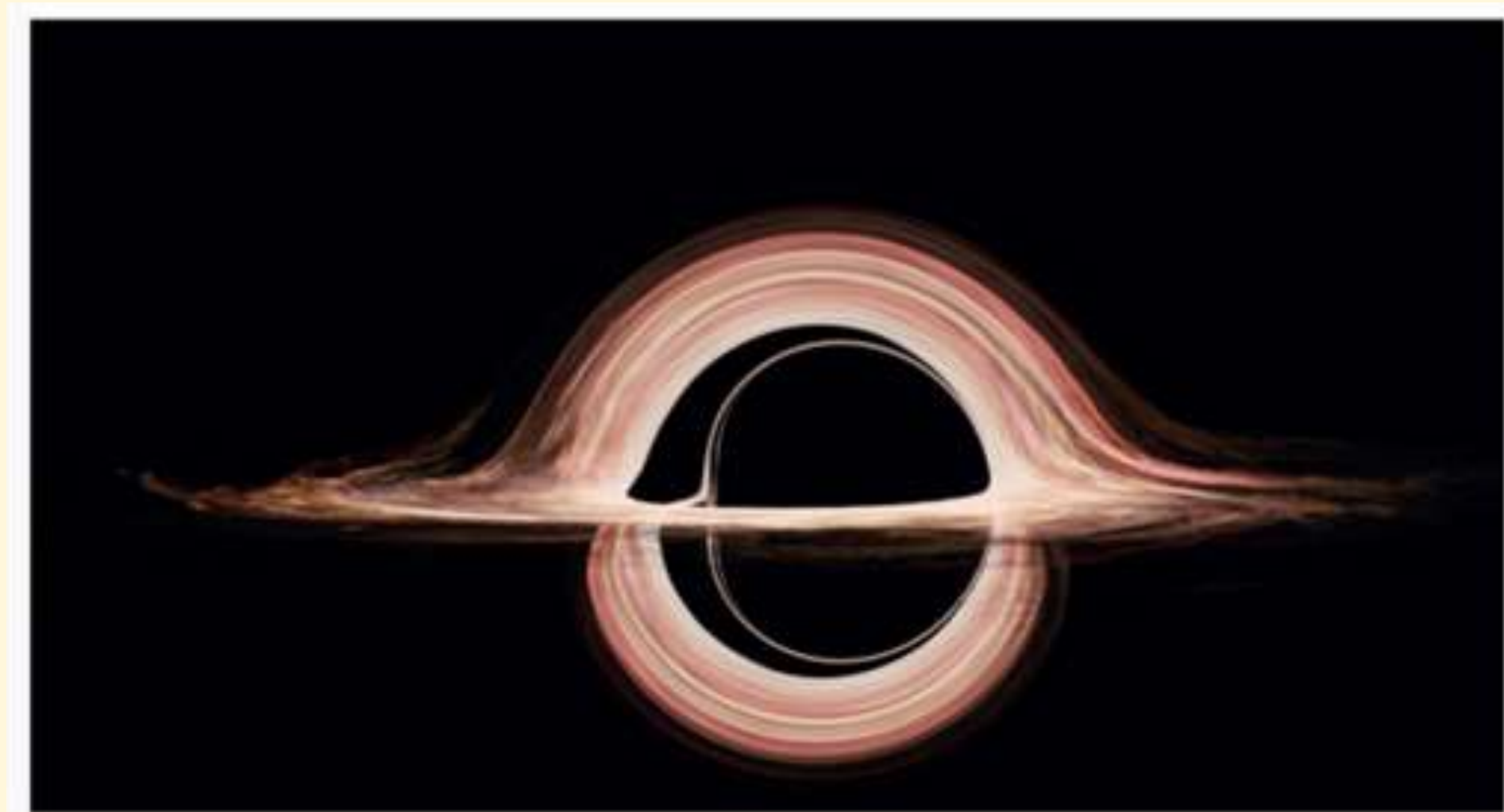


Naissance, vie et mort de l'Univers



Gabriel Chardin
CNRS, Paris Michel-Ange

Naissance de l'Univers

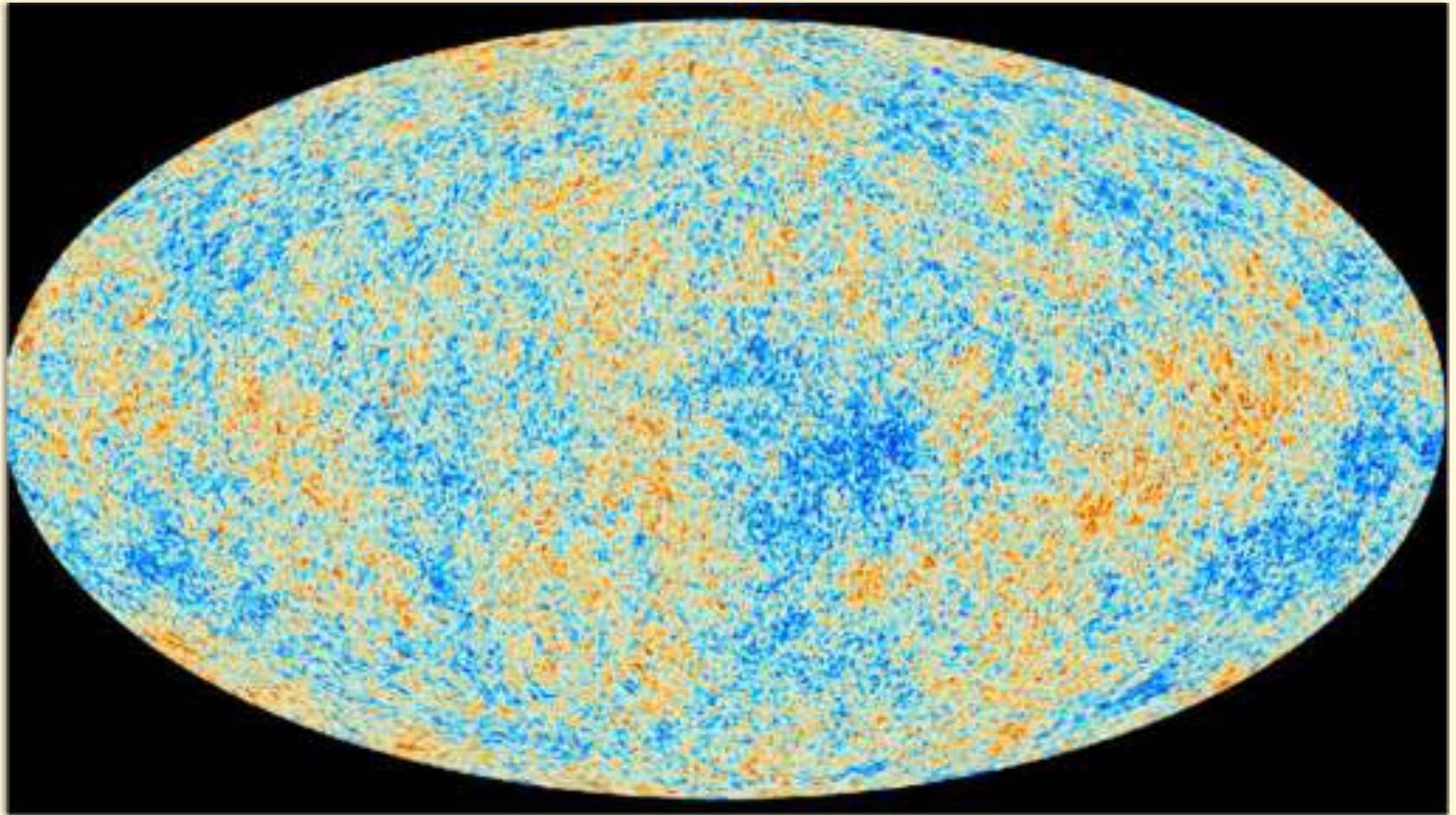
- L'univers a été extrêmement chaud dans le passé : fond diffus à 2,7 degrés, « cuisson » des noyaux légers (hélium, lithium, ...)
- On observe aujourd'hui avec une précision exquise la surface où l'univers a cessé d'être aussi chaud qu'une étoile, vers 400 000 ans d'âge, où il était environ un milliard de fois plus dense qu'aujourd'hui et 1 000 fois plus chaud
- Idée essentielle : c'est la gravitation qui est le « moteur » de l'évolution de l'univers

Le Big Bang...

- La théorie de la gravitation (relativité générale) d'Einstein prédit que l'Univers a vu sa densité croître jusqu'à l'infini en remontant dans le passé
- Proche du Big Bang, la température devient aussi grande que l'on veut (à la limite, infinie...)
- Vers un milliard de degrés, les éléments nucléaires légers (hélium, deutérium, lithium, etc.) se forment : la nucléosynthèse

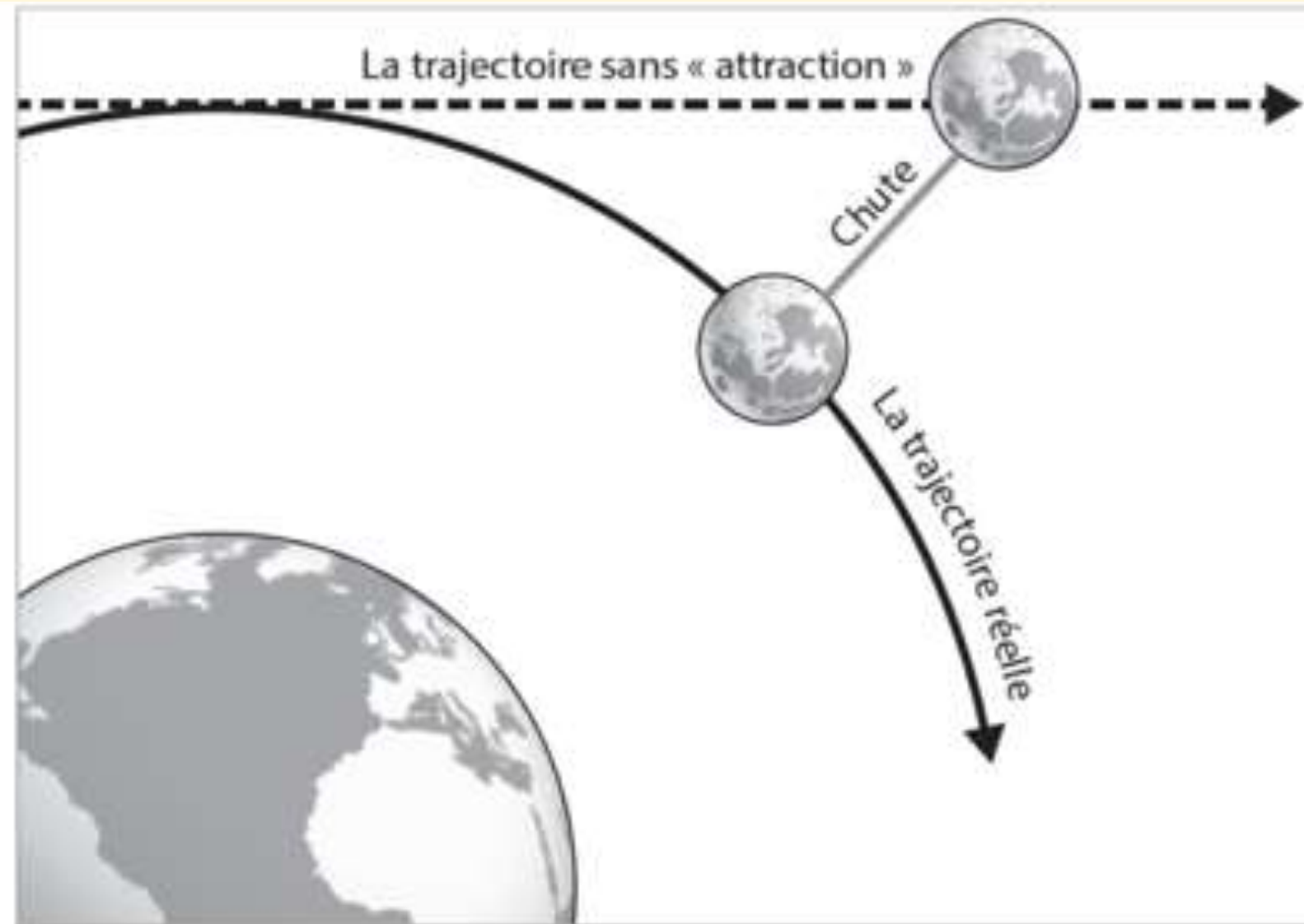
4

Carte du satellite européen Planck-HFI



Température moyenne aujourd'hui 2,7 K, uniforme à $< 10^{-5}$

Newton (1643-1727)



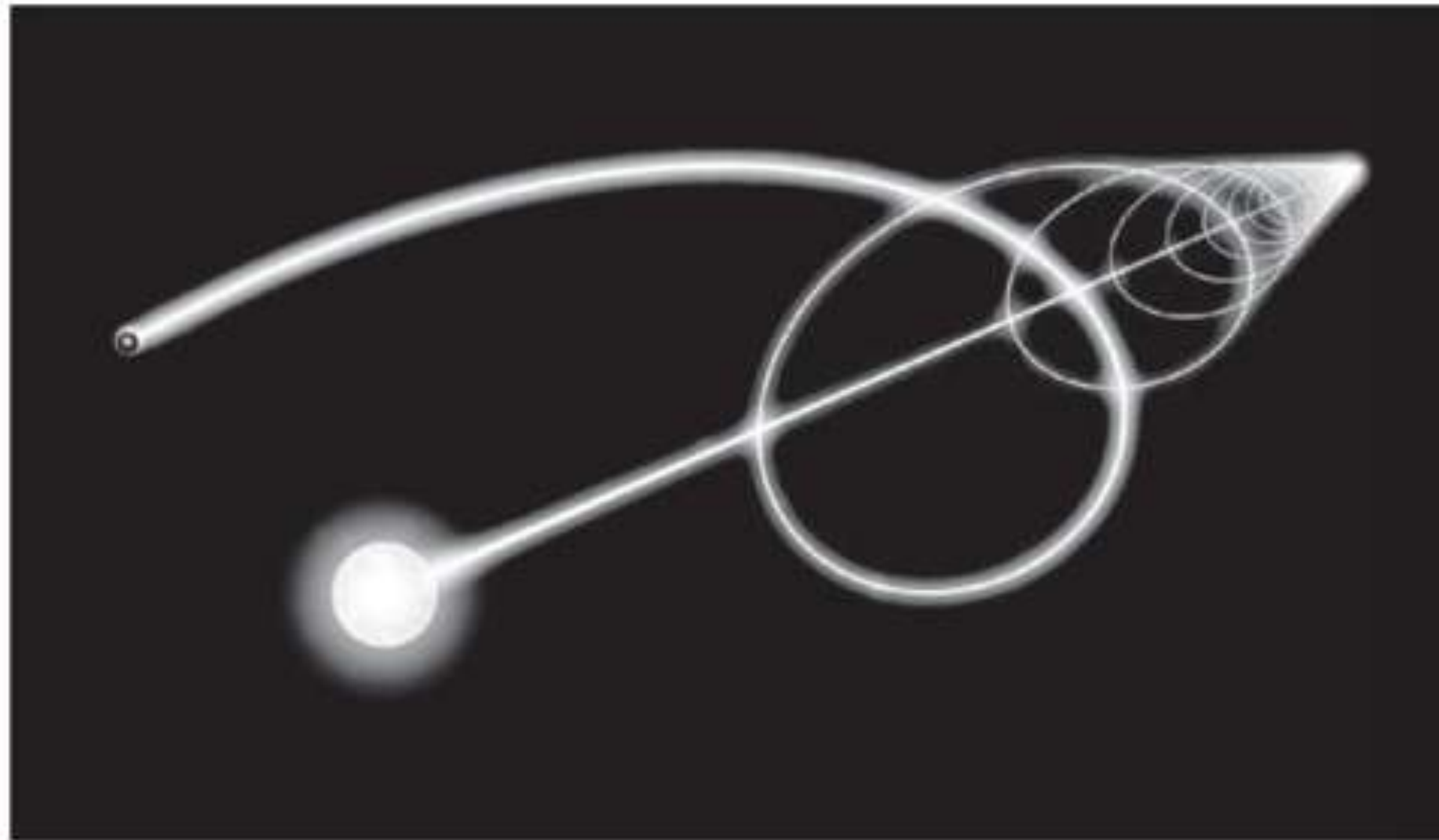
Si l'on traite la chute de la Lune comme celle de n'importe quel objet terrestre, telle une pomme, on s'aperçoit que sa trajectoire circulaire autour de la Terre peut se concevoir comme une chute permanente qui la maintient, en raison de son mouvement tangentiel, à distance constante par rapport au centre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

Ondes gravitationnelles

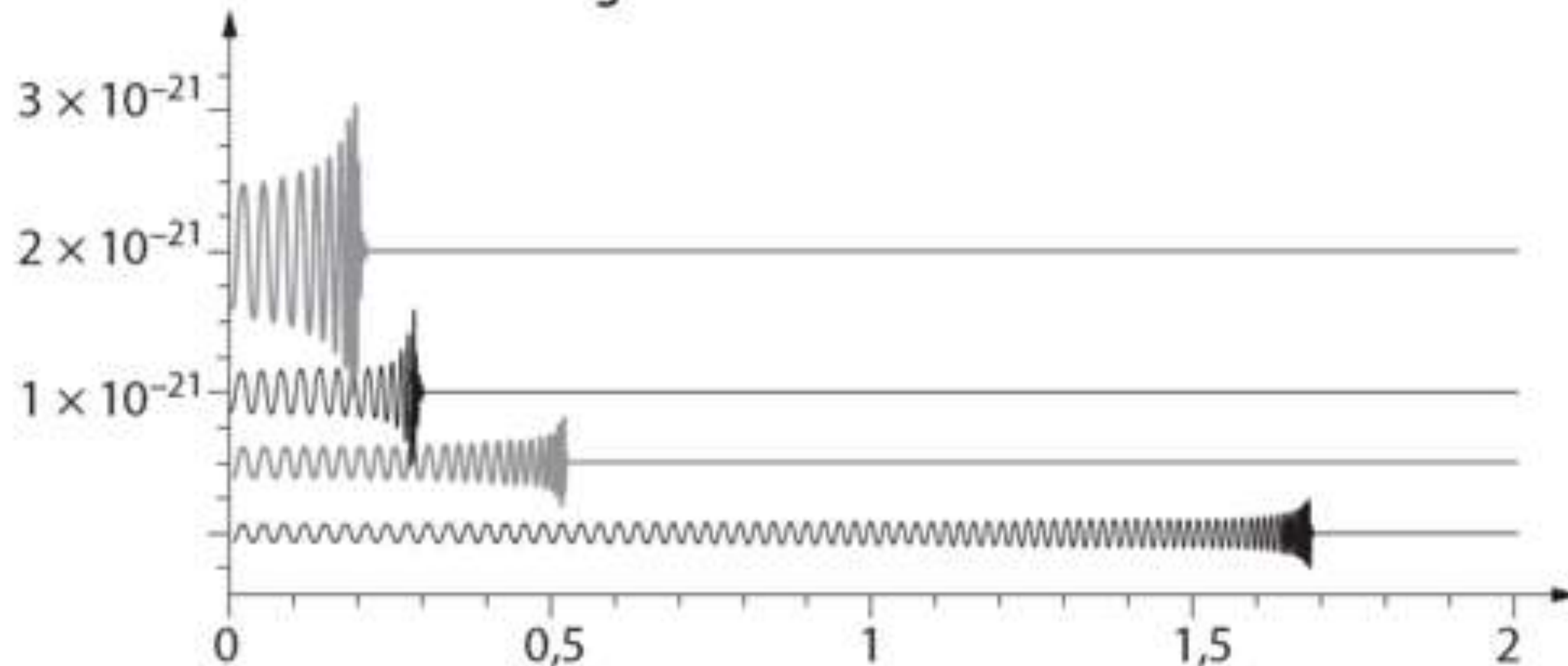


VIRGO (près de Pise) (et LIGO...)



Quatre premiers événements détectés par la collaboration LIGO-VIRGO

Déformation relative de la géométrie



Signaux enregistrés par les détecteurs d'ondes gravitationnelles
en fonction du temps (en seconde)

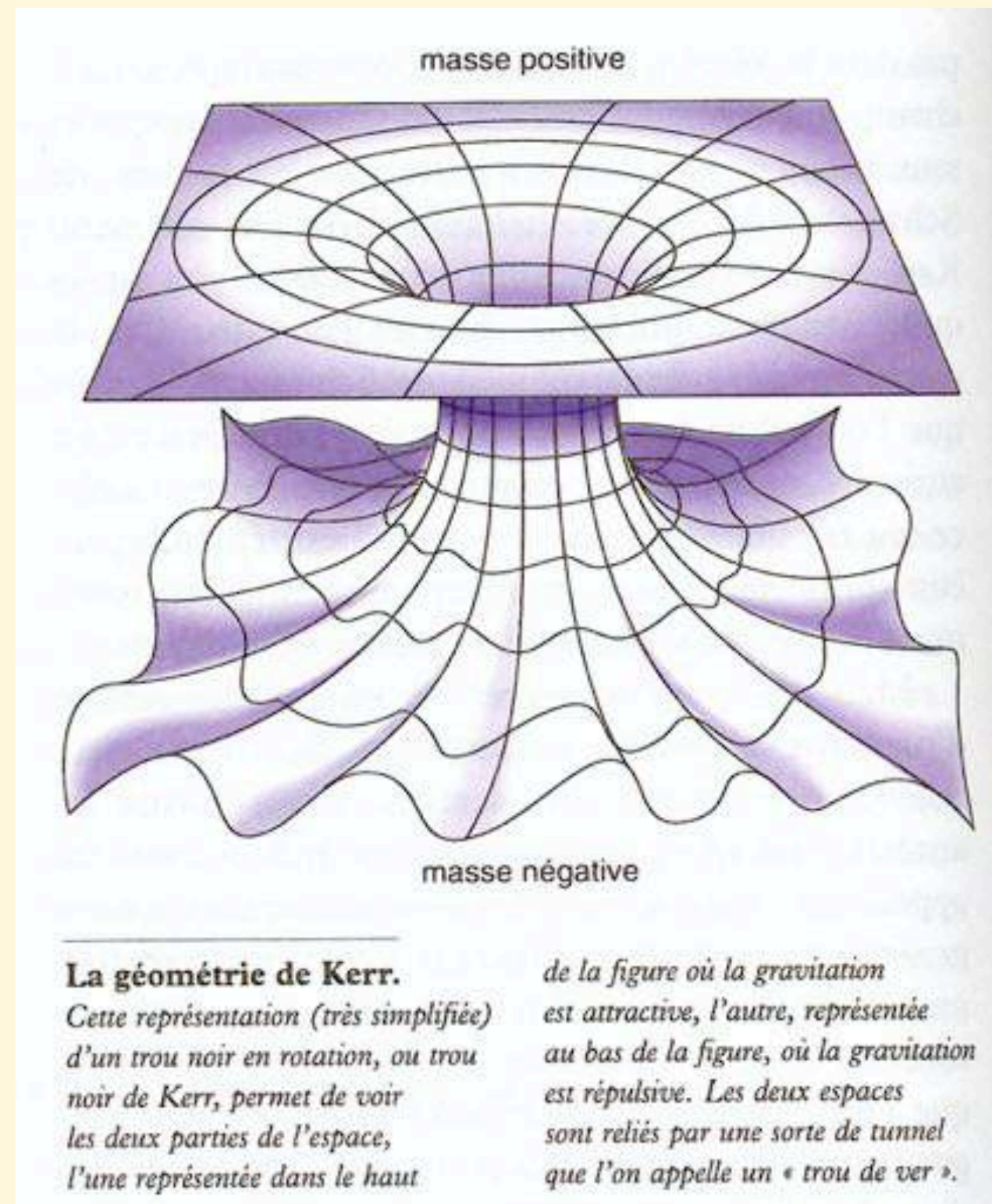
Détecter une variation inférieure à la taille d'un atome
sur la distance Terre-Soleil !

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, plus réalistes : début des années 1960 (Roy Kerr et Ezra Newman)

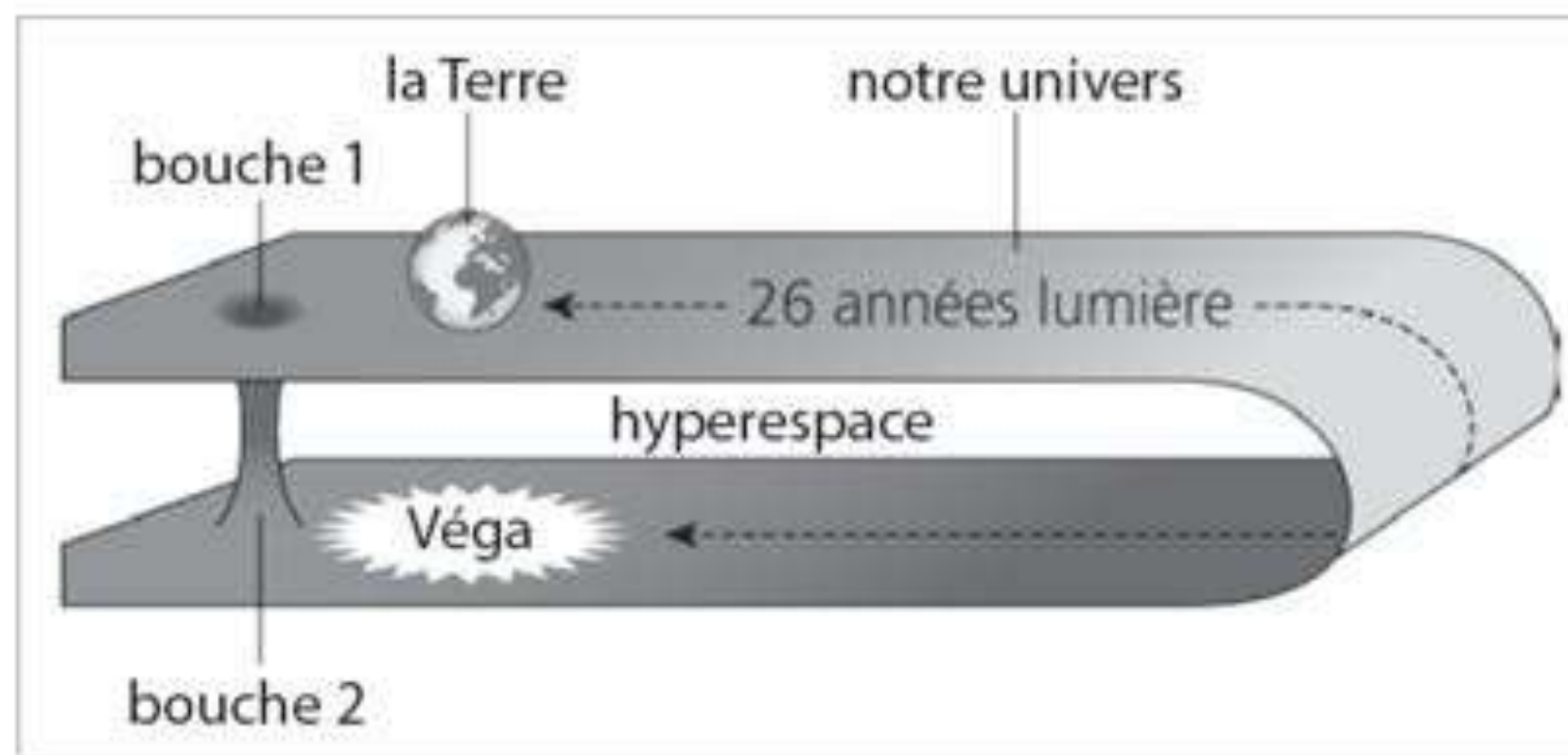
Des trous de ver qui ressemblent fort à des particules (Carter 1966, 1968)

- 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** ?



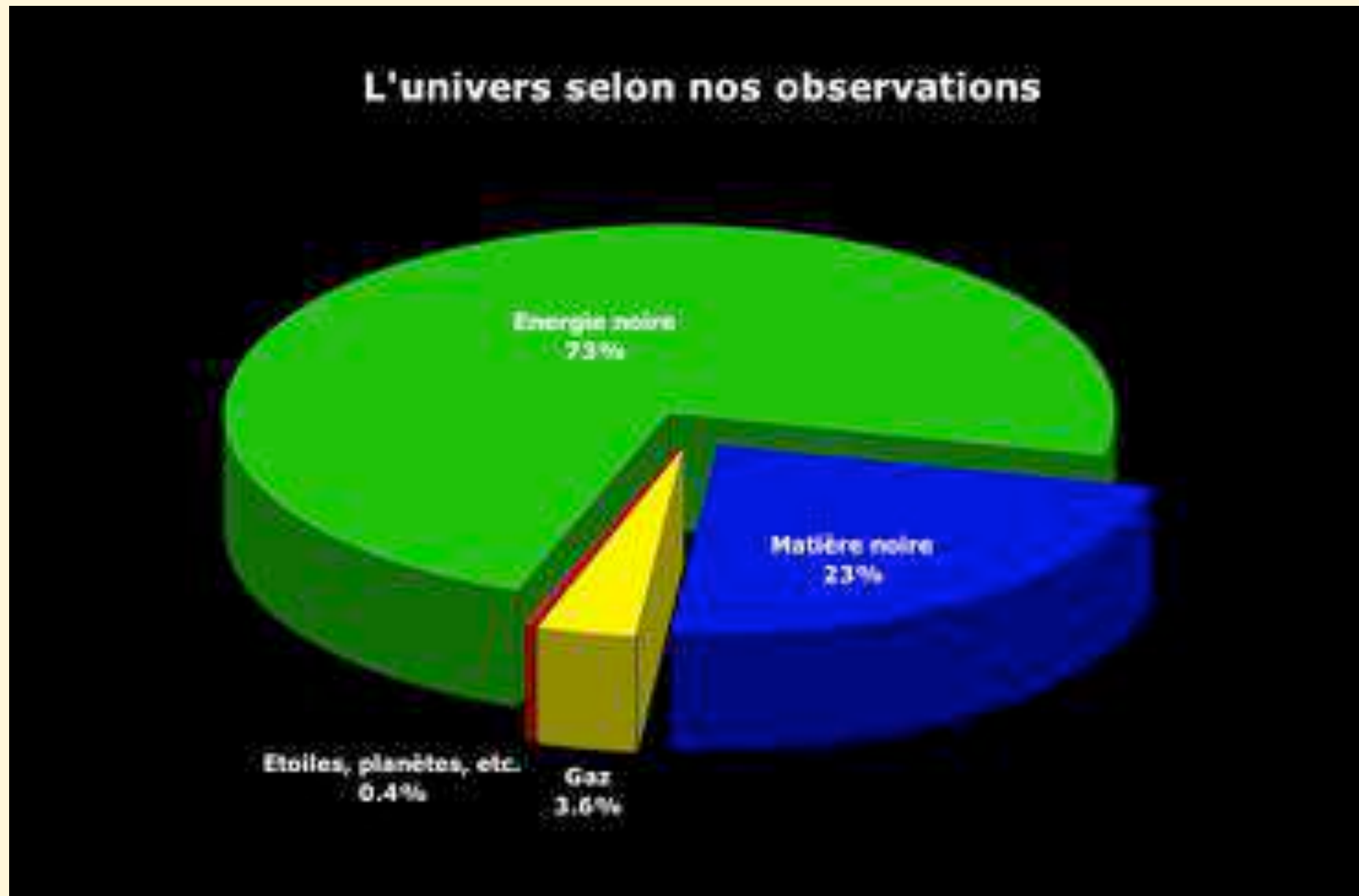
Trous de ver

- 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 »

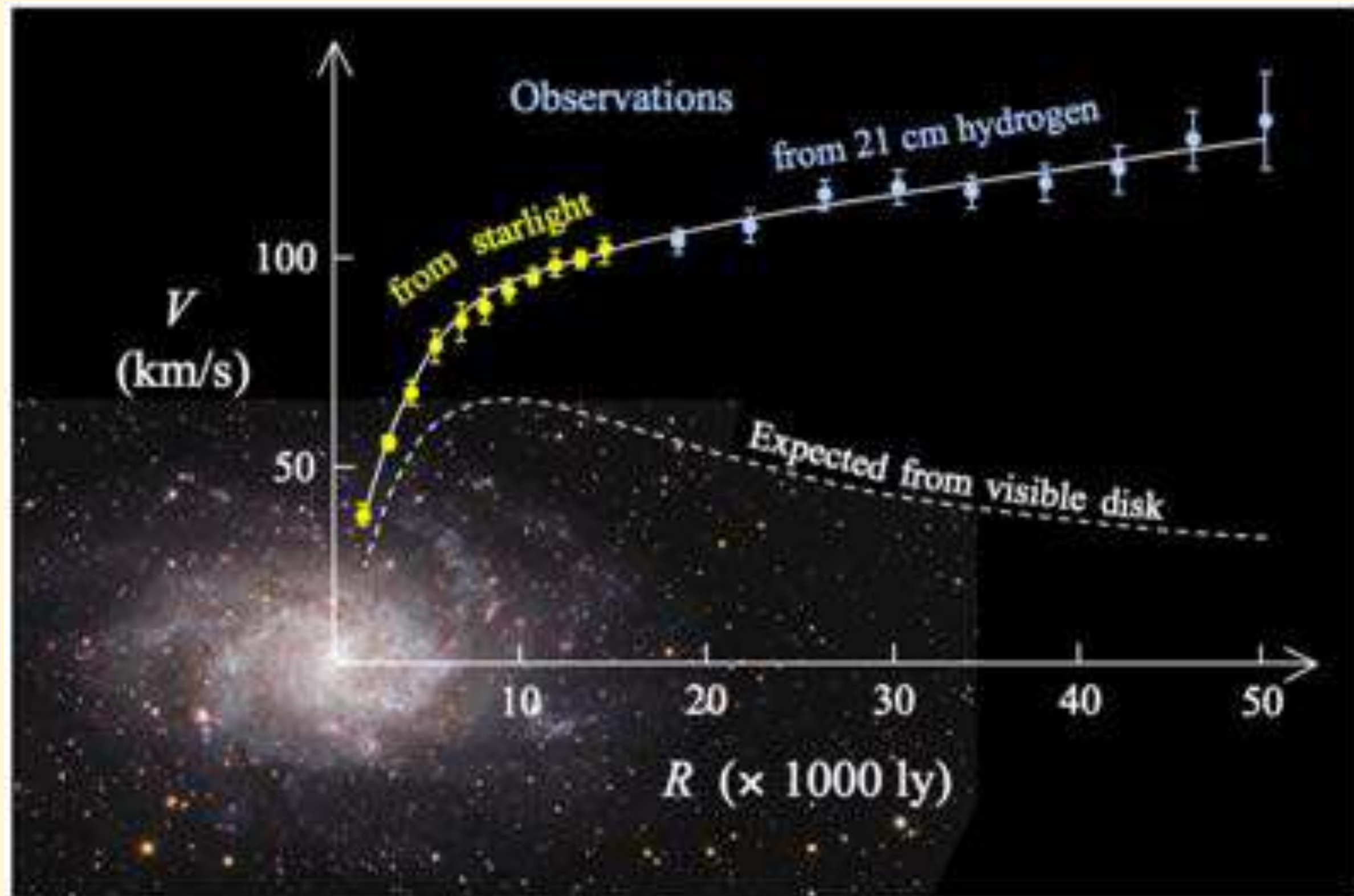


Un trou de ver est une porte dans l'espace-temps permettant d'accéder presque instantanément, pour l'observateur qui le traverse, à une autre zone de l'espace-temps - permettant par exemple d'accéder de la Terre à Véga, située à 26 années-lumière de nous.

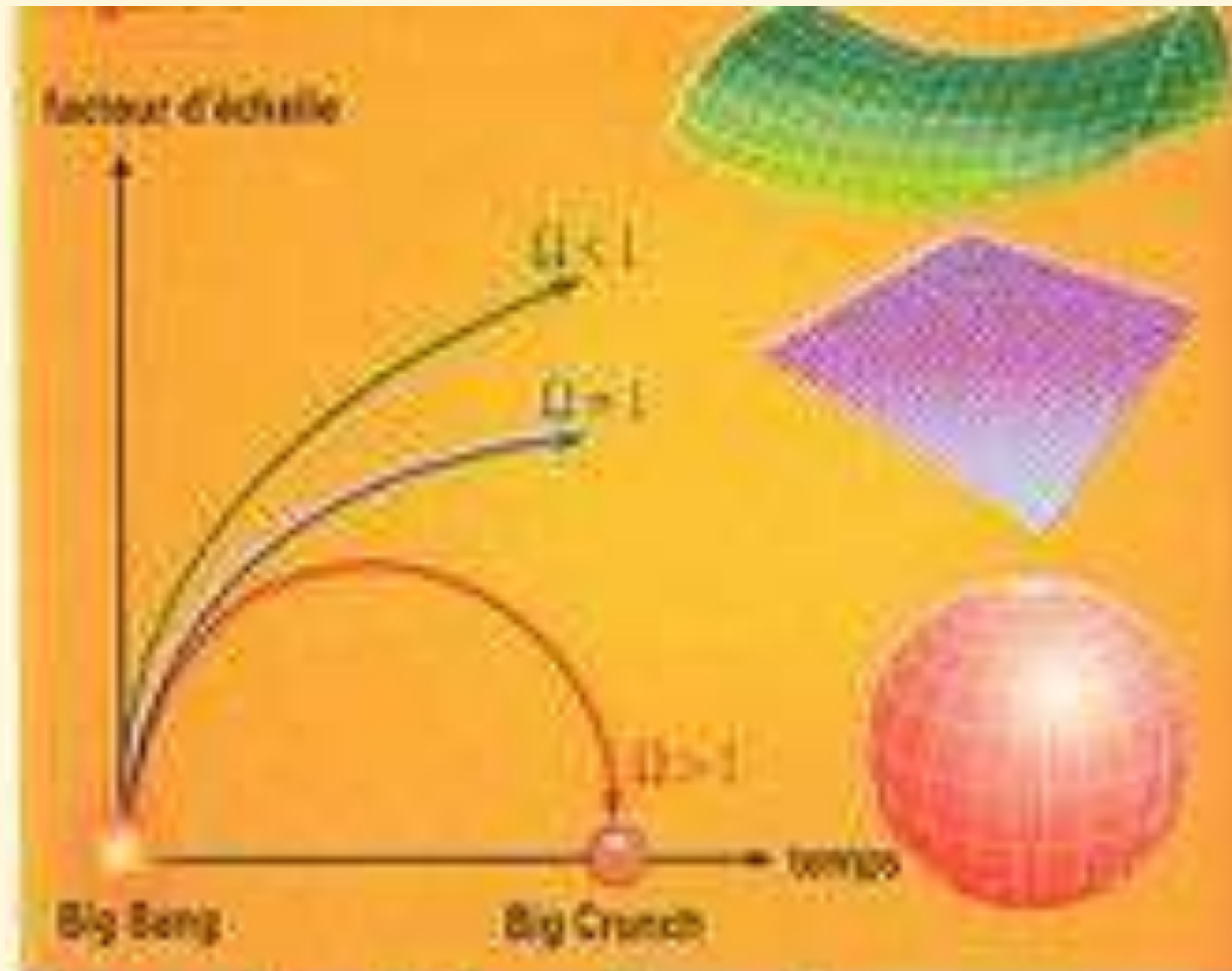
Vie de l'Univers : une très étrange composition...



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



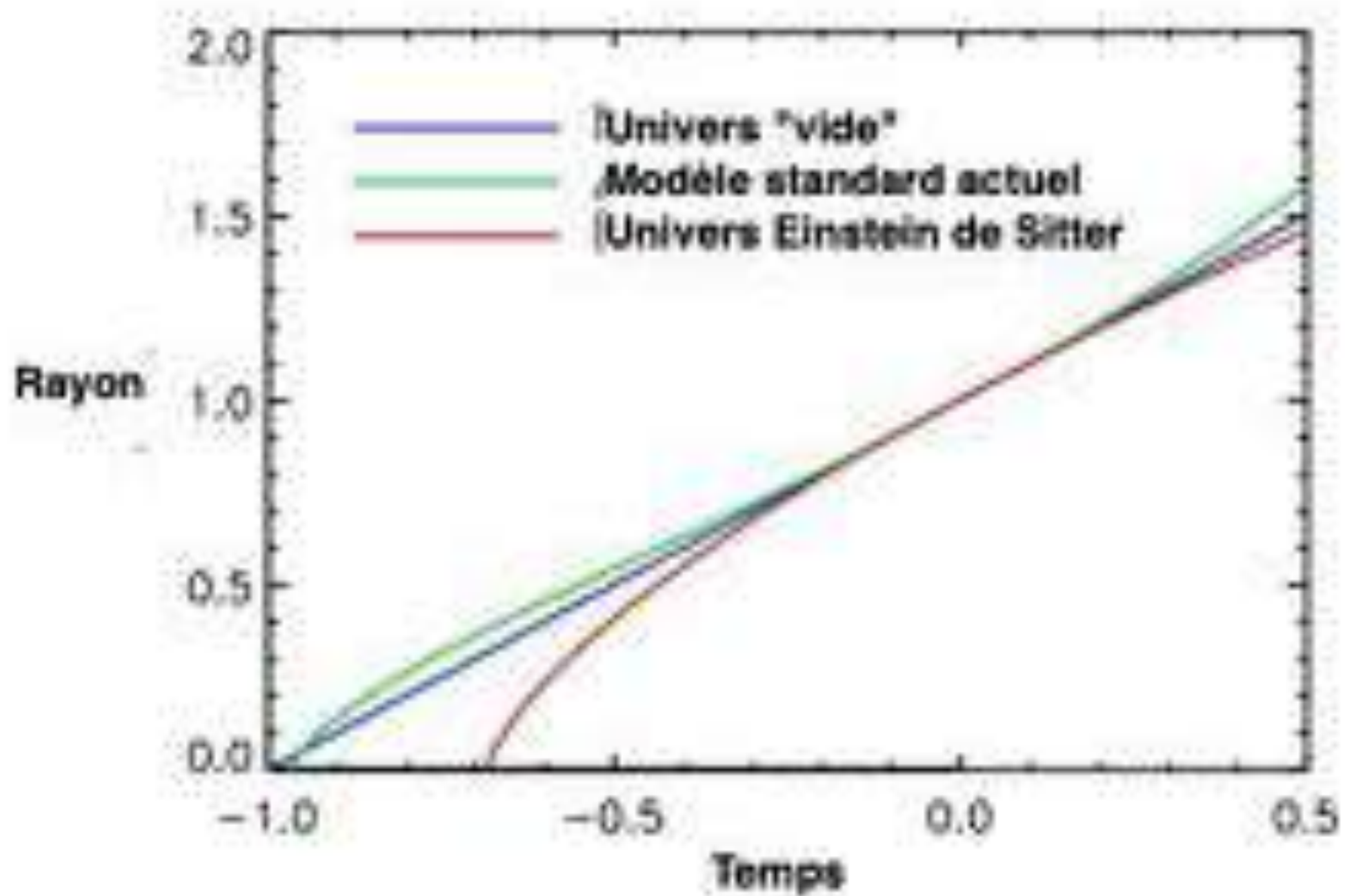
Géométrie de notre univers



Ouvert, plat ou fermé

Selon la valeur du rapport de la densité de l'Univers à sa densité critique (Ω), la géométrie et l'évolution de l'Univers seront différentes. Pour $\Omega < 1$ et $\Omega = 1$, l'Univers est infini et son expansion éternelle. Pour $\Omega > 1$, il est fermé et finira par se recontracter dans un Big Crunch.

Géométrie de notre univers

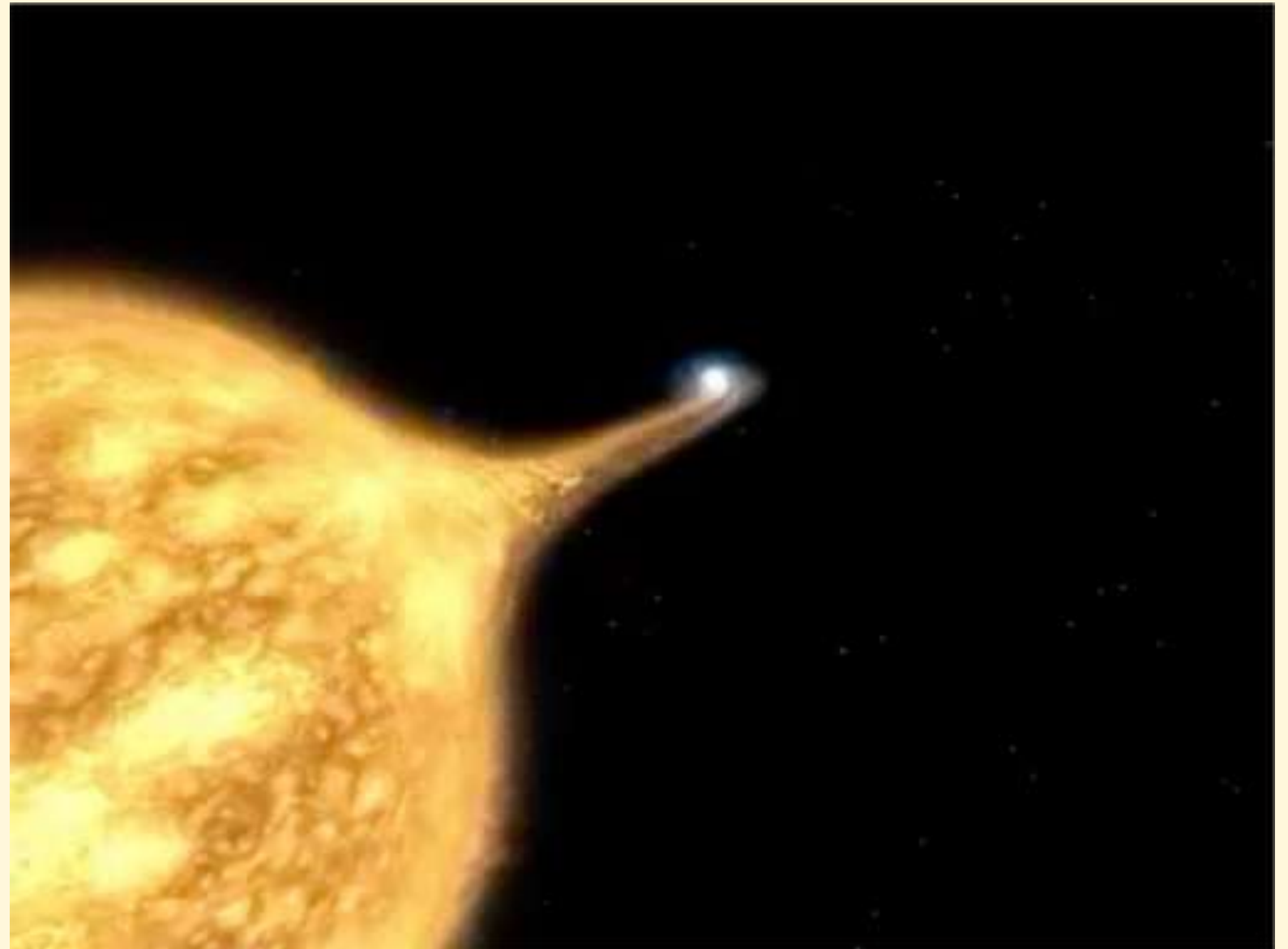


Les supernovae SN Ia : des chandelles (assez) standard

Les supernovae sont des explosions d'étoiles extrêmement violentes.

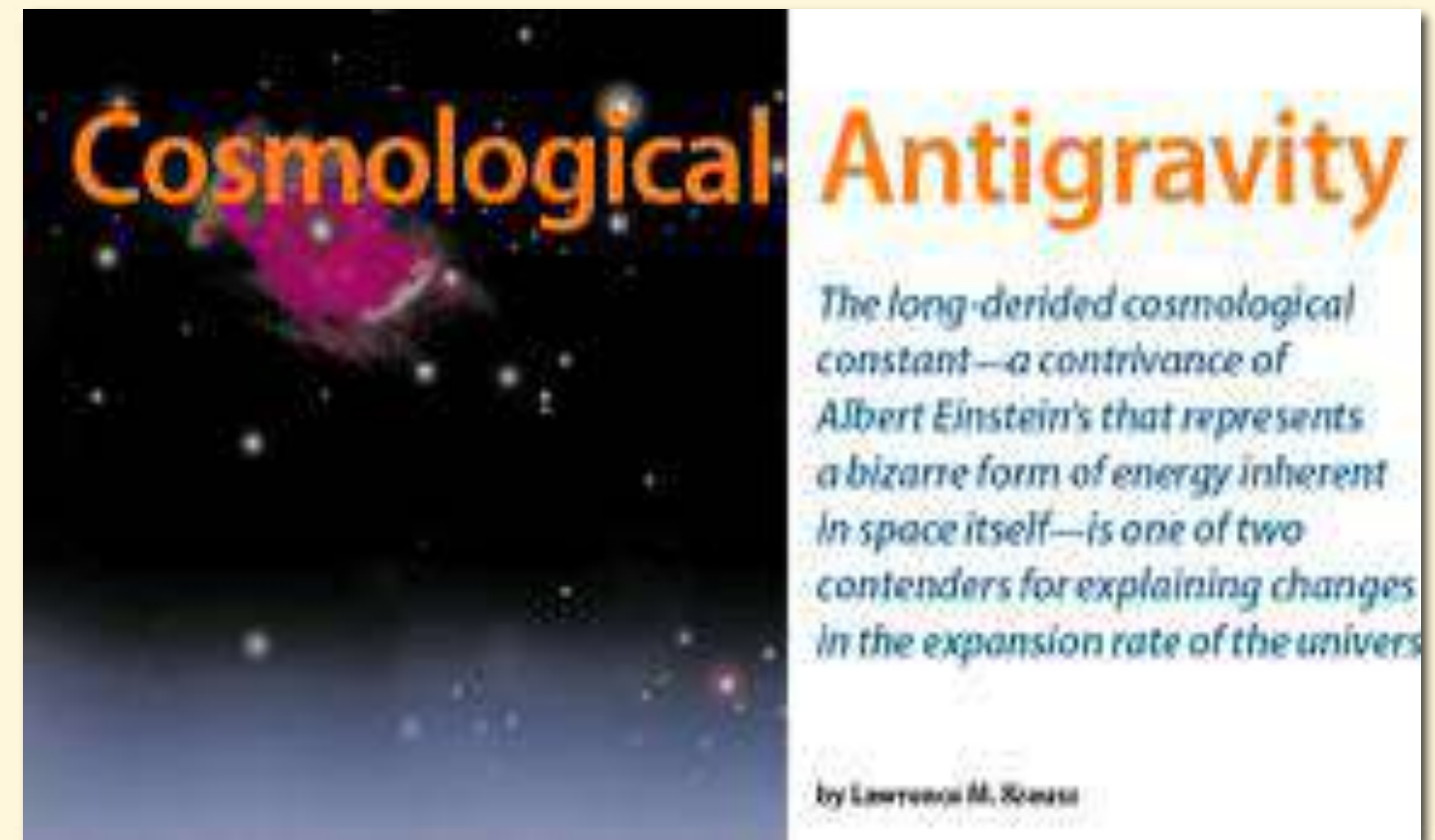
Les supernovae de **type Ia** (cf. ci-contre) ont une luminosité très reproductible.

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

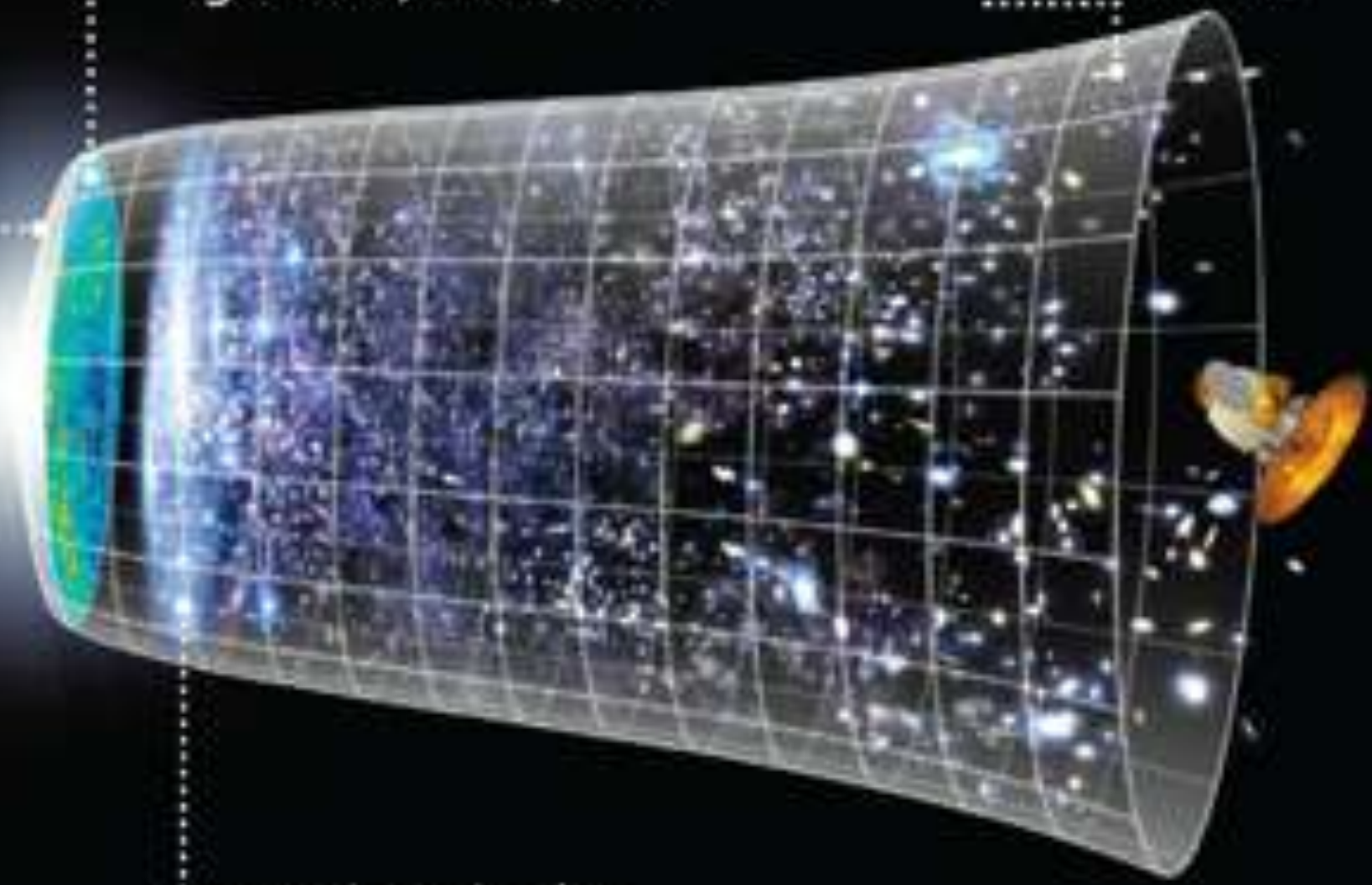
• Émission du fond diffus cosmologique [377 000 ans]

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

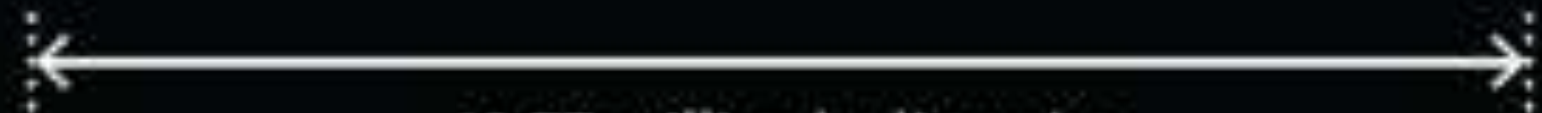
• Accélération de l'expansion de l'Univers

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 ?



Photo CERN

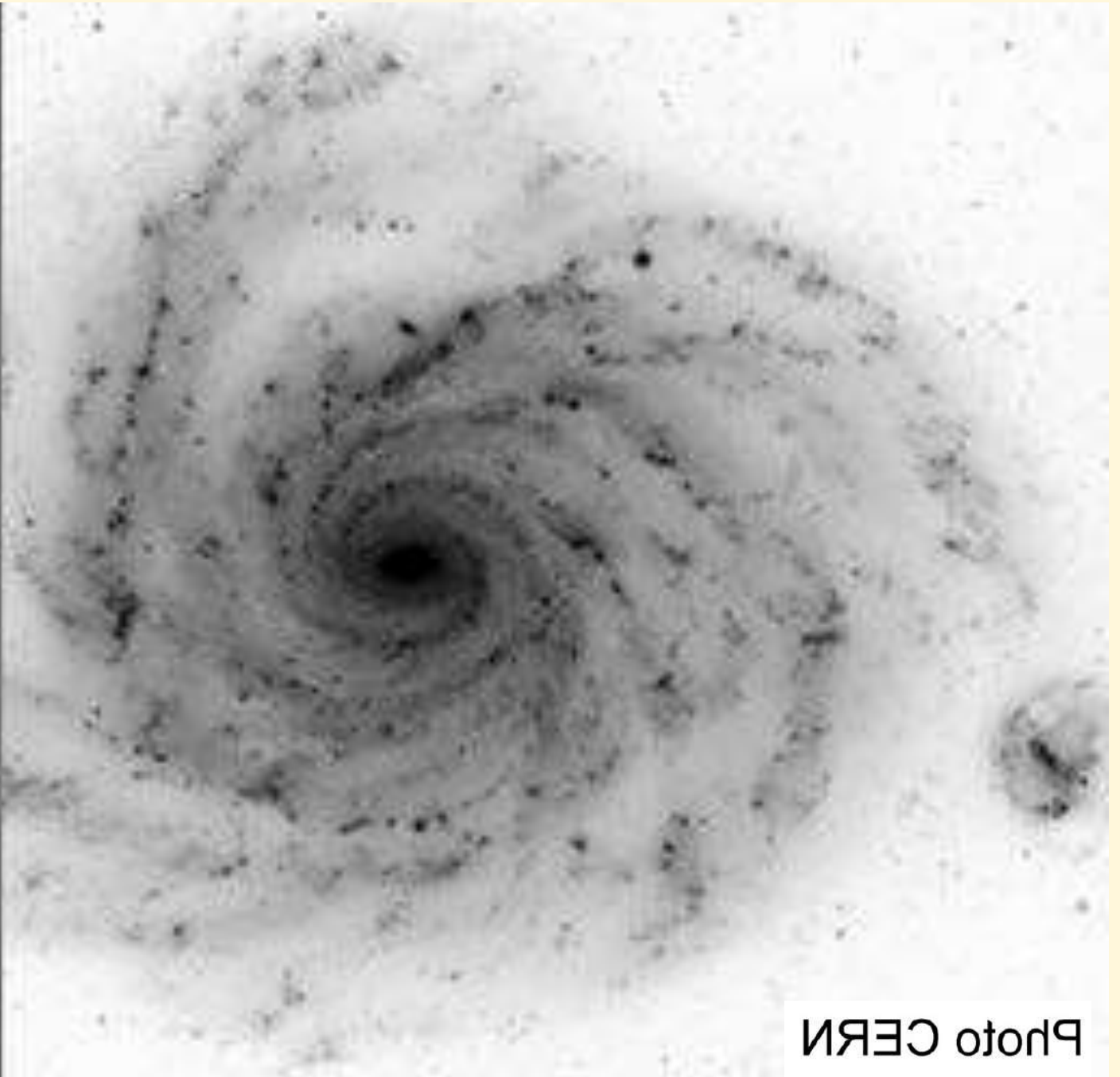


Photo CERN

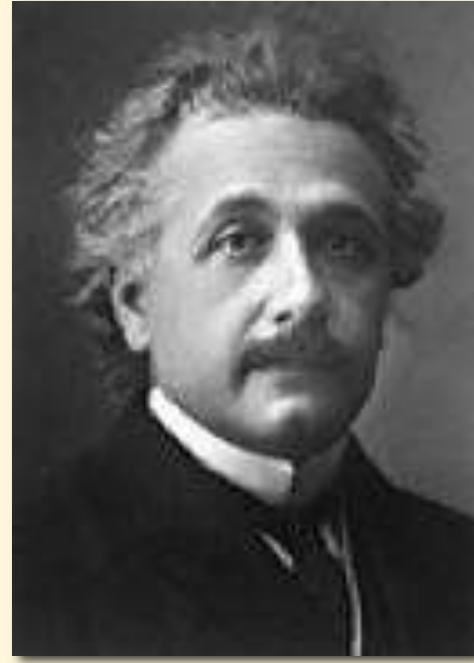
Petite histoire de l'antimatière



Maxwell

Électromagnétisme

électron



1905 : Einstein

Relativité restreinte

relativiste



1926 : Schrödinger

Mécanique Quantique

avec spin



1929 : Dirac

Problème...

L'équation de Dirac a 2 solutions !

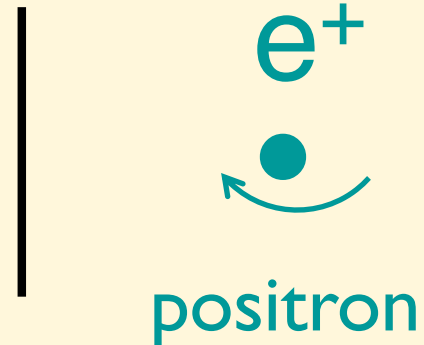
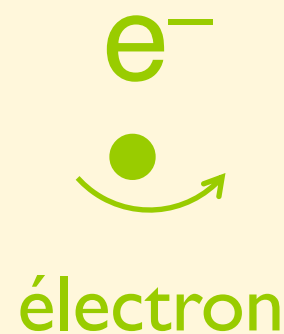
L'une d'énergie positive, l'autre d'énergie négative

Que représente la deuxième solution ?

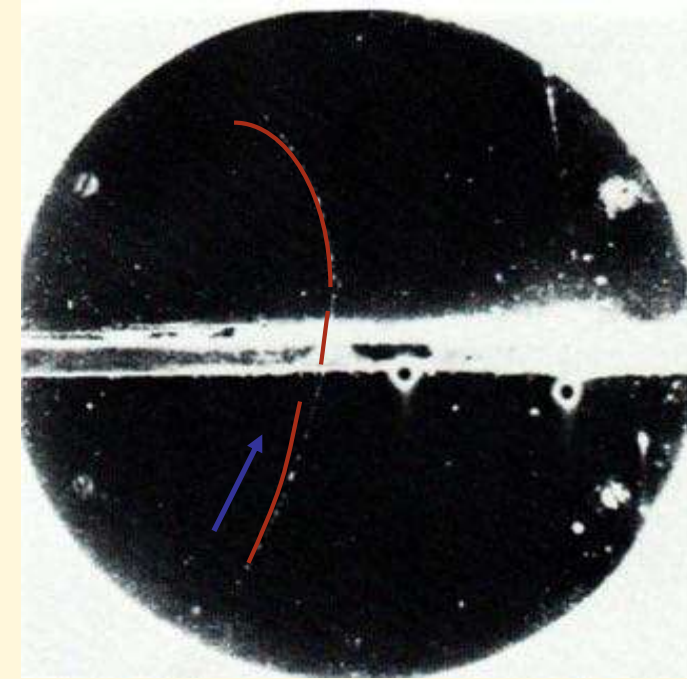
- Rien ?
- Électron d'énergie négative ...
- Une particule de charge +1 ???
- Le proton ? Mais sa masse est 2000 fois plus grande. Weyl : $m^+ = m^-$



Dirac invente
l'antiélectron
en 1930



1932 : Anderson découvre le positron
dans les rayons cosmiques



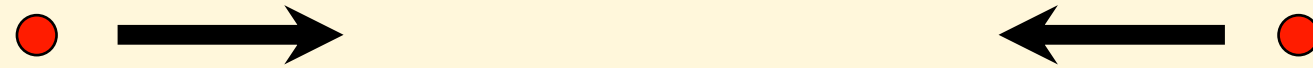
Plomb

Les univers matière-antimatière sont-ils possibles ?

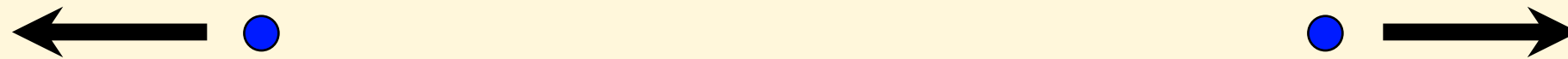
- Étudiés dans les années 1960 par le groupe Roland Omnès, étude reprise circa 1990 par de Rujula, Glashow, Cohen
- Étude de poches d'antimatière : 1975-1995
- Des univers symétriques matière-antimatière sont impossibles car...
- Le fond à 2,7 degrés en porterait les cicatrices (mais dépend de la taille des domaines)
- Mais surtout, rayonnement gamma d'annihilation quand l'univers devient transparent : > plusieurs milliards d'années-lumière pour les domaines matière ou antimatière...
- 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)

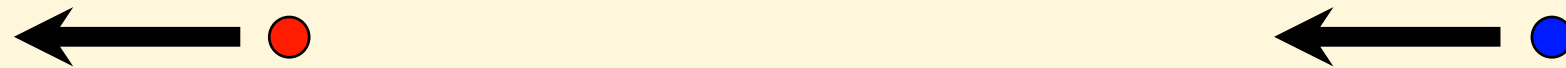
Deux masses positives s'attirent



Deux masses négatives se repoussent



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



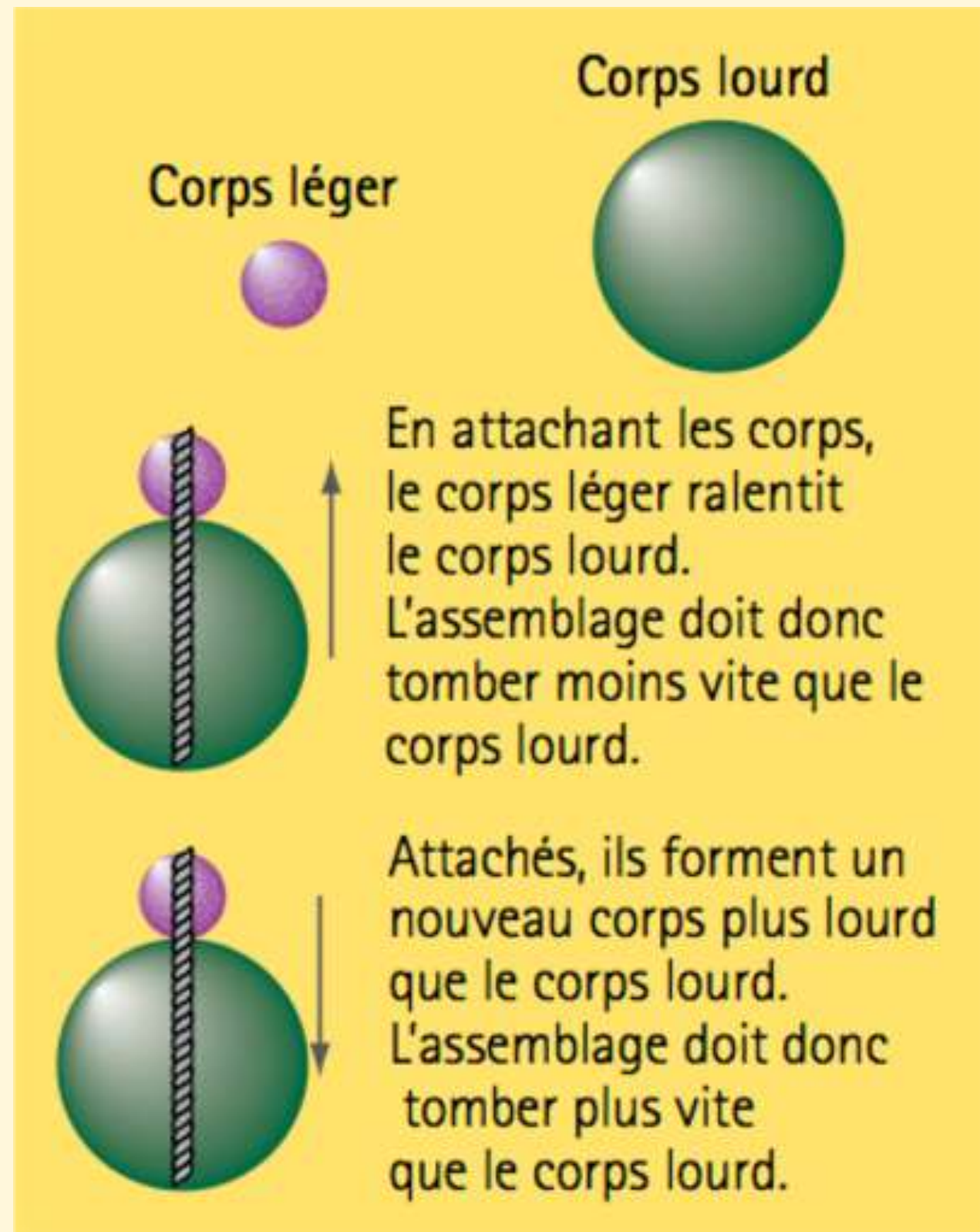
● Particule de masse positive

● Particule de masse négative

Développement de masse négative et gravité r

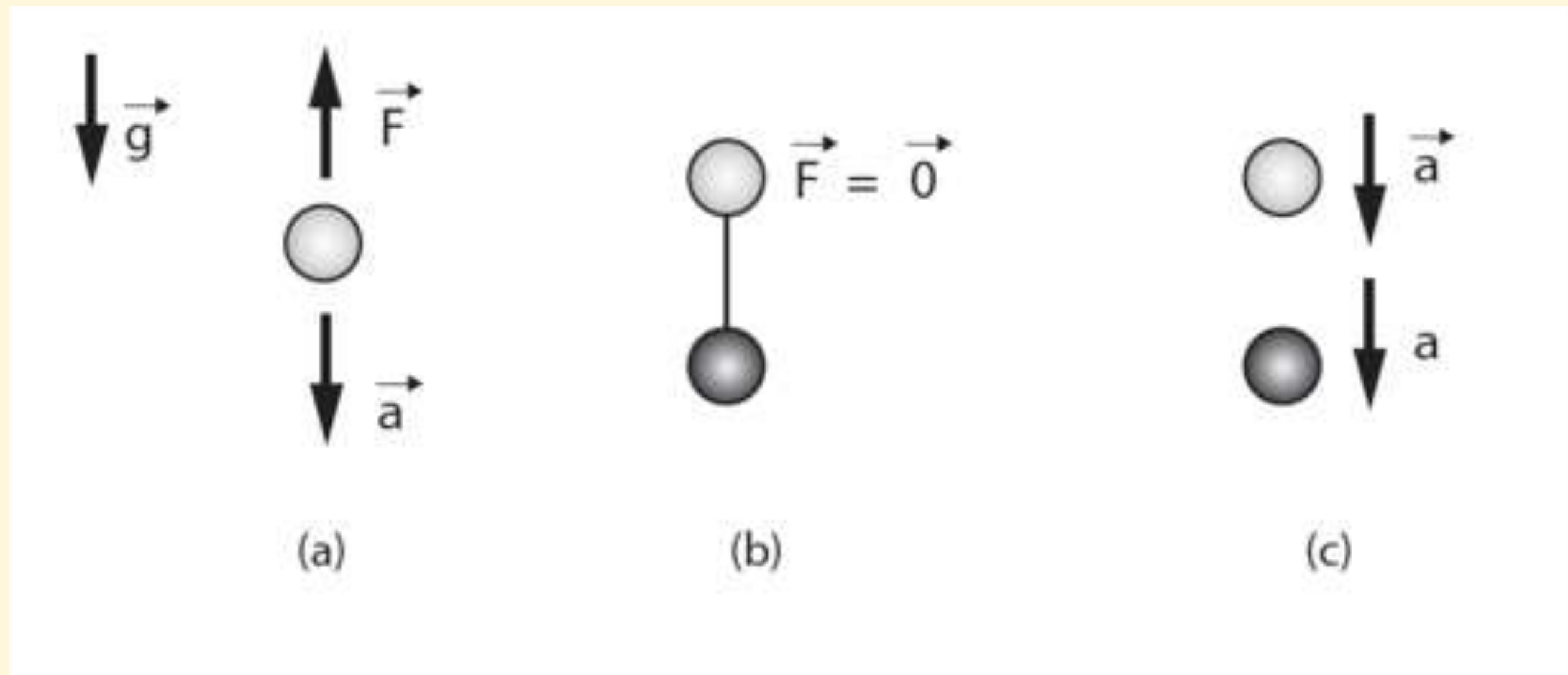
- Philip Morrison (1958) : instabilité
- Ed Witten, Richard Schoen et Shing-Tung Yau (1979), Hawking : les masses négatives sont impossibles
- B. Carter (1968) : espace-temps « vicieux », car permet de remonter en arrière dans le temps
- 1998 : l'univers contient \approx **70%** de contenu répulsif
-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

Chute universelle des corps : le raisonnement de Galilée



Mais le raisonnement de Galilée, 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) ?

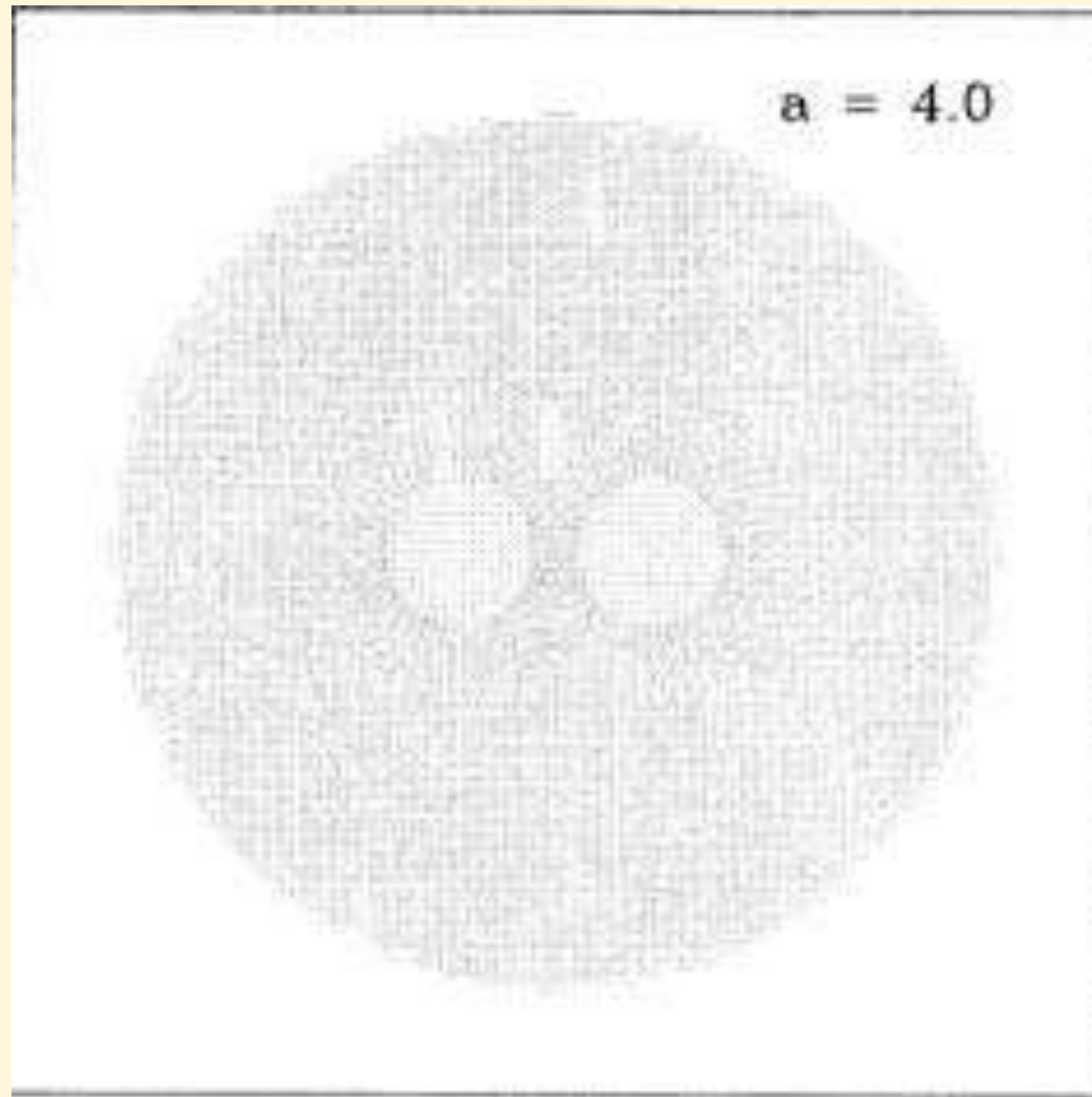


Un système lié $+m -m$ se met en lévitation (b) et viole en ce sens à 100% le principe d'équivalence...

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.)

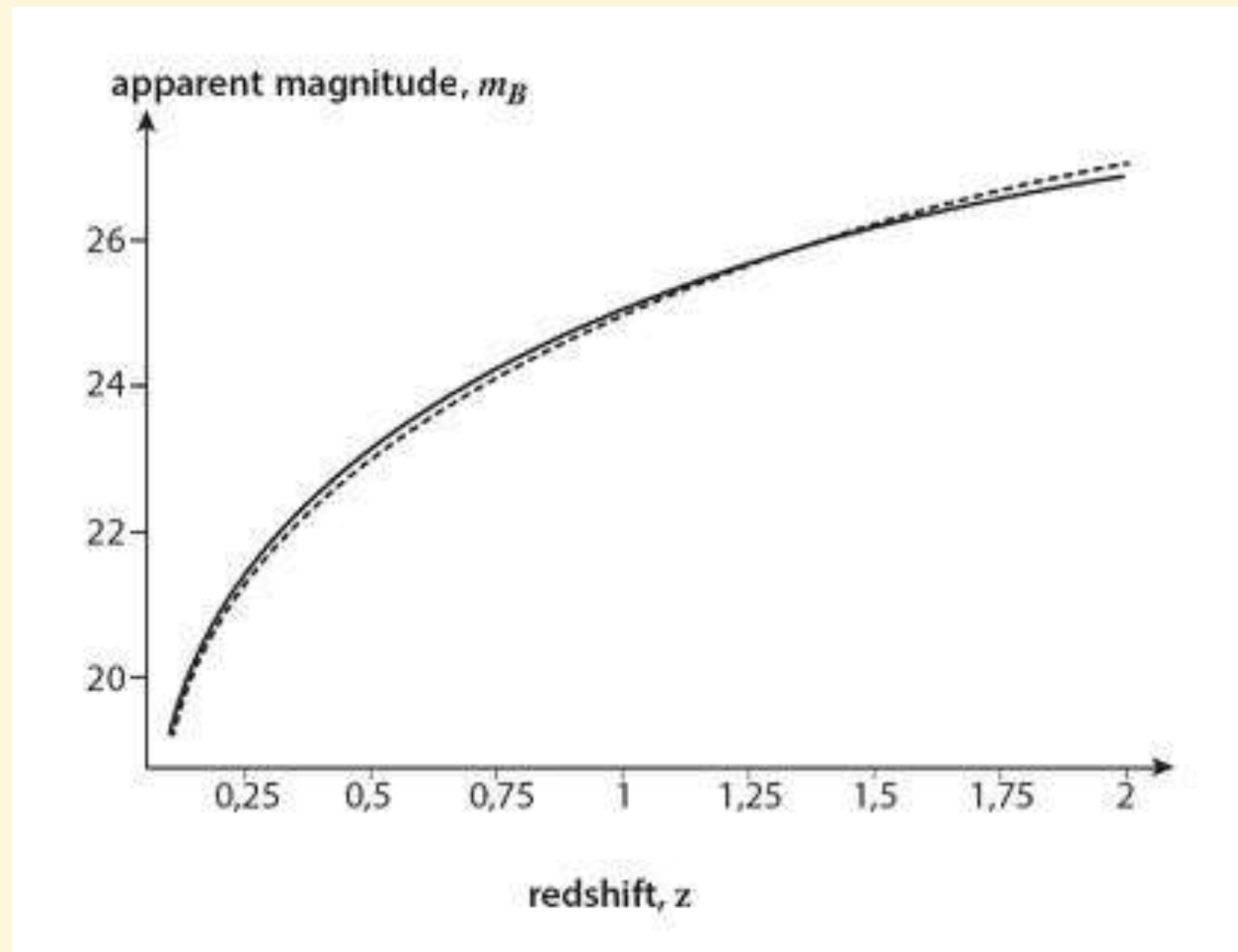


L'univers de Dirac-Milne

- Univers matière-antimatière, autant de matière que d'antimatière, antimatière « masse négative »
- Cet univers 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

L'univers de Dirac-Milne

- Luminosité fonction de la distance des supernovae
- Pratiquement identique au modèle cosmologique standard



Peser l'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

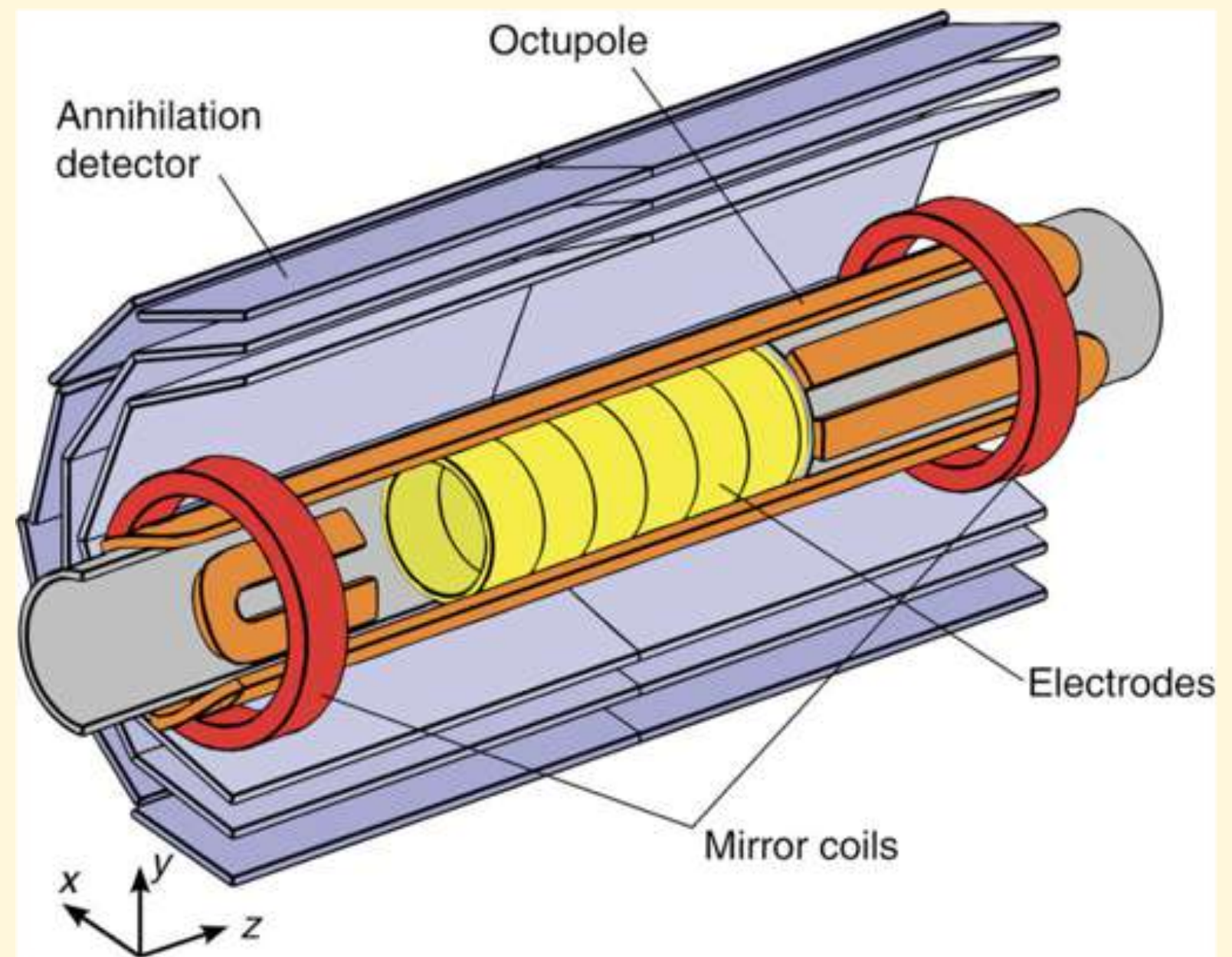


Trois expériences au CERN...

- 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 $\approx \mathbf{65 \times}$ antigravité

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



Grandes étapes de l'histoire de l'Univers

- Univers chaud \approx plasma ($< 380\,000$ ans)
- Formation des structures : amas de galaxies, galaxies, premières étoiles... : premiers centaines millions ans
- 14 milliards d'années : aujourd'hui
- Si le modèle standard de la cosmologie est correct : début d'une période d'accélération de l'expansion, les galaxies vont « bientôt » se retrouver isolées dans l'Univers

Futur lointain de l'univers

- 10^{14} années: toutes étoiles ou presque auront épuisé leur combustible
- 10^{17} - 10^{18} ans: éjection des planètes et évaporation des galaxies
- Désintégration proton (et tous noyaux): 10^{35} ans (?)
- Electrons et positrons: positronium + annihilation 10^{70} ans
- Évaporation des trous noirs supermassifs: 10^{100} ans
- Il ne reste alors plus rien à consommer dans l'univers...

Conclusions

- La gravitation est un domaine de recherche très actif, avec l'irruption de mesures de précision en cosmologie
- L'énergie noire, gravité répulsive et composant très important de notre univers (70% dans le modèle standard) n'est pas comprise actuellement
- Notre univers a toute les chances de rester en expansion (par opposition à se ré-effondrer)

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 et la matière noire, en fait inexistantes
- Dès le redémarrage du CERN au printemps 2021, l'expérience ALPHA-g devrait tester si l'antimatière « tombe vers le haut »

Références

- **G. Chardin, « L'insoutenable gravité de l'univers », Editions Le Pommier, Collection Idées, Mars 2018.**
- **G. Chardin, « L'antimatière tombe-t-elle vers le haut ? », Pour la Science, Avril 2019.**