

Histoire d'une science impossible

Le rôle des controverses philosophiques dans l'émergence et le développement de la cosmologie contemporaine.

Gauvain Leconte-Chevillard

SAF

30 septembre 2023

Cosmologie scientifique

Science de l'Univers (observable ?), c'est-à-dire du système physique qui englobe tous les autres systèmes physiques.

Cosmologie scientifique

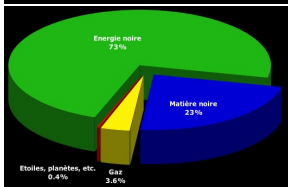
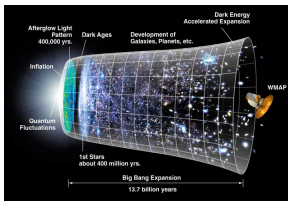
Science de l'Univers (observable ?), c'est-à-dire du système physique qui englobe tous les autres systèmes physiques.

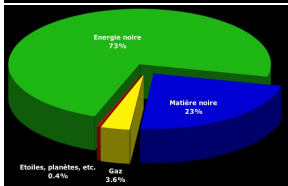
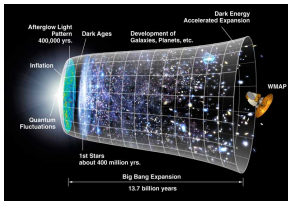
Spécificités de la cosmologie :

- ▶ Impossible de faire des expériences sur ce système physique qu'est l'Univers.
- ▶ Un seul exemplaire de ce système physique : pas de statistiques.
- ▶ Système physique dont nous faisons partie et qui ne peut être observé dans sa totalité.

Cosmologie semble être une science impossible d'un point de vue philosophique...

... et pourtant, incroyables progrès de la cosmologie relativiste en un siècle :





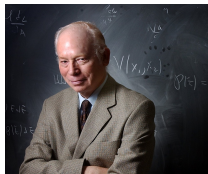
... et pourtant, incroyables progrès de la cosmologie relativiste en un siècle :

⇒ Univers en expansion

⇒ Âge et forme de l'Univers

⇒ Origine de l'Univers

⇒ Contenu de l'Univers



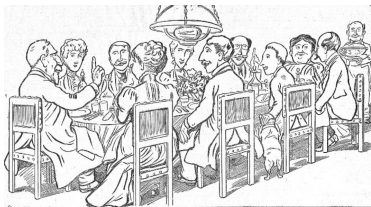
Une connaissance de la philosophie ne semble être d'aucune utilité aux physiciens.

Steven Weinberg, 1992, "Against Philosophy",
Dreams of a Final Theory



L'histoire et la philosophie des sciences est aussi utile aux scientifiques que l'ornithologie l'est aux oiseaux.

Richard Feynman (?)



Surtout ! Ne parlons pas de cosmologie !



Ils en ont parlé...

Mais ces progrès furent tout sauf un long fleuve tranquille !



Surtout ! Ne parlons pas de cosmologie !



Ils en ont parlé...

Mais ces progrès furent tout sauf un long fleuve tranquille !

- ▶ Controverse sur l'**expansion de l'Univers** dans les années 1920-1930



Surtout ! Ne parlons pas de cosmologie !



Ils en ont parlé...

Mais ces progrès furent tout sauf un long fleuve tranquille !

- ▶ Controverse sur **l'expansion de l'Univers** dans les années 1920-1930
- ▶ Controverse sur **la méthode de la cosmologie** dans les années 1930



Surtout ! Ne parlons pas de cosmologie !



Ils en ont parlé...

Mais ces progrès furent tout sauf un long fleuve tranquille !

- ▶ Controverse sur **l'expansion de l'Univers** dans les années 1920-1930
- ▶ Controverse sur **la méthode de la cosmologie** dans les années 1930
- ▶ Controverse sur **l'origine et l'évolution de l'Univers** dans les années 1940-1960



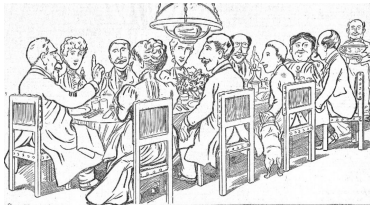
Surtout ! Ne parlons pas de cosmologie !



Ils en ont parlé...

Mais ces progrès furent tout sauf un long fleuve tranquille !

- ▶ Controverse sur **l'expansion de l'Univers** dans les années 1920-1930
- ▶ Controverse sur **la méthode de la cosmologie** dans les années 1930
- ▶ Controverse sur **l'origine et l'évolution de l'Univers** dans les années 1940-1960
- ▶ Controverse sur **la théorie de l'inflation** depuis les années 1980



Surtout ! Ne parlons pas de cosmologie !



Ils en ont parlé...

Mais ces progrès furent tout sauf un long fleuve tranquille !

- ▶ Controverse sur **l'expansion de l'Univers** dans les années 1920-1930
- ▶ Controverse sur **la méthode de la cosmologie** dans les années 1930
- ▶ Controverse sur **l'origine et l'évolution de l'Univers** dans les années 1940-1960
- ▶ Controverse sur **la théorie de l'inflation** depuis les années 1980
- ▶ Controverse sur **le principe anthropique** et l'hypothèse du **multivers** depuis les années 1970



La cosmologie et la philosophie, et notamment la philosophie des sciences, n'ont cessé de prospérer, chacune de son côté; et paradoxalement, ce sont plutôt les cosmologues eux-mêmes qui se sont risqués à la réflexion et à la spéculation philosophique.

Jacques Merleau-Ponty, 2003, *Sur la science cosmologique*



—o Quels ont été les problèmes philosophiques discutés en cosmologie depuis 1917 ?



—○ Quels ont été les problèmes philosophiques discutés en cosmologie depuis 1917 ?

—○ Pourquoi les cosmologistes ont-ils rencontré ces problèmes philosophiques ?



—o Quels ont été les problèmes philosophiques discutés en cosmologie depuis 1917 ?

—o Pourquoi les cosmologistes ont rencontré ces problèmes philosophiques ?

—o Qu'est-ce que cela nous apprend sur la science et la méthode scientifique ?



—○ Quels ont été les problèmes philosophiques discutés en cosmologie depuis 1917 ?

—○ Pourquoi les cosmologistes ont rencontré ces problèmes philosophiques ?

—○ Qu'est-ce que cela nous apprend sur la science et la méthode scientifique ?

—○ Comment ces controverses ont affecté le développement de la science de l'Univers ?
Ont-elles été fécondes ou stériles ?

Plan

1. L'expansion de l'Univers et le problème de la sous-détermination empirique des modèle d'Univers (années 1910-1930).
2. La question de la méthode de la cosmologie et le problème de la confirmation des hypothèses cosmologiques (années 1930).
3. L'origine de l'Univers et le problème de la démarcation entre science et non-science en cosmologie (années 1940-1960).
4. La théorie de l'inflation et le problème des hypothèses auxiliaires au modèle du Big Bang (depuis les années 1980).
5. L'hypothèse du multivers et la crise de la prédictibilité en cosmologie (depuis les années 1970).

1917-1931

La Renaissance de l'Univers





1917 : première controverse

Modèle d'**Albert Einstein** : univers statique, homogène et de courbure positive (sphérique).



Modèle de **Willem de Sitter** : univers sans matière dans lequel il y a un décalage vers le rouge **apparent** des sources (effet de Sitter).



Les modèles d'univers dynamiques

$$\frac{R'^2}{R^2} = \frac{\Lambda}{3} + \frac{8\pi Gc^2}{3}\rho - \frac{kc^2}{R^2}$$

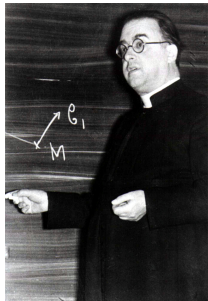
où R est le facteur d'échelle de l'Univers, G est la constante gravitationnelle, k la courbure de l'espace, ρ la densité d'énergie et de matière dans l'Univers, Λ la constante cosmologique.

1922

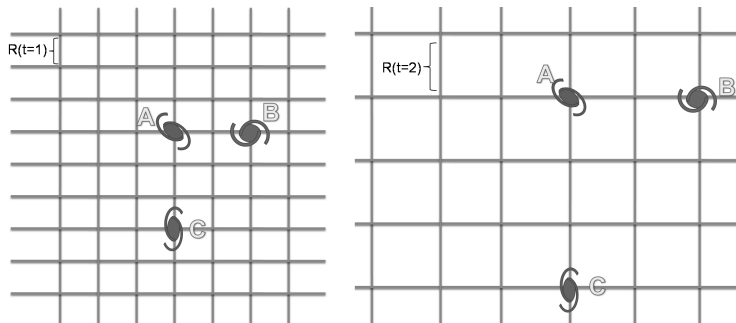
Solutions d'**Alexandre Friedman** : univers de rayon variable (en **expansion** ou en **contraction**).

1927

Modèle de **Georges Lemaître** : univers en expansion qui prédit que les galaxies doivent s'éloigner les unes des autres.



La prédiction de la relation distance-vélocité



Lemaître fut le premier à interpréter le décalage vers le rouge comme un effet Doppler-Fizeau qui n'était pas dû à des galaxies s'éloignant *dans* l'espace, mais emportées *par* l'expansion de l'espace.

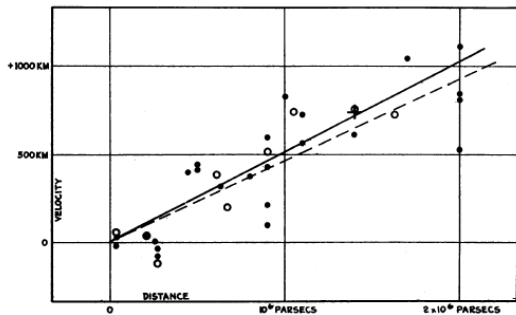


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

1929

L'astronome étatsunien **Edwin Hubble**, utilisant les résultats de **Vesto Slipher** et **Henrietta Leavitt**, met au jour la relation entre la vélocité des galaxies et leur distance :

$$c.z = v = H_0 d$$

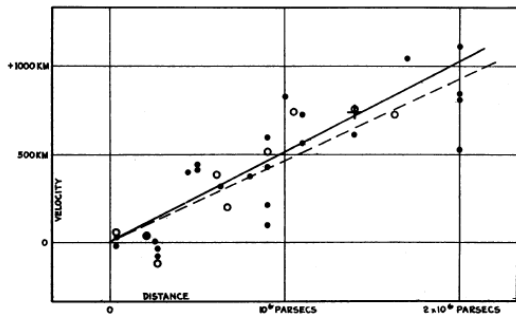


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

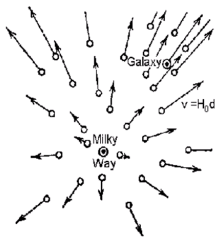
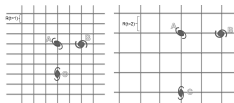
1929

L'astronome étatsunien **Edwin Hubble**, utilisant les résultats de **Vesto Slipher** et **Henrietta Leavitt**, met au jour la relation entre la vitesse des galaxies et leur distance :

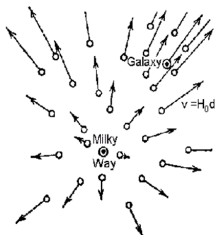
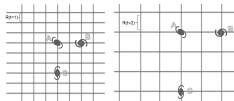
$$c.z = v = H_0 d$$

Cela confirme la prédiction de Lemaître, mais Hubble n'a **jamais** soutenu que cette relation montre l'expansion de l'Univers : il l'interprète comme un **effet de Sitter**.

Au début des années 1930, il y avait de nombreuses hypothèses différentes pour expliquer la récession des galaxies :

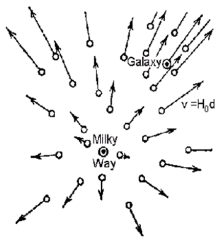
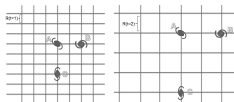


Au début des années 1930, il y avait de nombreuses hypothèses différentes pour expliquer la récession des galaxies :



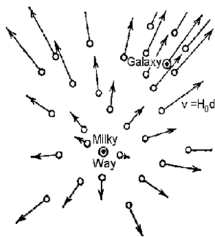
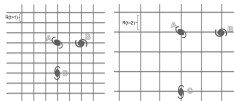
- ▶ **Lemaître 1927** : comme la mesure de l'expansion de l'Univers (une vélocité réelle, mais qui n'est pas une vitesse intrinsèque des galaxies).

Au début des années 1930, il y avait de nombreuses hypothèses différentes pour expliquer la récession des galaxies :



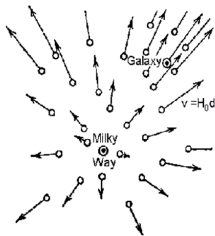
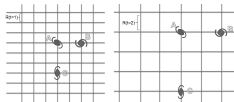
- ▶ **Lemaître 1927** : comme la mesure de l'expansion de l'Univers (une vitesse réelle, mais qui n'est pas une vitesse intrinsèque des galaxies).
- ▶ **Hubble 1929** : comme la mesure d'un effet de Sitter (une vitesse apparente mais non réelle).

Au début des années 1930, il y avait de nombreuses hypothèses différentes pour expliquer la récession des galaxies :



- ▶ **Lemaître 1927** : comme la mesure de l'expansion de l'Univers (une vélocité réelle, mais qui n'est pas une vitesse intrinsèque des galaxies).
- ▶ **Hubble 1929** : comme la mesure d'un effet de Sitter (une vélocité apparente mais non réelle).
- ▶ **Zwicky 1929, Takeuchi 1931** : comme une perte d'énergie de la lumière due à un effet gravitationnel, aux poussières intergalactiques ou à la "fatigue" de la lumière.

Au début des années 1930, il y avait de nombreuses hypothèses différentes pour expliquer la récession des galaxies :



- ▶ **Lemaître 1927** : comme la mesure de l'expansion de l'Univers (une vitesse réelle, mais qui n'est pas une vitesse intrinsèque des galaxies).
- ▶ **Hubble 1929** : comme la mesure d'un effet de Sitter (une vitesse apparente mais non réelle).
- ▶ **Zwicky 1929, Takeuchi 1931** : comme une perte d'énergie de la lumière due à un effet gravitationnel, aux poussières intergalactiques ou à la "fatigue" de la lumière.
- ▶ **Milne 1932** : comme la mesure d'une vitesse réelle des galaxies.

Le problème philosophique

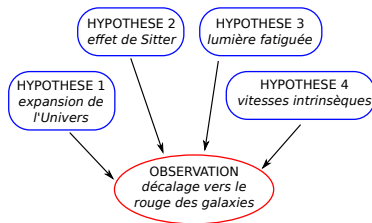
On a affaire à plusieurs prédictions de la récession des galaxies dans des modèles théoriques différents.

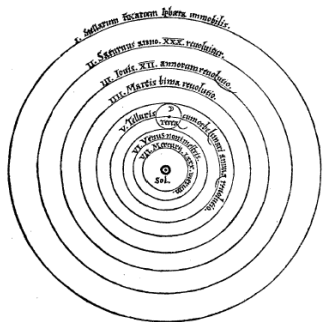
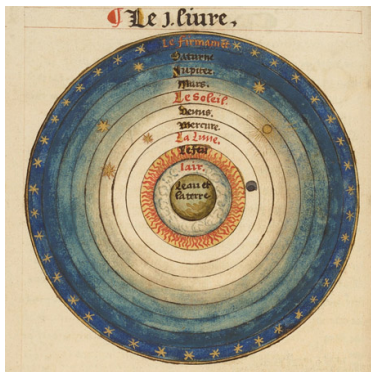
Peut-on trancher entre ces hypothèses rivales ?

Comment faire si l'on n'a pas d'autres observations pertinentes que la récession des galaxies ?

C'est le problème de la

sous-détermination empirique des modèles théoriques.

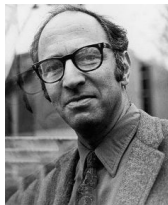




Comment choisir entre différents modèles d'univers qui font les mêmes prédictions observables ?



Thomas Kuhn (1922-1996), historien et philosophe des sciences étatsunien, dans son article "Objectivity, Value Judgement and Theory Choice" (1973) a montré que le choix entre théories rivales repose sur plusieurs critères :



Thomas Kuhn (1922-1996), historien et philosophe des sciences étatsunien, dans son article "Objectivity, Value Judgement and Theory Choice" (1973) a montré que le choix entre théories rivales repose sur plusieurs critères :

1. *Précision* : les conséquences de la théorie doivent être en accord avec les observations existantes.



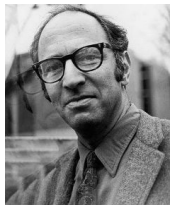
Thomas Kuhn (1922-1996), historien et philosophe des sciences étatsunien, dans son article "Objectivity, Value Judgement and Theory Choice" (1973) a montré que le choix entre théories rivales repose sur plusieurs critères :

1. *Précision* : les conséquences de la théorie doivent être en accord avec les observations existantes.
2. *Cohérence* : la théorie ne doit pas être contradictoire (ni avec elle-même, ni avec d'autres théories).



Thomas Kuhn (1922-1996), historien et philosophe des sciences étatsunien, dans son article "Objectivity, Value Judgement and Theory Choice" (1973) a montré que le choix entre théories rivales repose sur plusieurs critères :

1. *Précision* : les conséquences de la théorie doivent être en accord avec les observations existantes.
2. *Cohérence* : la théorie ne doit pas être contradictoire (ni avec elle-même, ni avec d'autres théories).
3. *Envergure* : la théorie doit avoir des conséquences au-delà des phénomènes qu'elle était initialement destinée à expliquer.



Thomas Kuhn (1922-1996), historien et philosophe des sciences étatsunien, dans son article "Objectivity, Value Judgement and Theory Choice" (1973) a montré que le choix entre théories rivales repose sur plusieurs critères :

1. *Précision* : les conséquences de la théorie doivent être en accord avec les observations existantes.
2. *Cohérence* : la théorie ne doit pas être contradictoire (ni avec elle-même, ni avec d'autres théories).
3. *Envergure* : la théorie doit avoir des conséquences au-delà des phénomènes qu'elle était initialement destinée à expliquer.
4. *Fécondité* : les possibles développements de cette théorie peuvent mener à de nouvelles découvertes.



Thomas Kuhn (1922-1996), historien et philosophe des sciences étatsunien, dans son article "Objectivity, Value Judgement and Theory Choice" (1973) a montré que le choix entre théories rivales repose sur plusieurs critères :

1. *Précision* : les conséquences de la théorie doivent être en accord avec les observations existantes.
2. *Cohérence* : la théorie ne doit pas être contradictoire (ni avec elle-même, ni avec d'autres théories).
3. *Envergure* : la théorie doit avoir des conséquences au-delà des phénomènes qu'elle était initialement destinée à expliquer.
4. *Fécondité* : les possibles développements de cette théorie peuvent mener à de nouvelles découvertes.
5. *Simplicité* : la théorie doit mettre de l'ordre dans des phénomènes apparemment confus.

La controverse fut tranchée avec d'autres moyens que l'observation : **la simplicité**.

*Une solution d'une **simplicité** telle qu'elle apparaisse évidente d'elle-même [...] ne peut laisser le moindre doute que la théorie de Lemaître est essentiellement vraie.*

De Sitter, 1931, "The Evolution of the Universe", *Nature*

La controverse fut tranchée avec d'autres moyens que l'observation : **la simplicité**.

*Une solution d'une **simplicité** telle qu'elle apparaisse évidente d'elle-même [...] ne peut laisser le moindre doute que la théorie de Lemaître est essentiellement vraie.*

De Sitter, 1931, "The Evolution of the Universe", *Nature*

Mais la simplicité est dans l'œil de celui qui la contemple :

Une explication beaucoup plus simple [que celle de Lemaître] considère le mouvement apparent des nébuleuses lointaines comme d'authentiques mouvements dans un espace euclidien.

Milne, 1932, "World-Structure and the Expansion of the Universe", *Nature*

La controverse fut tranchée avec d'autres moyens que l'observation : **la simplicité**.

*Une solution d'une **simplicité** telle qu'elle apparaisse évidente d'elle-même [...] ne peut laisser le moindre doute que la théorie de Lemaître est essentiellement vraie.*

De Sitter, 1931, "The Evolution of the Universe", *Nature*

Mais la simplicité est dans l'œil de celui qui la contemple :

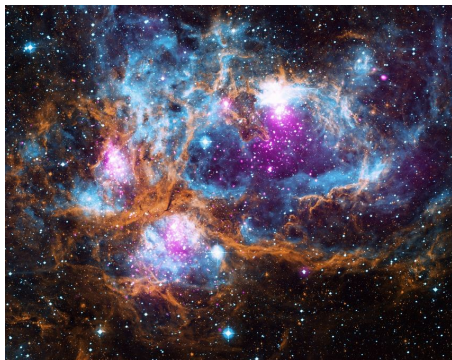
Une explication beaucoup plus simple [que celle de Lemaître] considère le mouvement apparent des nébuleuses lointaines comme d'authentiques mouvements dans un espace euclidien.

Milne, 1932, "World-Structure and the Expansion of the Universe", *Nature*

Les braises couvaient sous la cendre et allaient s'enflammer pendant les années 1930.

1932-1939

La cosmologie est-elle une science (comme les autres) ?





Les années 30 : des années troubles

Multiplication des modèles d'Univers concurrents.

Edward Milne : nouvelle théorie de la relativité qui explique le mouvement des galaxies sans expansion de l'espace.

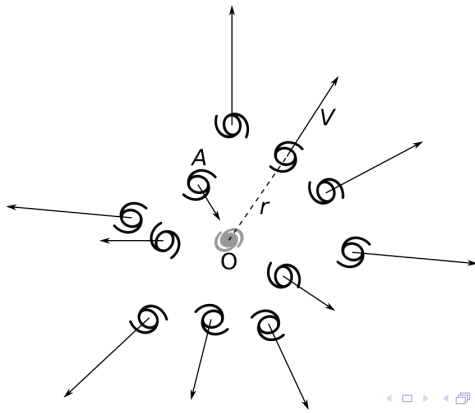
Arthur Eddington : déduction *a priori* toutes les constantes de l'Univers, y compris le nombre de particules dans l'Univers observable.

Paul Dirac : Univers avec une création de matière et une évolution de la constante de gravitation.

1932 : l'univers en diffusion de Milne

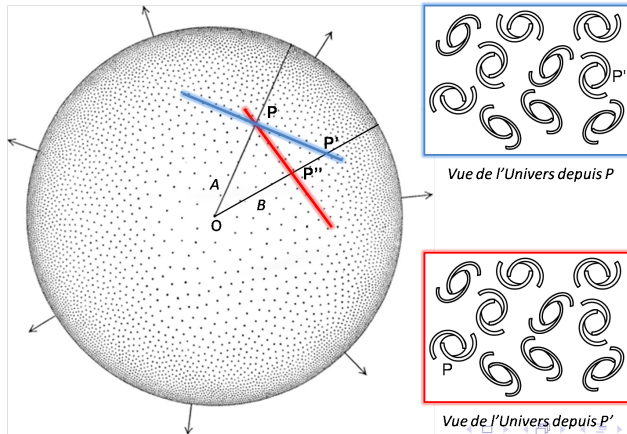


Dès 1932, l'astrophysicien britannique Edward Milne (1896-1950) propose un modèle d'Univers dans lequel l'espace n'a pas de dynamique (\neq relativité générale). Les galaxies ont une vitesse intrinsèque : au bout d'un certain temps les plus rapides seront plus loin, les moins rapides seront plus proches : $v \propto d$



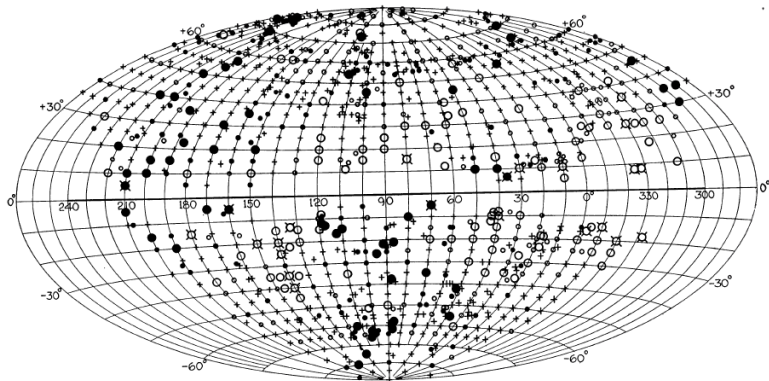
Origine du principe cosmologique

Le principe cosmologique est introduit par Milne pour calculer la distribution de densité et de vitesse telle que toutes les observatrices puissent faire une description équivalente de l'Univers.



Le problème scientifique

Comment tester le principe cosmologique ? À quelle échelle observe-t-on une uniformité de la distribution de matière dans l'Univers ?



Hubble, 1934, "The Distribution of Extragalactic Nebulae"

Le problème philosophique

Est-ce que le principe cosmologique est *a priori* (non fondé sur l'expérience) ou *a posteriori* (vérifiable expérimentalement) ?



Dans la plupart des présentations de la cosmologie relativiste, cette condition [d'homogénéité] n'est pas imposée mais vérifiée a posteriori. Dans la mienne elle est imposée a priori.
Milne, 1934, "Some Points in the Philosophy of Physics"

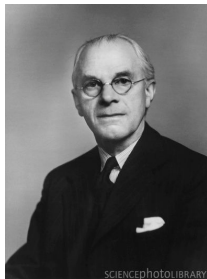


L'esprit de la relativité est simplement une réaffirmation du principe de Newton d'induction à partir des phénomènes. [...] Milne approche les problèmes de la physique par une méthode exactement opposée. Il commence, non par les phénomènes, mais par supposer un univers aplani qui doit obéir à un principe arbitraire.

Dingle, 1933, "On Milne's Theory of World Structure"

1937 : le feu aux poudres

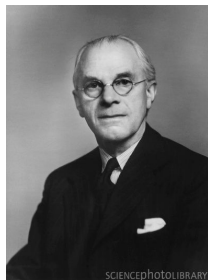
Herbert Dingle, 1937, "Modern Aristotelianism", *Nature* :



*Ce phénomène peut être décrit comme une idolâtrie dont "l'Univers" est le dieu. [...] Cette **cosmolâtrie**, comme on pouvait s'y attendre, provient de la métaphysique via les mathématiques.*

1937 : le feu aux poudres

Herbert Dingle, 1937, "Modern Aristotelianism", *Nature* :



*Ce phénomène peut être décrit comme une idolâtrie dont "l'Univers" est le dieu. [...] Cette **cosmolâtrie**, comme on pouvait s'y attendre, provient de la métaphysique via les mathématiques.*

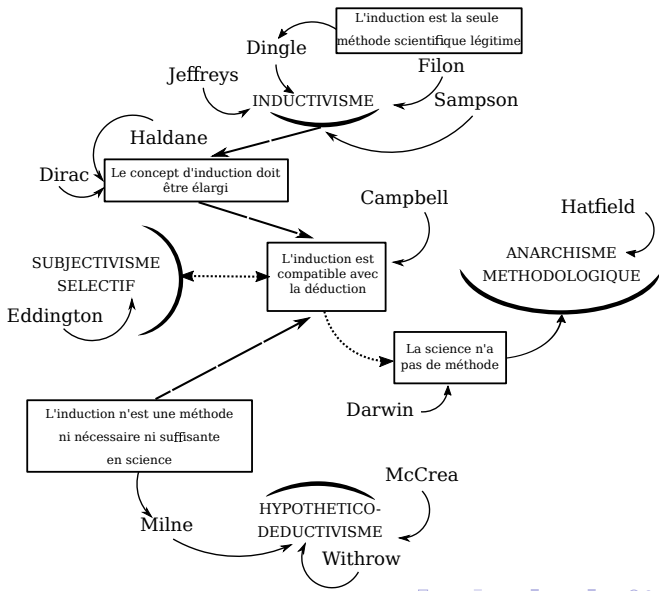
*En lieu et place d'une induction à partir des phénomènes observables, on nous offre une **cosmo-mythologie invertébrée et pseudo-scientifique.***



Supplément
exceptionnel de la
revue *Nature* : "On
the Philosophy of
Physics"



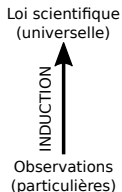
Supplément
exceptionnel de la
revue *Nature* : "On
the Philosophy of
Physics"



Induction

Inférence dont la conclusion est probable, par ex. passage d'observations à une loi universelle. C'est une inférence *ampliative* : la conclusion est plus forte que la conjonction des prémisses.

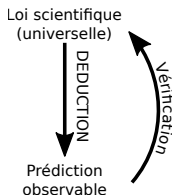
Méthode inductive

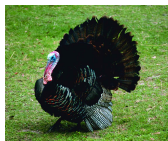


Déduction

Inférence dont la conclusion est nécessairement vraie si les prémisses sont vraies. Inférence *conservatrice* : la conclusion est une reformulation de la conjonction des prémisses.

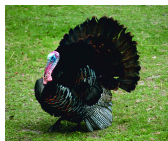
Méthode hypothético-déductive





Le problème de l'induction : même en établissant des **règles de l'induction** (ex : tests expérimentaux et statistiques), on ne peut pas être certain que l'avenir ressemblera au passé.

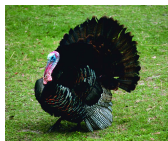
Exemple : la dinde inductiviste de Russell.



Le problème de l'induction : même en établissant des **règles de l'induction** (ex : tests expérimentaux et statistiques), on ne peut pas être certain que l'avenir ressemblera au passé.

Exemple : la dinde inductiviste de Russell.

Dès le matin de son arrivée dans la ferme pour dindes, une dinde s'aperçut qu'on la nourrissait à 9 heures du matin. Toutefois, en bonne inductiviste, elle ne s'empessa pas d'en conclure quoi que ce soit. Elle attendit d'avoir observé de nombreuses fois qu'elle était nourrie à 9 heures du matin, et elle recueillit ces observations dans des circonstances fort différentes, les mercredis et jeudis, les jours chauds et les jours froids, les jours de pluie et les jours sans pluie. Sa conscience inductiviste fut enfin satisfaite et elle recourut à une inférence inductive pour conclure : " Je suis toujours nourrie à 9 heures du matin."



Le problème de l'induction : même en établissant des **règles de l'induction** (ex : tests expérimentaux et statistiques), on ne peut pas être certain que l'avenir ressemblera au passé.

Exemple : la dinde inductiviste de Russell.

Dès le matin de son arrivée dans la ferme pour dindes, une dinde s'aperçut qu'on la nourrissait à 9 heures du matin. Toutefois, en bonne inductiviste, elle ne s'empessa pas d'en conclure quoi que ce soit. Elle attendit d'avoir observé de nombreuses fois qu'elle était nourrie à 9 heures du matin, et elle recueillit ces observations dans des circonstances fort différentes, les mercredis et jeudis, les jours chauds et les jours froids, les jours de pluie et les jours sans pluie. Sa conscience inductiviste fut enfin satisfaite et elle recourut à une inférence inductive pour conclure : " Je suis toujours nourrie à 9 heures du matin." Or, cette conclusion se révéla fausse quand, un jour de Noël, à la même heure, on lui tordit le cou.

Problème de Hume

On ne peut justifier une induction que si l'on admet un principe d'*uniformité de la Nature* (*l'avenir ressemblera au passé* ou *les mêmes causes ont toujours les mêmes effets*), mais ce principe repose lui-même sur une induction ou sur un autre principe qu'il faut justifier soit par induction soit par un autre principe, etc..

$$\exists(x)K(x) \not\vdash \forall(x)K(x)$$

Il est impossible de déduire logiquement une loi universelle d'un ensemble d'observations particulières sans présupposer **une uniformité de la nature**.

Le problème de l'hypothético-déductivisme : on ne peut pas prouver qu'une théorie est vraie à partir de ses conséquences.

Le problème de l'hypothético-déductivisme : on ne peut pas prouver qu'une théorie est vraie à partir de ses conséquences.



Exemple

H1 : la maladie M est causée par le démon D .

H2 : D peut posséder les personnes qui entrent en contact avec d'autres personnes possédées par D .

P : M se transmet par contact.

P est vérifiée si M est une maladie infectieuse mais cela ne prouve ni $H1$ ni $H2$.

Le problème de la vérification

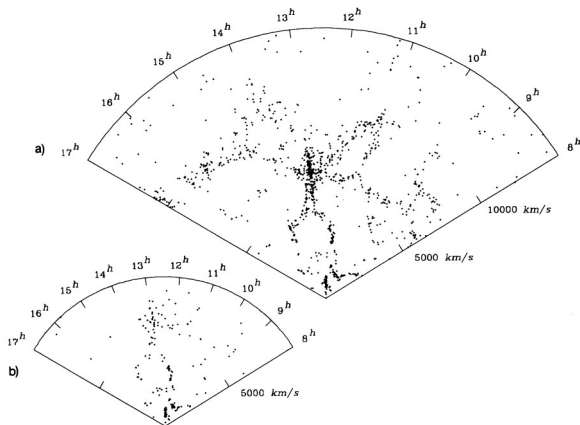
On ne peut jamais vérifier qu'une théorie est vraie à partir de ses conséquences.

Soit T une théorie et O une observation.

$(T \rightarrow O) \wedge O \not\vdash T$ (si $O \not\rightarrow T$)

C'est l'une des conséquences du **problème de la sous-détermination empirique** des théories.

Controverse actuelle



Cartographies de l'Univers : Margaret Geller, Valérie de Lapparent et John Huchra, 1986, "A Slice of the Universe"

= tests de l'homogénéité **inductif** ou test **hypothético-déductif** ?

Controverse actuelle

On peut aussi essayer de justifier le principe cosmologique en utilisant un **principe copernicien** :

(Isotropie) Nous observons l'isotropie de l'Univers.

(Principe copernicien) Nous sommes des observatrices typiques dans l'Univers, nous n'occupons pas une place particulière.

(Théorème EGS) Donc l'Univers est statistiquement homogène et isotrope.

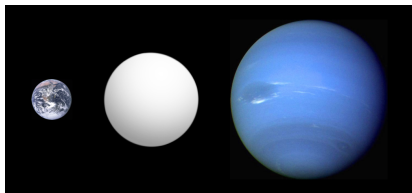
Controverse actuelle

Problème du principe copernicien : comment justifier ce principe copernicien ? Quelles sont nos caractéristiques d'observatrices typiques ?

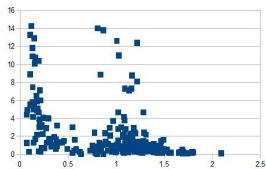
Controverse actuelle

Problème du principe copernicien : comment justifier ce principe copernicien ? Quelles sont nos caractéristiques d'observatrices typiques ?

Sur certains cas, le principe copernicien est faillible : par exemple, notre système planétaire n'est peut-être pas le plus typique dans la galaxie.



Kepler 10c $\simeq 10M_{\oplus}$

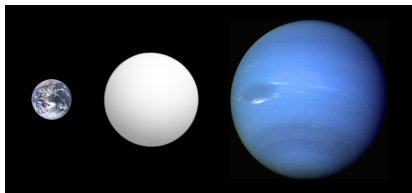


Densité (g.cm⁻³) par R/R_{Jup}

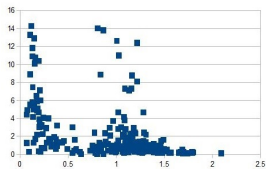
Controverse actuelle

Problème du principe copernicien : comment justifier ce principe copernicien ? Quelles sont nos caractéristiques d'observatrices typiques ?

Sur certains cas, le principe copernicien est faillible : par exemple, notre système planétaire n'est peut-être pas le plus typique dans la galaxie.



Kepler 10c $\simeq 10M_{\oplus}$



Densité (g.cm⁻³) par R/R_{Jup}

La typicalité doit être testée empiriquement : on ne sort pas du problème de l'induction.

Controverse actuelle

Classical and Quantum Gravity

PAPER

Is the observable Universe consistent with the cosmological principle?

Pavan Kumar Aluri¹, Paolo Cea² , Pravabati Chingambam^{3,4}, Ming-Chung Chu⁵, Roger G Clowes⁶, Damien Hutsemékers⁷, Joby P Kochappan⁸, Alexia M Lopez⁹, Lang Liu⁹, Niels C M Martens^{10,11} 

[+ Show full author list](#)

Published 4 April 2023 • © 2023 IOP Publishing Ltd

[Classical and Quantum Gravity, Volume 40, Number 9](#)

[Focus Issue on the Hubble Constant Tension](#)

Citation Pavan Kumar Aluri et al 2023 *Class. Quantum Grav.* **40** 094001

DOI 10.1088/1361-6382/acbfec

[References](#) • [Open science](#) •

[+ Article and author information](#)

Abstract

The cosmological principle (CP)—the notion that the Universe is spatially isotropic and homogeneous on large scales—underlies a century of progress in cosmology. It is conventionally formulated through the Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) cosmologies as the spacetime metric, and culminates in the successful and highly predictive Λ -Cold-Dark-Matter (Λ CDM) model. Yet, tensions have emerged within the Λ CDM model, most notably a statistically significant discrepancy in the value of the Hubble constant, H_0 . Since the notion of cosmic expansion determined by a single parameter is intimately tied to the CP, implications of the H_0 tension may extend beyond Λ CDM to the CP itself. This review surveys current observational hints for deviations from the expectations of the CP, highlighting synergies and disagreements that warrant further study. Setting aside the debate about individual large structures, potential deviations from the CP include variations of cosmological parameters on the sky, discrepancies in the cosmic dipoles, and mysterious alignments in quasar polarizations and galaxy spins. While it is possible that a host of observational systematics are impacting results, it is equally plausible that precision cosmology may have outgrown the FLRW paradigm, an extremely pragmatic but non-fundamental symmetry assumption.

Pavan Kumar Aluri et al, 2023, "Is the observable Universe consistent with the cosmological principle?"

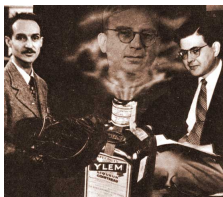
1948-1968 Et si tout avait commencé par un Big Bang ?



1948, *annus mirabilis*

USA : projet Manhattan, émergence des grandes Universités californiennes, recherches en cosmologie et relativité générale à Princeton.

Angleterre et Grande-Bretagne : projet radar, Université de Cambridge, sociétés savantes (Royal Astronomical Society).



Gauche : Robert Herman (1914-1997), George Gamow (1904-1968) et Ralph Alpher (1921-2007).

Droite : Thomas Gold (1920-2004), Hermann Bondi (1919-2005) et Fred Hoyle (1915-2001).

1948, *annus mirabilis*

Nucléosynthèse primordiale

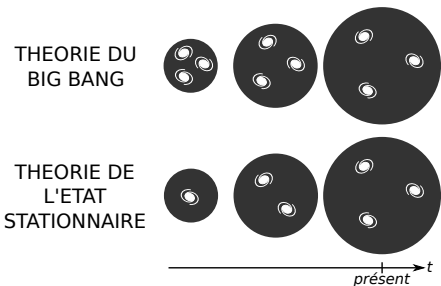
Explique la formation des éléments atomiques dans les conditions de chaleur de l'Univers primitif

1948 : prédiction d'un rayonnement de fond de l'Univers d'environ 5 K ayant le **spectre d'un corps noir**

État stationnaire

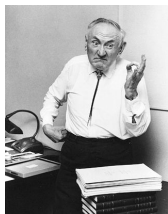
L'Univers est en expansion mais a toujours la même densité grâce à une création continue de matière

1948 : prédictions du nombre, de l'âge et de l'aspect des galaxies en fonction de leur distance



Critiques de la **scientificité** de la théorie de l'état stationnaire :
problème de la **démarcation**.

Critiques de la **scientificité** de la théorie de l'état stationnaire : problème de la **démarcation**.

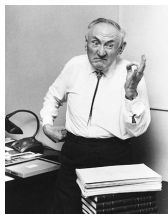


L'état stationnaire n'est pas une théorie, d'un point de vue scientifique.

Zwicky



Critiques de la **scientificité** de la théorie de l'état stationnaire : problème de la **démarcation**.



L'état stationnaire n'est pas une théorie, d'un point de vue scientifique.

Zwicky

[La théorie de l'état stationnaire] a précisément la même nature que les orbites circulaires et les cieux immuables.

Aucun énoncé sur l'Univers, la Nature ou l'expérience ne doit être affirmé sans preuve.

Dingle





Les partisans de la théorie de l'état stationnaire s'appuient sur l'épistémologie de **Karl Popper** (1902–1994) qui, dans la *Logik der Forschung*, propose la **réfutabilité** d'un système théorique comme critère de démarcation.



Les partisans de la théorie de l'état stationnaire s'appuient sur l'épistémologie de **Karl Popper** (1902–1994) qui, dans la *Logik der Forschung*, propose la **réfutabilité** d'un système théorique comme critère de démarcation.

- ▶ Problème de l'induction → si l'on n'acceptait que les hypothèses *prouvées* par des observations, alors la science n'aurait jamais été constituée de lois universelles.



Les partisans de la théorie de l'état stationnaire s'appuient sur l'épistémologie de **Karl Popper** (1902–1994) qui, dans la *Logik der Forschung*, propose la **réfutabilité** d'un système théorique comme critère de démarcation.

- ▶ Problème de l'induction → si l'on n'acceptait que les hypothèses *prouvées* par des observations, alors la science n'aurait jamais été constituée de lois universelles.
- ▶ Les hypothèses théoriques ne peuvent pas être *fondées* sur l'expérience, ce sont des conjectures audacieuses sur la nature de la réalité.



Les partisans de la théorie de l'état stationnaire s'appuient sur l'épistémologie de **Karl Popper** (1902–1994) qui, dans la *Logik der Forschung*, propose la **réfutabilité** d'un système théorique comme critère de démarcation.

- ▶ Problème de l'induction → si l'on n'acceptait que les hypothèses *prouvées* par des observations, alors la science n'aurait jamais été constituée de lois universelles.
- ▶ Les hypothèses théoriques ne peuvent pas être *fondées* sur l'expérience, ce sont des conjectures audacieuses sur la nature de la réalité.
- ▶ Mais ces conjectures doivent pouvoir être **réfutées** expérimentalement : elles doivent faire des *prédictions* qui peuvent être mises en échec par des observations.



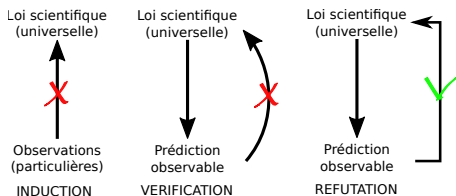
Les partisans de la théorie de l'état stationnaire s'appuient sur l'épistémologie de **Karl Popper** (1902–1994) qui, dans la *Logik der Forschung*, propose la **réfutabilité** d'un système théorique comme critère de démarcation.

- ▶ Problème de l'induction → si l'on n'acceptait que les hypothèses *prouvées* par des observations, alors la science n'aurait jamais été constituée de lois universelles.
- ▶ Les hypothèses théoriques ne peuvent pas être *fondées* sur l'expérience, ce sont des conjectures audacieuses sur la nature de la réalité.
- ▶ Mais ces conjectures doivent pouvoir être **réfutées** expérimentalement : elles doivent faire des *prédictions* qui peuvent être mises en échec par des observations.
- ▶ Une hypothèse qui est **irréfutable** ne nous apprend rien et n'est pas scientifique (ex : créationnisme ou astrologie).

Le critère de réfutation

Popper = **hypothético-déductivisme cohérent** : une hypothèse scientifique n'est jamais vraie ni même vraisemblable. Mais même s'il est impossible de **prouver** une hypothèse en testant ses conséquences, il est logiquement possible de la **réfuter** en n'utilisant que des inférences déductives (*modus tollens*) :

$$[(T \rightarrow O) \wedge (\neg O)] \vdash (\neg T)$$





*Je ne vois aucune raison de préférer l'idée d'un Big Bang. Il me semble qu'il s'agit en réalité d'une notion très peu satisfaisante, en un sens philosophique, car elle place son hypothèse principale hors de vue, là où elle ne peut jamais être **défiée** par aucun appel direct à l'observation.*



Hoyle, 1950, "The Nature of the Universe"



*Je ne vois aucune raison de préférer l'idée d'un Big Bang. Il me semble qu'il s'agit en réalité d'une notion très peu satisfaisante, en un sens philosophique, car elle place son hypothèse principale hors de vue, là où elle ne peut jamais être **défiée** par aucun appel direct à l'observation.*



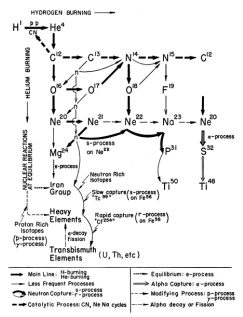
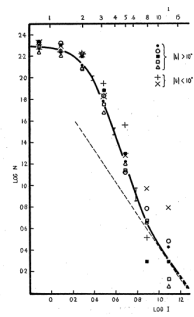
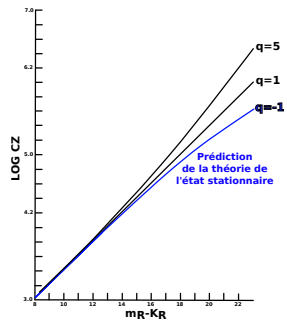
Hoyle, 1950, "The Nature of the Universe"

*L'argument valide a toujours été que le modèle de l'état stationnaire était celui qui pouvait le plus facilement être **réfuté** par les observations.*

Bondi et Kilmister, 1959, "The Impact of Logik der Forschung"

└ 1948-1968 : et si tout avait commencé par un Big Bang ?

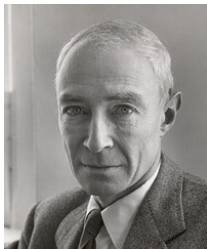
Les tests de la théorie de l'état stationnaire \Rightarrow nombreux liens avec les observations astronomiques et la physique nucléaire.



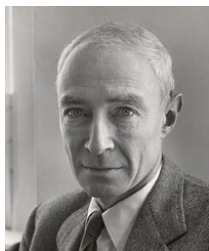
Mesure du paramètre de décélération de l'Univers (Sandage et Hoyle).

Distribution des sources dans les catalogues radioastronomiques (Ryle et Gold).

Mécanismes de la nucléosynthèse stellaire (B^2HF).



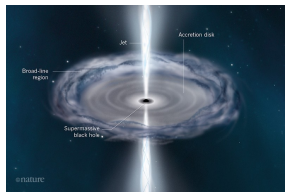
Le Dr Heckmann a exprimé des doutes à propos de la modification des équations fondamentales de la Relativité Générale impliquée par la théorie de l'état stationnaire. Je le rejoins sur ce point. Mais, en incitant à comprendre l'état présent du cosmos en terme de processus encore actifs aujourd'hui, cette théorie a mené au travail remarquable exposé hier par Hoyle sur la synthèse des éléments.



*Le Dr Heckmann a exprimé des doutes à propos de la modification des équations fondamentales de la Relativité Générale impliquée par la théorie de l'état stationnaire. Je le rejoins sur ce point. Mais, en incitant à comprendre l'état présent du cosmos en terme de processus encore actifs aujourd'hui, cette théorie a mené au travail remarquable exposé hier par Hoyle sur la synthèse des éléments. Même si cette hypothèse est, comme je le pense, **parfaitement fausse**, elle a ainsi mené à de grands progrès de nos connaissances.*

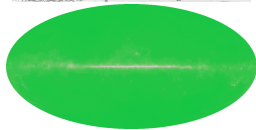
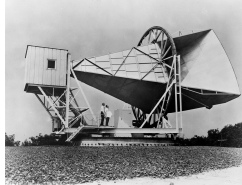
Robert Oppenheimer (1904-1967), 1958, 11^e Congrès de Solvay

└ 1948-1968 : et si tout avait commencé par un Big Bang ?

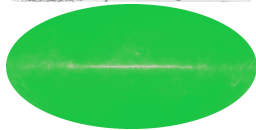
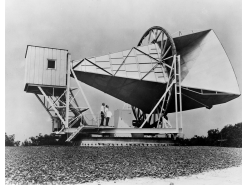
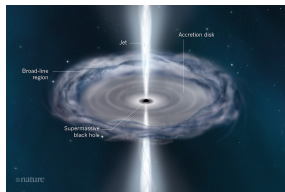


La vapeur se renverse dans les années 1960 : les preuves vont s'accumuler contre la théorie de l'état stationnaire et au contraire montrer la fécondité de la théorie du Big Bang :

- Découverte des quasars par Maarten Schmidt.



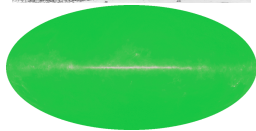
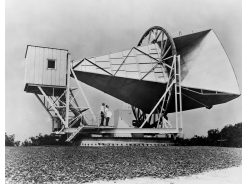
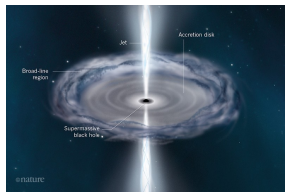
└ 1948-1968 : et si tout avait commencé par un Big Bang ?



La vapeur se renverse dans les années 1960 : les preuves vont s'accumuler contre la théorie de l'état stationnaire et au contraire montrer la fécondité de la théorie du Big Bang :

- ▶ Découverte des quasars par Maarten Schmidt.
- ▶ Découverte du fond diffus cosmologique par Penzias et Wilson, Dicke et Peebles, Roll et Wilkinson.

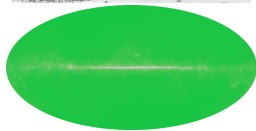
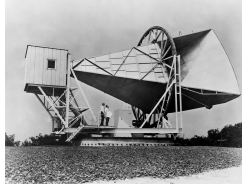
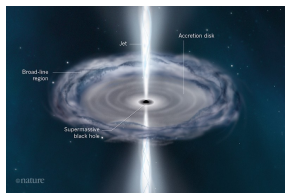
└ 1948-1968 : et si tout avait commencé par un Big Bang ?



La vapeur se renverse dans les années 1960 : les preuves vont s'accumuler contre la théorie de l'état stationnaire et au contraire montrer la fécondité de la théorie du Big Bang :

- ▶ Découverte des quasars par Maarten Schmidt.
- ▶ Découverte du fond diffus cosmologique par Penzias et Wilson, Dicke et Peebles, Roll et Wilkinson.
- ▶ Calcul des abondances d'hélium dans l'Univers par Wagoner, Fowler et Hoyle (!).

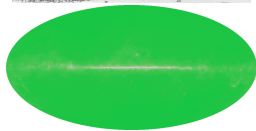
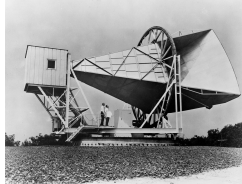
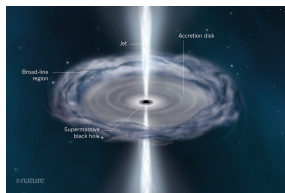
└ 1948-1968 : et si tout avait commencé par un Big Bang ?



La vapeur se renverse dans les années 1960 : les preuves vont s'accumuler contre la théorie de l'état stationnaire et au contraire montrer la fécondité de la théorie du Big Bang :

- ▶ Découverte des quasars par Maarten Schmidt.
- ▶ Découverte du fond diffus cosmologique par Penzias et Wilson, Dicke et Peebles, Roll et Wilkinson.
- ▶ Calcul des abondances d'hélium dans l'Univers par Wagoner, Fowler et Hoyle (!).
- ▶ Renaissance de la relativité générale (théorèmes de singularité de Penrose, Hawking et Ellis).

└ 1948-1968 : et si tout avait commencé par un Big Bang ?



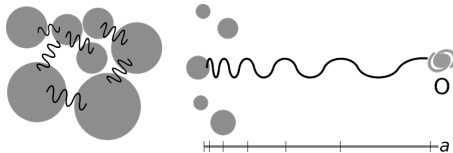
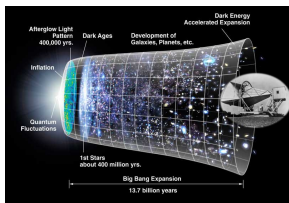
La vapeur se renverse dans les années 1960 : les preuves vont s'accumuler contre la théorie de l'état stationnaire et au contraire montrer la fécondité de la théorie du Big Bang :

- ▶ Découverte des quasars par Maarten Schmidt.
- ▶ Découverte du fond diffus cosmologique par Penzias et Wilson, Dicke et Peebles, Roll et Wilkinson.
- ▶ Calcul des abondances d'hélium dans l'Univers par Wagoner, Fowler et Hoyle (!).
- ▶ Renaissance de la relativité générale (théorèmes de singularité de Penrose, Hawking et Ellis).

Une réfutation ?

- ▶ La distribution des sources radio était une preuve réfutante mais ces observations n'étaient pas jugées suffisamment fiables pour être prises comme une menace sérieuse.
- ▶ Dennis Sciama a abandonné la théorie de l'état stationnaire suite à la découverte des quasars.
- ▶ D'autres ont continué à la soutenir après la découverte du CMB, comme Hoyle et Jayant Narlikar (théorie de l'état quasi-stationnaire).
- ▶ Il fallait prouver que le rayonnement de fond avait une origine cosmologique et donc un spectre de corps noir pour réfuter la théorie de l'état stationnaire, ce qui ne sera fait qu'en 1989 par le satellite COBE.

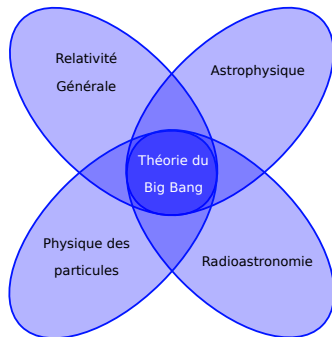
La découverte du CMB



1963 : Penzias et Wilson, antenne Bell Laboratory de communication avec le satellite Telstar, New Jersey. Pour $\lambda = 7,4\text{cm}$ ils trouvent une température du halo galactique de 7,5 K au lieu des 3 K attendus.

Mars 1965 : Robert Dicke, Edwin Peebles, Peter Roll et David Wilkinson, physiciens de Princeton, redécouvrent la prédiction d'un rayonnement de fond d'origine cosmologique en travaillant sur des modèles d'univers cycliques.

Le triomphe de la théorie du Big Bang



*La découverte du fond diffus cosmologique a tout changé parce qu'elle a transformé la spéculation cosmologique sur les premières minutes en une **science normale et respectable**. Ainsi, si quelqu'un, par exemple, calculait les effets de nouveaux neutrinos sur la nucléosynthèse primordiale, c'était vu comme un sujet respectable. Vous étiez en train de travailler dans un cadre scientifique que tout le monde comprenait et qui avait connu plusieurs succès. **Ce n'était peut-être pas vrai, mais au moins c'était quelque chose qui valait la peine d'être fait.***

Steven Weinberg, 1990, *Origins*

De 1972 à nos jours

La théorie de l'inflation

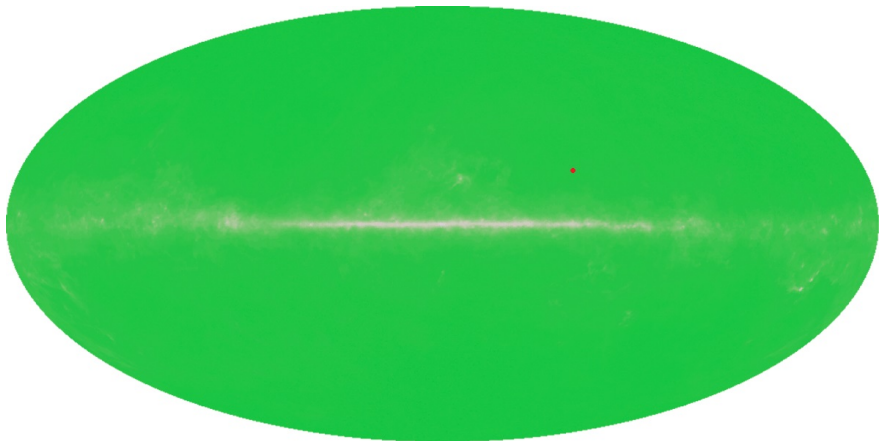


Au début des années 1970 la théorie du Big Bang s'impose comme **le modèle standard de la cosmologie** (Weinberg, 1972

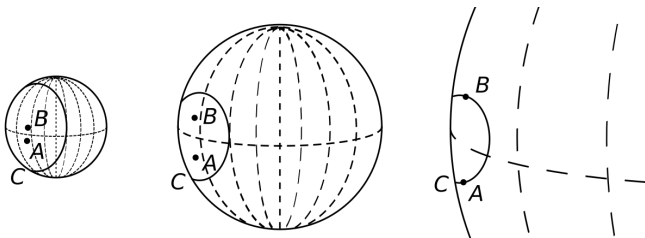
Gravitation and Cosmology) :

- ▶ La métrique de l'Univers est celle de Robertson-Walker avec une courbure constante $k \simeq 0$
- ▶ L'expansion de l'Univers est guidée par l'équation de Friedman-Lemaître avec $\Lambda = 0$.
- ▶ L'histoire de l'Univers commence par une *singularité*, se poursuit par la *nucléosynthèse primordiale*, puis le *découplément* matière/rayonnement donnant lieu au CMB.

Mais cette théorie n'est pas sans problèmes : comment se sont formées les galaxies ? Pourquoi l'Univers a-t-il une courbure si proche de zéro ? Pourquoi le CMB est-il si isotrope ?



En 1981 le physicien **Alan Guth** redécouvre une idée d'**Alexei Starobinsky** en supposant que l'Univers jeune passe par une phase d'expansion exponentielle (10^{26} entre 10^{-36} et 10^{-33} secondes après le Big Bang)

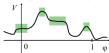


Le problème philosophique : l'inflation des modèles d'inflation

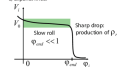
a) Potential needed for single-field inflation



b) Generic potential on the landscape



c) Expend linear



d) Expend hilltop



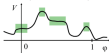
La théorie de l'inflation regroupe de très nombreux modèles aux paramètres différents (Martin et al. en dénombrent 190 en 2014) : elle semble pouvoir rendre compte de n'importe quelle observation et donc être impossible à réfuter.

Le problème philosophique : l'inflation des modèles d'inflation

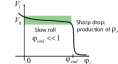
a) Potential needed for single-field inflation



b) Generic potential on the landscape



c) Expand linear



d) Expand hilltop



La théorie de l'inflation regroupe de très nombreux modèles aux paramètres différents (Martin et al. en dénombrent 190 en 2014) : elle semble pouvoir rendre compte de n'importe quelle observation et donc être impossible à réfuter.

Certains modèles d'inflations prédisent l'homogénéité sans la courbure nulle et inversement : si les observations venaient réfuter un *scénario* d'inflation en montrant que la courbure n'est pas nulle par exemple, il suffirait de changer de scénario pour sauver la *théorie* de l'inflation.

Cette hypothèse de l'**inflation cosmique** a été vue comme une hypothèse auxiliaire utilisée seulement pour sauver la théorie du Big Bang de la réfutation :

Selon ma théorie [la cosmologie actuelle] n'est pas de la science. [...]

(1) Elle introduit une nouvelle hypothèse auxiliaire à chaque fois qu'une théorie est réfutée; (2) elle se soutient mutuellement avec la théorie des particules – mais les critiques, les expériences critiques (= les tentatives de réfutations) sont ignorées.

Karl Popper, 1994, dans une lettre à l'historien Helge Kragh



Le problème des hypothèses auxiliaires

Est-ce qu'on a le droit de rajouter des hypothèses pour sauver une théorie de la réfutation ?

Le problème des hypothèses auxiliaires

Est-ce qu'on a le droit de rajouter des hypothèses pour sauver une théorie de la réfutation ?

Oui ! Si les scientifiques ne faisaient pas cela, ils ne pourraient jamais appliquer aucune théorie à l'expérience (idéalisations, conditions aux limites, etc.).

Le problème des hypothèses auxiliaires

Est-ce qu'on a le droit de rajouter des hypothèses pour sauver une théorie de la réfutation ?

Oui ! Si les scientifiques ne faisaient pas cela, ils ne pourraient jamais appliquer aucune théorie à l'expérience (idéalisations, conditions aux limites, etc.).

1974 : Imre Lakatos (1922-1974), *La Méthodologie des programmes de recherche* : si l'on interdit l'usage d'hypothèses auxiliaires pour permettre à une théorie d'éviter les réfutations, alors toute théorie serait morte-née, et cela freinerait le progrès scientifique.

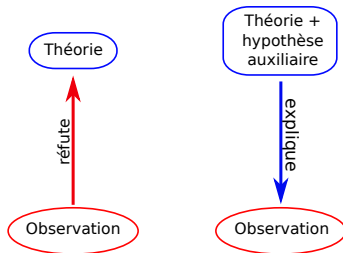


Exemple : la loi de l'attraction universelle de Newton (1687) ne décrit pas correctement le mouvement de la Lune. Il faut attendre 1752 et les travaux du mathématicien Alexis Clairaut (1713-1765) pour que l'on trouve le moyen d'appliquer la théorie de Newton à l'orbite lunaire. Si l'on avait considéré que l'orbite de la Lune réfutait la théorie de Newton, alors il aurait fallu l'abandonner !



Le problème des hypothèses auxiliaires

Mais si on doit utiliser des hypothèses auxiliaires pour tester une théorie, est-ce que cela ne rend pas toute théorie irréfutable puisqu'il suffit de changer une de ces hypothèses auxiliaires pour sauver une théorie de la réfutation ?

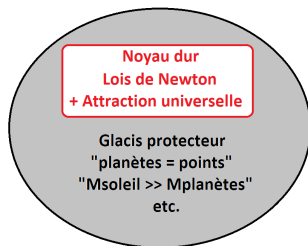


La méthodologie des programmes de recherche

Programme de recherche scientifique

Le noyau dur : *hypothèses fondamentales* que les scientifiques considèrent comme irréfutables.

Le glacis protecteur : *hypothèses auxiliaires* qui empêchent le noyau d'être réfuté et qui permettent de l'appliquer à des cas concrets.

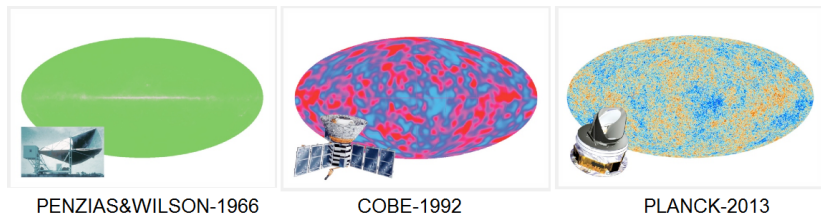


La méthodologie des programmes de recherche

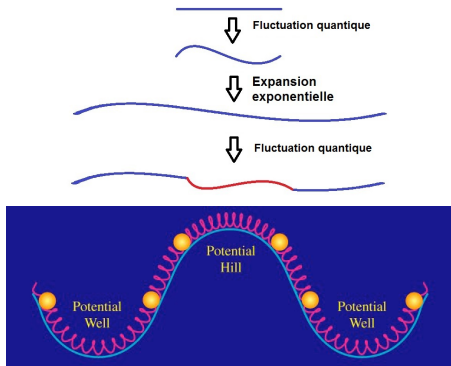


Toutes les hypothèses auxiliaires ne se valent pas :

Or à partir des années 1990 plusieurs programmes d'observation permettent de mesurer les différences de températures (anisotropies) du CMB.



Anisotropies dans le CMB de l'ordre du μK à l'origine des grandes structures galactiques.

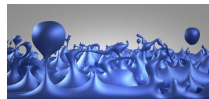


Les fluctuations quantiques du vide pendant l'inflation créent des perturbations responsables des anisotropies du CMB, puis de la formation des grandes structures de l'Univers \Rightarrow permet de tester les prédictions des modèles d'inflation.

Une hypothèse auxiliaire ? Et alors ?

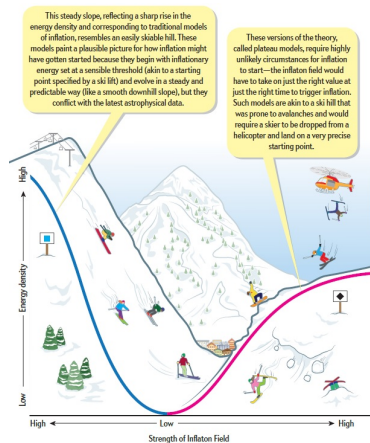
*Par contraste avec l'inflation comme théorie des conditions initiales, le modèle de l'inflation comme origine possible des structures dans l'Univers est fortement **prédictif**. [...] L'inflation comme origine des structures est donc une science de prédiction et d'observation, méritant un examen détaillé.*

Liddle et Lyth, 2000, *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*



Anna Ijjas, Paul Steinhardt, Abraham Loeb,
2017, "POP goes the Universe" :

- ▶ Les ondes gravitationnelles primordiales n'ont pas été détectées dans les données de Planck sur le CMB.
- ▶ Les modèles actuels d'inflation doivent être très finement ajustés pour rendre compte des données.
- ▶ Il est temps de donner leur chance à des modèles d'Univers différents du Big Bang (modèles rebonds).

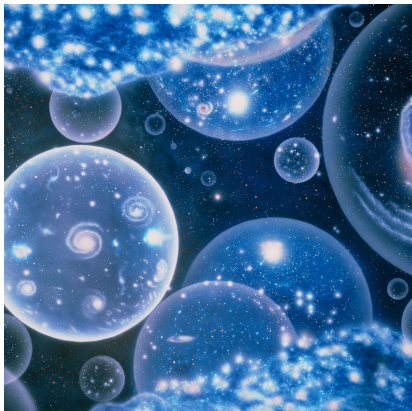


La question à poser au sujet de la théorie de l'inflation n'est pas de savoir si elle permet de faire différentes prédictions "réfutables", mais en quelle mesure les données observables nous permettent d'inférer les détails de l'inflation ? Si l'on suppose que l'inflation est correcte, qu'est-ce que les données nous permettent d'inférer à propos du champ d'inflation et de son potentiel $V(\Phi)$? En ces termes, il est vrai que la théorie de l'inflation comme théorie de la formation des structures propose un ensemble plus riche de contraintes sur la théorie.



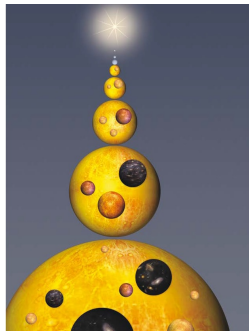
Chris Smeenk, 2012, "Inflation as a Theory of Structure Formation"

De 1974 à nos jours Une pléthore d'univers



Multivers cosmologique

Ensemble de régions de l'espace-temps (univers) déconnectées causalement dans lesquelles les conditions initiales, les constantes et/ou les lois physiques varient.



Crédits: Pour La Science



Brandon Carter, "Large Number Coincidences and the Anthropic Principle in Cosmology", 1974.

Principe anthropique faible (WAP)

Notre position dans l'Univers est privilégiée dans la mesure où elle est compatible avec notre existence comme observatrices.

Principe anthropique fort (SAP)

L'Univers (et donc les paramètres fondamentaux dont il dépend) doit être tel qu'il admet la création d'observatrices en son sein à une certaine étape [de son évolution].

Brandon Carter, "Large Number Coincidences and the Anthropic Principle in Cosmology", 1974.

Principe anthropique faible (WAP)

Notre position dans l'Univers est privilégiée dans la mesure où elle est compatible avec notre existence comme observatrices.

Principe anthropique fort (SAP)

L'Univers (et donc les paramètres fondamentaux dont il dépend) doit être tel qu'il admet la création d'observatrices en son sein à une certaine étape [de son évolution].

L'hypothèse du multivers permet de se passer du SAP.

Exemple : la valeur de Λ

La constante cosmologique Λ peut être assimilée à une forme d'énergie du vide ayant une pression négative :

- ▶ Si $\Lambda \ll 0$ l'Univers risque de s'effondrer avant qu'apparaissent les grandes structures galactiques.
- ▶ Si $\Lambda \gg 0$, l'expansion risque d'être trop forte et d'empêcher la gravitation de regrouper la matière en grandes structures.

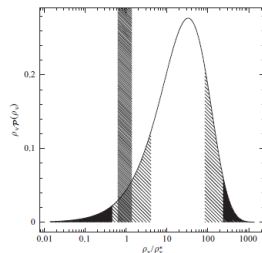
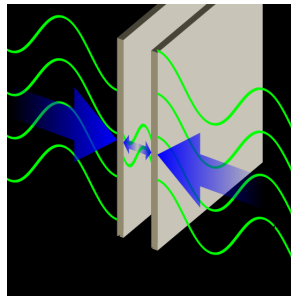
Il y a donc des **bornes** que Λ ne doit pas dépasser sinon l'Univers n'aurait pas pu voir apparaître les structures et la vie.

Problème : l'énergie du vide prédite par la mécanique quantique est de $10^{113} J.m^{-3}$!

Catastrophe du vide : avec une telle valeur, Λ serait si importante qu'elle aurait empêché la gravitation de construire aucune structure galactique.

Solution : Λ varie dans le multivers nous vivons dans l'univers où la valeur de Λ est compatible avec l'apparition de la vie.

⇒ on peut prédire la probabilité qu'une observatrice prise au hasard dans le multivers mesure une valeur de Λ proche de la nôtre.





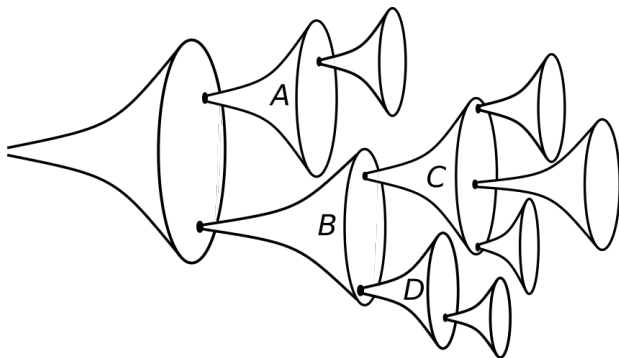
Pour le cosmologiste George Ellis ces prédictions ne sont que « des tests de consistance »

Elles reposent toutes sur le principe que tout ce qui peut arriver doit arriver dans un des Univers du multivers. Or aucune preuve expérimentale ne peut réfuter un tel principe !

L'hypothèse du multivers serait donc incapable de réaliser des prédictions et irréfutable.

George Ellis, "On the Philosophy of Cosmology", 2013

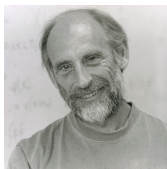
Certains physiciens proposent des hypothèses de multivers réfutables ou des tests empiriques de certains modèles d'univers.



Cosmological Natural Selection : Lee Smolin, 2004, "Scientific Alternative to the Anthropic Principle"

La crise de la réfutabilité

Certains physiciens ont proposé de se débarrasser des notions de prédictibilité et de réfutabilité :



Tout au long de ma longue expérience de scientifique, j'ai entendu l'expression « irréfutable » jetée à la face de tant d'idées importantes, que je suis incliné à penser qu'aucune idée ne peut avoir de grand mérite sans s'attirer ce genre de critique.

Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape*, 2008, p.193.

—o Quels ont été les problèmes philosophiques discutés en cosmologie depuis 1917 ?

—o Quels ont été les problèmes philosophiques discutés en cosmologie depuis 1917 ?

Les principaux problèmes de philosophie générale des sciences :
sous-détermination, induction, confirmation, démarcation, hypothèses auxiliaires, ...

—o Quels ont été les problèmes philosophiques discutés en cosmologie depuis 1917 ?

Les principaux problèmes de philosophie générale des sciences :
sous-détermination, induction, confirmation, démarcation, hypothèses auxiliaires, ...

—o Pourquoi les cosmologistes ont rencontré ces problèmes philosophiques ?

—o Quels ont été les problèmes philosophiques discutés en cosmologie depuis 1917 ?

Les principaux problèmes de philosophie générale des sciences :
sous-détermination, induction, confirmation, démarcation, hypothèses auxiliaires, ...

—o Pourquoi les cosmologistes ont rencontré ces problèmes philosophiques ?

Ces problèmes sont apparus parce qu'ils étaient posés par le contexte scientifique de l'époque : ce sont des problèmes **intrinsèques** à l'activité scientifique.

—○ Qu'est-ce que cela nous apprend sur la science et la méthode scientifique ?

—○ Qu'est-ce que cela nous apprend sur la science et la méthode scientifique ?

Il n'y a pas une méthode scientifique canonique : la cosmologie est une science **pluraliste** qui a créé son propre modèle de scientificité à partir des apports et des méthodes d'autres sciences.

—o Qu'est-ce que cela nous apprend sur la science et la méthode scientifique ?

Il n'y a pas une méthode scientifique canonique : la cosmologie est une science **pluraliste** qui a créé son propre modèle de scientificité à partir des apports et des méthodes d'autres sciences.

—o Comment ces controverses ont affecté le développement de la science de l'Univers ? Ont-elles été fécondes ou stériles ?

—○ Qu'est-ce que cela nous apprend sur la science et la méthode scientifique ?

Il n'y a pas une méthode scientifique canonique : la cosmologie est une science **pluraliste** qui a créé son propre modèle de scientificité à partir des apports et des méthodes d'autres sciences.

—○ Comment ces controverses ont affecté le développement de la science de l'Univers ? Ont-elles été fécondes ou stériles ?

Cela dépend si ces controverses ont poussé les cosmologistes à réagir aux critiques et à aller chercher de nouveaux liens avec d'autres disciplines et avec les observations.

La cosmologie est une science dans laquelle les controverses épistémologiques ont accompagné les principaux progrès au cours du XX^e siècle, et cela continue aujourd'hui.

Ces débats ne concernent pas toute la communauté mais sont vécus très intensément. Certains ont permis de clarifier les principaux concepts de la cosmologie, d'autres de développer les liens avec les observations ou avec d'autres disciplines.

Ils illustrent la production conflictuelle du savoir : les controverses peuvent être fécondes et générer des connaissances.

Remerciements

Jean-Pierre Martin et la SAF pour leur aimable invitation.
Chantal Balkowski, Mathieu Puech et David Valls-Gabaud de
l'Observatoire de Paris-Meudon pour la formation au sein des DU
ECU et DU SU.

George Ellis, Julien Grain et Christian Marinoni pour leurs
éclairages.

Mes proches et mes élèves qui supportent ma passion pour les
théories farfelues et réfutées.

Bibliographie

Histoire et philosophie de la cosmologie :

- ▶ George Ellis, " On the Philosophy of Cosmology" , 2013.
- ▶ Helge Kragh, *Conceptions of Cosmos*, Oxford University Press, 2007.
- ▶ Jacques Merleau-Ponty, *Sur la science cosmologique*, EDP Science, 2003
- ▶ Gauvain Leconte-Chevillard, *Histoire d'une science impossible*, Editions de la Sorbonne, 2023

Philosophie des sciences :

- ▶ Alan Chalmers, *Qu'est-ce que la science ?*, Éditions La Découverte, 1987.
- ▶ Anouk Barberousse, Denis Bonnay et Mikaël Cozic, *Précis de philosophie des sciences*, Vuibert, 2011.
- ▶ Sandra Laugier et Pierre Wagner, *Textes-clés de la philosophie des sciences*, Vrin, 2004.

Ressources internet :

- ▶ *Encyclopédie philosophique en ligne* : encyclo-philos.fr/
- ▶ *Stanford Encyclopedia of Philosophy* : plato.stanford.edu

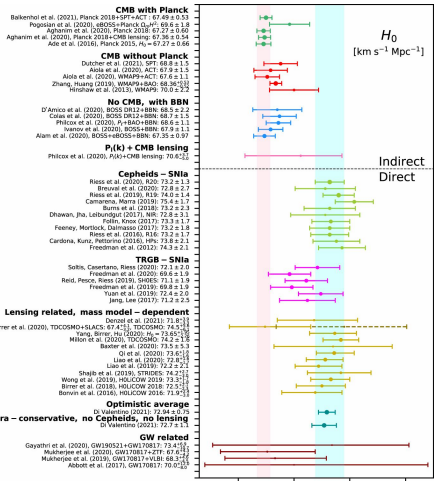
Cimetière des diapos rejetées

La tension H_0

Désaccord entre les mesures locales (≈ 73 km/s/Mpc) et cosmologiques (≈ 67 km/s/Mpc) de la valeur actuelle du paramètre de Hubble (H_0).

Peut être vu comme un signe de la crise du modèle standard Λ CDM mais aussi signe de la maturité de la cosmologie.

La cosmologie est devenue une science **riche en données**.



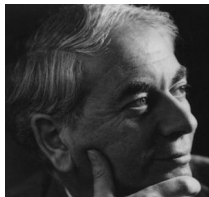
Physique des particules et cosmologie

- ▶ **1967** : Fred Hoyle et Roger Tayler, « The Mystery of the Cosmic Helium Abundance », *Nature* 203
- ▶ **1969** : Shvartsman, « Density of Relict Particles with Zero Rest Mass in the Universe », *JEPT Letters*
- ▶ **1977** : Gary Steigman, David Schramm, et James Gunn, « Cosmological Limits to the Number of Massive Leptons » *Physics Letters B* 66.2

Le nombre de types de *leptons* influe sur le nombre de neutrinos et la durée de la nucléosynthèse primordiale, donc sur l'abondance relative d' ${}^4\text{He}$ dans l'Univers \Rightarrow types de leptons ≤ 5 .

Résultat vérifié par le Large Electron-Positron Collider du CERN dans les années 1980.

Physique des particules et cosmologie



*Les physiciens voyaient [la cosmologie] d'un mauvais œil. Les physiciens en général, et les physiciens des particules en particulier disaient que **la cosmologie était fortement spéculative**, que tout était incertain. Ils étaient très dédaigneux. [...] Les choses se mirent à changer quand, par exemple, les physiciens réalisèrent que la cosmologie pouvait faire bien mieux que la physique des particules quand il s'agissait de restreindre le nombre de types de neutrino. Là, les physiciens ont dû admettre que les cosmologistes tenaient quelque chose.*

Dennis Sciama, *Origins*, p.145-146

La cosmologie en URSS

Cette connexion entre physique des particules et cosmologie va permettre l'émergence d'une communauté de cosmologistes soviétiques : Andreï **Sakharov** (1921-1989), Yakov **Zel'dovich** (1914-1987) s'éloignent des projets militaro-scientifiques de physique nucléaire dans les années 1960 et commencent des travaux en cosmologie qui entraînent toute une nouvelle génération de cosmologistes (Sunyaev, Shvartsman, Starobinsky, Linde, ...).



« *L'Univers est l'accélérateur de particules du pauvre* » est le mot d'ordre de cette nouvelle direction de la science [cosmologique].

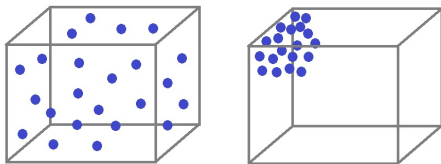
Zel'dovich

Critique 1 : le mécanisme de l'inflation

Le mécanisme de l'inflation suppose un champ inconnu en physique des particules, et il y a très peu de candidats sérieux pour expliquer l'expansion exponentielle de l'Univers jeune.

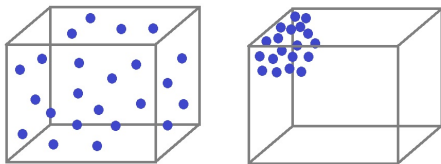
Critique 2 : les conditions initiales de l'Univers

Les énigmes de la courbure et de l'horizon sont des problèmes liés aux conditions initiales de l'Univers. Or ces conditions initiales ne peuvent poser de réels problèmes scientifiques car aucune observation ni aucune théorie ne prouve que certaines conditions initiales sont plus probables que d'autres.



Critique 2 : les conditions initiales de l'Univers

Les énigmes de la courbure et de l'horizon sont des problèmes liés aux conditions initiales de l'Univers. Or ces conditions initiales ne peuvent poser de réels problèmes scientifiques car aucune observation ni aucune théorie ne prouve que certaines conditions initiales sont plus probables que d'autres.



Zel'Dovich : " J'ai choisi de croire que l'Univers a commencé en étant isotrope !"