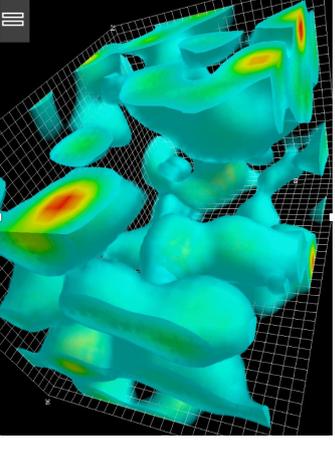


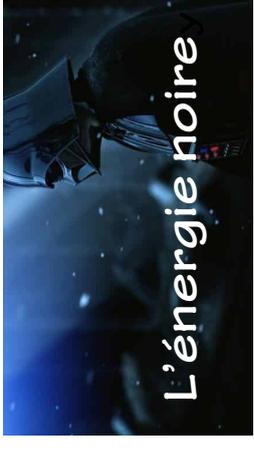
Selon la mécanique quantique, un vide n'est pas l'absence de tout, mais plutôt un grouillement permanent de particules et d'antiparticules, apparaissant et disparaissant continuellement. Le vide doit donc avoir une densité non nulle.

8

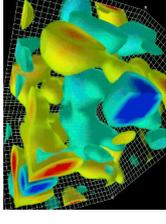


<https://physicscommunication.ie/holting-matters-how-the-study-of-vacuum-energy-is-proving-catastrophic>  
Aller sur ce site pour voir l'animation

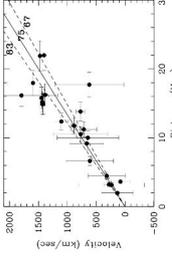
## L'Univers dans ma poche



Alain Blanchard  
Université Paul Sabatier,  
Toulouse



## Quiz



Laquelle de ces images montre :

- Différentes géométries de l'espace
- Une représentation du vide quantique
- Le diagramme de Hubble



Réponses au verso

## Le vide quantique



Trois des plus grands physiciens du XXe siècle ont examiné la question du **vide quantique**, notant la valeur incroyablement élevée prédite pour la densité du vide quantique par rapport à celle déduite des observations. La valeur quantique est environ  $10^{120}$  fois\* supérieure. Ce chiffre est souvent présenté comme le calcul d'ordre de grandeur le plus erroné de toute la physique.

Encore une question qui aurait pu rester dans le placard des curiosités inutiles en physique.

\*  $10^{120} = (10 \times 10 \times 10) \dots (10) 120$  fois

9

## L'énergie sombre

La constante cosmologique introduite par Einstein est très artificielle d'un point de vue théorique. La valeur du vide quantique prédite par la théorie quantique des champs dépasse la valeur déduite des observations d'au moins 120 ordres de grandeur. De nombreuses explications alternatives à l'origine de l'expansion accélérée furent proposées, cette origine fut appelée « **énergie noire** ». La quintessence est la forme la plus simple d'énergie noire : c'est une composante hypothétique qui interagit avec le reste de l'Univers uniquement par la gravité. Sa densité peut varier avec le temps, mais elle peut aussi se comporter comme une constante cosmologique, selon le potentiel qui régit son évolution. En 2024, la collaboration DESI affirme avoir trouvé des indices d'une telle énergie noire évolutive. **13**

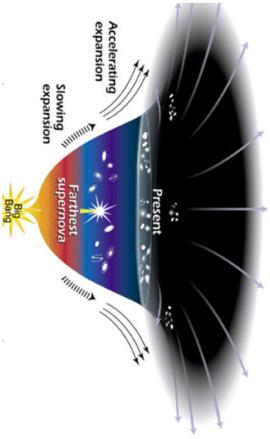


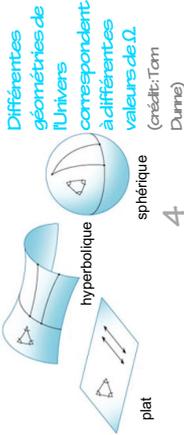
Diagramme représentant l'expansion accélérée de l'Univers.

Credit : Conception Alex Mittelmann, Coldcreation

Termer d'expliquer l'expansion accélérée de l'Univers a conduit à une grande diversité de théories. Il va sans dire que la description détaillée de ces théories est mathématiquement délicate.

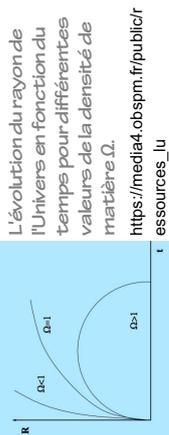
Une autre solution consiste à modifier la théorie de la gravité d'Einstein. Il existe de nombreuses façons d'y parvenir, mais il est difficile de le faire sans violer une ou plusieurs des nombreuses prédictions réussies de la relativité générale. Enfin, les deux approches peuvent être combinées de différentes manières. **12**

12



Différentes géométries de l'Univers correspondent à différentes valeurs de  $\Omega$ . (crédit: Tom Dunne)

4



L'évolution du rayon de l'Univers en fonction du temps pour différentes valeurs de la densité de matière  $\Omega$ .  
[https://media4.obspm.fr/pub/lu/ressources\\_lu](https://media4.obspm.fr/pub/lu/ressources_lu)

La vitesse des galaxies due à l'expansion est connue grâce aux observations, mais on ne connaît pas la force de la gravitation de la matière, contrôlée par sa densité. Si la densité est suffisamment élevée ( $\Omega > 1$ ), l'expansion s'arrêtera et l'Univers se contractera. Si la densité est trop faible ( $\Omega < 1$ ), la force gravitationnelle n'est pas assez forte et l'expansion se poursuivra indéfiniment. Le cas limite entre ces deux possibilités se produit lorsque la densité est égale à la densité critique ( $\Omega = 1$ ).

## Le destin de l'Univers



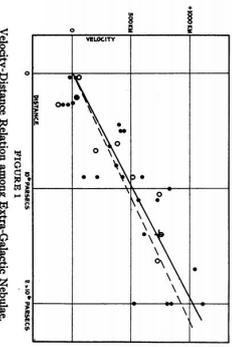
Albert Einstein

C'est la théorie de la relativité générale, publiée par Albert Einstein en 1915, qui décrit le mieux l'expansion. Cette théorie nous dit que la géométrie de l'espace est liée à la densité de l'Univers. Einstein n'était pas satisfait de la première version de sa théorie, car elle était incompatible avec un Univers statique (c'est-à-dire pas en expansion). Il a donc introduit en 1917 un **nouveau** terme, la **constante cosmologique**  $\Lambda$ . Ce devait être le début d'une saga qui, plus d'un siècle plus tard, est peut-être à son apogée... **5**

5

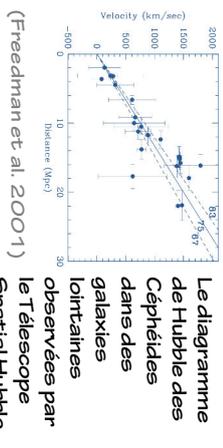
La valeur de  $H_0$ , la constante de Hubble, a d'abord été estimée à environ 500 km/s par Mpc, puis à environ 1 000 km/s par Mpc au début des années 1960. Les estimations actuelles sont d'environ 73 km/s par Mpc.

1 Mpc équivaut à 3 millions d'années-lumière



### La nature de Lambda

La découverte de l'expansion de l'Univers conduisit à ce que la constante cosmologique soit reléguée au placard des curiosités inutilisées en physique, avec l'assentiment d'Einstein... Mais en 1931, Lemaître fit une remarque cruciale qui passa inaperçue à l'époque : la constante cosmologique, auparavant considérée comme un terme supplémentaire dans la partie géométrique des équations d'Einstein, peut tout aussi bien être attribuée à la pression et à la densité d'un fluide, ce fluide étant le vide de l'espace !

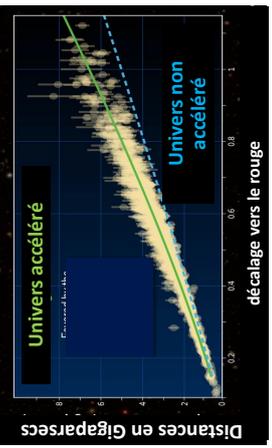


Une représentation du vide quantique

## Réponses

Le diagramme de Hubble des Céphéïdes dans des galaxies lointaines observées par le Télescope Spatial Hubble.

Le diagramme de Hubble des supernovae



Adapté de la collaboration NOIRLab DES. Les supernovae sélectionnées pour cette étude étaient de type Ia. Les supernovae de ce type ont une luminosité très régulière, ce qui implique qu'elles peuvent être utilisées de manière fiable pour déterminer les distances. La version moderne du diagramme de Hubble des supernovae de type Ia a montré que l'expansion s'accélére. Cette découverte a valu le prix Nobel de physique 2011 à Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt et Adam G. Riess. Ce résultat est tout à fait étonnant : il signifie qu'à l'échelle de l'Univers, la gravitation agit comme une force répulsive.

Traduction: Graczyka Stefańska  
TUMIP Creative Commons

Pour en savoir plus sur cette collection et sur les sujets présentés dans ce mini-livre, consultez <http://www.tumip.org>

L'image de couverture: Darth Vader de la série Star Wars est le personnage qui est « passé du côté obscur de la Force ». L'Univers lui-même est soumis à une force inconnue dont l'origine mystérieuse fut appelée « Énergie Noire ».

Image de couverture: Ce mini-livre a été écrit en 2024 par Alain Blanchard de l'Université Paul Sabatier (Toulouse, France) et révisé par Stan Kurtz de l'IKyA (Mexique).

### L'expansion accélérée

En 1998, deux équipes étudiant le diagramme de Hubble des supernovae lointaines ont fait une découverte qui a révolutionné la cosmologie et la physique fondamentale. Ces supernovae sont si lointaines que la lumière que nous recevons d'elles a été émise lorsque l'Univers était beaucoup plus jeune. On peut ainsi comparer la vitesse d'expansion de l'Univers à cette époque avec la vitesse d'expansion actuelle. Dans un Univers dominé par la matière, la vitesse d'expansion diminuerait. Le diagramme de Hubble des supernovae a révélé que la vitesse d'expansion de l'Univers augmente.

### La loi de Hubble-Lemaître

Juste après le Grand Débat de 1925, qui a conclu qu'il existe des galaxies en dehors de la nôtre, Edwin Hubble observa que les vitesses de récession des galaxies étaient proportionnelles à leurs distances. Georges Lemaître interpréta cela comme un effet de l'expansion de l'Univers.

L'expansion de l'Univers est un concept qui n'est pas trivial : si on fait abstraction des mouvements individuels qui accompagnent la structure de la Toile Cosmique (voir TUMIP 13), les galaxies s'éloignent les unes des autres avec une vitesse proportionnelle à leurs distances respectives. Ce qui régit cette vitesse, c'est la gravitation, comme quand on lance une pierre vers le haut : si la vitesse initiale est faible, la pierre monte puis retombe. Si la vitesse initiale est suffisamment élevée (en oubliant l'atmosphère terrestre), la pierre monte indéfiniment.



Albert Einstein et Georges Lemaître

En 1948, Georges Lemaître construisit le premier modèle cosmologique traitant de la phase initiale de l'Univers, appelé « atome primitif », l'ancêtre du Big Bang. Il avait remarqué qu'étant donné la vitesse d'expansion mesurée par Hubble, l'Univers serait plus jeune que l'âge de la Terre à moins de préconiser une constante cosmologique (C.C.). Cet argument ne persuada pas Einstein, qui abandonna la C.C. après la découverte de l'expansion. Avec la valeur de la constante de Hubble connue aujourd'hui, l'écart entre l'âge de l'Univers et celui de la Terre disparaît de toute façon.