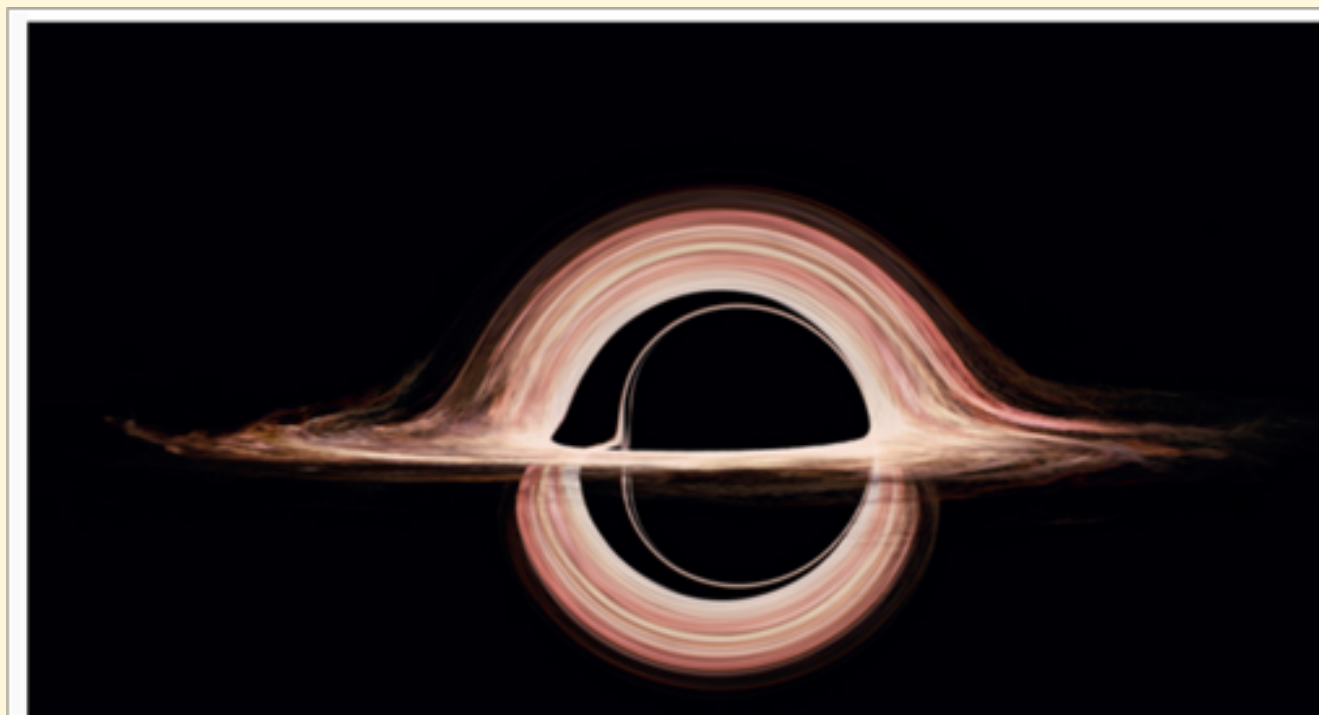


# L'insoutenable gravité de l'Univers

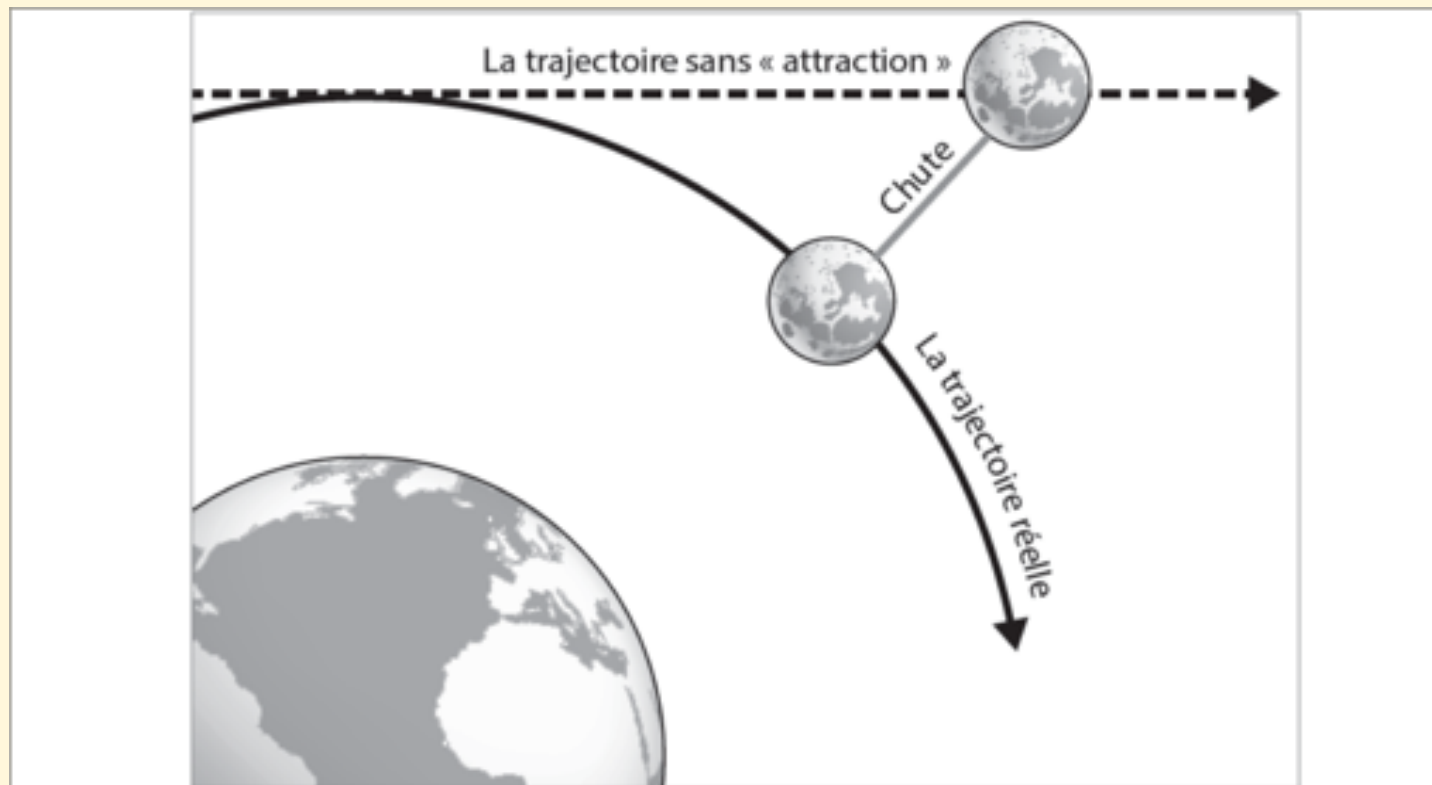


Gabriel Chardin  
CNRS, Paris Michel-Ange

# Quatre affirmations (toutes fausses)

- Les masses négatives sont impossibles (conduiraient à une instabilité majeure) : E. Witten, R. Schoen et Shing-Tung Yau, Hawking
- La gravité répulsive est impossible (violerait les conditions d'énergie)
- Toute violation du principe d'équivalence, au cœur de la Relativité d'Einstein, doit être très faible (ou nulle).
- Il n'y a aucune indication d'une différence entre la matière et l'antimatière en Relativité Générale

# Newton (1643-1727)



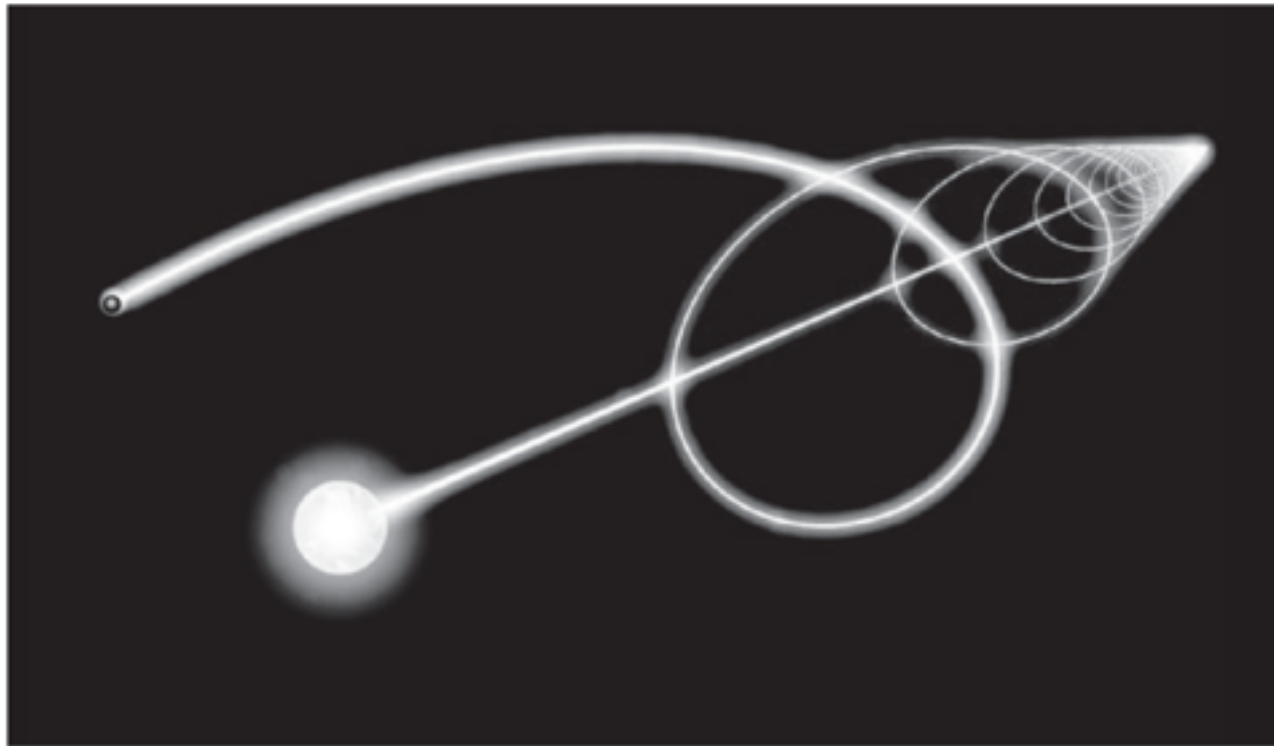
Si l'on traite la chute de la Lune comme celle de n'importe quel objet terrestre, telle une pomme, on s'aperçoit que sa trajectoire circulaire autour de la Terre peut se concevoir comme une chute permanente qui la maintient, en raison de son mouvement tangentiel, à distance constante par rapport au centre de la Terre.

# **Révolutions des idées sur la gravitation**

- **« Le génie de Newton a consisté à dire que la lune tombe alors que tout le monde voit bien qu'elle ne tombe pas. » Paul Valéry**
- **« Il fallait le génie d'Einstein pour remarquer que la Lune ne tombe pas, alors que tout le monde voit bien qu'elle tombe. » John Archibald Wheeler**
- **Le principe d'équivalence : « tous les corps tombent de la même façon dans un champ de gravitation » (Galilée) semble au cœur de la relativité générale**
- **Modification suggérée par la cosmologie**

# Révolutions des idées sur la gravitation

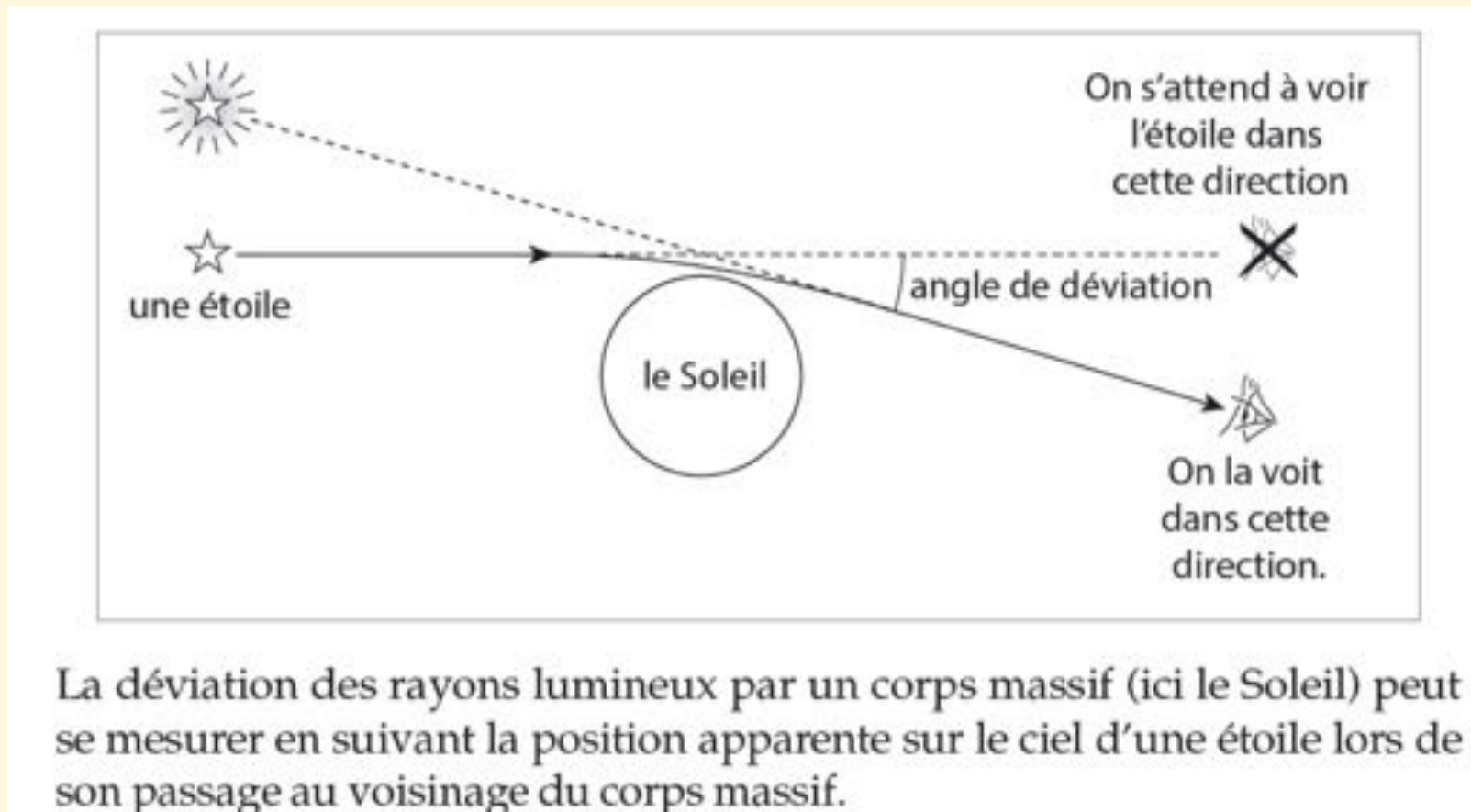
- « Il fallait le génie d'Einstein pour remarquer que la Lune ne tombe pas, alors que tout le monde voit bien qu'elle tombe. » John Archibald Wheeler



D'après une réalisation de WorldlessTech.

# Déflexion des rayons lumineux par le Soleil (Eddington et al. 1919)

- La courbure de l'espace-temps au voisinage du Soleil induit une déflexion deux fois plus forte que la prédiction de Newton



# Ondes gravitationnelles



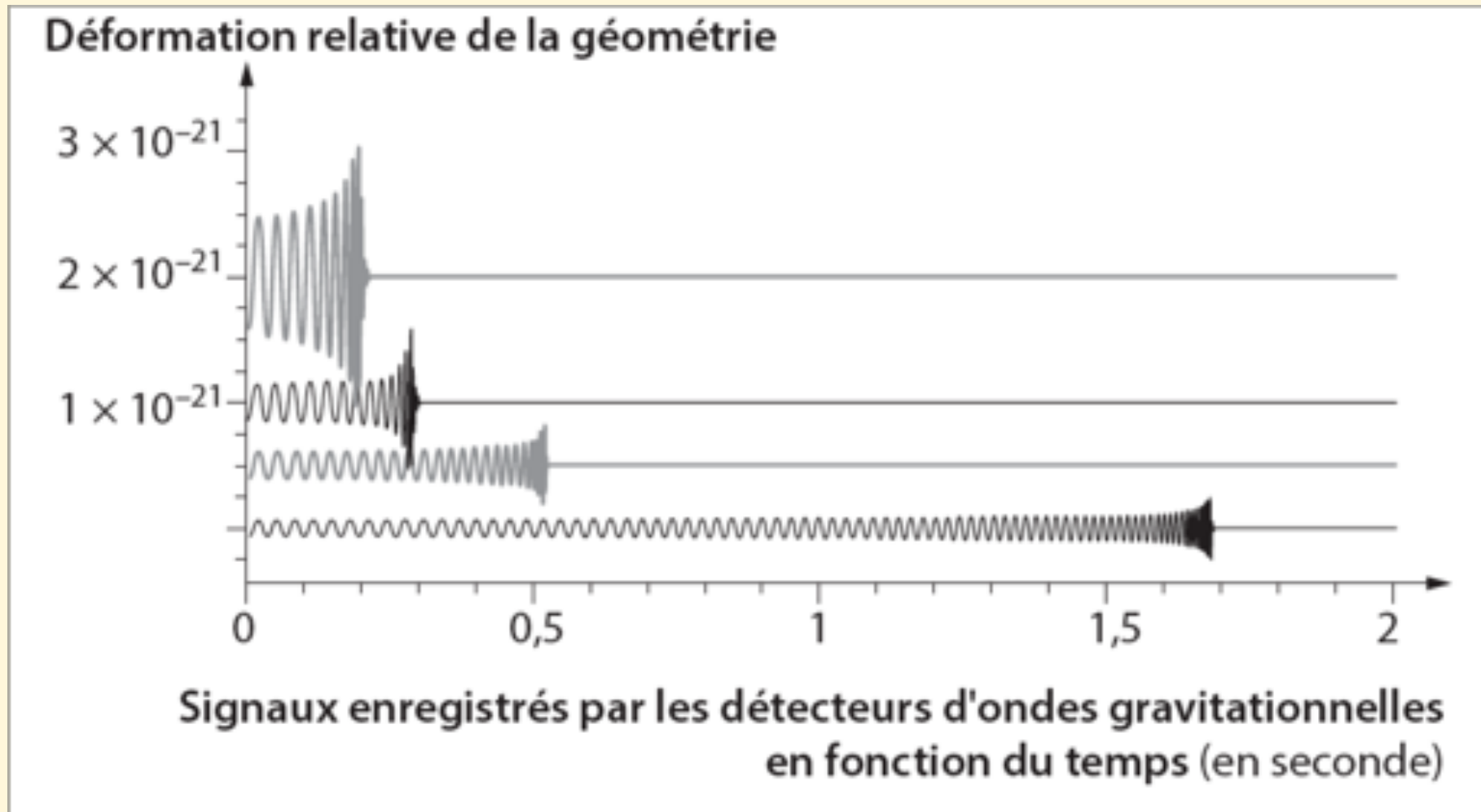


# VIRGO (près de Pise) (et LIGO...)



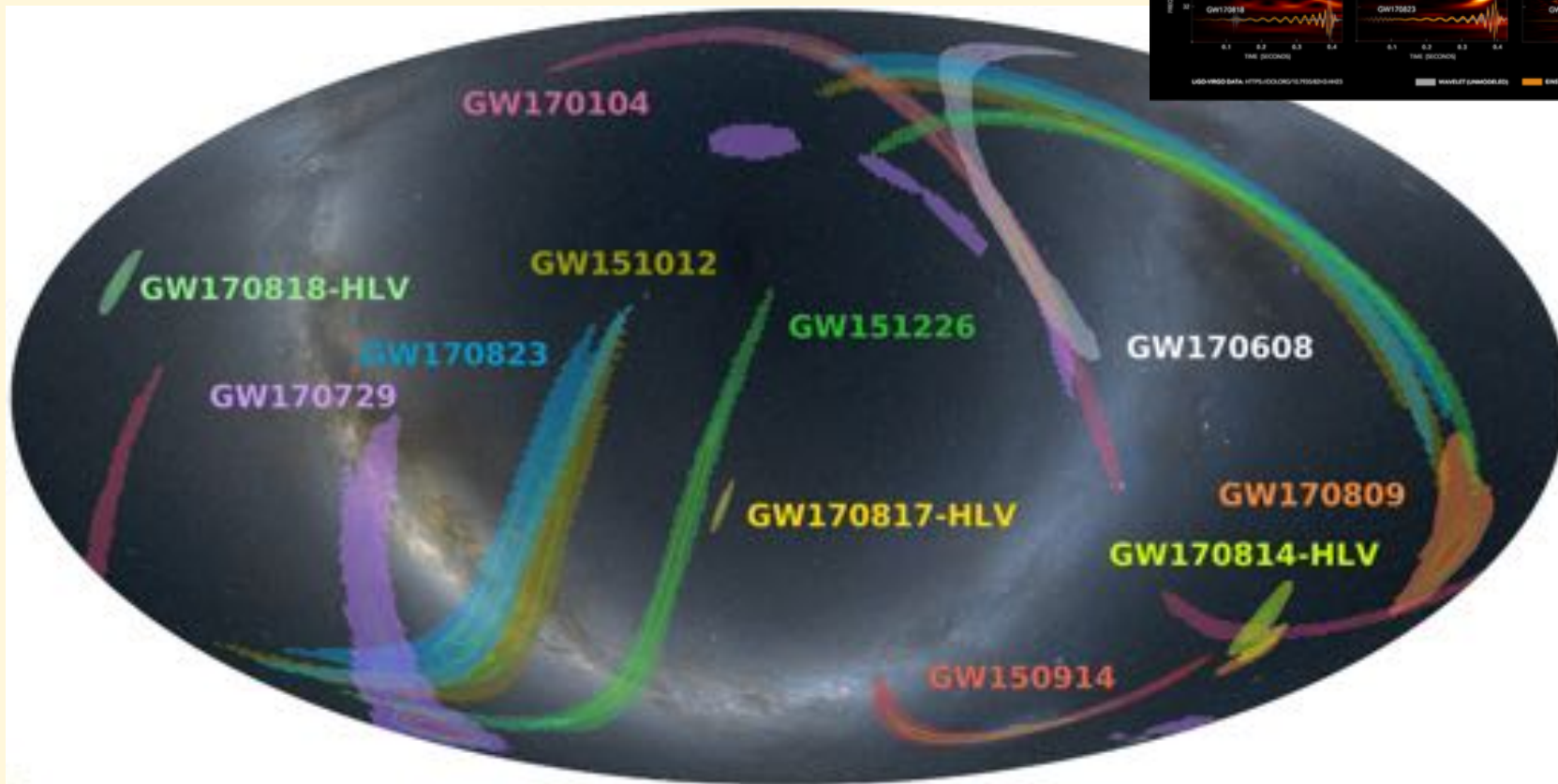
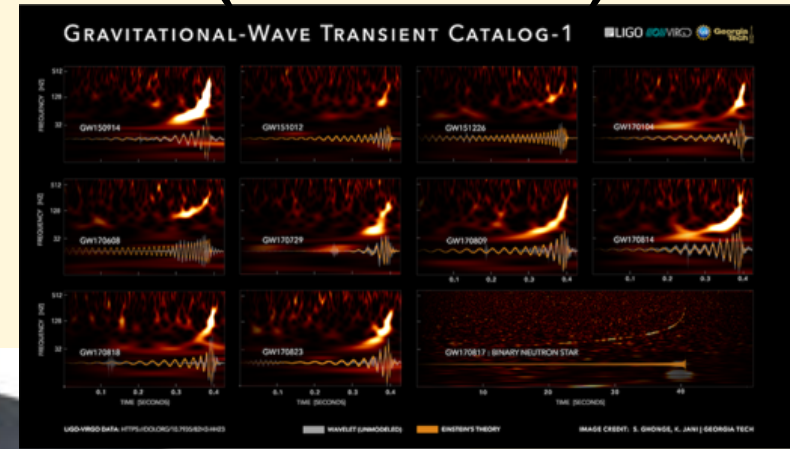


# Événements détectés par la collaboration LIGO-VIRGO



# GWTC-1: Catalogue des événements de coalescence LIGO + VIRGO (O1+O2)

- 10 TN-TN et 1 système de deux étoiles à neutrons
- $z_{\max} = 0.48$  (GW170729)



# Einstein Telescope

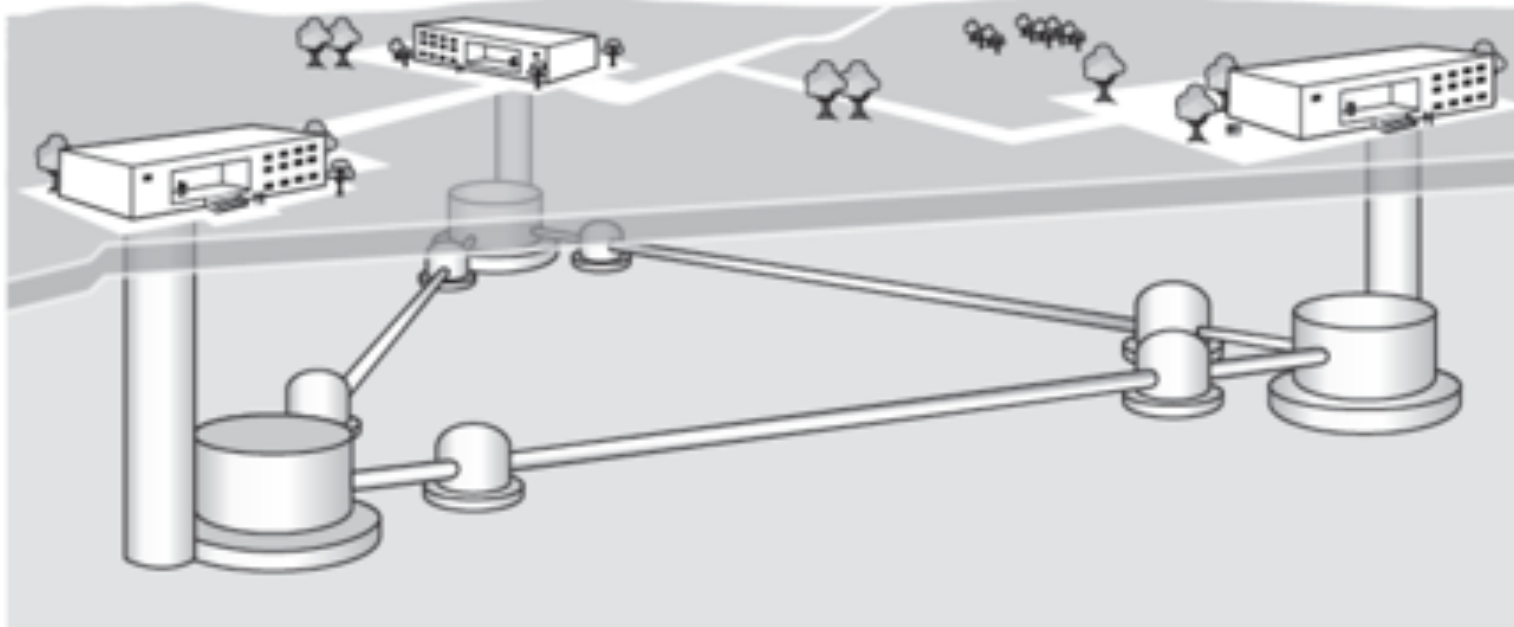
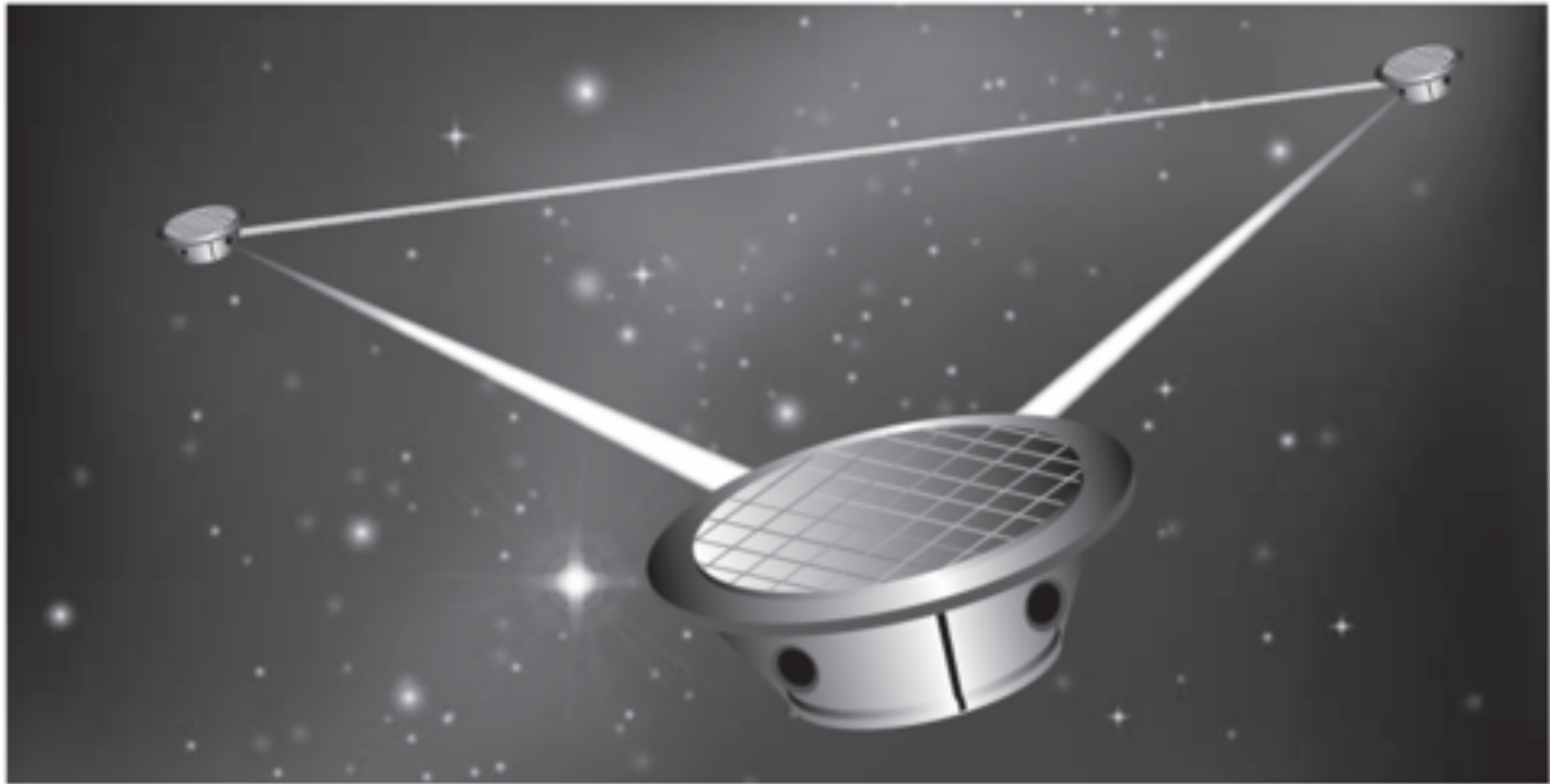


Schéma de principe d'Einstein Telescope, un interféromètre souterrain conçu pour dépasser d'un ordre de grandeur la sensibilité de Advanced LIGO et Advanced Virgo. Deux interféromètres laser souterrains, dont les trois bras ont dix kilomètres de longueur, sont refroidis à la température de l'hélium superfluide, permettant d'envisager un facteur compris entre 100 et 1 000 dans le taux d'événements observés, soit de quelques unités à plusieurs dizaines par jour.

# LISA dans l'espace ( $\approx$ 2032-2034)



<http://sci.esa.int/lisa/>

# Trous noirs

- John Michell (1784) et Pierre-Simon Laplace (1796) : en augmentant la masse d'une étoile, sa gravité va finir par piéger même sa lumière : « trou noir »
- Cette notion va être rendue précise dans la relativité générale (1911) : Karl Schwarzschild (1916) trouve la solution trou noir sphérique qui porte son nom
- Il faut attendre les années 1960 et Finkelstein pour que la nature de l'espace-temps autour d'un trou noir soit mieux comprise
- Trous noirs en rotation et chargés : début des années 1960 (Roy Kerr et Ezra Newman)



# Des trous de ver qui ressemblent fort à des particules (Carter 1966, 1968)

- Pas possible d'atteindre la singularité d'un trou noir en rotation (un anneau)
- Quand on traverse l'anneau d'un trou « noir » chargé, sa **charge change de signe**
- La **masse gravitationnelle change également de signe**
- Un **électron** apparaît donc de l'autre côté de l'anneau comme un **positron** gravitationnellement **répulsif** !
- Mais a-t-on déjà vu de la **gravité répulsive** ?



# La thermodynamique des trous noirs

- Hawking, Carter, Bardeen (vers 1970) : les lois gouvernant l'évolution des trous noirs ressemblent à celle de la thermodynamique (évolution, dissipation)

## The Four Laws of Black Hole Mechanics

J. M. Bardeen\*

Department of Physics, Yale University, New Haven, Connecticut, USA

B. Carter and S. W. Hawking

Institute of Astronomy, University of Cambridge, England

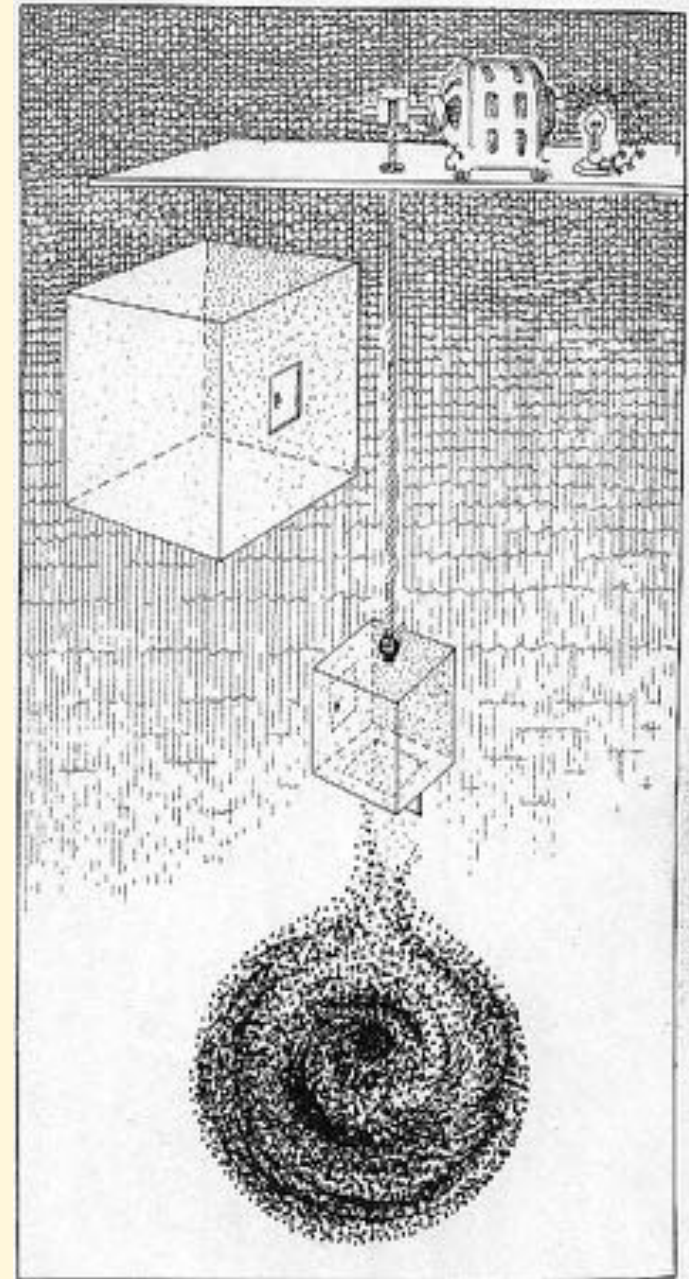
Received January 24, 1973

- J. Bekenstein (1972) : l'analogie est une identité, un trou noir possède vraiment une entropie, proportionnelle à sa surface



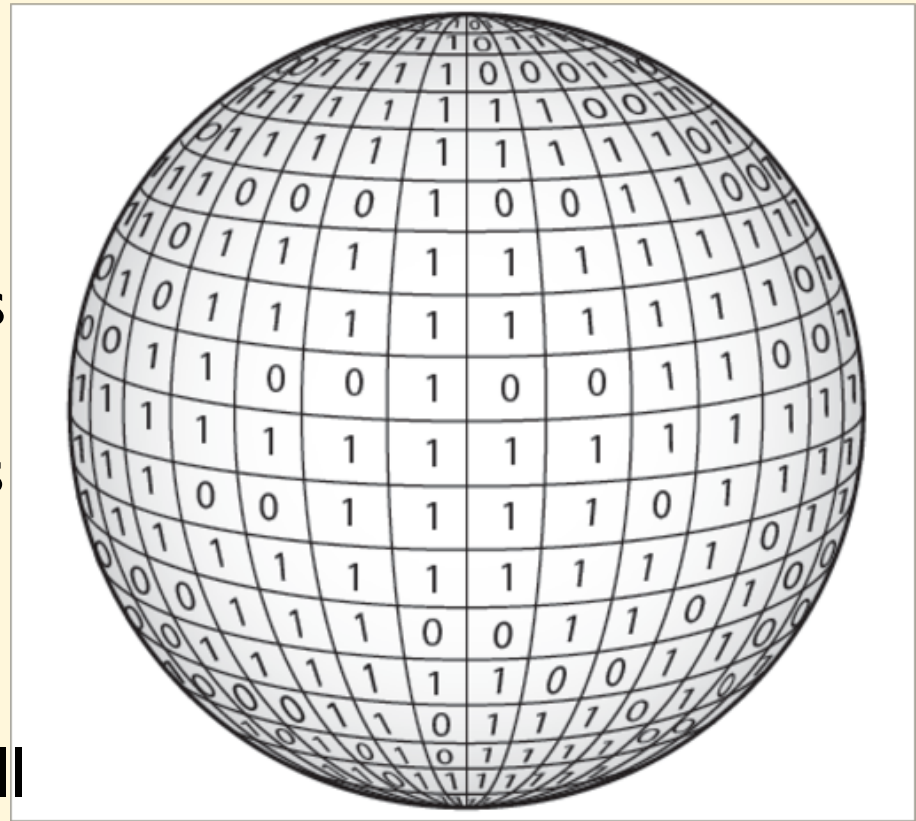
# La thermodynamique des trous noirs

- J. Bekenstein (1972) : l'analogie est une identité, un trou noir possède vraiment une entropie, proportionnelle à sa surface
- Hawking et Carter critiquent fortement l'idée de Bekenstein
- ... mais en 1974, Hawking démontre que les trous noirs rayonnent et confirme l'expression de l'entropie proposée par Bekenstein



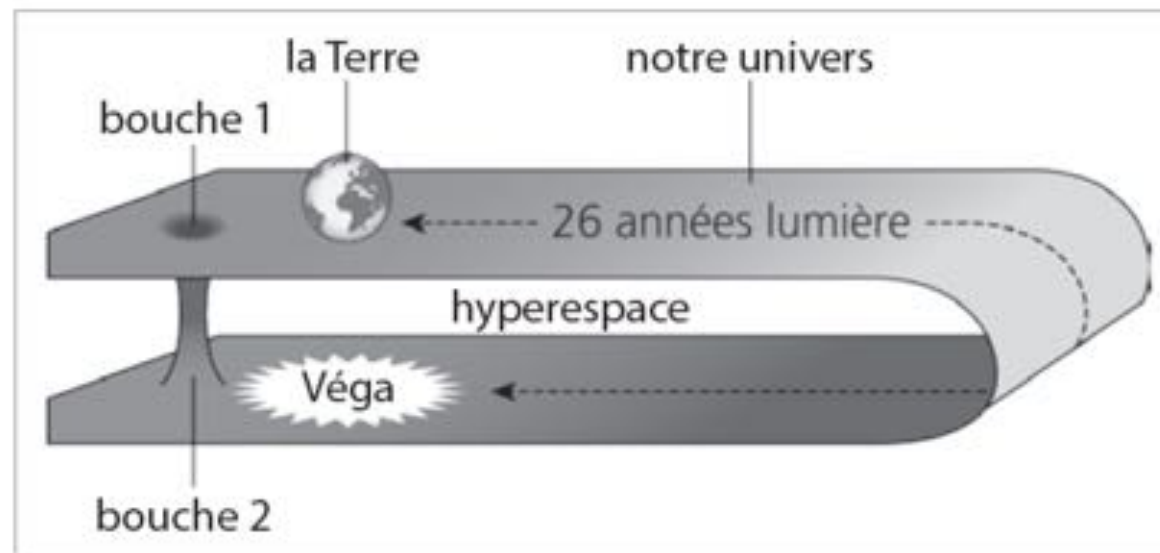
# La thermodynamique des trous noirs

- J. Bekenstein (1972) : l'analogie est une identité, un trou noir possède vraiment une entropie, proportionnelle à sa surface
- Calculer l'entropie d'un trou noir est simple : on pave la surface de son horizon avec des surfaces de Planck ( $10^{-70} \text{ m}^2$ ) et de compter le nombre de pavés
- Question de perte d'information dans les trous noirs : Hawking, Thorne, Preskill



# Trous de ver

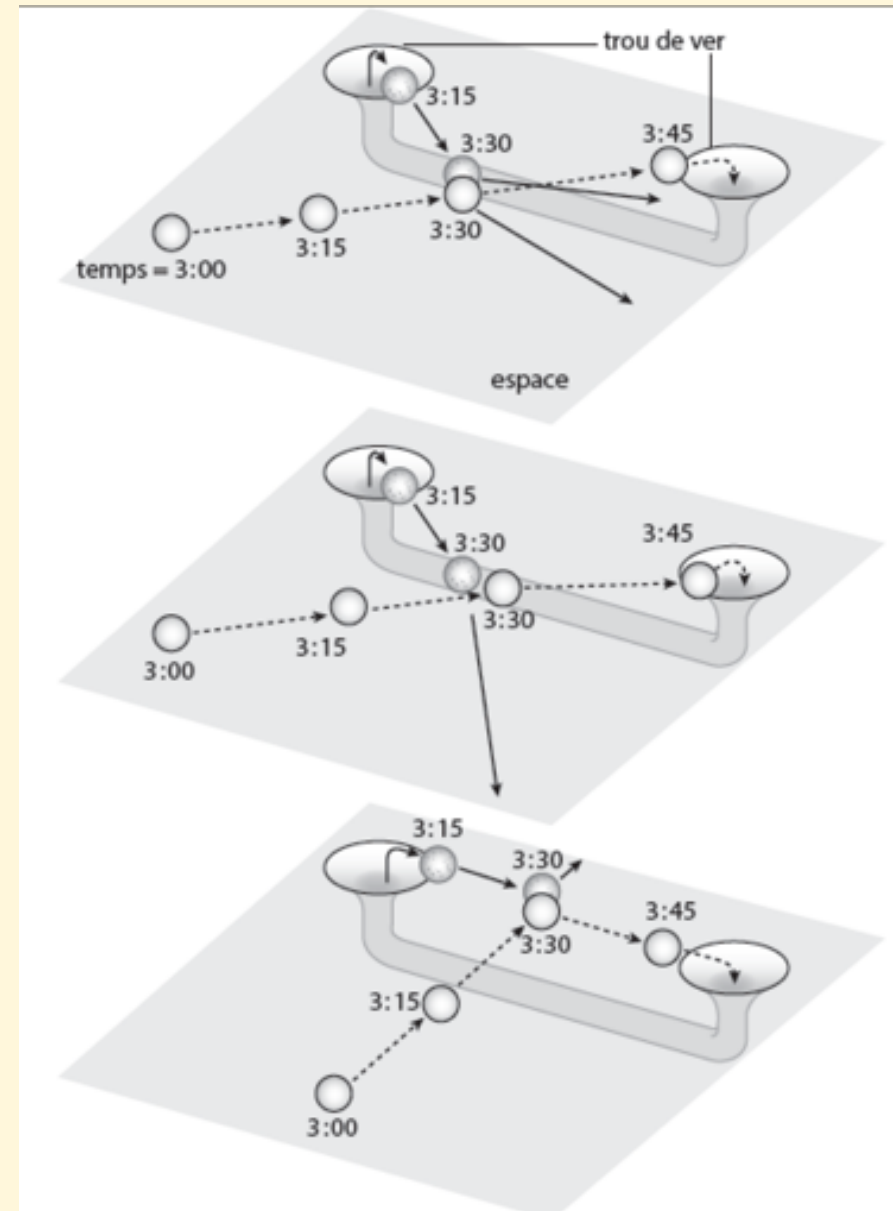
- Question posée par Carl Sagan (Contact) : les lois de la physique autorisent-elles les portes dans l'espace-temps, les « trous de ver » ?
- Nécessaire d'employer de la matière « exotique »



Un trou de ver est une porte dans l'espace-temps permettant d'accéder presque instantanément, pour l'observateur qui le traverse, à une autre zone de l'espace-temps - permettant par exemple d'accéder de la Terre à Véga, située à 26 années-lumière de nous.

# Trous de ver : paradoxe du grand-père

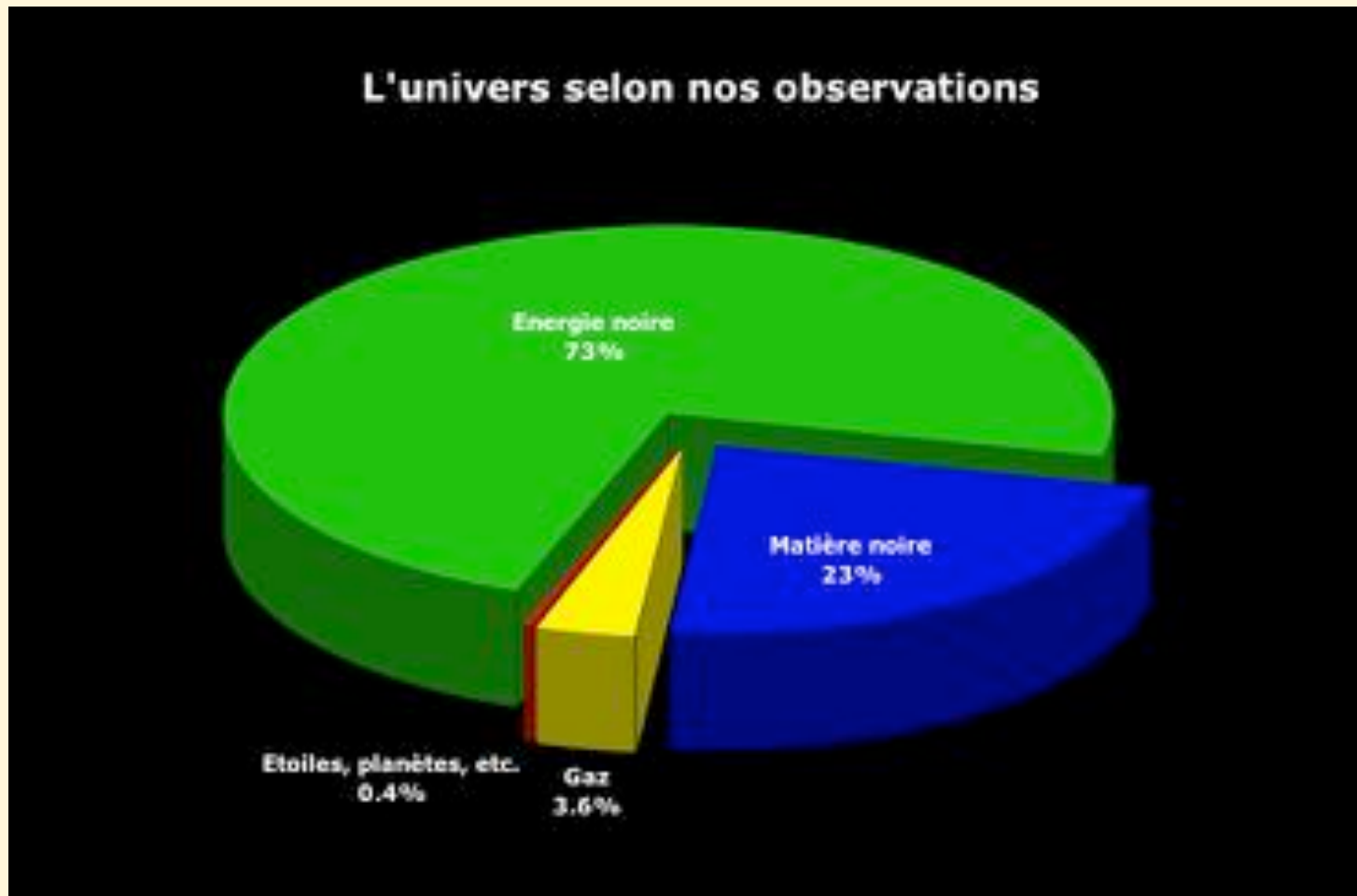
- Des paradoxes ne sont-ils pas toujours associés au voyage dans le temps ?
- Non, au contraire, cela permet d'expliquer le comportement très bizarre de la Mécanique quantique
- Discussion dans Kip Thorne, Flammarion



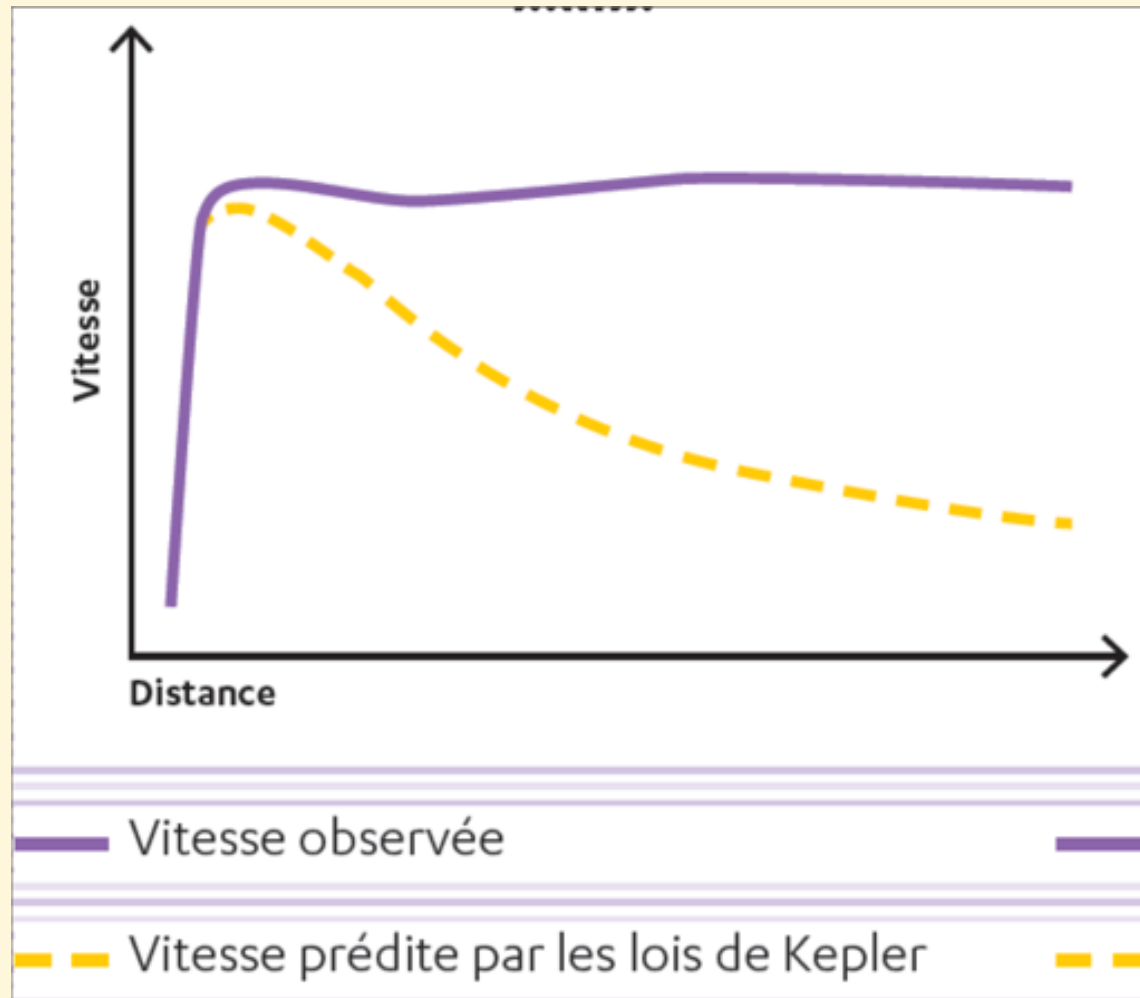
---

# Gravité répulsive dans l'Univers : L'énergie noire...

# Une très étrange composition de l'Univers



# De la matière manquante ? L'énigme de la matière noire



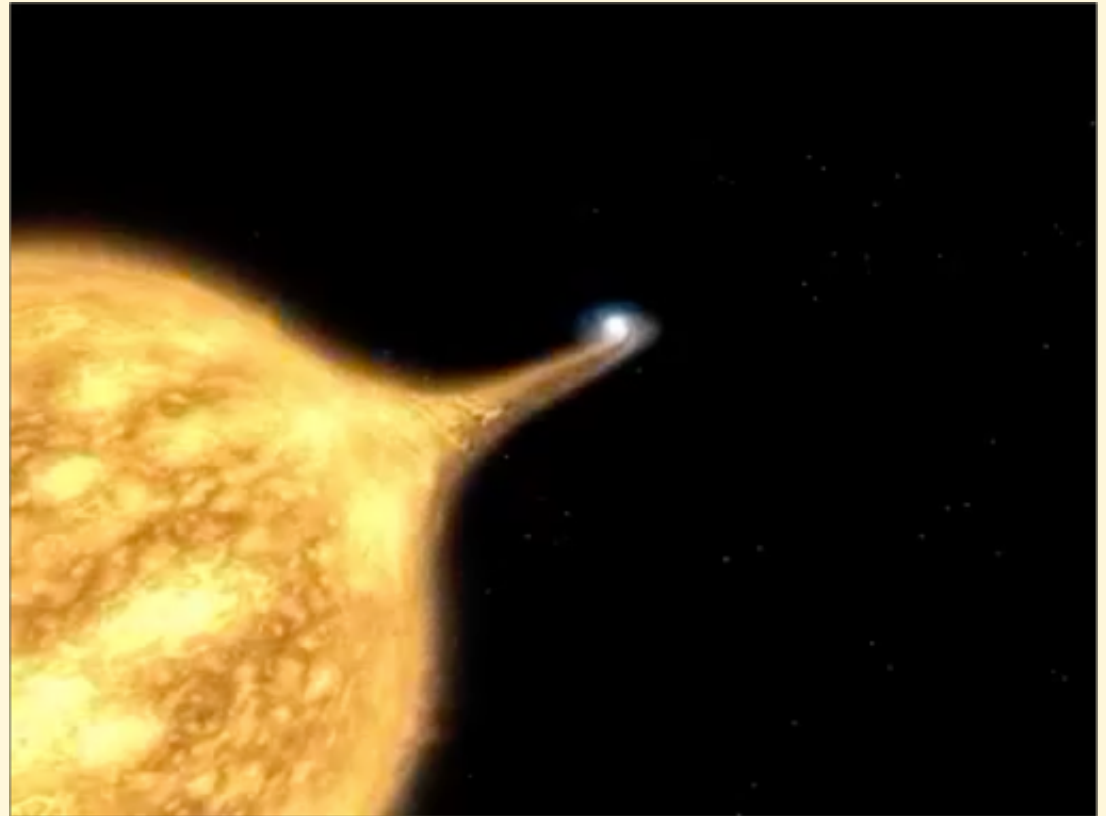


# Les supernovae SNIa : des chandelles (assez) standard

Les supernovae sont des explosions d'étoiles extrêmement violentes.

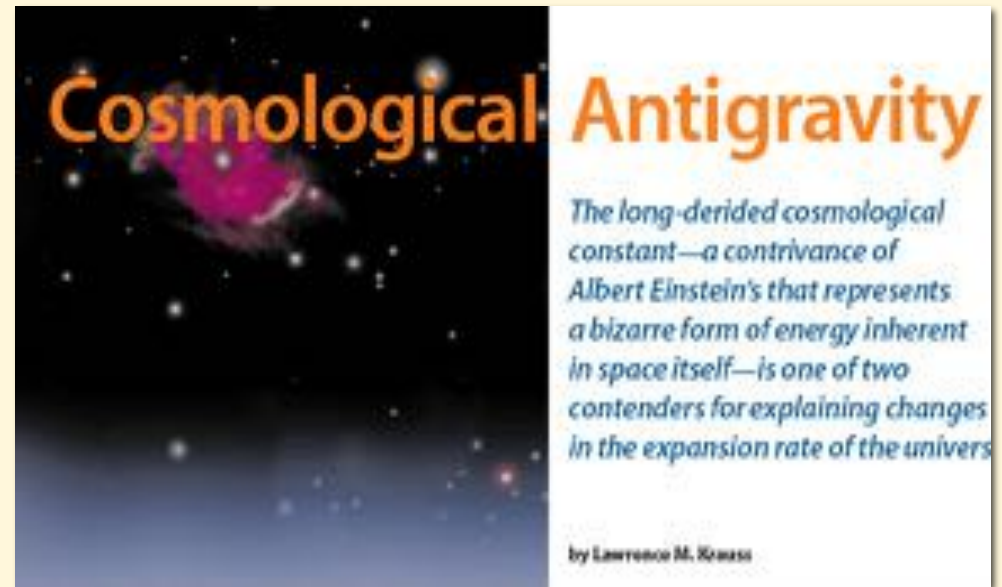
Les supernovae de **type Ia** (cf. ci-contre) ont une luminosité très reproductible.

Cela permet de les utiliser comme des « **chandelles-standard** » jusqu'à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière...



# L'énergie noire

- L'énergie noire, véritable antigravité cosmologique, est aujourd'hui l'une des principales questions scientifiques actuelles
- Des centaines de physiciens travaillent à étudier ses propriétés et à comprendre sa nature



# L'étrange modèle cosmologique standard

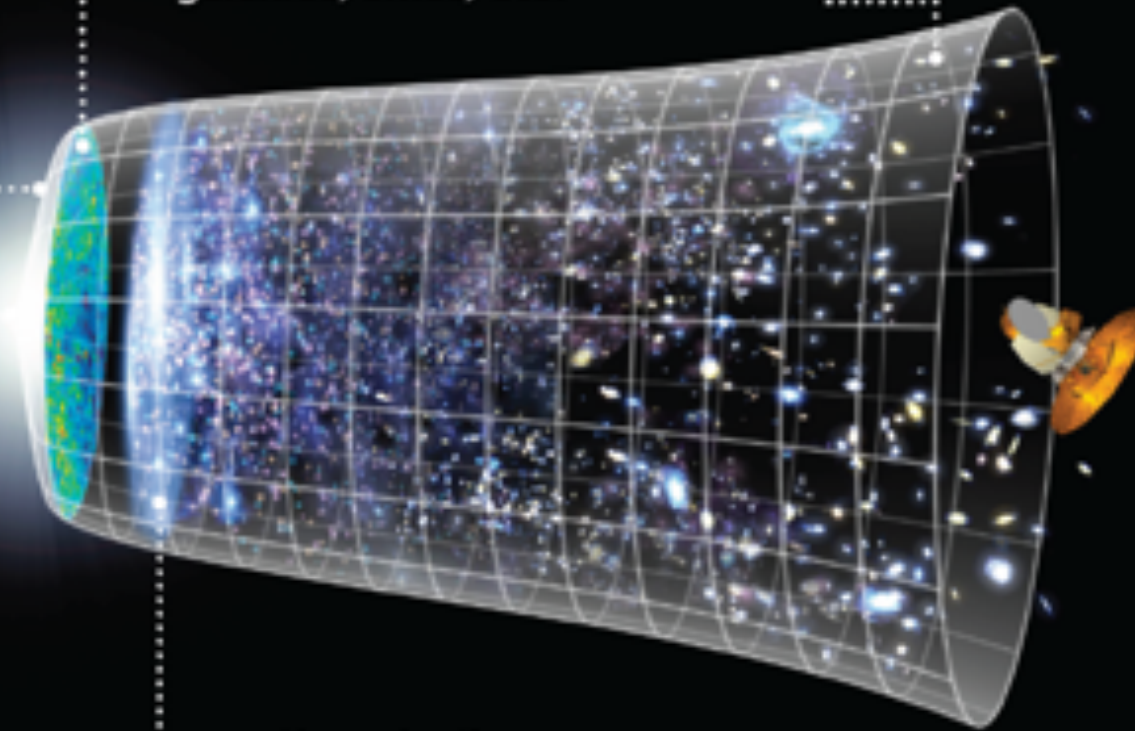
• Émission du fond diffus cosmologique [377 000 ans]

Formation des grandes structures de l'Univers : galaxies, amas, etc.

• Accélération de l'expansion de l'Univers

Inflation

• Big Bang



• Premières étoiles



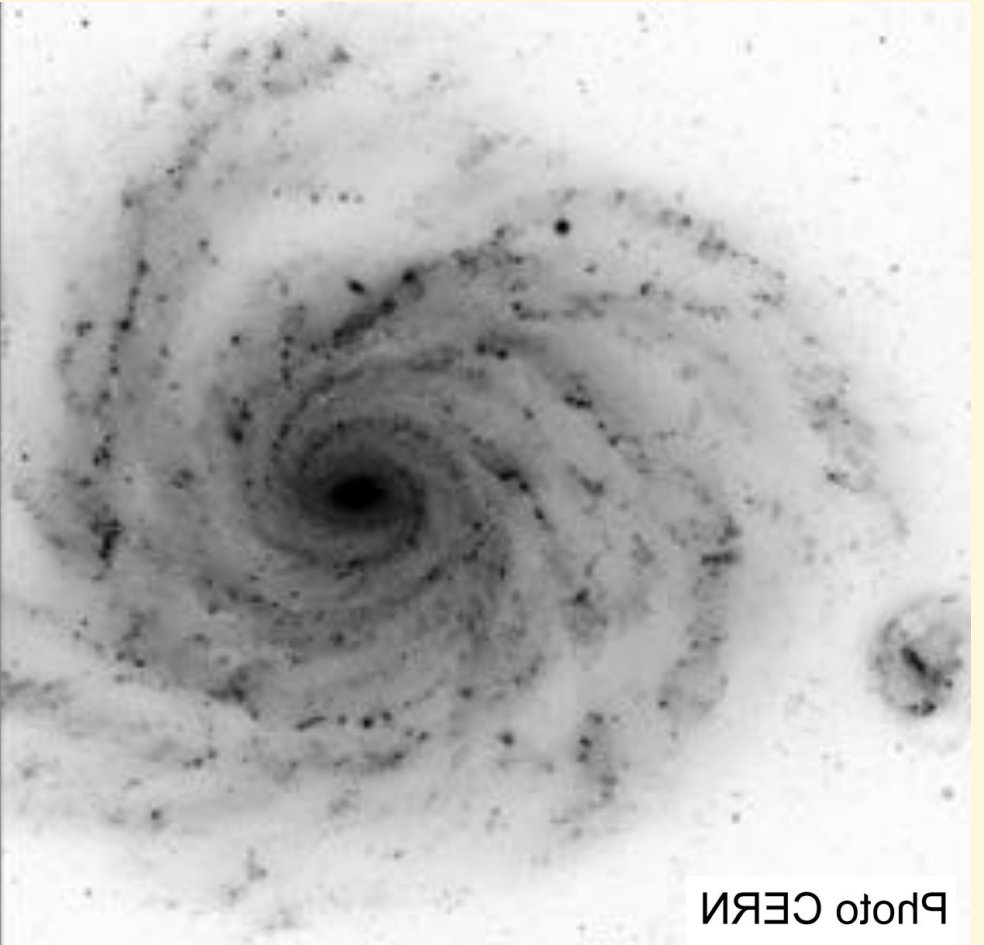
13,77 milliards d'années

Marche bien, mais peu naturel. Alternative ?

# Une histoire assez invraisemblable...

- Le modèle cosmologique standard décrit une histoire assez invraisemblable :
- D'abord une phase ultra-courte de décélération extrêmement violente (environ  $10^{-35}$  seconde)
- Suivie d'une phase également extrêmement courte d'inflation, première *phase d'accélération de l'expansion*
- Et on retrouve une phase, très longue celle-là, de décélération, d'une violence qui diminue avec le temps, alors que baisse la température
- Et c'est seulement au bout de quelques milliards d'années que débute une *nouvelle phase d'accélération de l'expansion*, due à une mystérieuse énergie noire
- Difficile de croire à un scénario aussi tarabiscoté...

# Où est passée l'antimatière ?





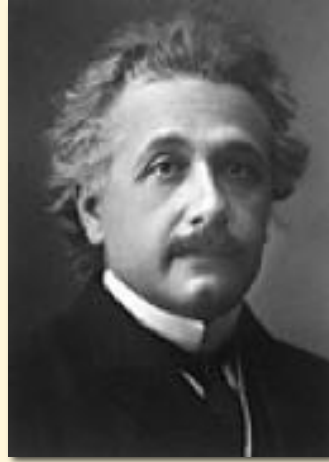
# Petite histoire de l'antimatière



**Maxwell**

Électromagnétisme

électron



**1905 : Einstein**

Relativité restreinte

relativiste



**1926 : Schrödinger**

Mécanique Quantique

avec spin



**1929 : Dirac**

# Problème...

L'équation de Dirac a 2 solutions !

L'une d'énergie positive, l'autre d'énergie négative


**Que représente la deuxième solution ?**

- Rien ?
- Électron d'énergie négative ...
- Une particule de charge +1 ???
- Le proton ? Mais sa masse est 2000 fois plus grande. Weyl :  $m^+ = m^-$



Dirac invente  
l'antiélectron  
en 1930

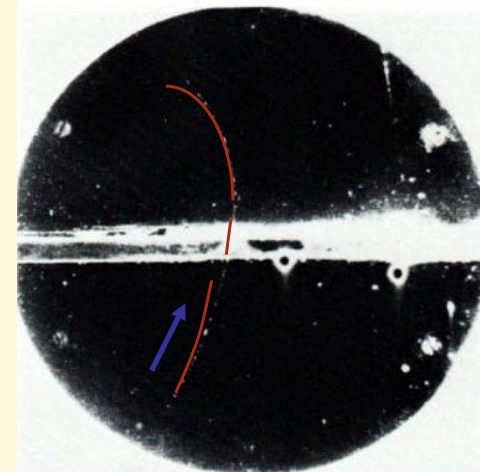


$e^-$   
  
électron

$e^+$   
  
positron



1932 : Anderson découvre le positron  
dans les rayons cosmiques



Plomb



# **Les univers matière-antimatière sont-ils possibles ?**

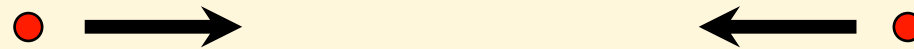
**Étudiés dans les années 1960 par le groupe  
Roland Omnès, étude reprise circa 1990  
par de Rujula, Glashow, Cohen**

**Étude de poches d'antimatière dans divers  
modèles (nucléosynthèse)  $\approx$  1975 -  
1995**

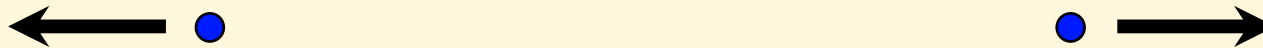
- Des univers symétriques matière-antimatière sont impossibles car...
- Distorsion du fond diffus (mais dépend de la taille des domaines)
- Mais surtout, rayonnement gamma d'annihilation quand l'univers devient transparent : contrainte taille de domaines de la taille de l'univers observable...
- Sauf si ... la gravitation sépare matière et antimatière
- En principe impossible, si le principe d'équivalence est respecté

# Masse négative dans la relativité d'Einstein (H. Bondi)

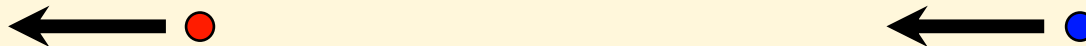
Deux masses positives s'attirent



Deux masses négatives se repoussent



Une masse négative et une masse positive se poursuivent à distance constante (runaway) !



- Particule de masse positive
- Particule de masse négative

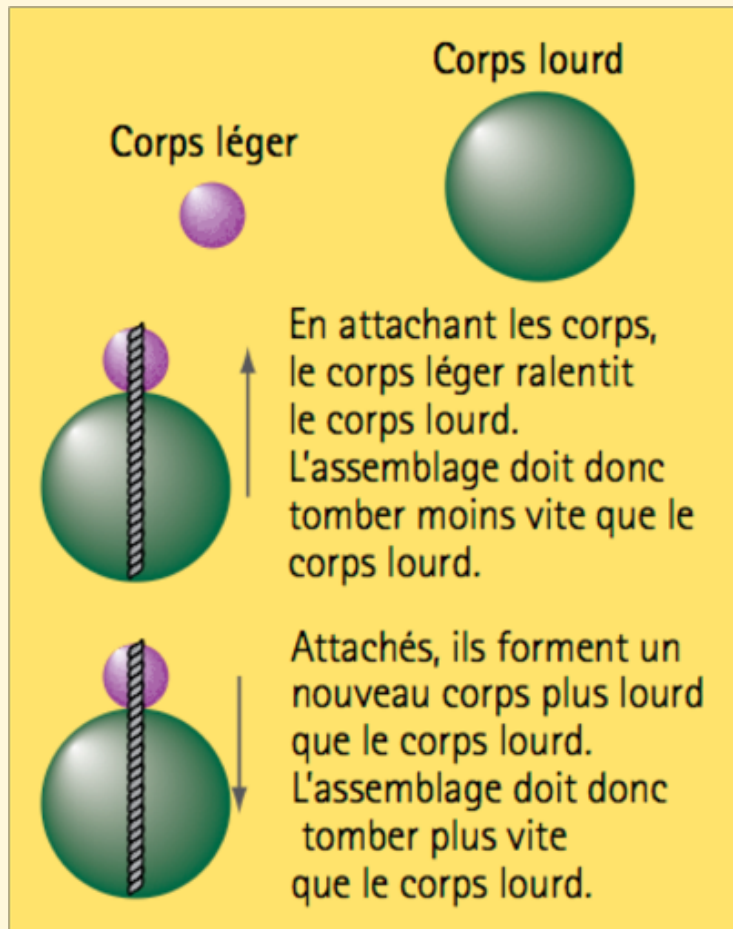
# Développement de l'idée de masse négative

- Philip Morrison (1958) : instabilité
- Ed Witten, Richard Schoen et Shing-Tung Yau (1979), Hawking : les masses négatives sont impossibles
- B. Carter (1968) : espace-temps « vicieux », permet de remonter en arrière dans le temps
- 1998 : l'univers contient  $\approx$  **70%** de contenu répulsif
- Matt Visser (1995-2005) : contre-exemples aux théorèmes d'impossibilité
- Manu Paranjape (2014) : solution masse négative

# Exemples classiques d'antigravité

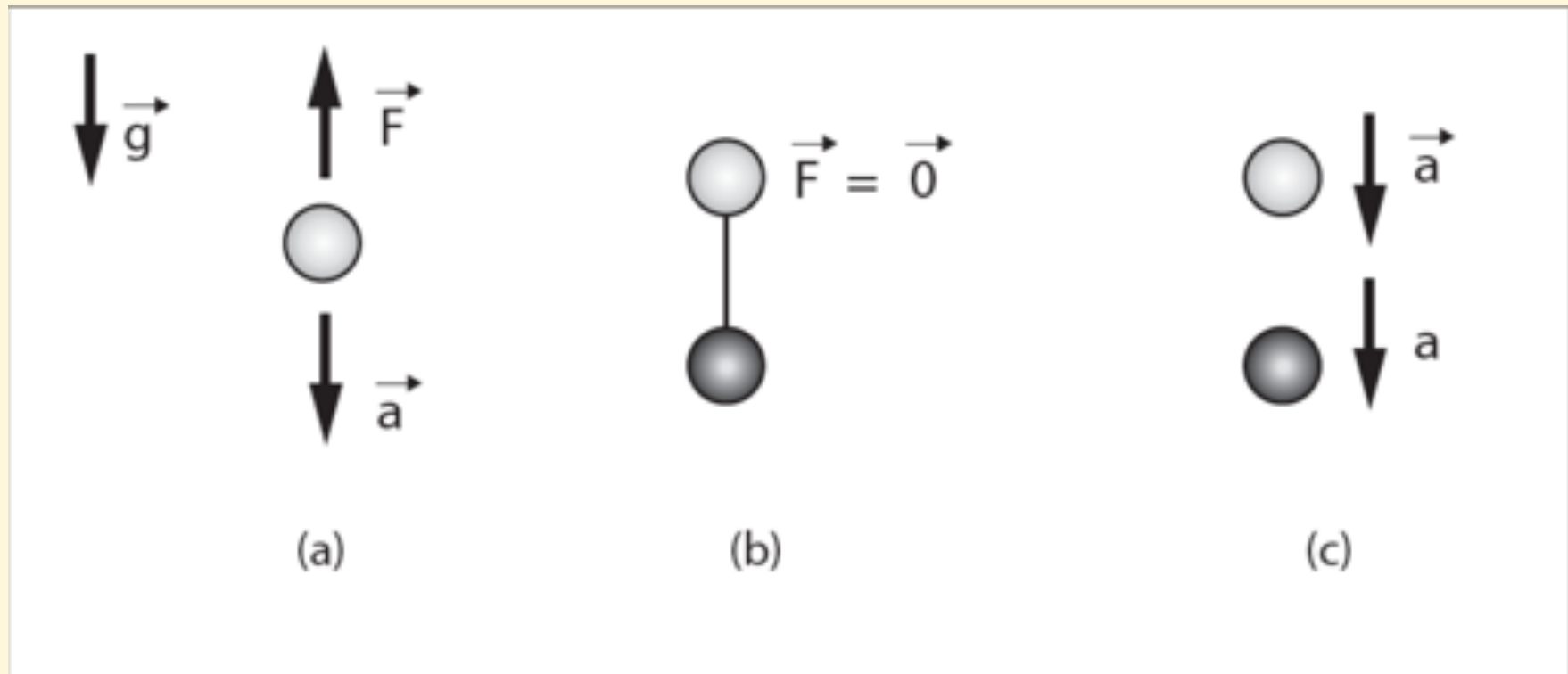
- Hélium superfluide où l'on met un électron : bulle de vide autour de l'électron, masse négative par rapport au milieu ambiant, de densité supérieure
- Mouvement de cette « bulle électron » : accélère vers le haut avec une accélération exactement égale à  $+2g$
- Dans un solide (silicium, germanium) : électrons et trous
- Trou = électron manquant : antigravite (et tout le monde trouve cela normal)
- Les « vides » dans les structures à grande échelle vues comme des masses négatives (Dubinski et al. 93, Piran 97).

# Chute universelle des corps : le raisonnement de Galilée



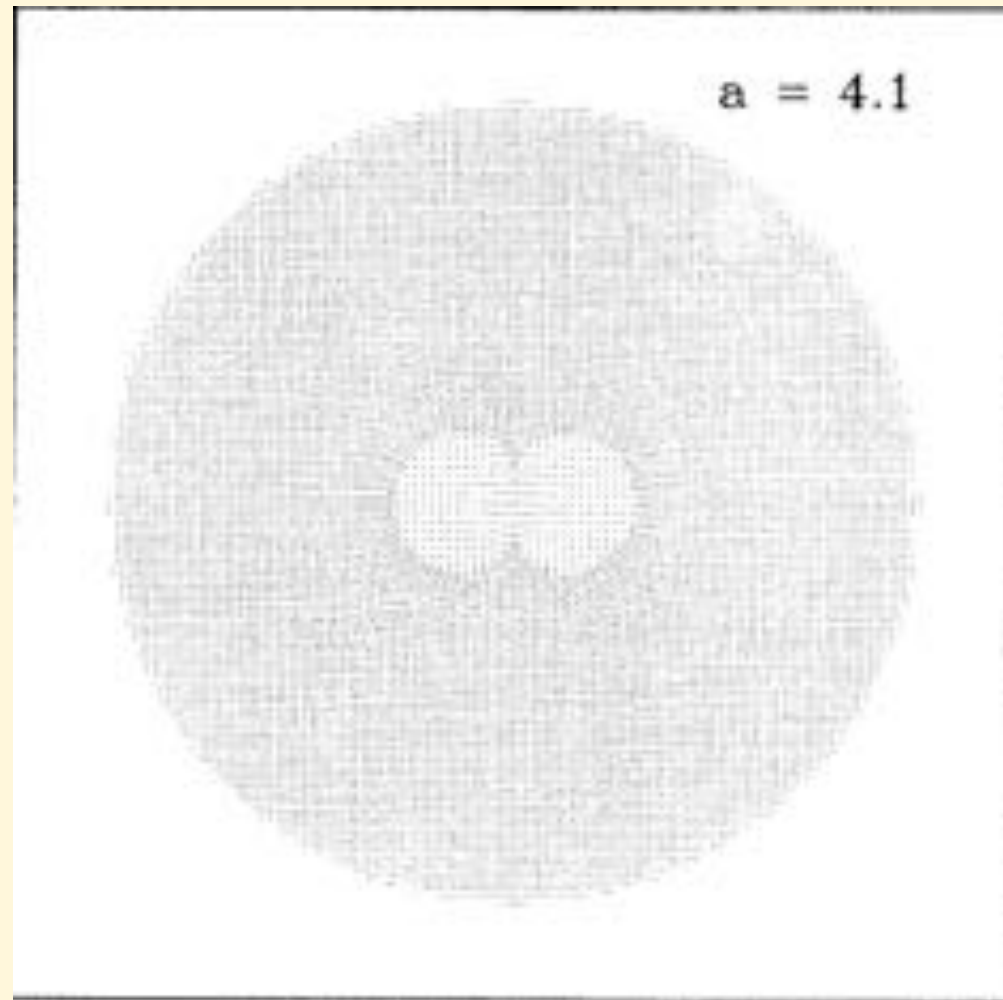
Mais ce  
raisonnement  
apparemment  
imparable  
ne va plus marcher  
avec des masses  
négatives...

# Que se passe-t-il si on relie entre elles une masse positive $+m$ et une masse négative $-m$ (Price 1993) ?



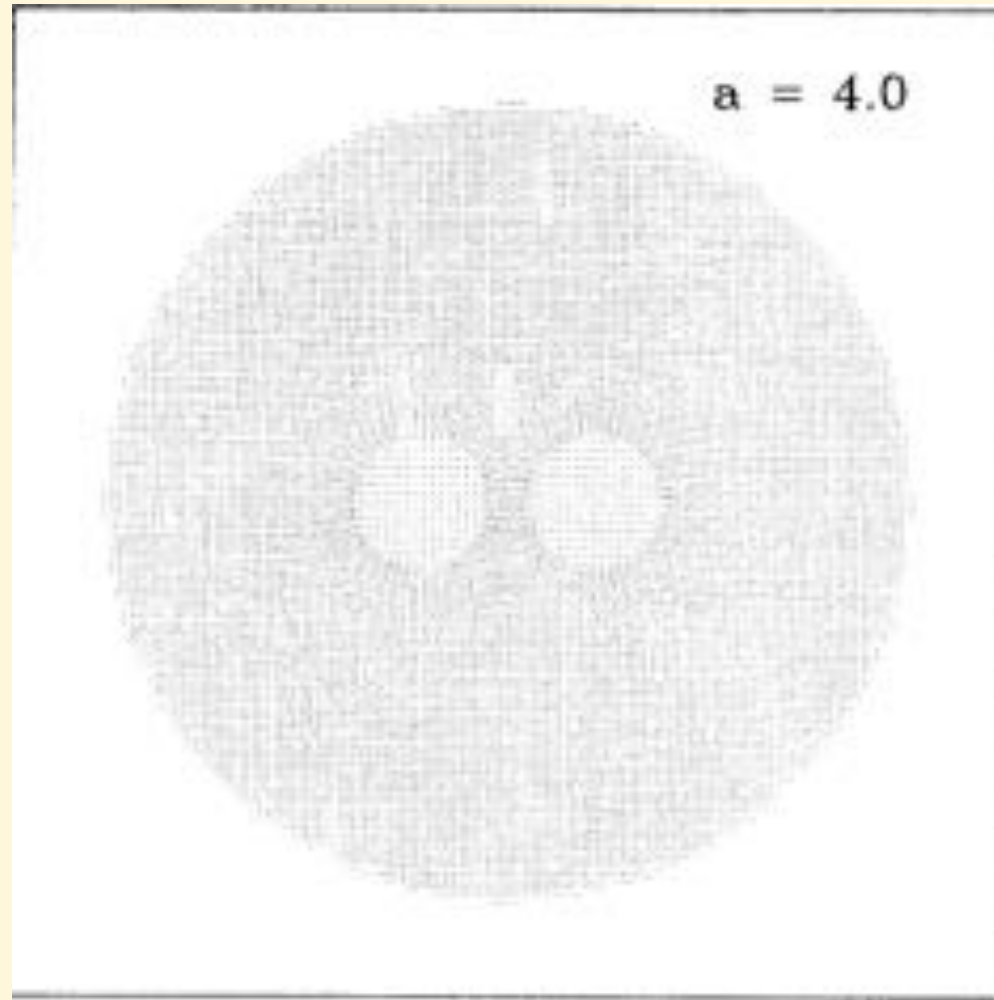
Un système lié  $+m -m$  *lévite et se polarise* (b) et viole en ce sens à 100% le principe d'équivalence...

Les régions moins denses que les autres agissent  
comme des masses négatives (Dubinski et al.)

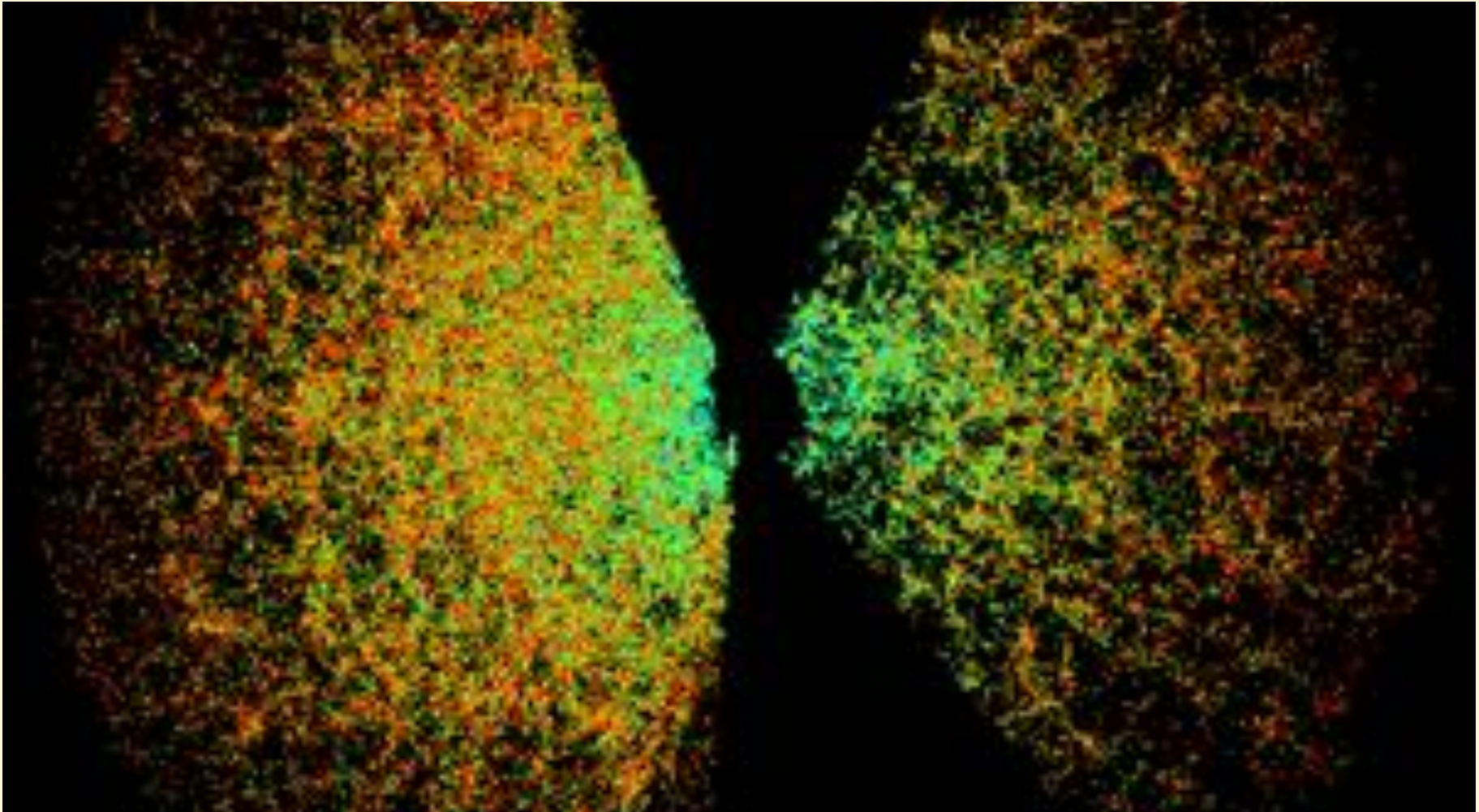




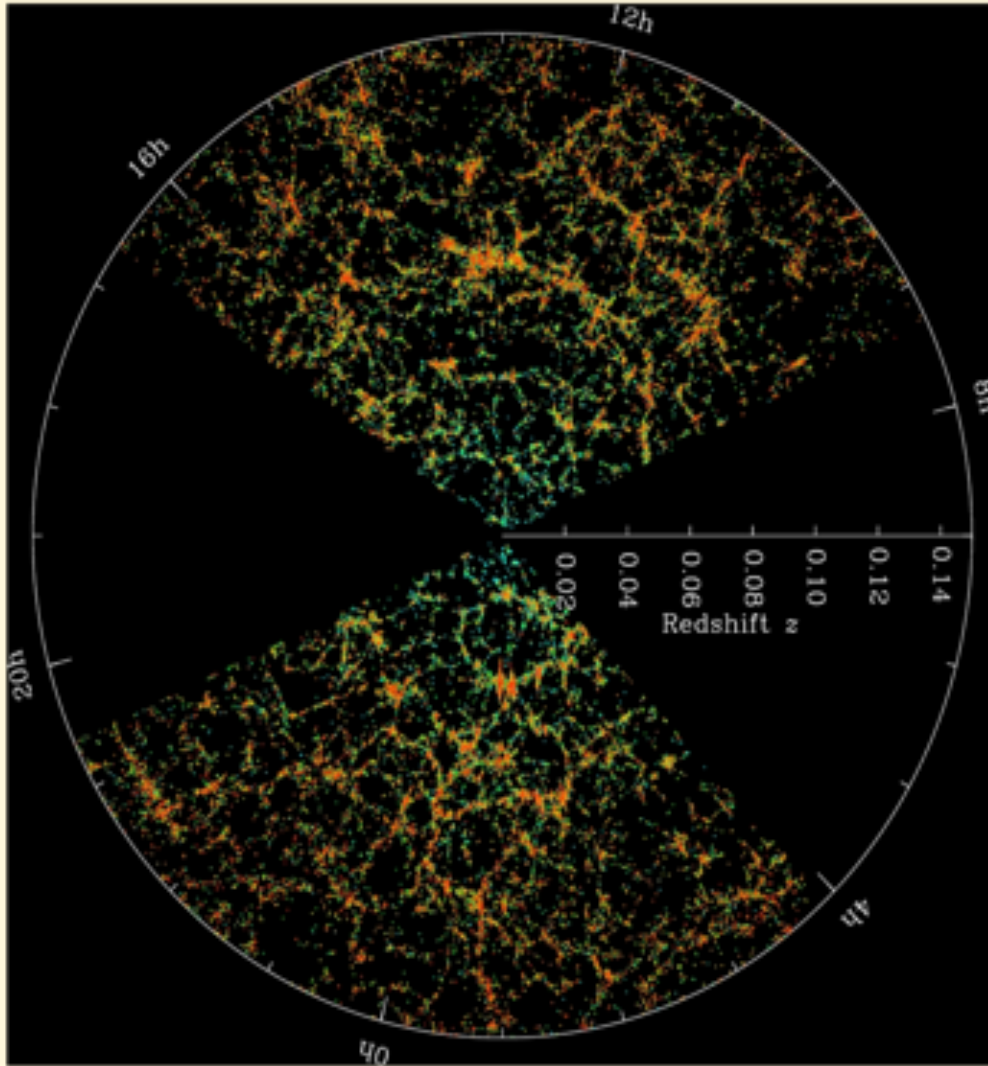
Les régions moins denses que les autres agissent  
comme des masses négatives (Dubinski et al.)



# Structures dans notre univers (SDSS)



# Structures dans notre univers (SDSS)



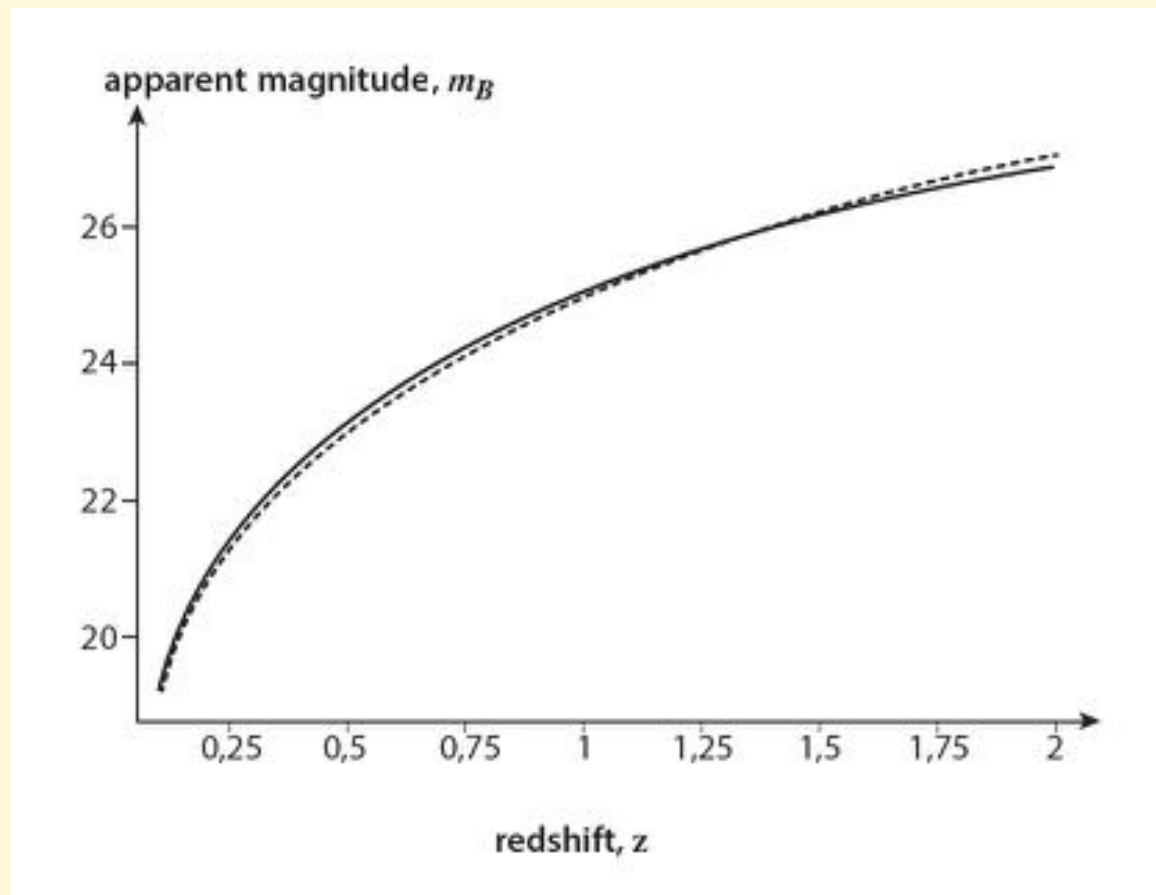
- Echelle d'un effet linéaire (BAO)  
**≈ échelle**  
d'un effet non linéaire
- Pas d'explication dans le modèle standard

# L'univers de Dirac-Milne

- Cet univers matière-antimatière est étonnamment proche sur âge, formation des éléments nucléaires (nucléosynthèse), fonds diffus cosmologique, distance des supernovae
- Il n'a aucun paramètre libre, et devrait donc facilement être falsifiable
- Caractère essentiel : c'est la gravitation qui permet de séparer matière d'antimatière (de masse gravitationnelle négative)

# L'univers de Dirac-Milne

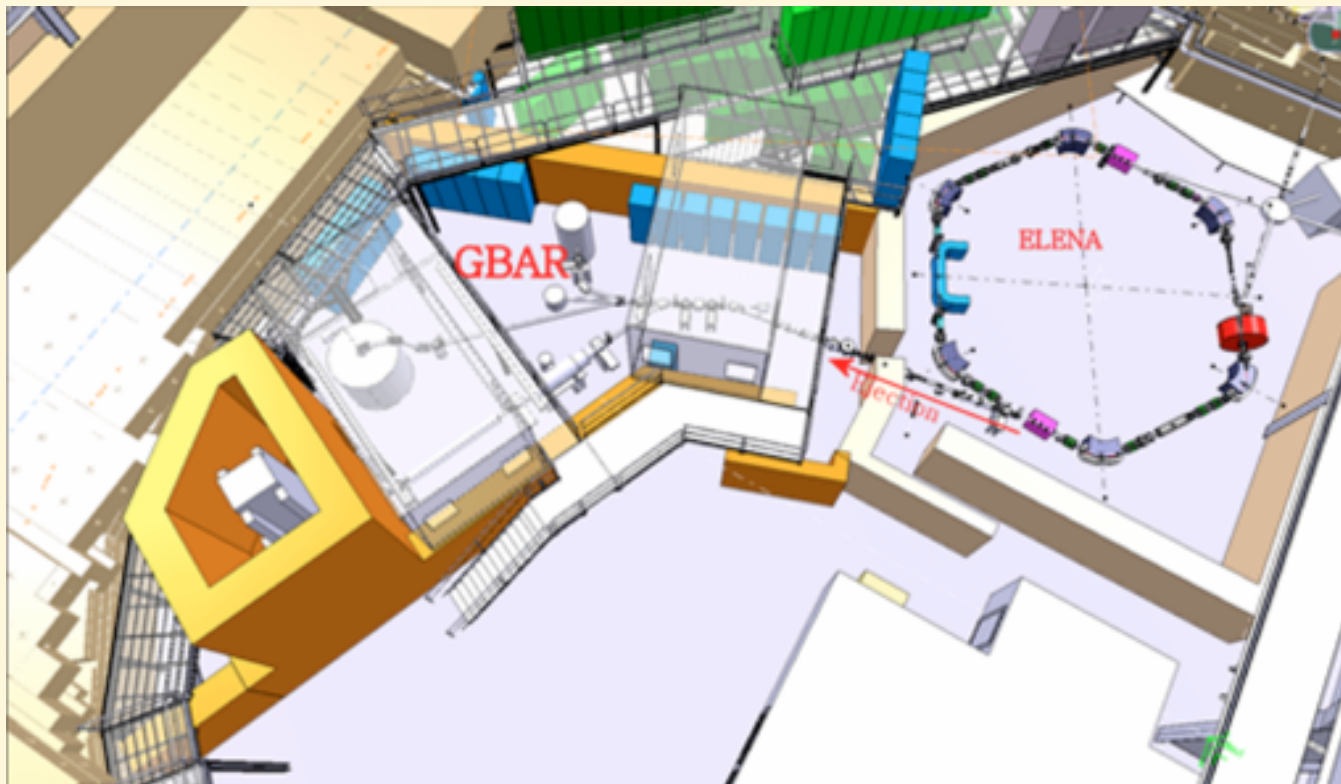
- Distance de luminosité des supernovae Ia
- Pratiquement identique au modèle cosmologique standard





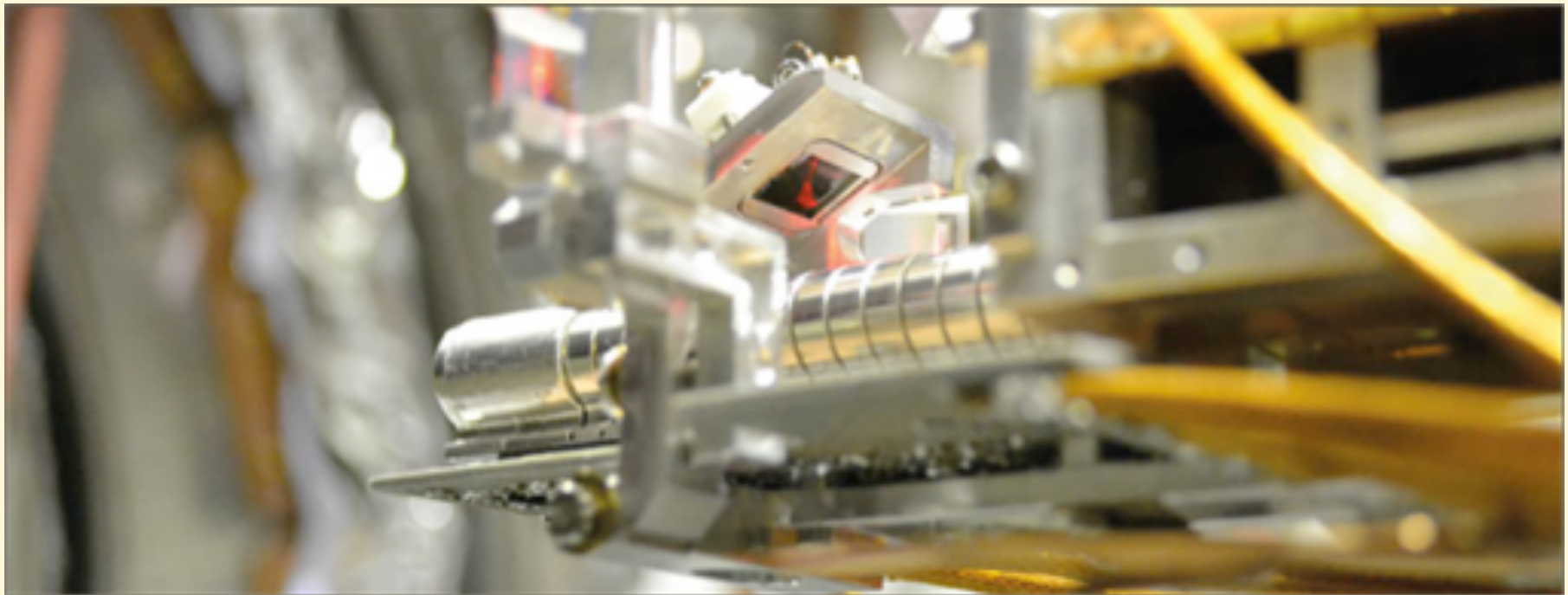
# Test antihydrogène

- Trois expériences au CERN : Gbar, AEGIS, ALPHA-g tentent de mesurer la trajectoire d'antihydrogènes froids dans le champ de gravitation de la Terre (en 2021)



# Trois expériences au CERN...

- Trois expériences au CERN : Gbar, AEGIS, ALPHA-g luttent pour mesurer la trajectoire d'atomes d'antihydrogène dans le champ de gravitation terrestre



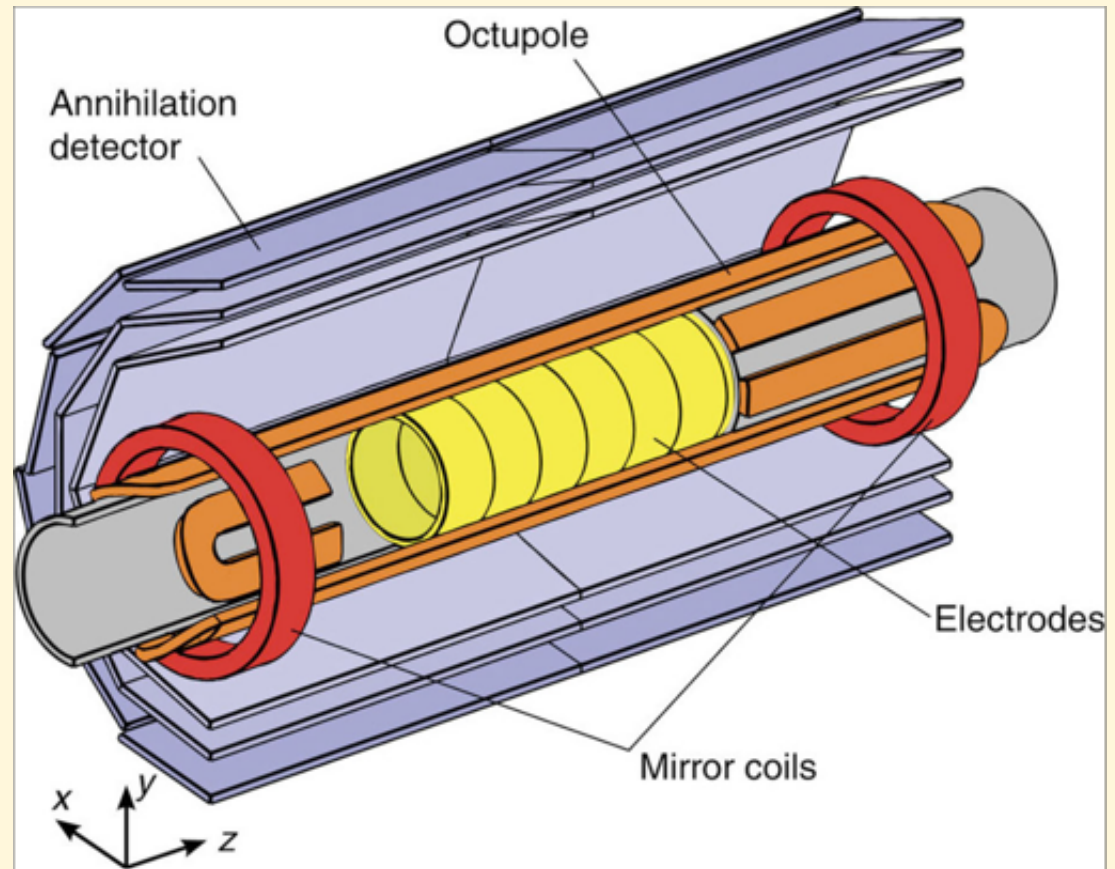


# Trois expériences au CERN...

- Trois expériences au CERN : Gbar, AEGIS, ALPHA-g luttent pour mesurer la trajectoire d'atomes d'antihydrogène dans le champ de gravitation terrestre

2013 : ALPHA réalise  
la première mesure,  
capable d'exclure  
**≈ 65 x** antigravité

ALPHA-g et Gbar vise  
maintenant 1-10% de  
précision sur  
l'antigravité (facteur  
>1000 d'amélioration)



## Conclusions

- La gravitation est un domaine de recherche très actif, avec l'irruption de mesures de précision en cosmologie
- La quantification de la gravitation reste un défi, et la « bonne » théorie reste à trouver (cordes/membranes, boucles, théorie discrète, autre ?)
- L'énergie noire, gravité répulsive et composant très important de notre univers (70% dans le modèle standard) n'est pas comprise actuellement
- L'observation des événements violents à l'origine des ondes gravitationnelles révèle des trous noirs inattendus (forte masse : 20-30 masses solaires)

## Conclusions

- L'antimatière, la matière qui remonte le temps, pourrait jouer un rôle de « masse négative » dans l'univers.
- Cette hypothèse qui semblait initialement provocante permettrait d'expliquer plusieurs éléments importants de notre univers, à commencer par l'énergie noire
- Les trois expériences ALPHA-g, Gbar et AEGIS ne sont pas parvenues à mesurer l'effet de la gravité sur l'antimatière avant novembre 2018, date de la fermeture du CERN pour deux ans (et demi)  
Rendez-vous au premier semestre 2021.

## Références

- **G. Chardin, « L'insoutenable gravité de l'univers », Editions Le Pommier, Collection Idées, Mars 2018.**
- **A. Benoit-Lévy and G. Chardin, , “ Introducing the Dirac-Milne-Universe ”, A&A 537 A78 (2012).**
  - **G. Manfredi, J-L. Rouet, B. Miller, and G. Chardin, “ Cosmological structure formation with negative mass ”, Phys. Rev. D 98, 023514 (2018).**
  - **G. Chardin and G. Manfredi, "Gravity, antimatter and the Dirac-Milne universe", Hyperfine Interactions (2018) 239: 45.**