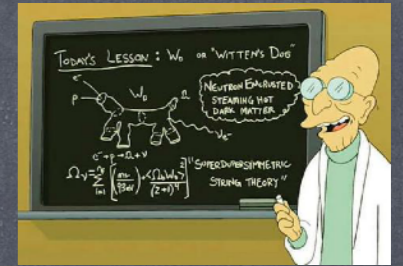
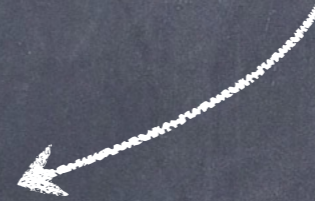


Loop Quantum Gravity

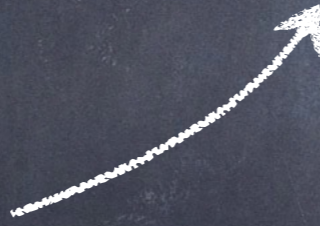


Quantum Gravity

String Theory



Non-Commutative Geometry





# La Géométrie Non-Commutative

Les distances acquièrent des fluctuations quantiques



$$\delta x \cdot \delta p \geq \hbar \longrightarrow \delta x \cdot \delta y \geq l_{Planck}^2$$

Les distances deviennent quantifiées en unité de Planck,

Mais on doit changer ce qu'on appelle translations et rotations !

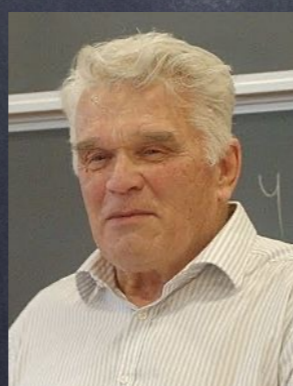
Espace-temps quantique

≠

Groupe de Symétrie Quantique



Connes



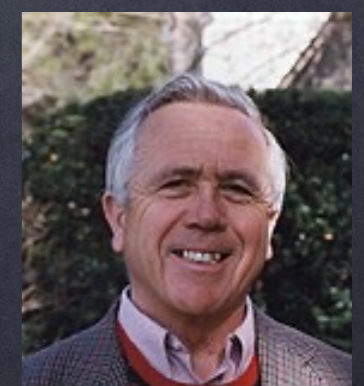
Faddeev



Jimbo

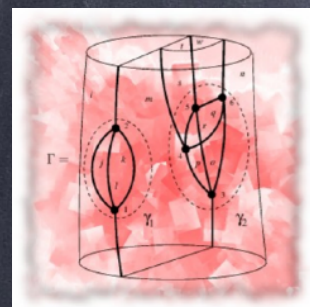


Drinfeld



Baxter

# Les Gravités Quantiques



Loop Quantum Gravity

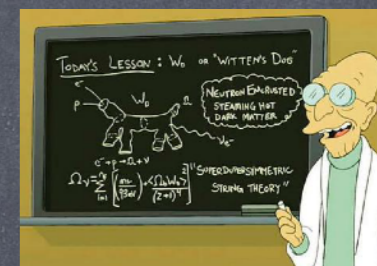
Matrix Models

String Theory

Quantum Gravity

Non-Commutative Geometry

Relative Locality



# Relativité de la localisation

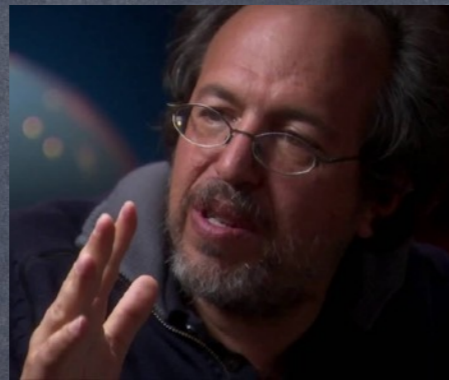
Vers une notion de Relativité Déformée,

on déforme les transformations de Lorentz,  
les translations & les rotations

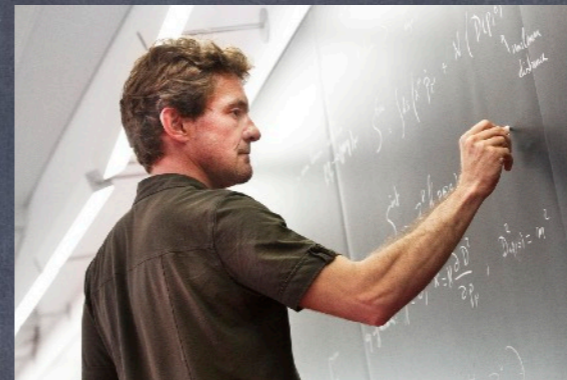
pour rendre la longueur de Planck universelle



Amelino-Camelia



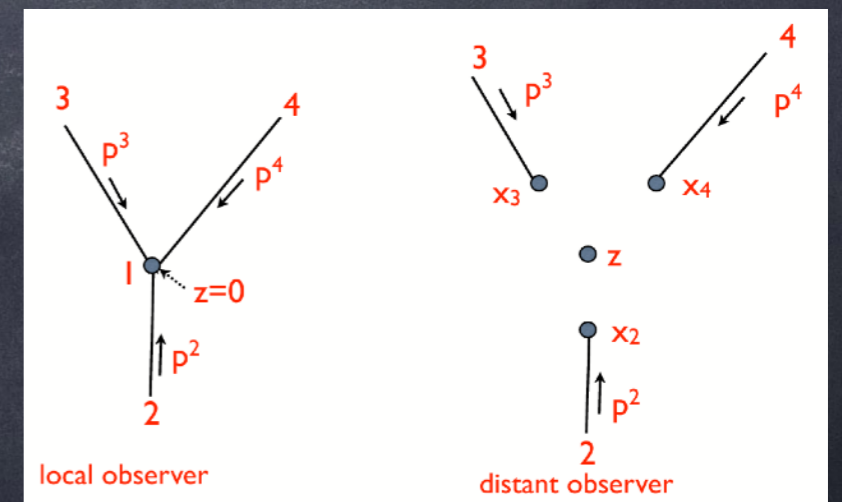
Smolin



Freidel

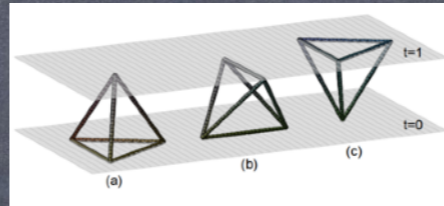


la localisation d'un événement  
est relative à l'observateur



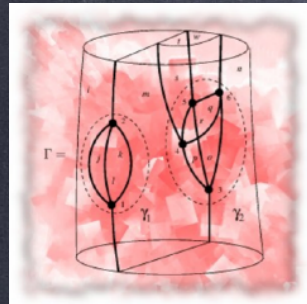
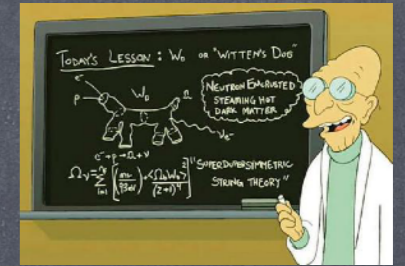
# Les Gravités Quantiques

Dynamical  
Triangulations



Matrix Models

String  
Theory



Loop Quantum  
Gravity

Quantum  
Gravity

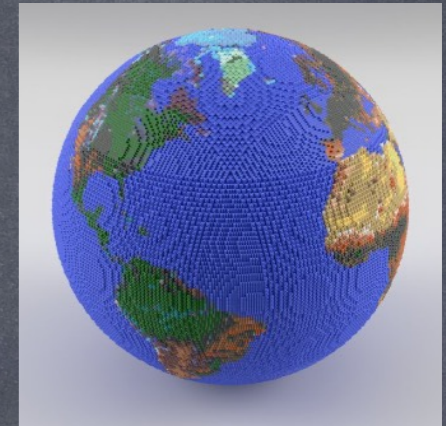
Non-Commutative  
Geometry

Relative  
Locality

# Matrices Aléatoires et Triangulations Dynamiques

On colle des petits morceaux  
de géométrie 4d aléatoirement  
pour former l'espace-temps

Comme un LEGO qui  
s'auto-assemble !



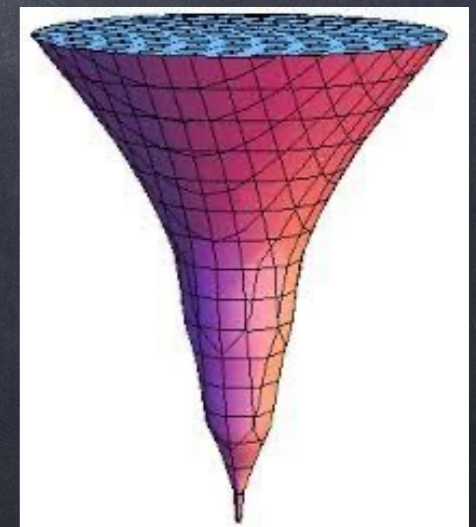
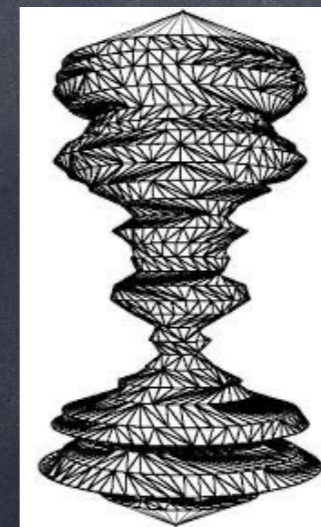
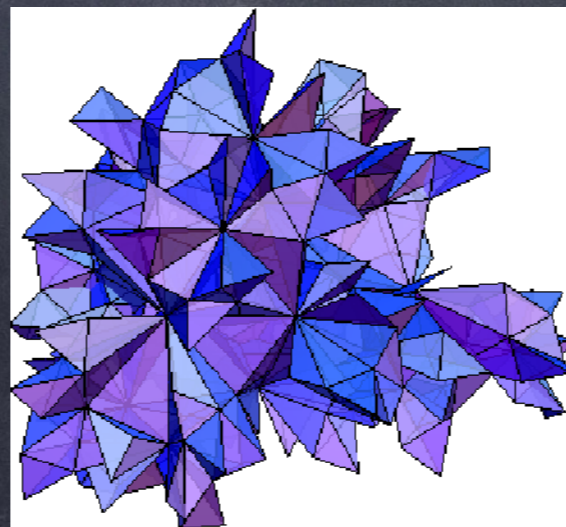
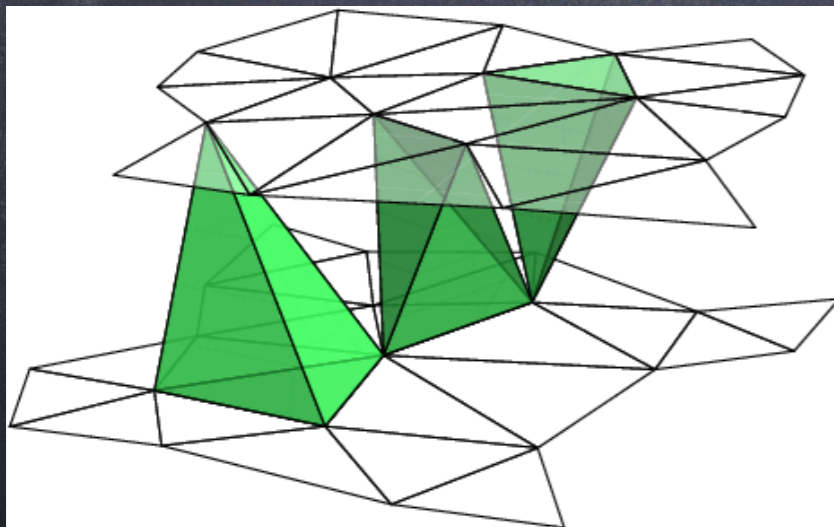
Et créer des  
tranches d'espace !



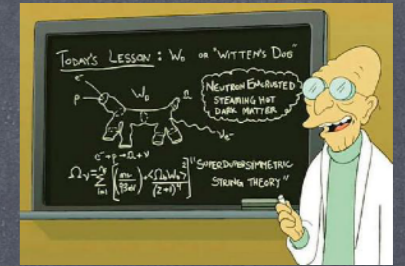
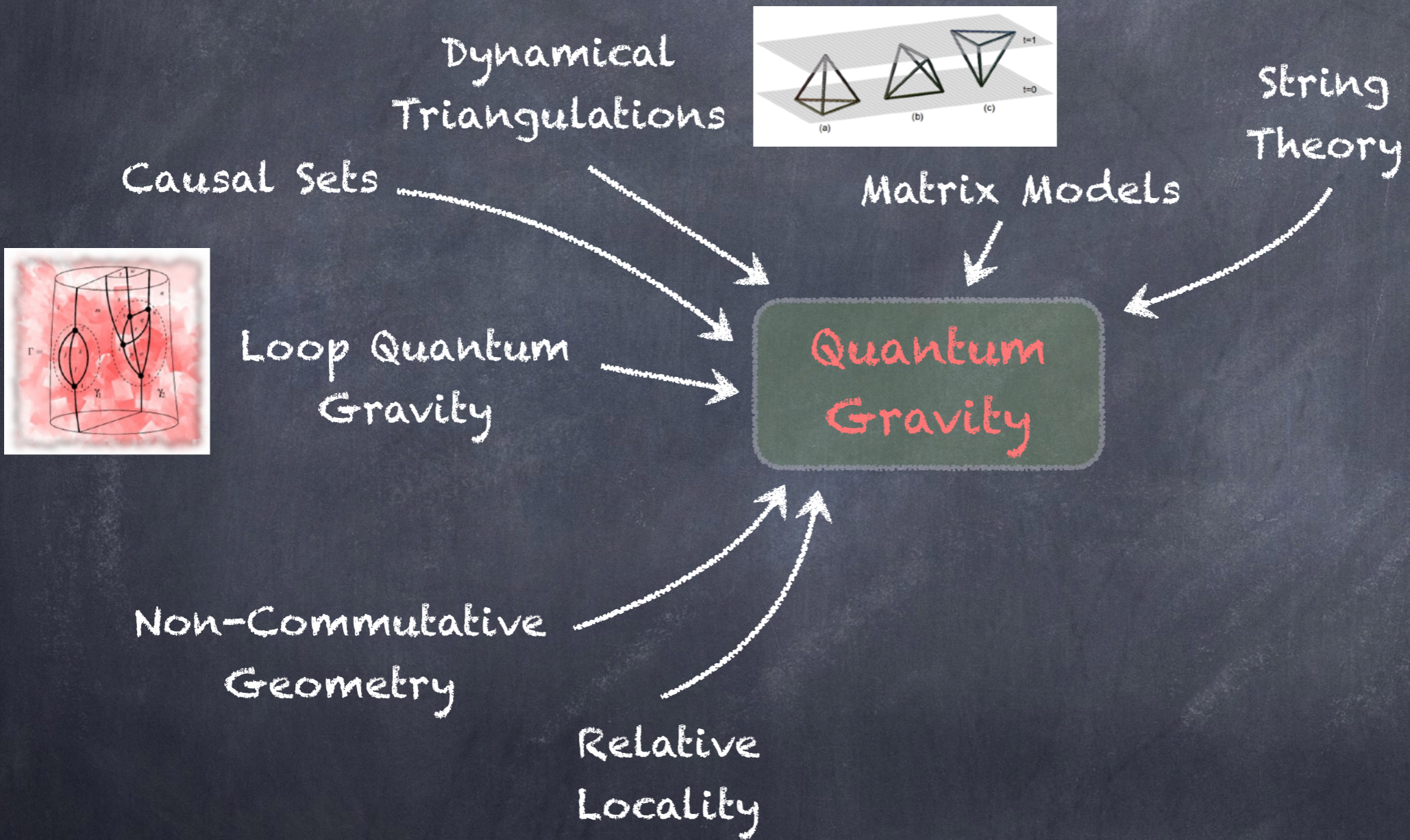
Jan AMBJORN



Renate LOLL



# Les Gravités Quantiques

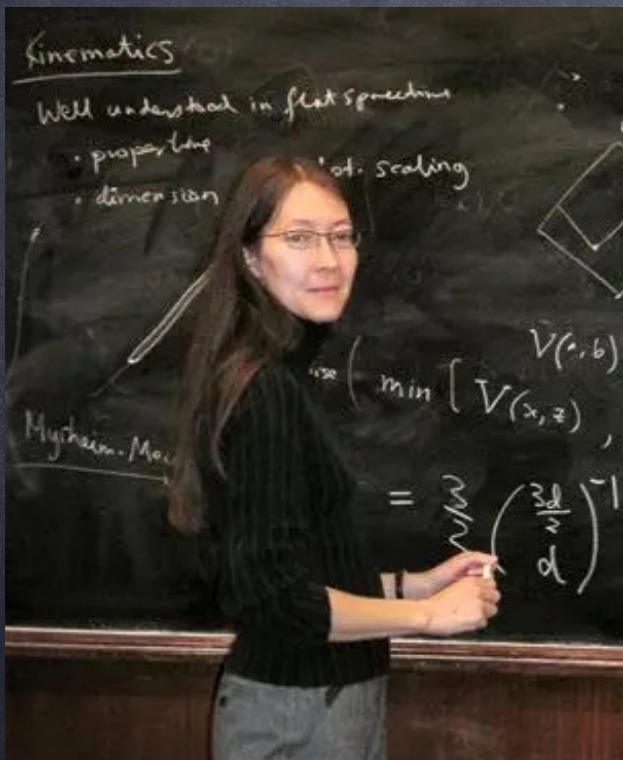


# Les Causal Sets

L'espace-temps est presque entièrement déterminée par ses relations causales

Reste à construire la probabilité de ces réseaux de causalité !

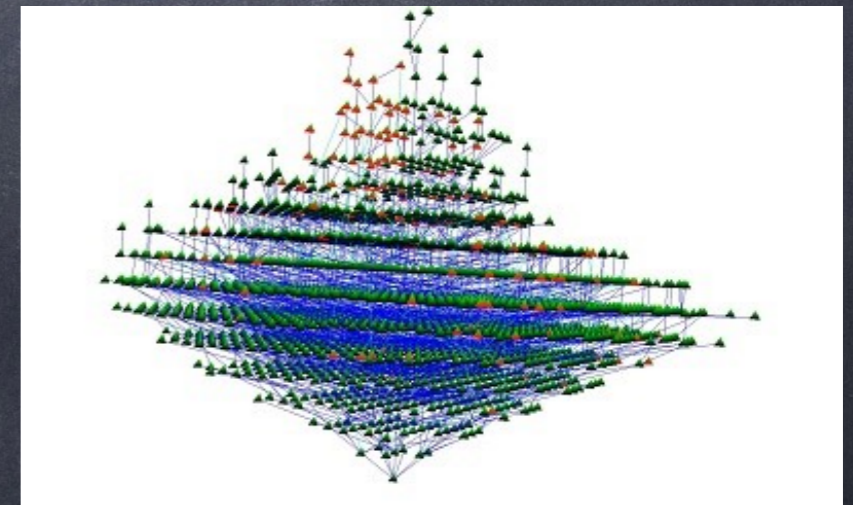
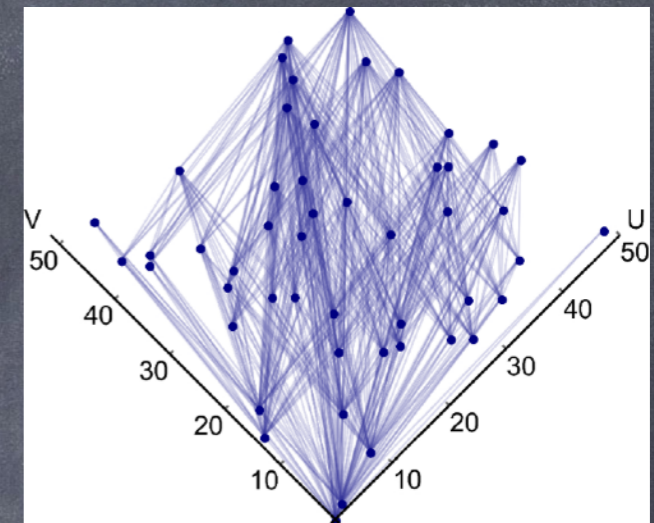
Temps plus fondamental que l'espace



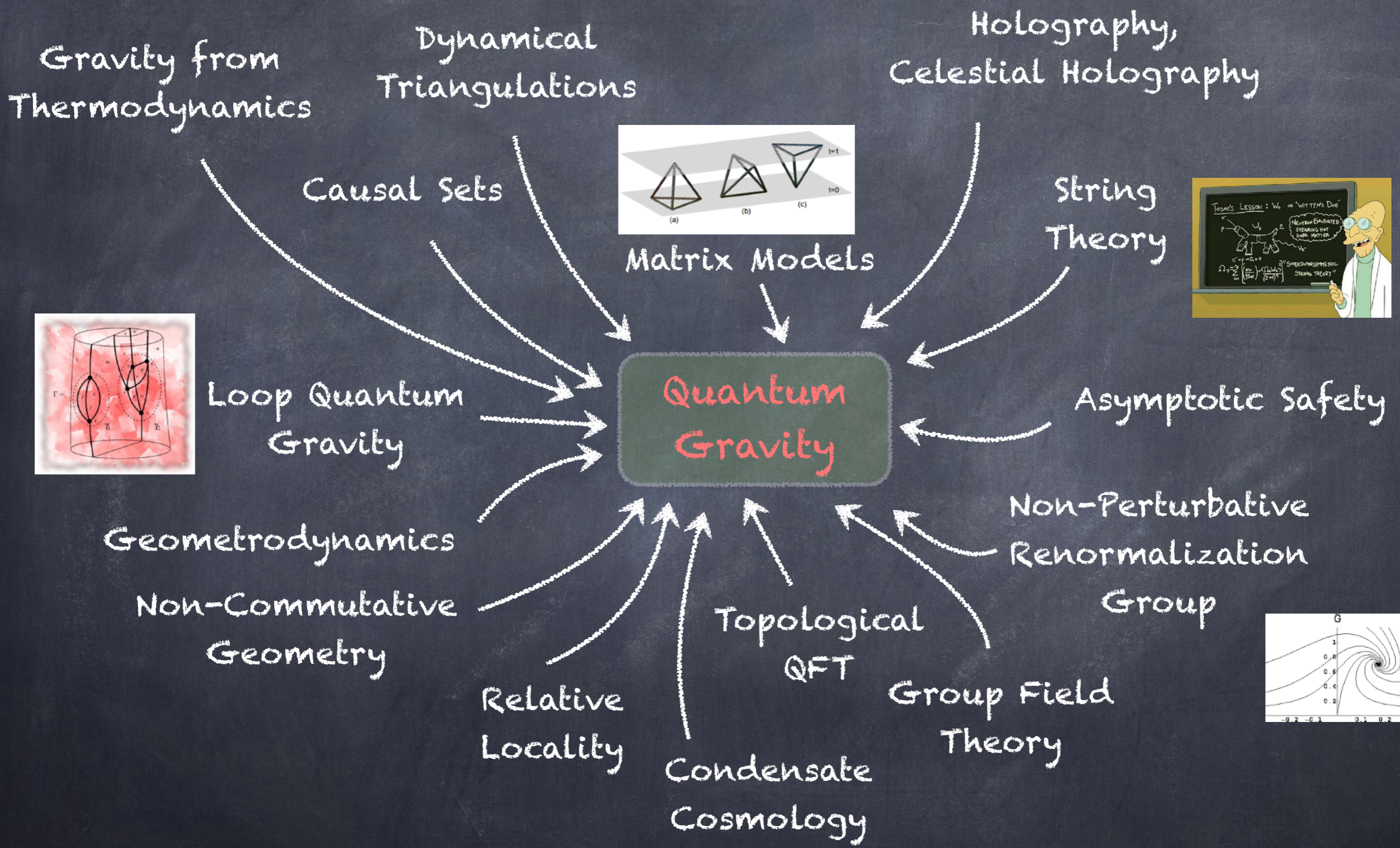
Fay DOWKER



Rafael SORKIN



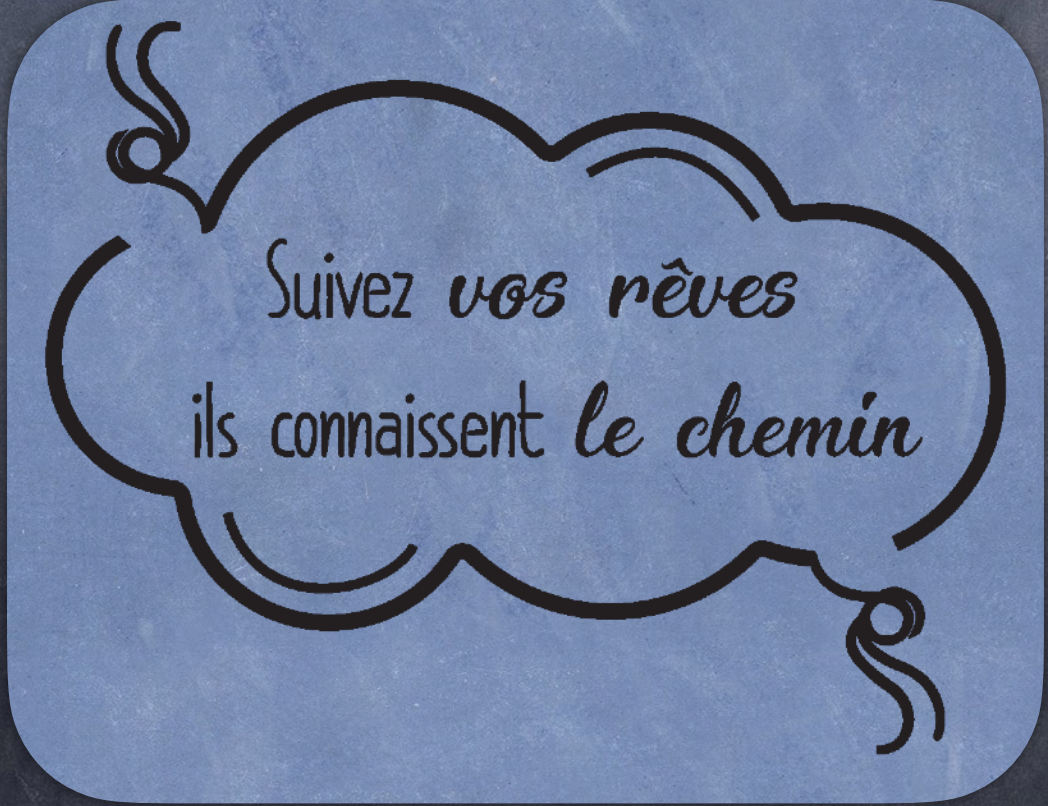
# Les Gravités Quantiques





# Les gravités quantiques

Il faut imaginer  
Les principes fondamentaux de La Physique  
et  
Les briques fondamentales de L'espace-temps



Suivez vos rêves  
ils connaissent le chemin

# Les gravités quantiques

Chaque question et perspective mène à une nouvelle approche

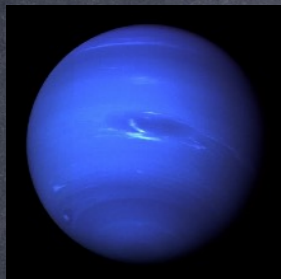


Tous les chemins convergent-ils ?

# Un énorme problème d'échelle

En fait, il s'agit de comprendre la structure de l'univers

4 h



4 an



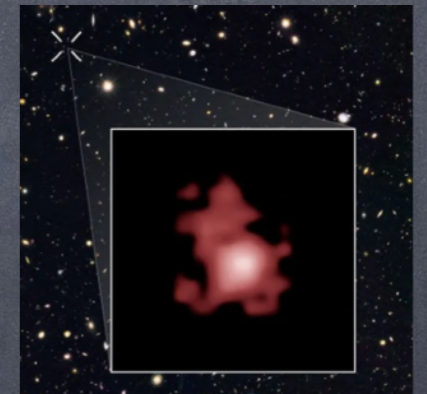
120 000 an



2.5 million an



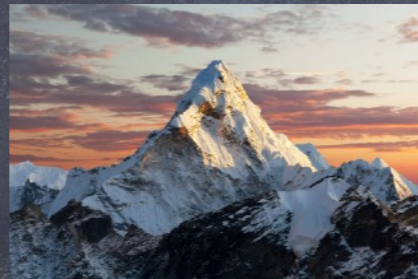
13 milliard an  
30 milliard an



8 min



1 s



8 849 m



200 m



≈ 1m

La quête de l'infiniment grand

Royaume de la gravité

# Un énorme problème d'échelle

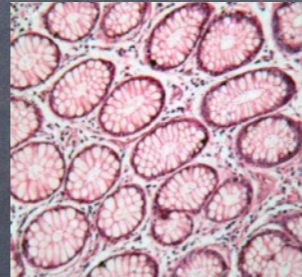
En fait, il s'agit de comprendre la structure de l'univers



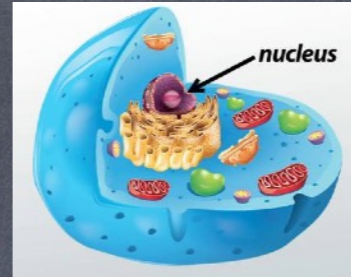
$\approx 1m$



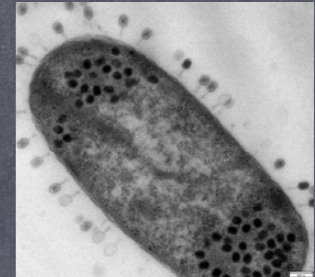
10 cm



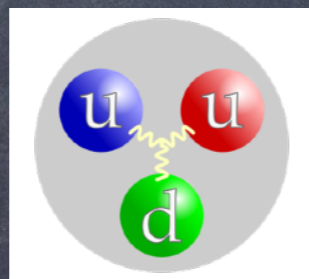
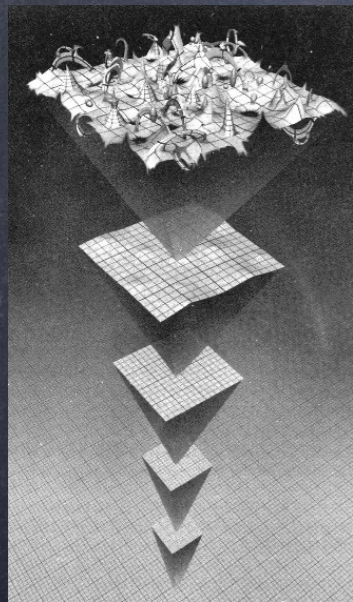
20  $\mu m$



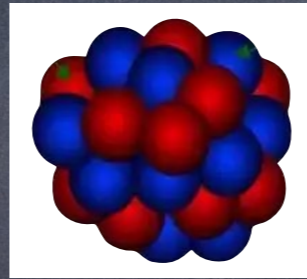
6  $\mu m$



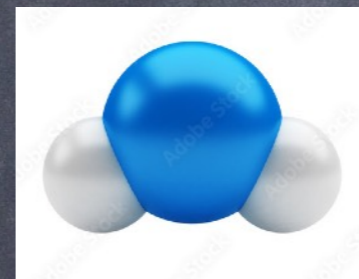
1  $\mu m$



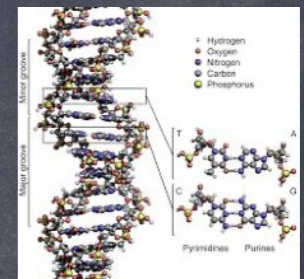
1 am =  $10^{-15} m$



1 - 10 fm



.2 nm



1 - 5 nm

La quête de l'infiniment grand

et de l'infiniment petit

Royaume quantique

Un énorme problème d'échelle

La quête de

L'infiniment grand

et de L'infiniment petit

Royaume de la gravité

Royaume quantique !

# Un énorme problème d'échelle



La quête de



L'infiniment grand

L'infiniment petit

Royaume de la

me quantique !

# Un énorme problème d'échelle



La quête de



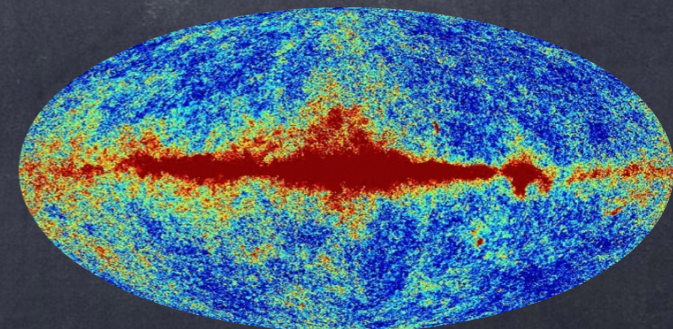
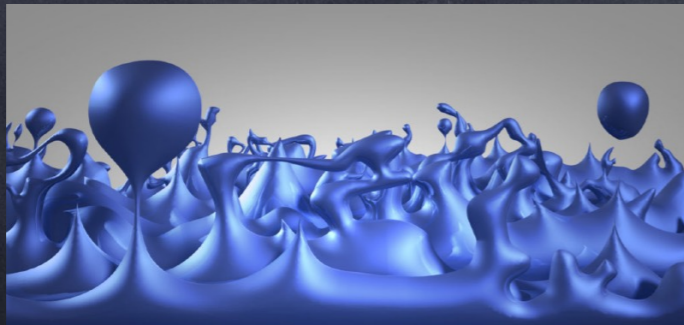
L'infiniment grand

L'infiniment petit

Royaume de la

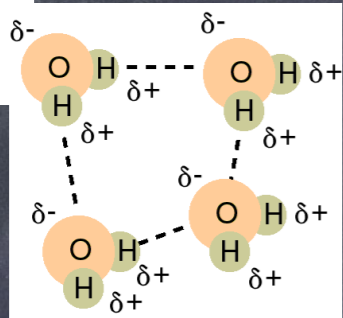
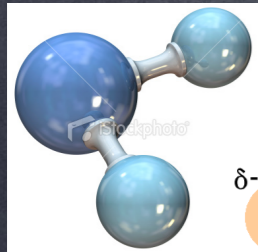
me quantique !

$10^{-35} m$



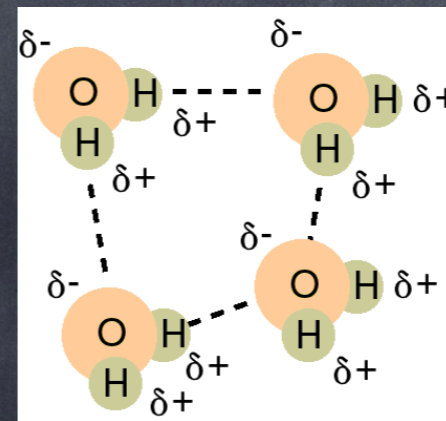
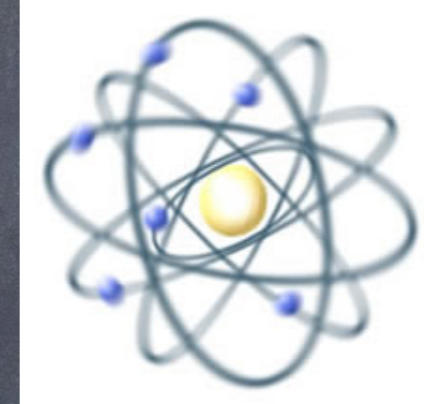
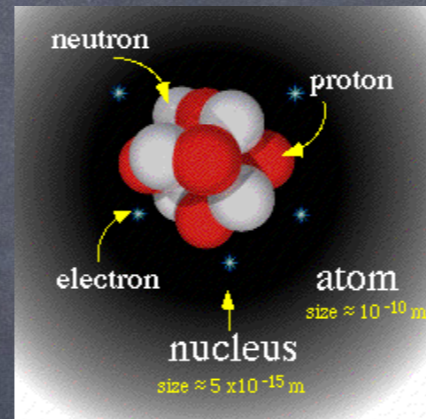
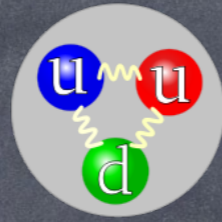
$10^{+27} m$

# Tout ré-inventer à chaque transition de phase

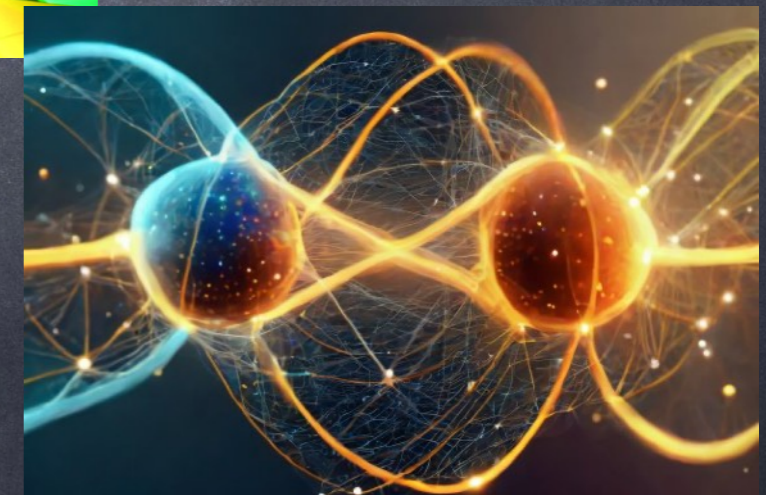
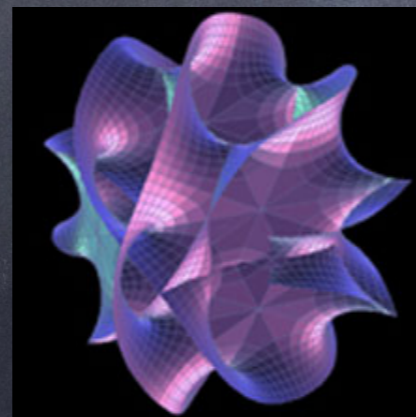
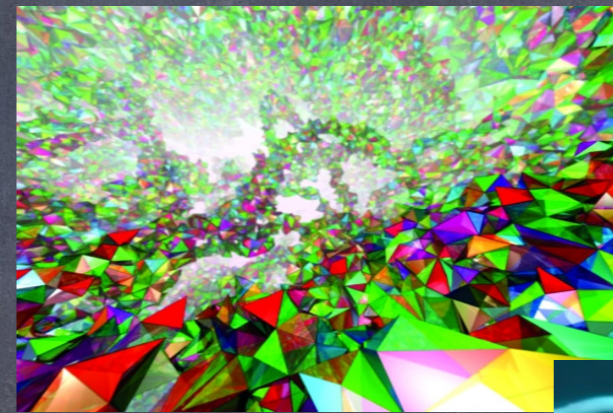
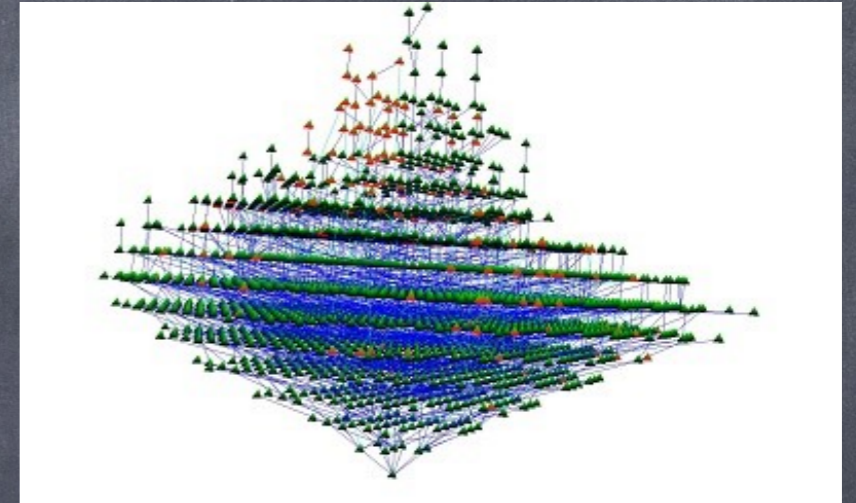
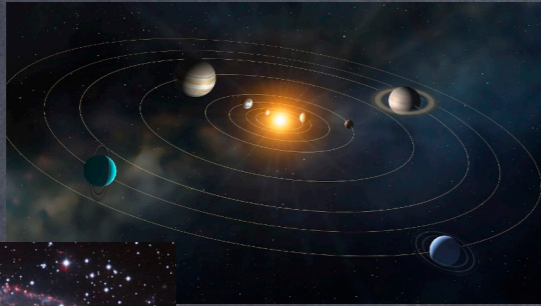




# Tout ré-inventer à chaque transition de phase

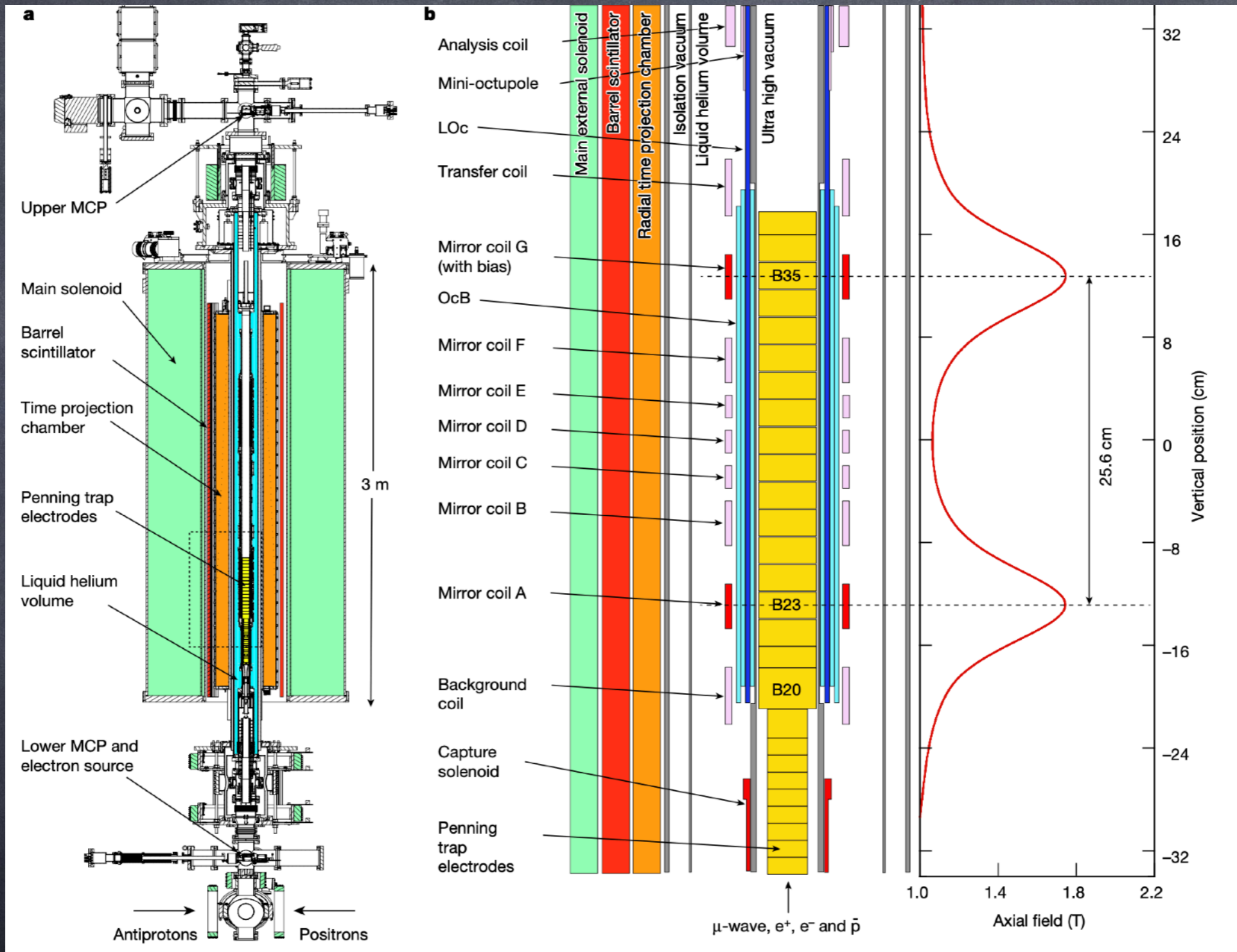


# Ré-inventer l'univers à chaque transition de phase

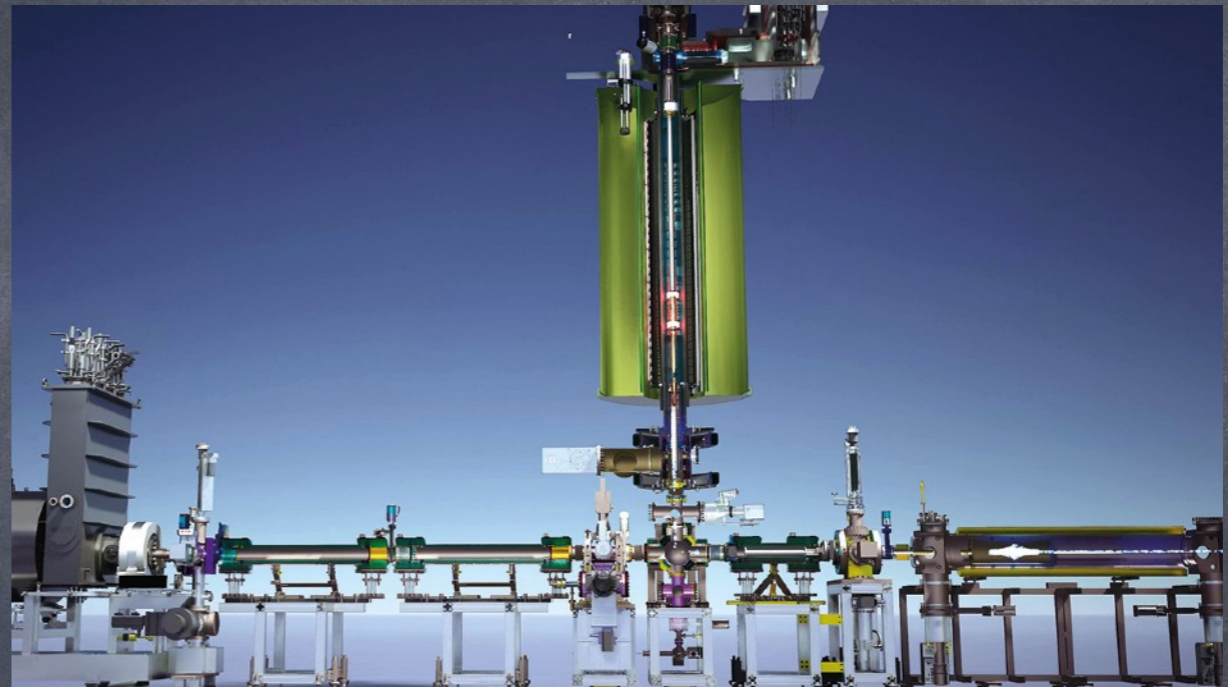
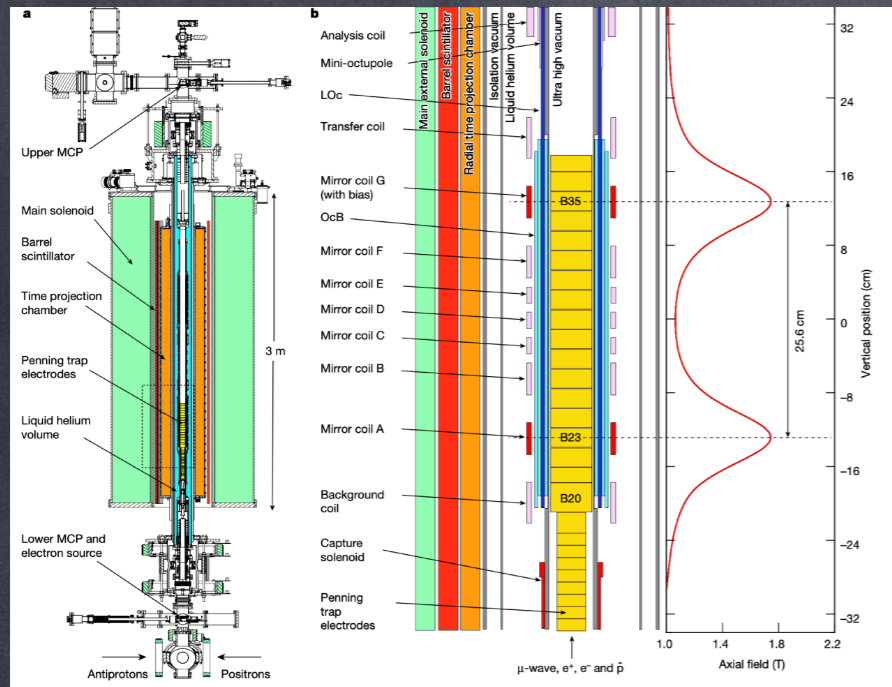


Que de la rêverie ?

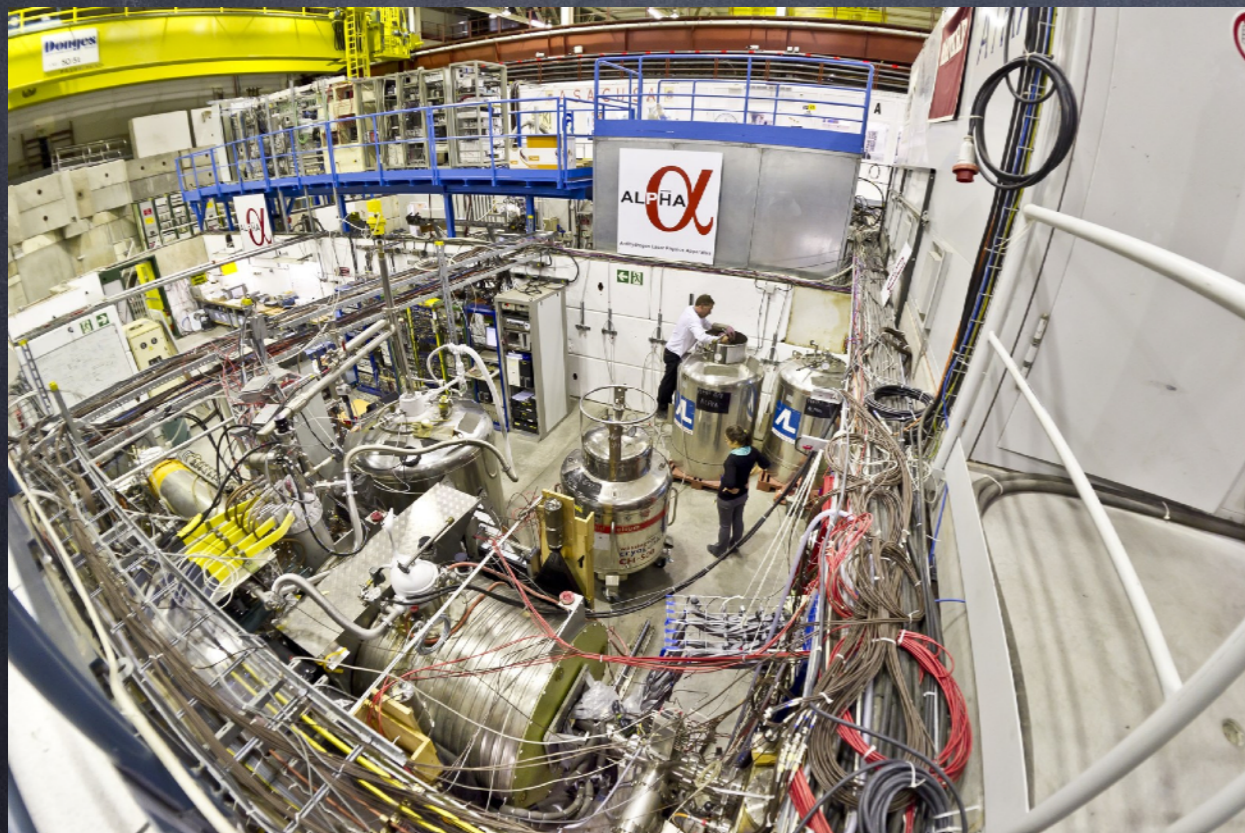
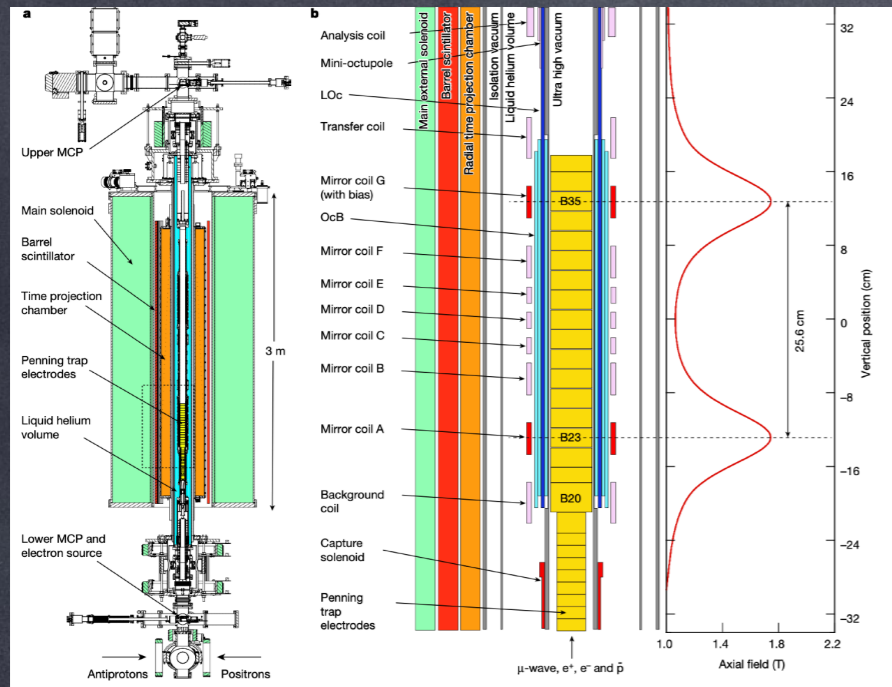
# Que de la rêverie ?



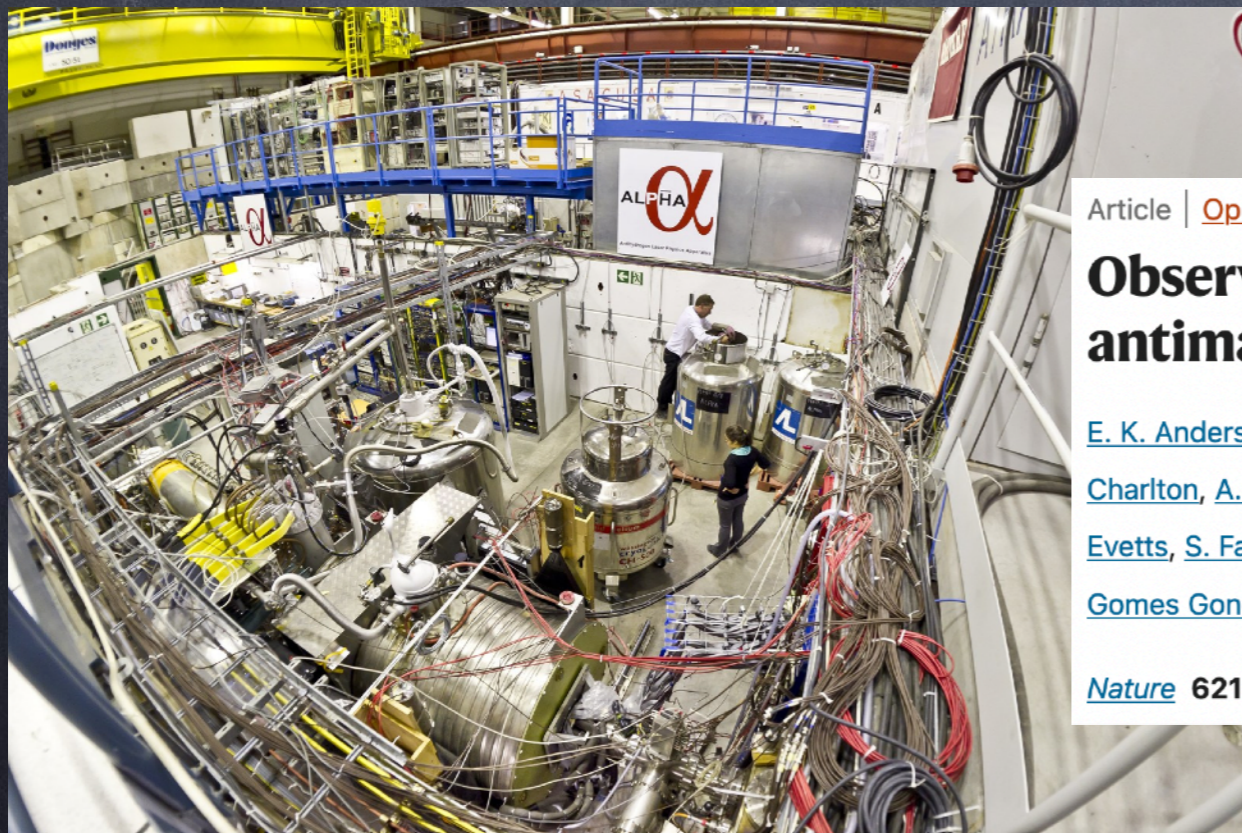
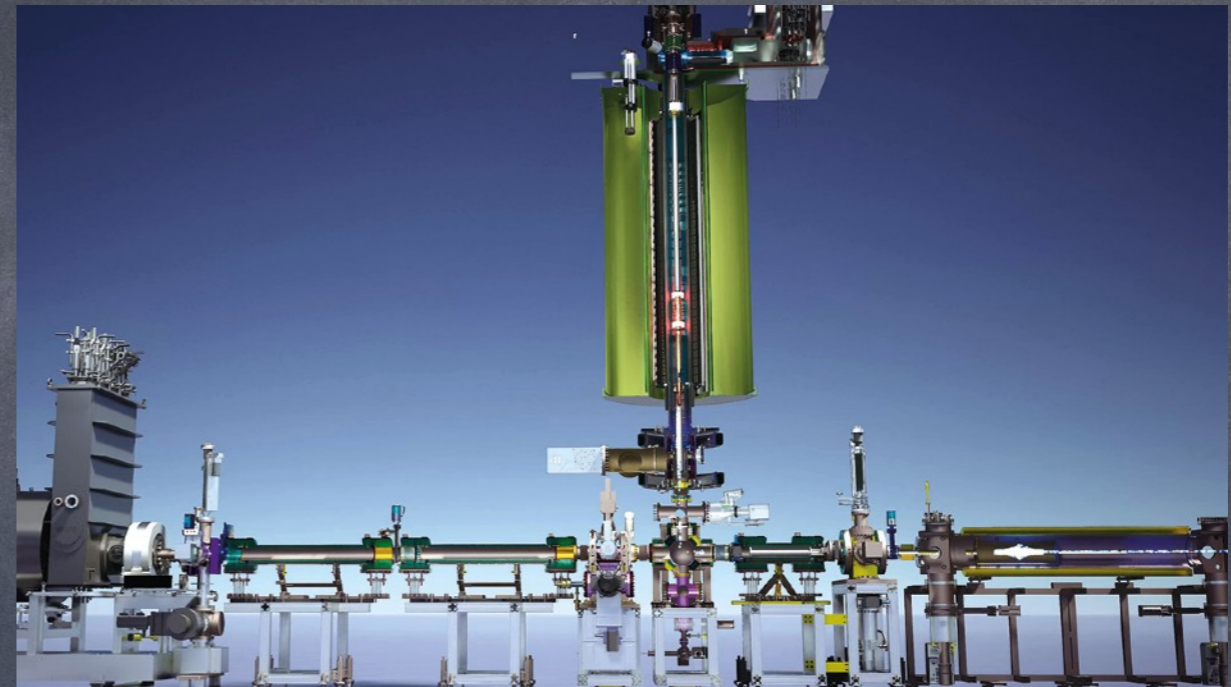
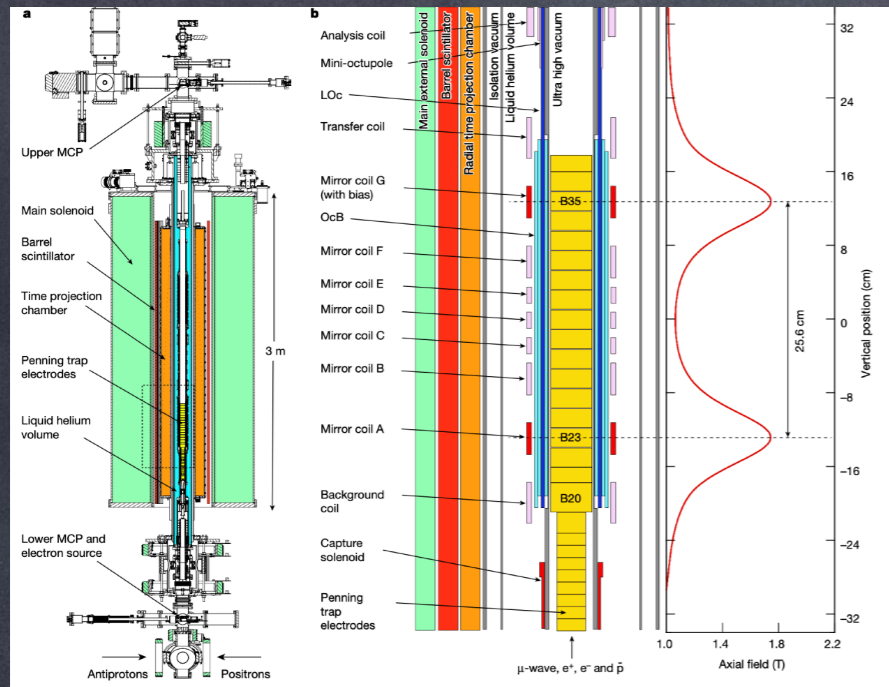
# Que de la rêverie ?



# Que de la rêverie ?





# Que de la rêverie ?



Article | [Open access](#) | Published: 27 September 2023

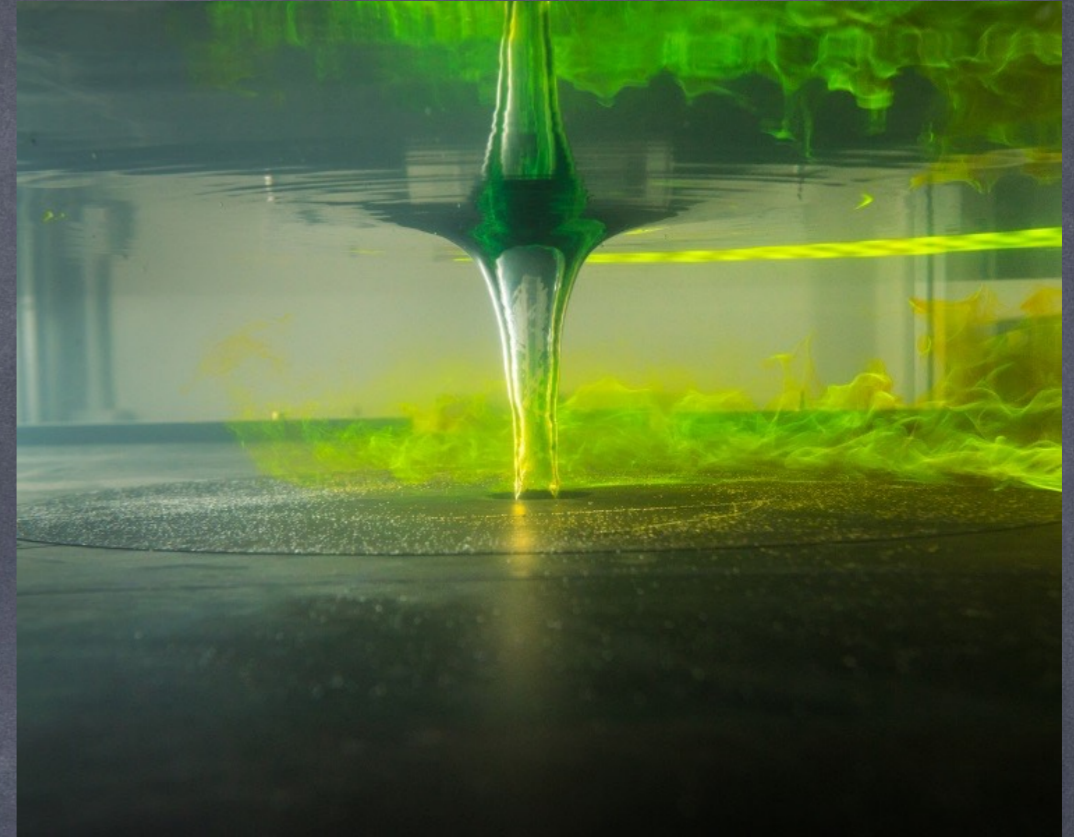
## Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter

[E. K. Anderson](#), [C. J. Baker](#), [W. Bertsche](#) , [N. M. Bhatt](#), [G. Bonomi](#), [A. Capra](#), [I. Carli](#), [C. L. Cesar](#), [M. Charlton](#), [A. Christensen](#), [R. Collister](#), [A. Cridland Mathad](#), [D. Duque Quiceno](#), [S. Eriksson](#), [A. Evans](#), [N. Evetts](#), [S. Fabbri](#), [J. Fajans](#) , [A. Ferwerda](#), [T. Friesen](#), [M. C. Fujiwara](#), [D. R. Gill](#), [L. M. Golino](#), [M. B. Gomes Gonçalves](#), ... [J. S. Wurtele](#)  Show authors

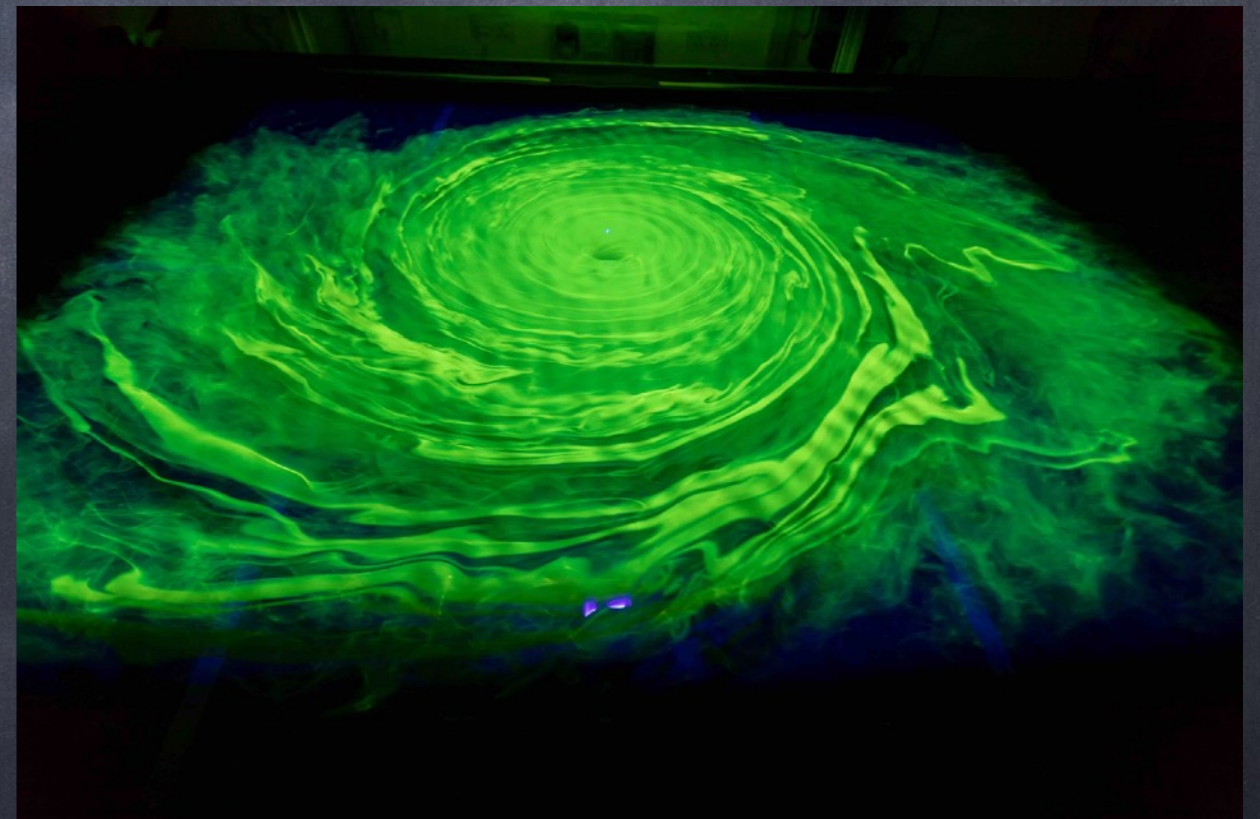
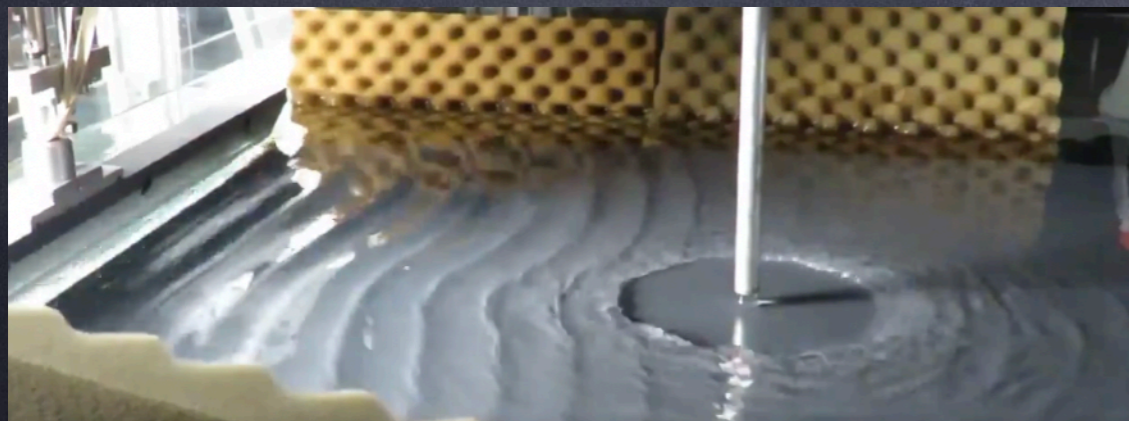
[Nature](#) 621, 716–722 (2023) | [Cite this article](#)

# Que de la rêverie ?

Simulons la gravité extrême



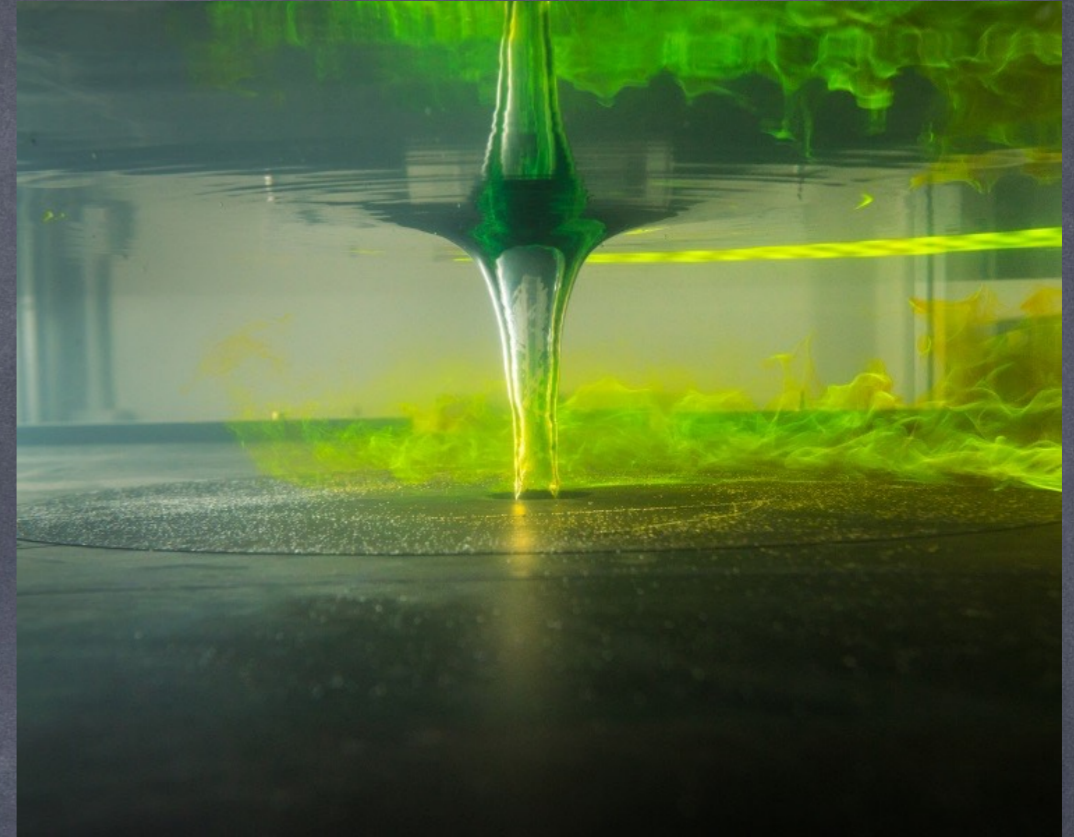
Simulation Hydrodynamique  
en laboratoire !



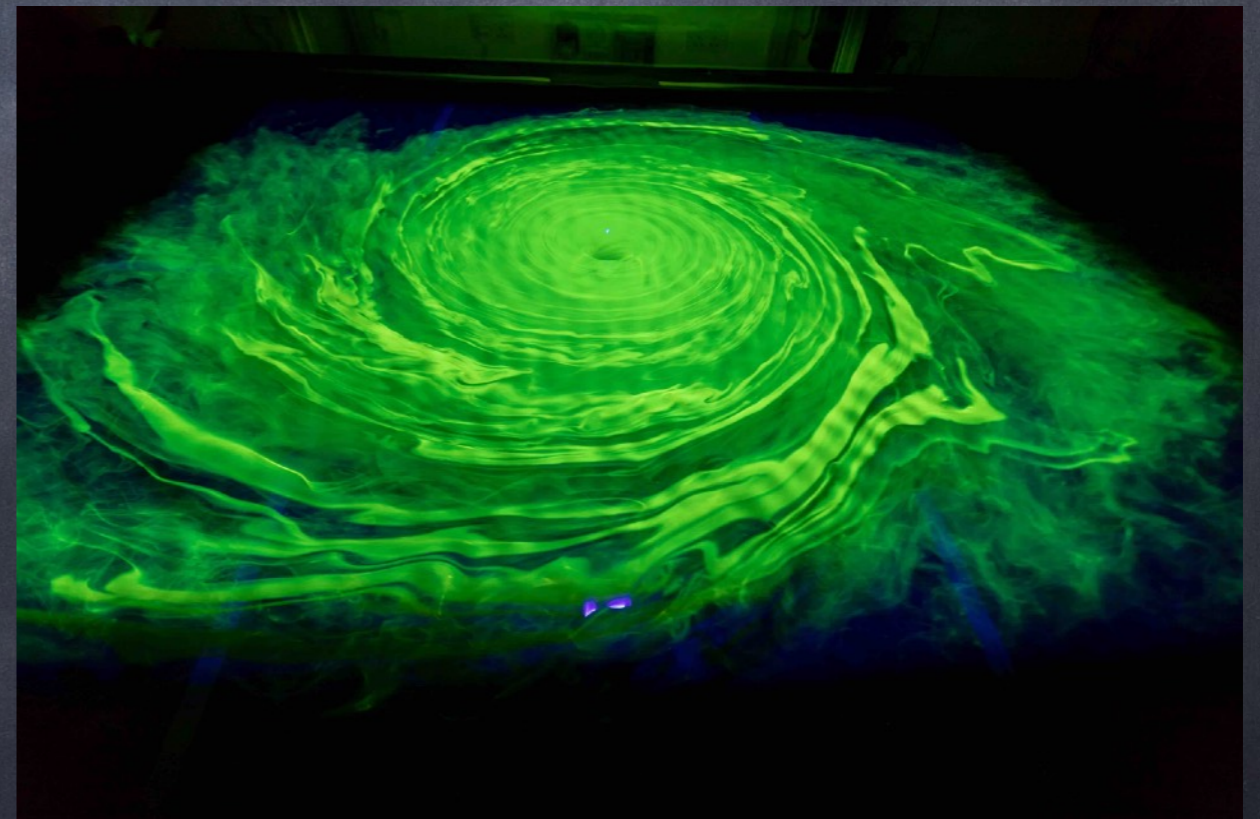
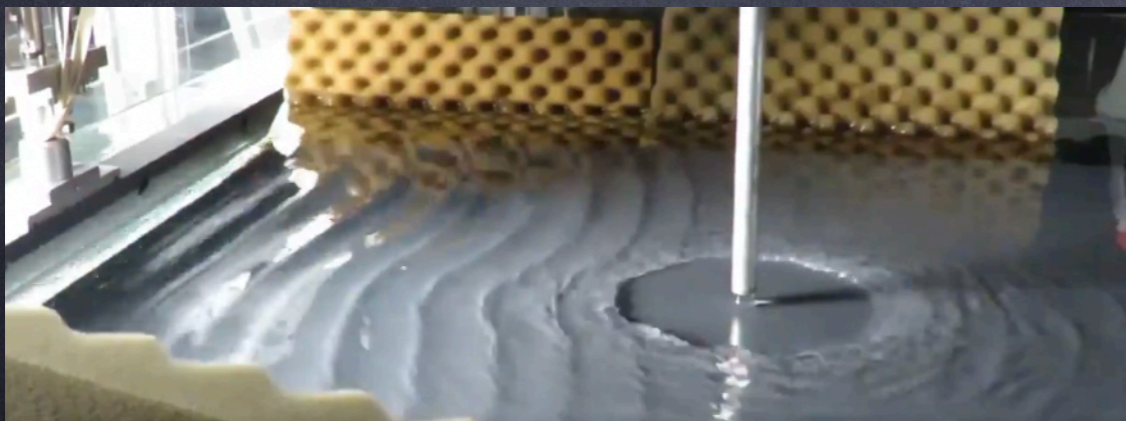


# Que de la rêverie ?

Simulons la gravité extrême



Simulation Hydrodynamique  
en laboratoire !



Un peu de rêverie quand même ...

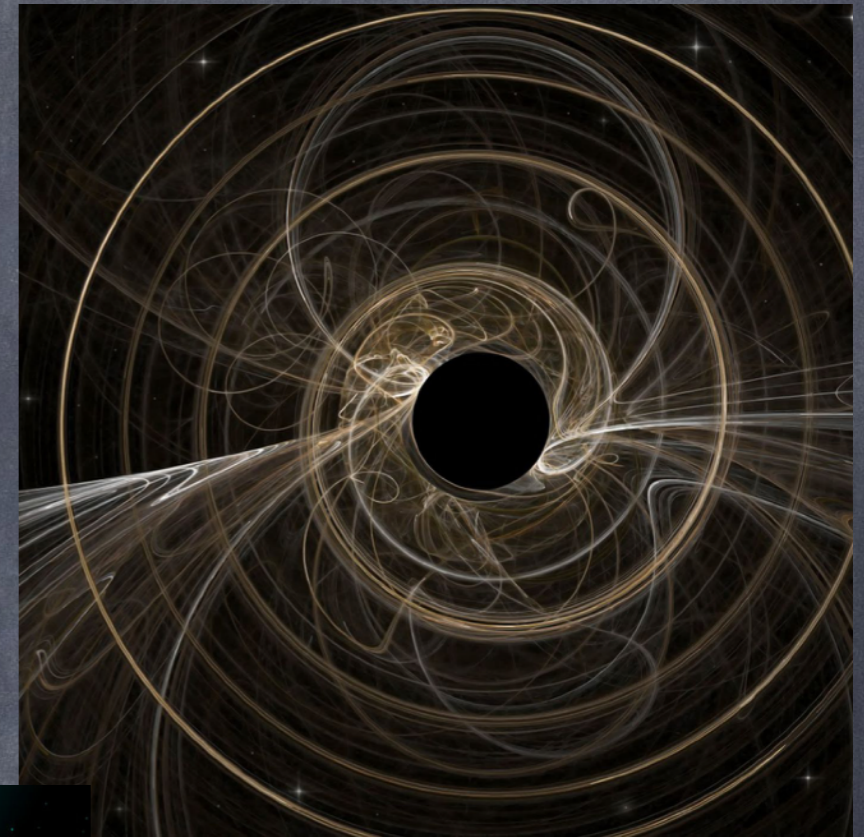
Et imaginons ses structures ...



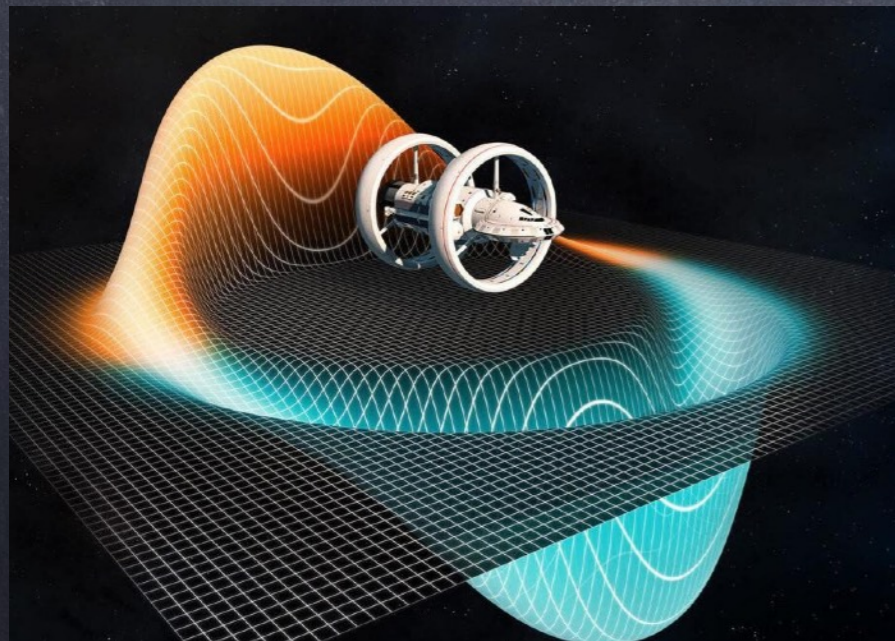
Collision de trous noirs et  
d'étoiles à neutrons

Thermodynamique  
de l'espace-temps

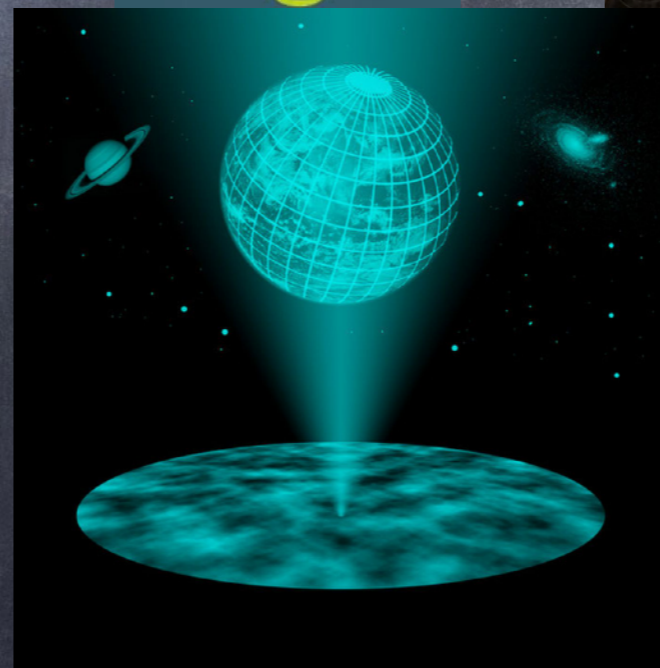
Rayonnement de  
Hawking



Live on the  
Edge



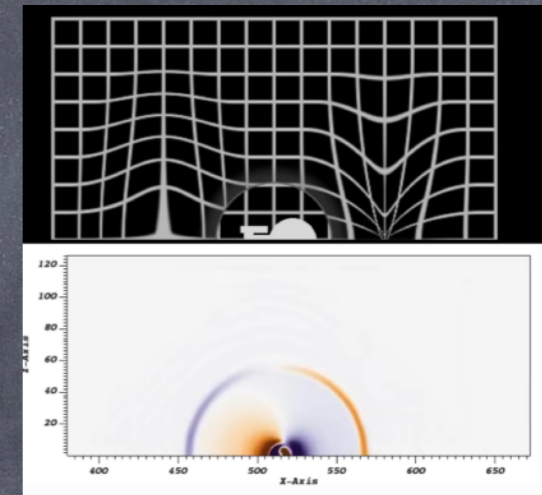
Warp Drive



Et nous travaillons pour les réaliser !

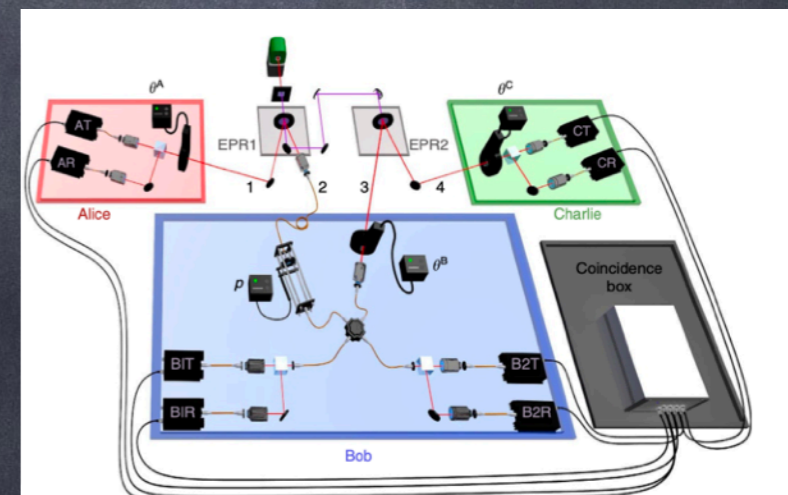
Signature de panne de Warp Drive

"At the Limits of astrophysics - Katy Clough"

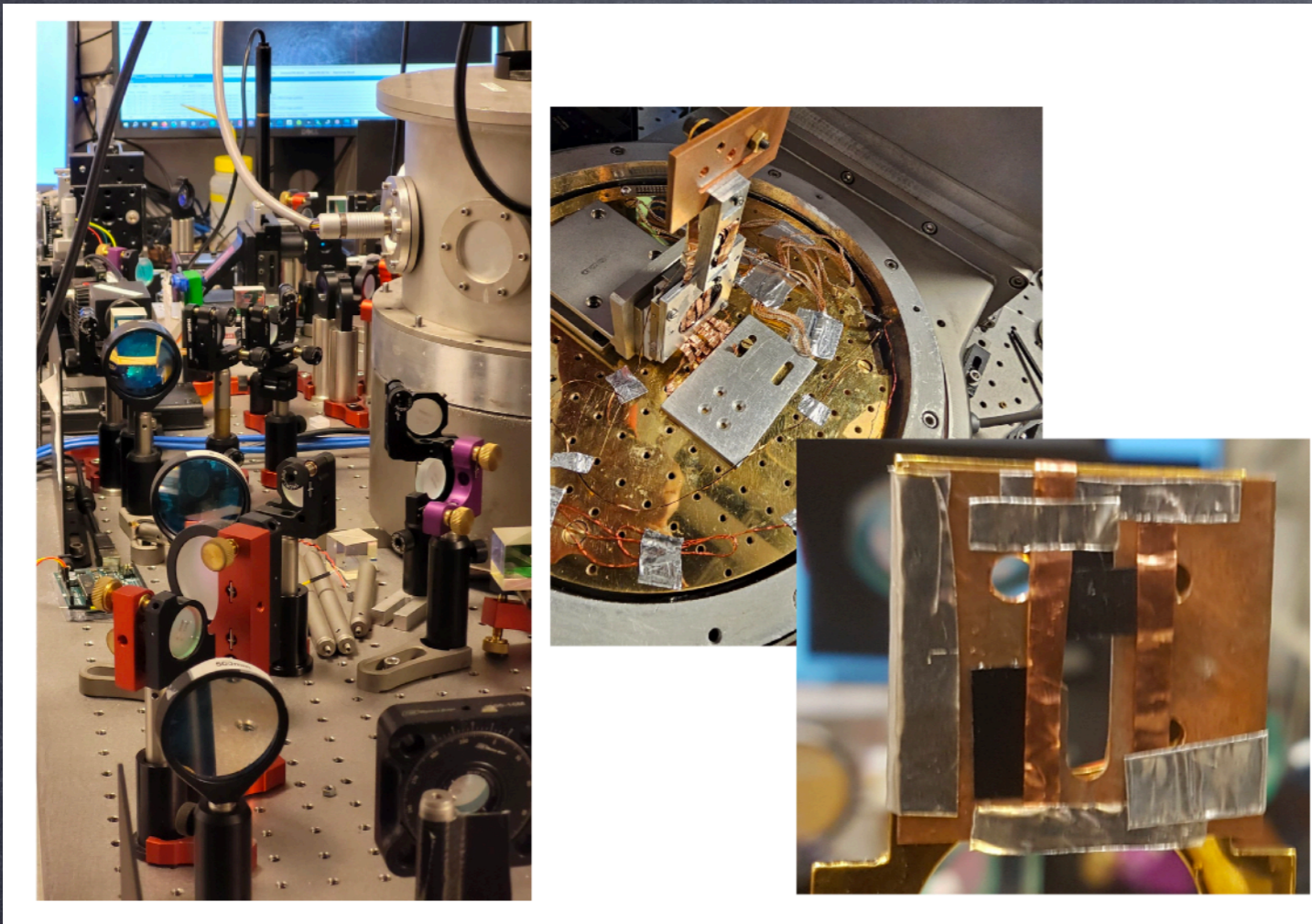


Superposition de Causalité

Quantum causality from  
superposition of quantum circuits  
- Brukner group @ IQOQI



Et nous travaillons pour les réaliser !



Quantum Optics group  
Laboratoire Kastler Brossel, Paris

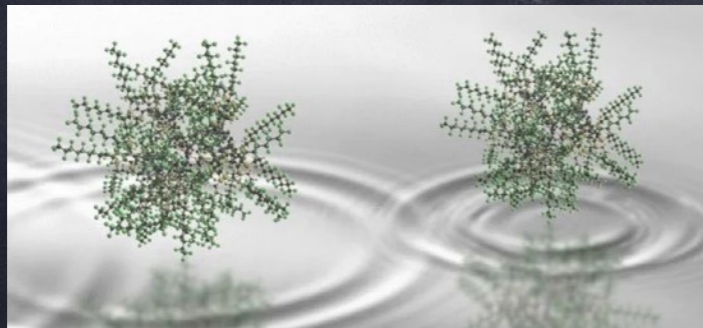
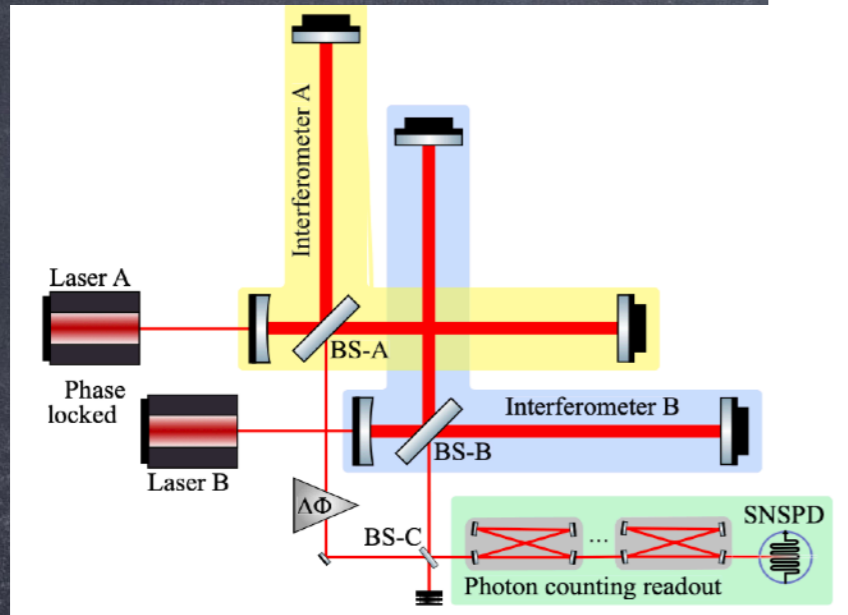
Kévin Falque, Killian Guerrero, Maxime Jacquet,  
Elisabeth Giacobino, Alberto Bramati



Laboratoire **Kastler Brossel**  
Physique quantique et applications

Et nous travaillons pour les réaliser !

Bruit quantique  
de l'espace-temps !



Superposition  
Quantique  
de masses ?

PHYSICAL REVIEW X 15, 011034 (2025)

Featured in Physics

### Photon-Counting Interferometry to Detect Geotropic Space-Time Fluctuations with GQuEST

Sander M. Vermeulen<sup>1,\*</sup>, Torrey Cullen<sup>1</sup>, Daniel Grass<sup>1</sup>, Ian A. O. MacMillan<sup>1</sup>, Alexander J. Ramirez<sup>1</sup>, Jeffrey Wack<sup>1</sup>, Boris Korzh<sup>2</sup>, Vincent S. H. Lee<sup>1</sup>, Kathryn M. Zurek<sup>1</sup>, Chris Stoughton<sup>3</sup>, and Lee McCuller<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Physics, Mathematics and Astronomy, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125, USA

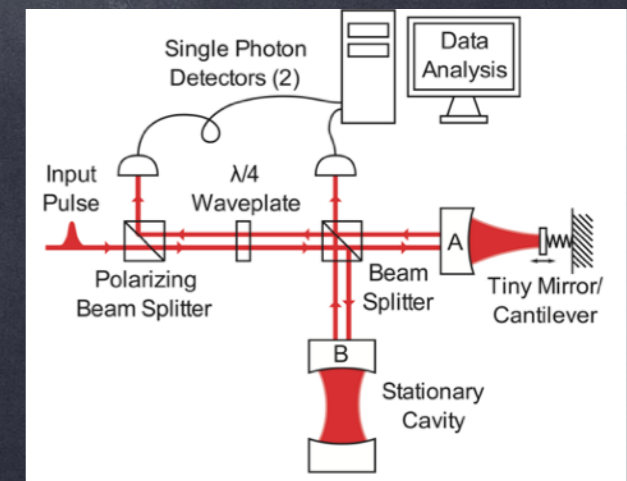
<sup>2</sup>NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California 91109, USA

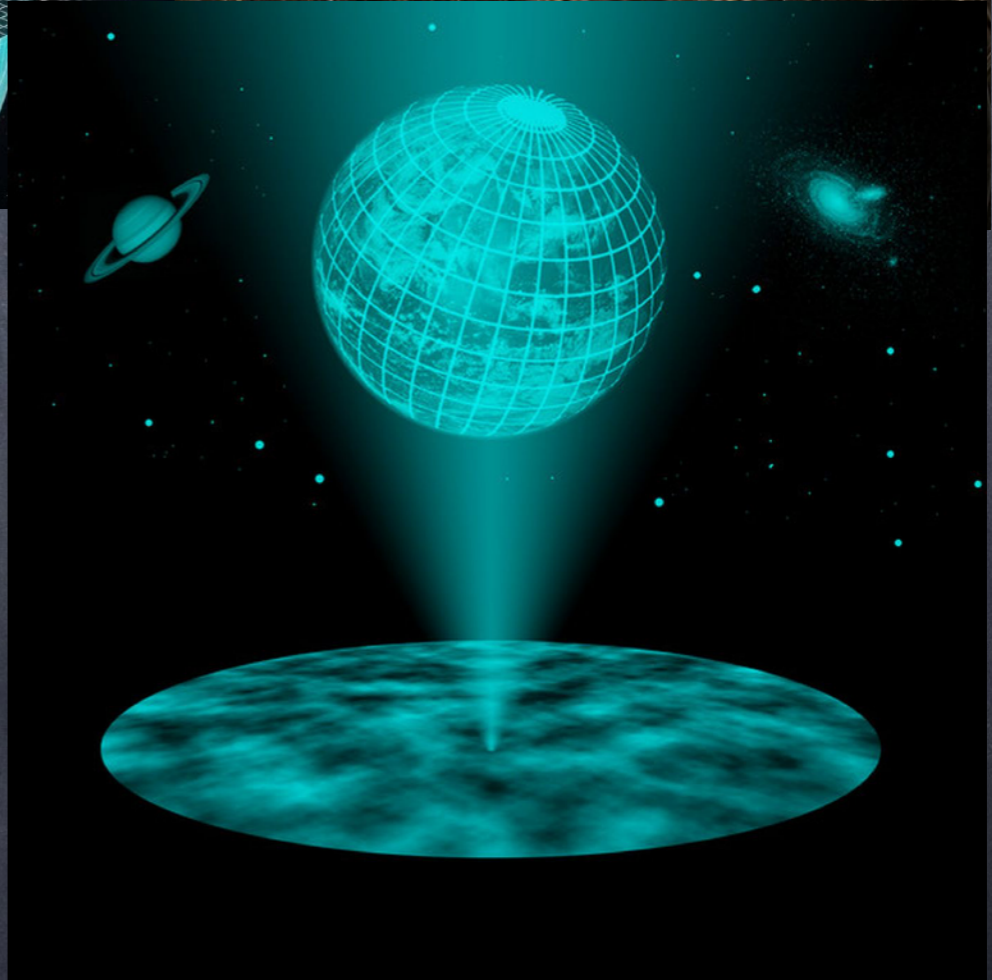
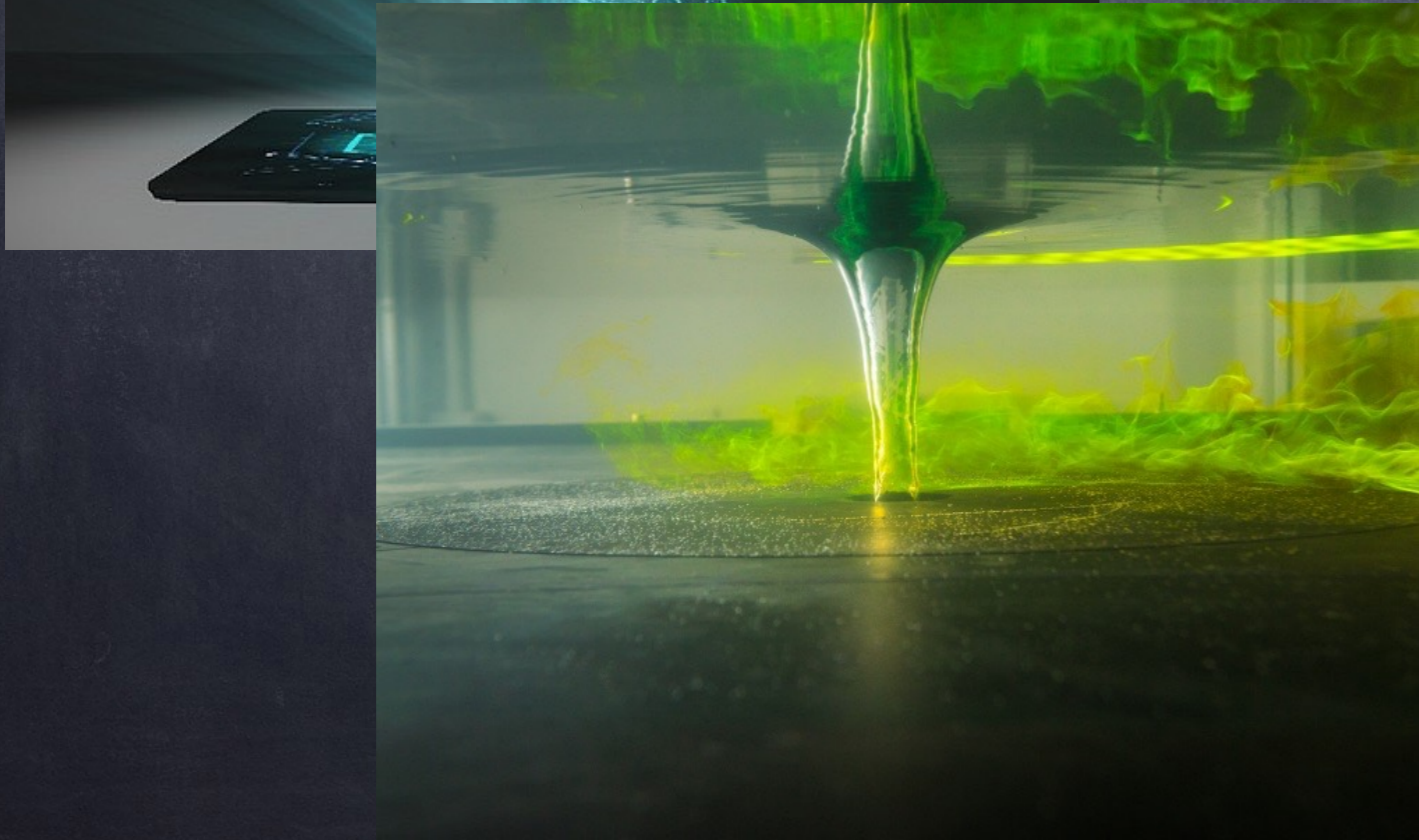
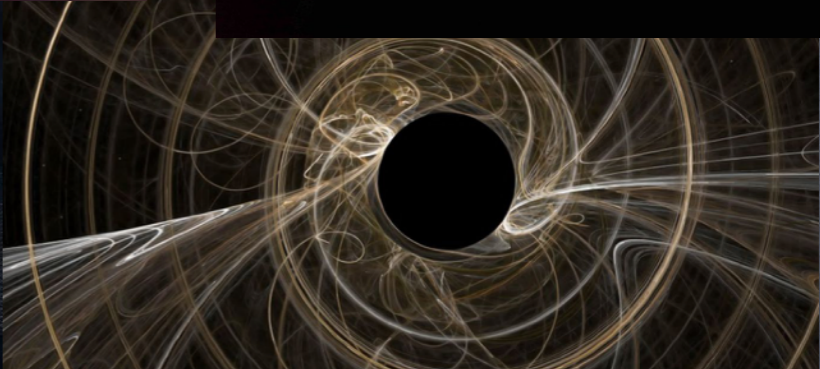
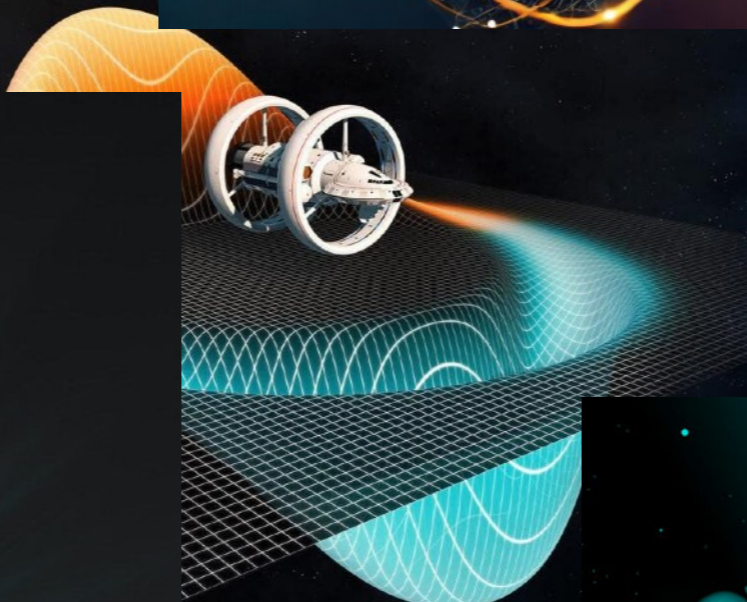
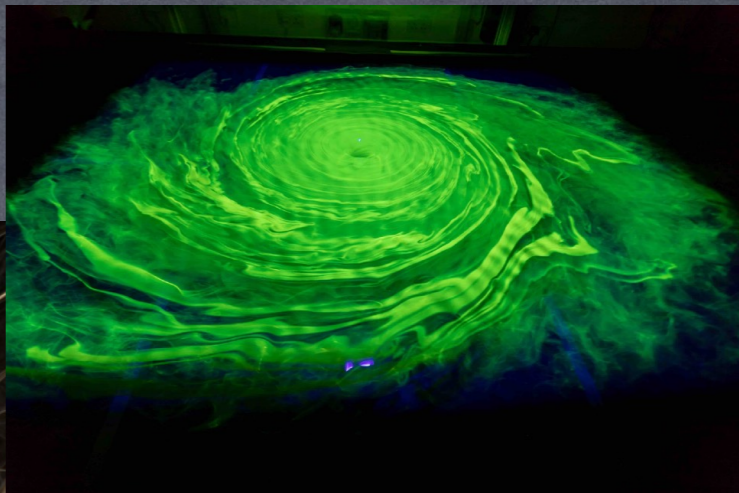
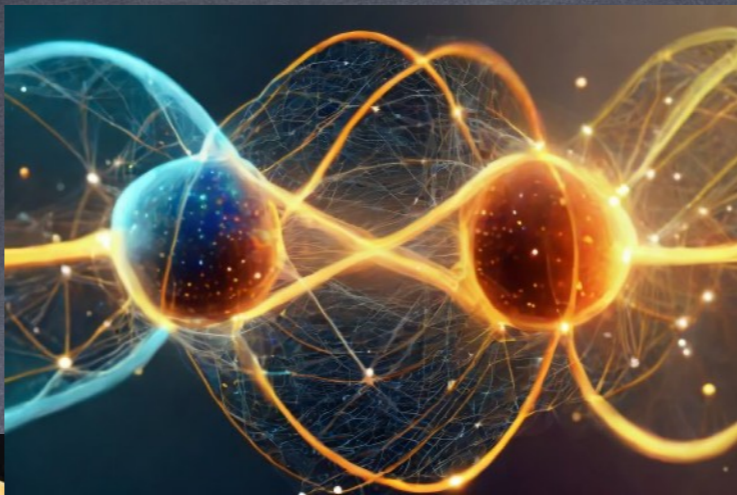
<sup>3</sup>Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510, USA

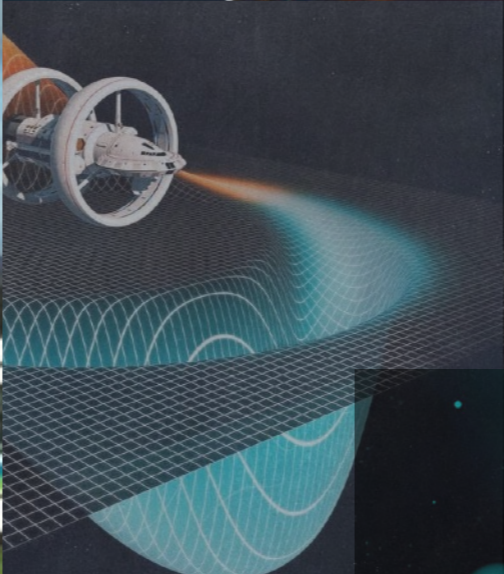
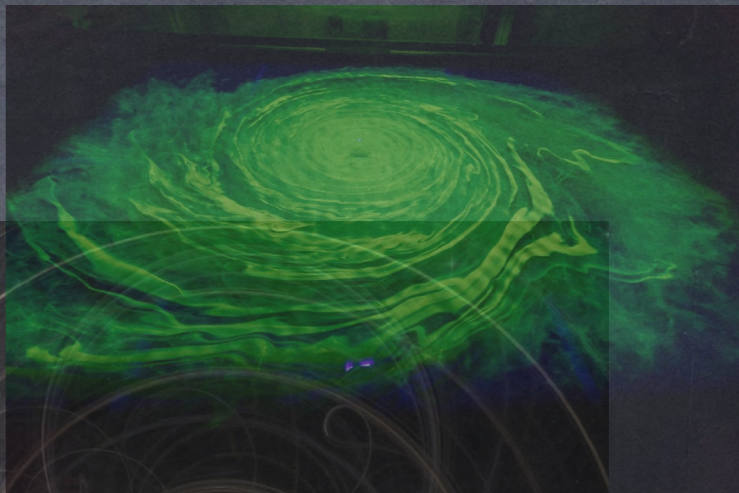
(Received 16 April 2024; revised 6 September 2024; accepted 5 December 2024; published 14 February 2025)

### Creating and verifying a quantum superposition in a micro-optomechanical system

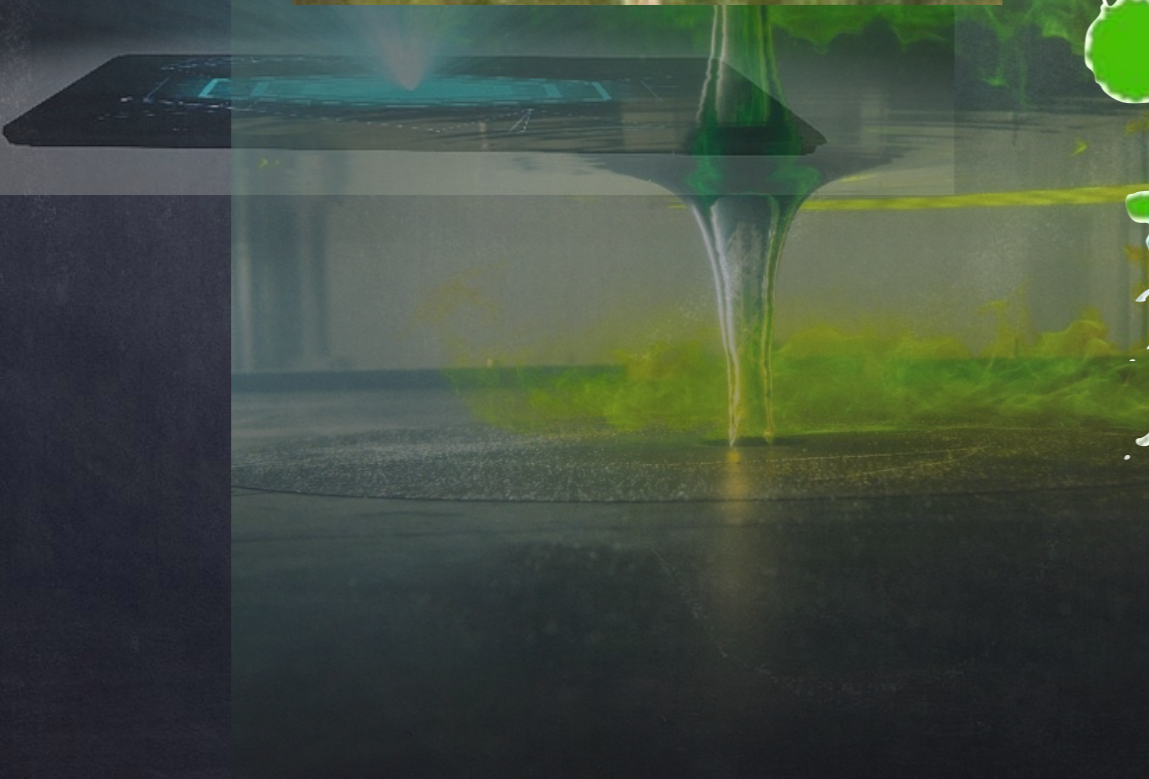
To cite this article: Dustin Kleckner *et al* 2008 *New J. Phys.* 10 095020







*Merçi!*





# Pourquoi la Gravitation Quantique ?

Etera LIVINE

Mars 2025

