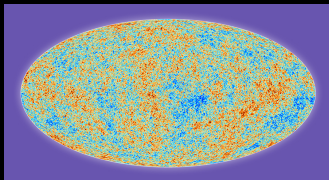


# De la cosmologie standard aux univers multiples

Denis Gialis

Astrophysicien



## Qu'est-ce que l'Univers ?



▷ **Première idée** - L'Univers est l'ensemble de tout ce qui existe physiquement.

▷ **Seconde idée** - L'Univers est l'ensemble de tout ce qui nous a été, est ou sera accessible par l'observation.

## Qu'est-ce que l'Univers ?



▷ **Première idée** - L'Univers est l'ensemble de tout ce qui existe physiquement.

▷ **Seconde idée** - L'Univers est l'ensemble de tout ce qui nous a été, est ou sera accessible par l'observation.

# L'Univers, un système physique pas comme les autres...

▷ L'Univers est un système physique unique

↪ Pas de démarche statistique possible sur ses propriétés globales...

▷ L'Univers contient ses observateurs

↪ Vision limitée dans le temps et dans l'espace...

▷ L'Univers réunit toutes les échelles d'espace et de temps

↪ De l'infiniment petit à l'infiniment grand,  
de l'infiniment court à l'infiniment long...

# De la construction des modèles cosmologiques...

(1/3)

## ▷ Une contrainte scientifique

↪ Tout modèle cosmologique se doit de rendre compte de l'ensemble des observations

[J.-P. Uzan, 2016 & 2010]

## ▷ Un postulat d'universalité

↪ Les lois de la physique sont identiques en tout point de l'espace-temps

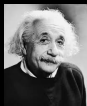
[J.-P. Uzan, 2016] [G.F.R. Ellis, 2006]

## ▷ Une question fondamentale...

↪ Quelle est la nature du temps et de l'espace ?

↪ Opposition entre un espace-temps substantiel et un espace-temps relationnel

[A. de Saint-Ours, 2006 & 2011]



**A. Einstein** - *La distinction entre le passé, le présent et le futur n'est qu'une illusion obstinément persistante.*



**J. Prévert** - *Le temps, on dit qu'il passe alors qu'il s'assoit et reste là, à vous regarder passer !*



# De la construction des modèles cosmologiques...

(2/3)

## ▷ Les hypothèses incontournables

(1) Une théorie de la gravité

(2) Une théorie de la matière, du rayonnement et de leurs interactions non-gravitationnelles

(3) Une hypothèse de symétrie...

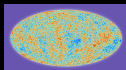
(4) Une hypothèse sur la forme globale de l'Univers.

# De la construction des modèles cosmologiques...

(3/3)

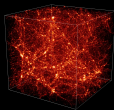
## ▷ Les principales observations...

- (1) L'existence d'un fond diffus cosmologique (Cosmic Microwave Background)
- (2) L'isotropie du CMB et de la matière visible à grande échelle

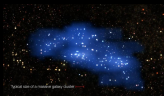


[ESA, *Planck project*, 2018]

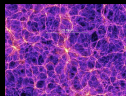
- (3) L'abondance relative des éléments chimiques
- (4) L'expansion de l'Univers et son accélération
- (5) La structuration de la matière visible en amas et en super-amas



[IPN Lyon, CEA/Irfu]



[ESO]



[MPI of Astrophysics, *Millenium Project*]



# Le modèle de concordance

(1/3)

## ▷ Ses ingrédients théoriques...

(1) La relativité générale :  $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi\mathcal{G}}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$

(2) La théorie quantique :  $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = H |\Psi\rangle$

## ▷ Ses hypothèses cosmologiques...

- (1) Un Big Bang suivi d'une phase d'expansion ultra-rapide : l'inflation
- (2) L'introduction de matière noire
- (3) L'existence d'une énergie noire

# Le modèle de concordance

(1/3)

## ▷ Ses ingrédients théoriques...

(1) La relativité générale :  $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi\mathcal{G}}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$

(2) La théorie quantique :  $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = H |\Psi\rangle$

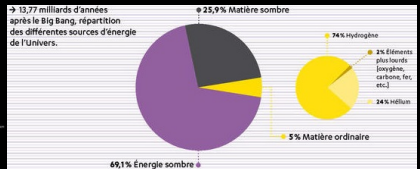
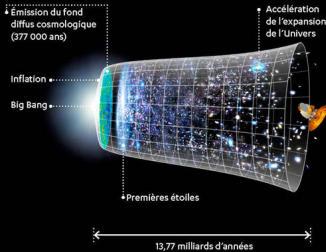
## ▷ Ses hypothèses cosmologiques...

(1) Un Big Bang suivi d'une phase d'expansion ultra-rapide : l'inflation

(2) L'introduction de matière noire

(3) L'existence d'une énergie noire

# Le modèle de concordance (2/3)



# Le modèle de concordance

(3/3)

## ▷ Les grandes questions...

↪ Qu'est-ce que le Big Bang ?

↪ De quoi est composée la matière noire ?

Une nouvelle controverse ? [F. Hammer & al., ApJ, 2019]

↪ Qu'est-ce que l'énergie noire ?

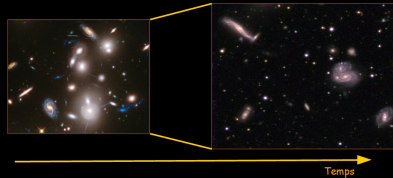
## ▷ Un autre problème...

↪ L'abondance observée (trop faible) du lithium

## Au-delà de notre Univers...

▷ L'univers est-il fini (sans bord) ou infini ?

L'idée d'un univers plus dense et plus chaud dans le passé ne permet pas de conclure.



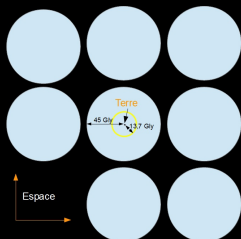
- (1) Dans un univers fini suffisamment petit : observation d'images multiples...
- (2) Dans un univers fini suffisamment grand : difficile !
- (3) Dans un univers infini : la répétition est inévitable !

## Quelques exemples d'univers...

(1/5)

### ▷ L'univers de type *patchwork*

Chaque observateur ne voit qu'une partie de l'univers...



Chaque partie peut se répéter un nombre infini de fois !

## Quelques exemples d'univers...

(2/5)

### ▷ L'univers de type *inflationnaire*

L'univers est rempli d'un champ d'*inflaton*.

Les fluctuations de ce champ créent des expansions inflationnaires.

Notre Univers est une *bulle*, résultat d'une de ces expansions...

↔ La collision de bulles pourrait-elle laisser des traces observables sur le CMB ?

# Quelques exemples d'univers...

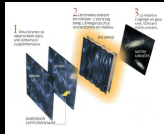
(3/5)

## ▷ Le multi-univers *branaire*

L'univers posséderait 9 dimensions.

Notre Univers serait une *brane* ayant 3 dimensions spatiales.

Le Big Bang serait le résultat d'une collision avec une autre brane.



↪ La collision de branes pourrait-elle produire des ondes gravitationnelles primordiales observables ?

↪ Les gravitons seraient des messagers entre les différents branes...



## Quelques exemples d'univers...

(4/5)

### ▷ Le multi-univers *quantique*

Ré-interprétation de la mécanique quantique [Everett, 1957]

↪ Chaque possibilité relative à une fonction d'onde se réalise dans un univers.

↪ Des univers se créent ou se séparent un nombre infini de fois.

## Quelques exemples d'univers...

(5/5)

### ▷ L'univers *mathématique*

Chaque univers mathématiquement possible est réel.

Les mathématiques ne sont plus un outil descriptif mais sont la réalité.

Seules les relations mathématiques existent...

## Conclusion

Si l'univers était un roman, nous n'avons réussi à lire que quelques bouts de phrases. Quant à connaître son histoire...