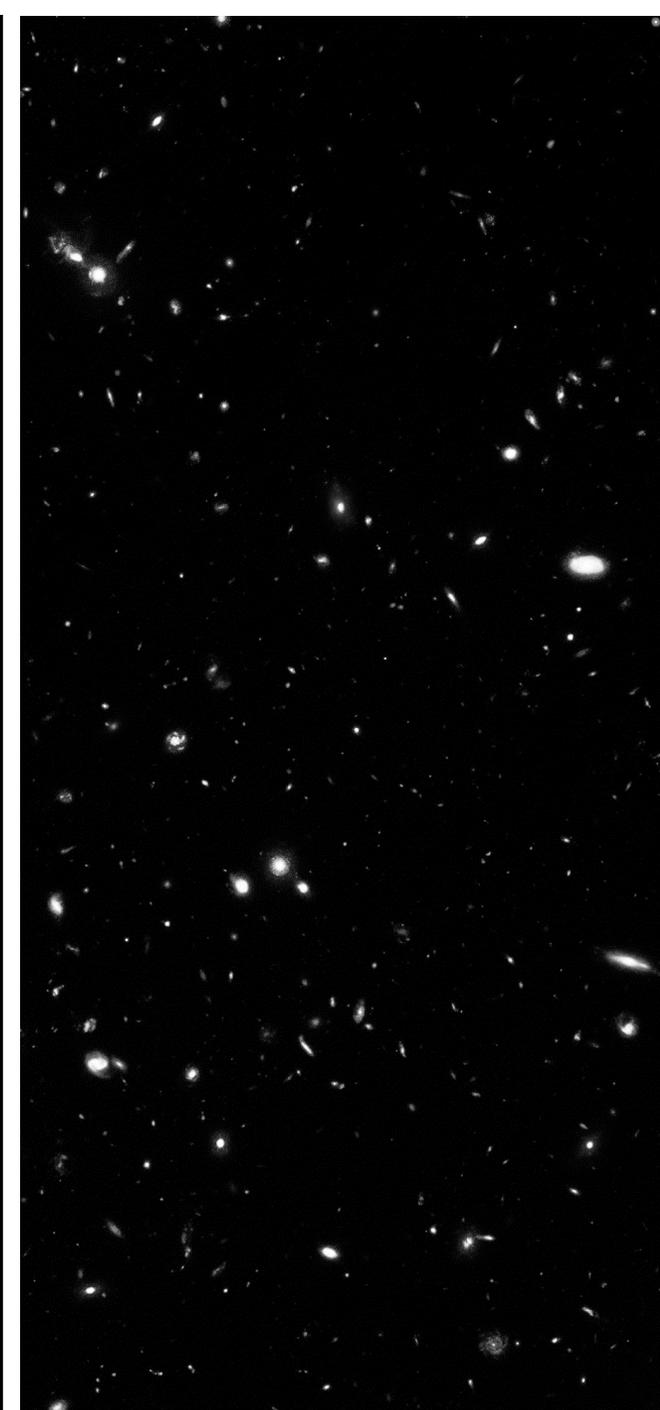


**ÉNERGIE NOIRE ET
SOLUTIONS COSMOLOGIQUES
DE LA THÉORIE DES CORDES**

PAUL MARCONNET



INTRODUCTION



Cosmologie : étude de l'univers dans son ensemble

- Décrite par la théorie de la **Relativité Générale**, régie par les **équations d'Einstein (1915)** :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Géométrie de l'espace-temps

Contenu en énergie/matière

- **Équation de Friedmann (1924)** :

$$\left(\frac{da}{dt}\right)^2 - \frac{8\pi G}{3}\rho\frac{1}{a} = \pm\frac{c^2}{r^2}$$

Facteur d'échelle

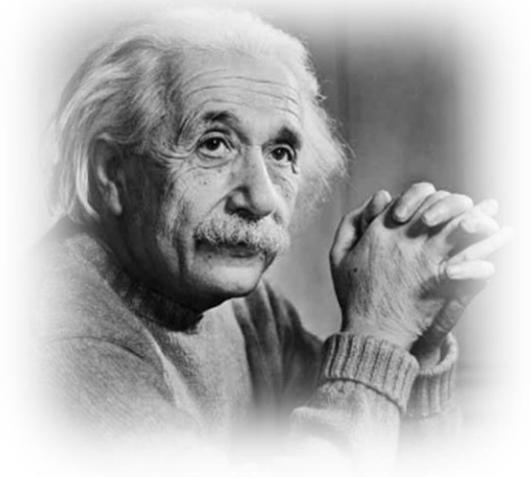
Densité d'énergie

Rayon de courbure de l'univers

Principe copernicien :

Univers = homogène + isotrope

- **Facteur d'échelle** $a(t) \sim$ taille de l'univers $D(t) = D_0 a(t)$



Évolution de l'univers : ne peut pas être statique !

Son destin est scellé par sa forme :

- Fini (sphérique) : « *Big Crunch* »
- Infini (hyperbolique) : « *Big Chill* »

Observation de l'expansion de l'univers :

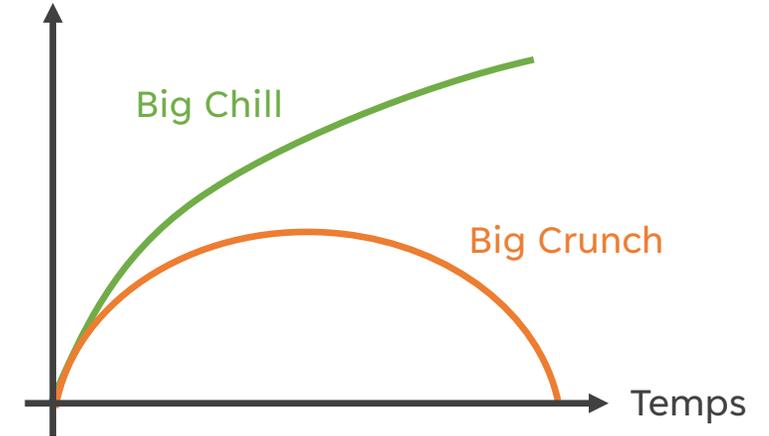
Edwin Hubble (1929)



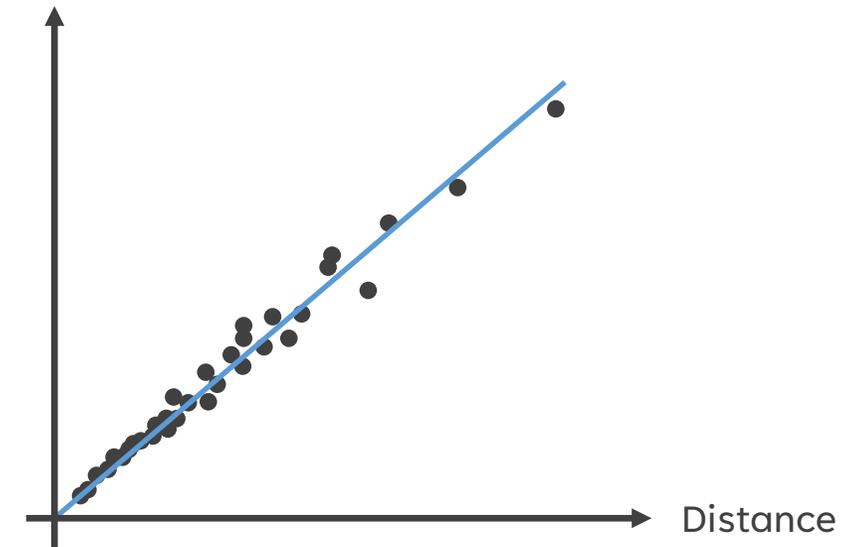
$$v = H_0 D$$

Paramètre de Hubble
= taux d'expansion, positif

Distance entre les galaxies



Vitesse d'éloignement



Expansion accélérée de l'univers :

Équipes de **S. Perlmutter** et **A. Riess – B. Schmidt** (1998) : Prix Nobel 2011

- Quel **cadre théorique** pour cette observation ?

(A) (Ré-) introduire une **constante cosmologique** dans les éq. d'Einstein :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Géométrie

ou alors (?)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

Source d'énergie

→ Possibilité d'avoir une accélération exponentielle :

Solution de de Sitter : $a(t) = a_0 \exp \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t$

B Introduire de **nouvelles particules** (e.g. champs scalaires)

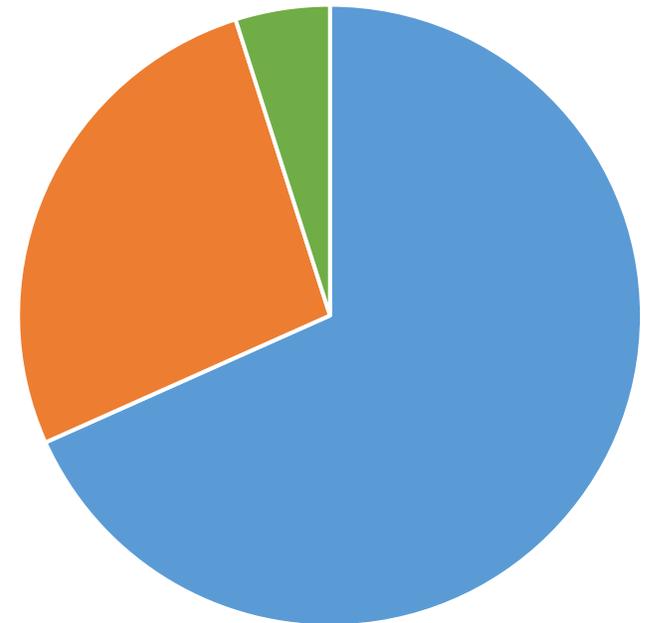
dont **l'énergie potentielle** imite la constante cosmologique $\Lambda \longrightarrow V(\phi)$

Énergie noire : forme d'énergie remplissant uniformément l'univers

- Pression négative
- Induit une « force gravitationnelle répulsive »

Budget énergétique de l'univers :

- 5% de **matière ordinaire**
- 27% de **matière noire**
- 68% d'**énergie noire**



Brève histoire de notre univers :



Inflation : période d'expansion très rapide pendant laquelle l'univers a grossi d'un facteur considérable en un temps très bref juste après le Big Bang

$$a(t_{\text{fin}}) = a(t_{\text{début}}) \times 10^{26} \simeq a(t_{\text{début}}) \times e^{60}$$

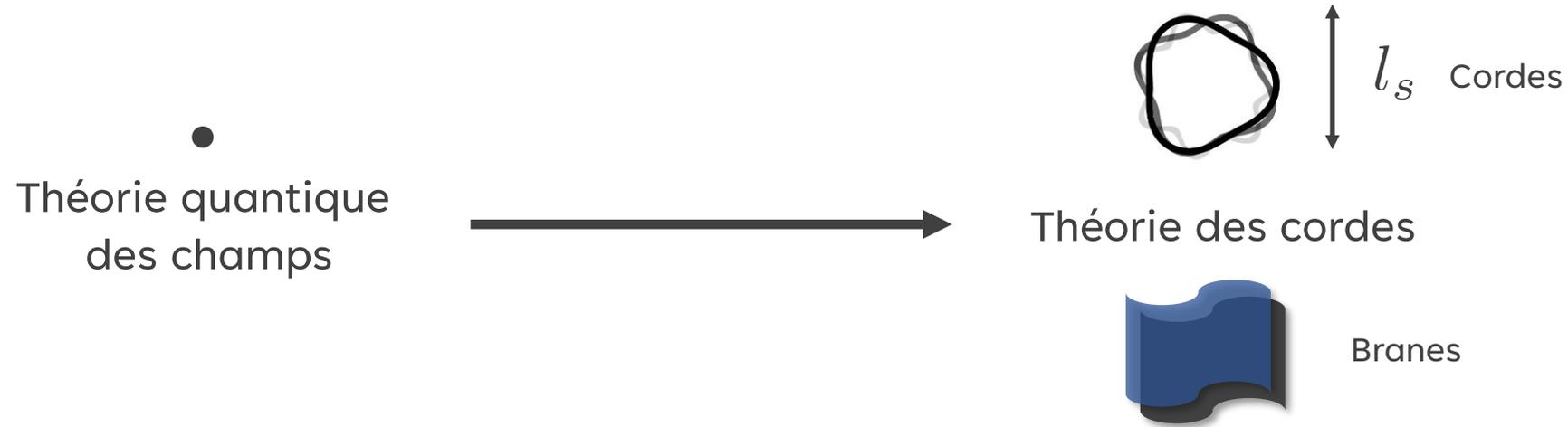
Nombre de e-folding N

$$t_{\text{début}} \sim 10^{-36} \text{ s}, \quad t_{\text{fin}} \sim 10^{-33} \text{ s}, \quad t_{\text{aujourd'hui}} \sim 13,8 \text{ milliards d'années}$$

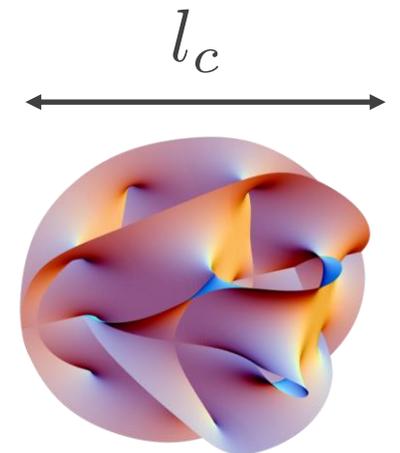
→ Comprendre les premiers instants de l'univers et les fluctuations quantiques à l'origine de la formation des structures : requiert une **théorie de gravité quantique**

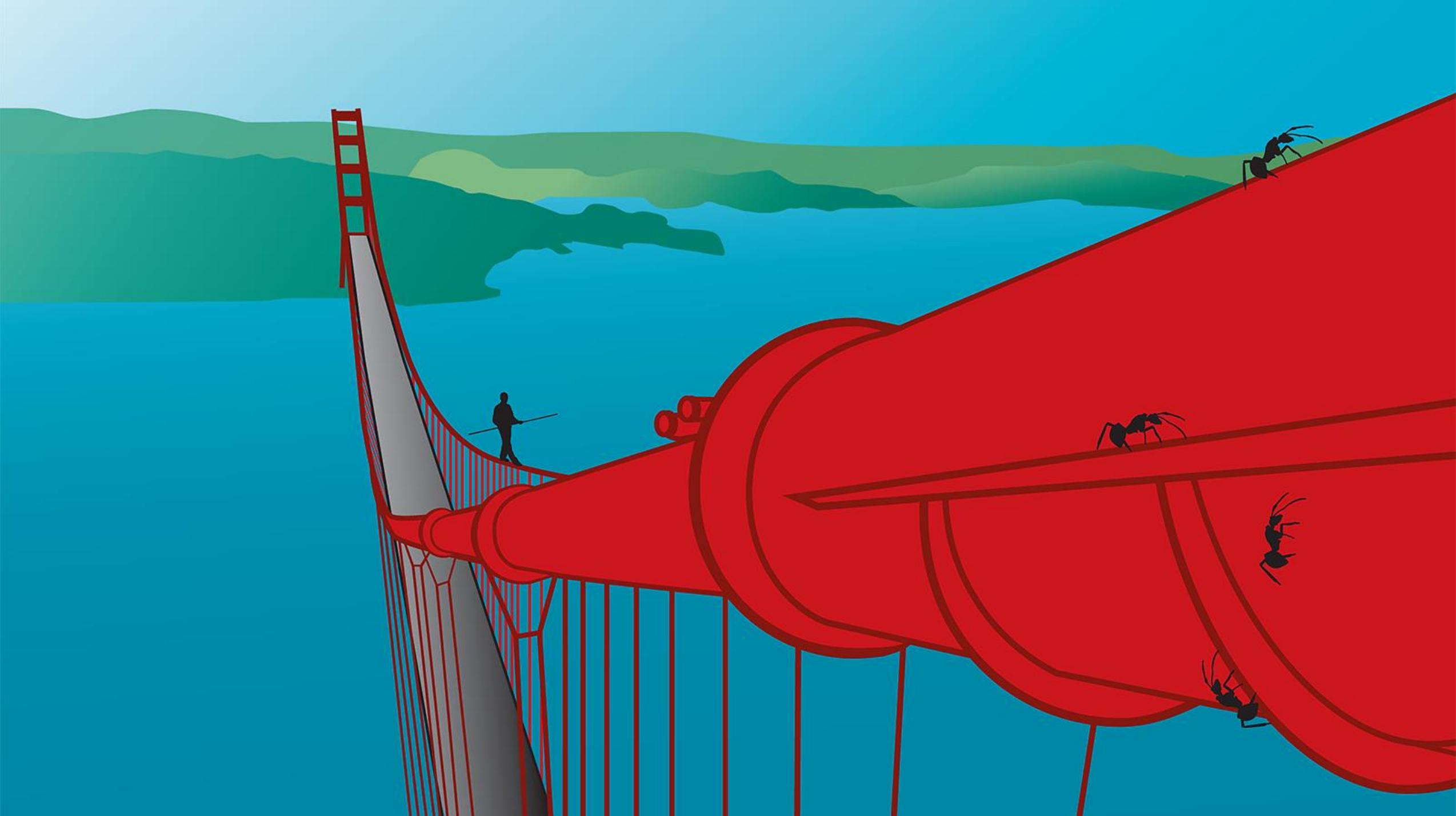
Théorie des cordes : candidat à une théorie de gravité quantique (1984)

- Remplace les **particules ponctuelles** par des **objets étendus**

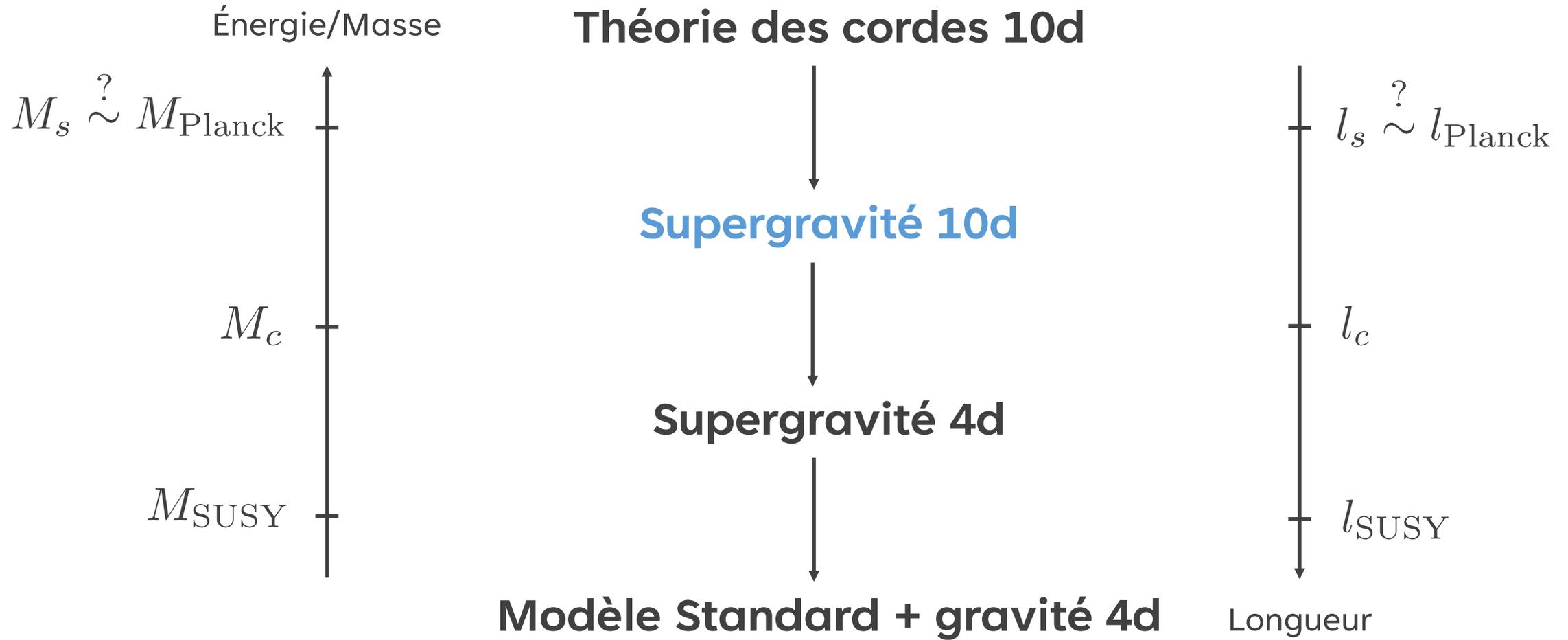


- Prédit l'existence de **6 dimensions supplémentaires**
- Prédit l'existence de **particules scalaires** qui pourraient correspondre à une source d'énergie noire





Théorie de supergravité : approximation « basse énergie » de la TdC

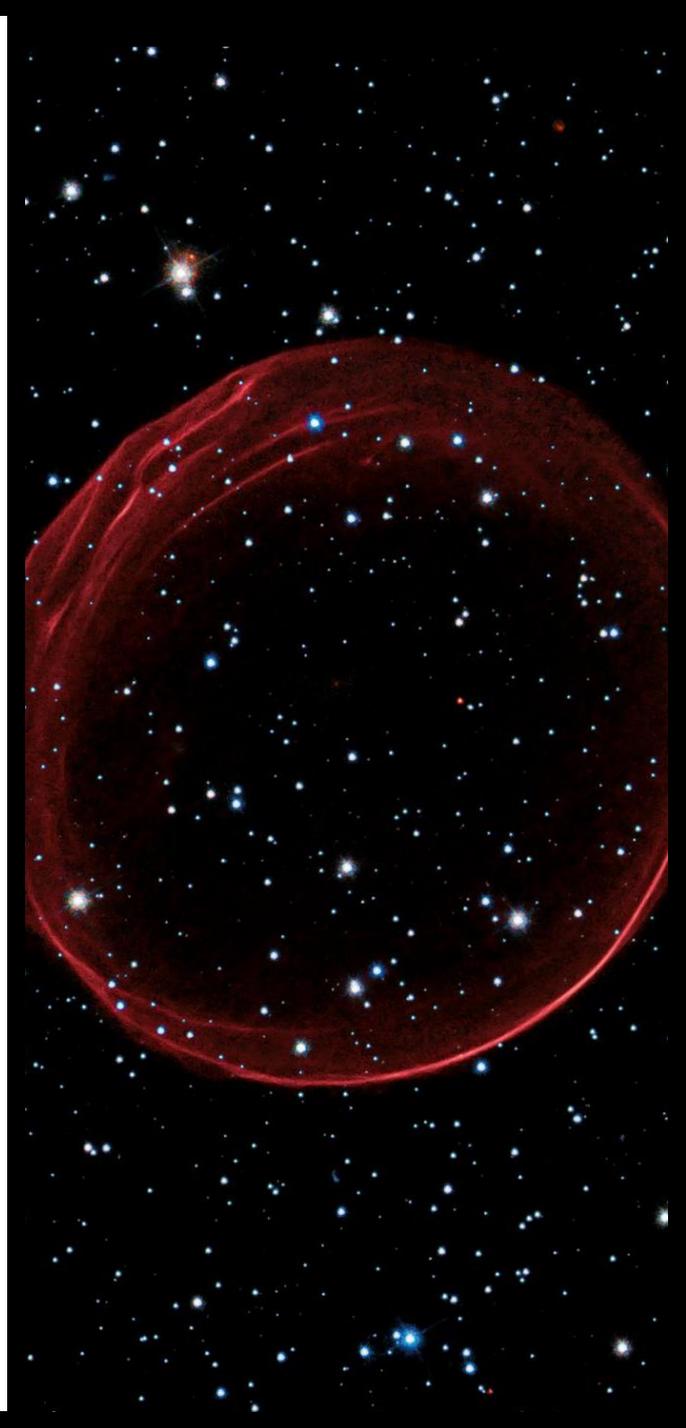


$$l_{\text{Planck}} \simeq 10^{-35} m$$

Ma thèse :

- Comprendre dans quelle mesure **la théorie des cordes** peut rendre compte de **l'accélération cosmique** et apporter une explication quant à la nature de **l'énergie noire** et au mécanisme d'**inflation**
- **En pratique** : comprendre si les **équations** de cette théorie admettent des **solutions** qui décrivent un univers en expansion accélérée, avec des **propriétés phénoménologiques viables**
 1. **Solutions de de Sitter**
 2. **Solutions cosmologiques** plus générales

SOLUTIONS DE DE SITTER



État de l'art :

- Obtenir de Sitter en TdC = problème notoirement compliqué :

Théorèmes *no-go* interdisant l'existence de de Sitter dans de nombreuses configurations [Gibbons '84, Maldacena, Nuñez '01]

« *La théorie des cordes semble conspirer contre de Sitter* »

- Solutions de de Sitter en supergravité 10d, recette :

Flux

Courbure interne

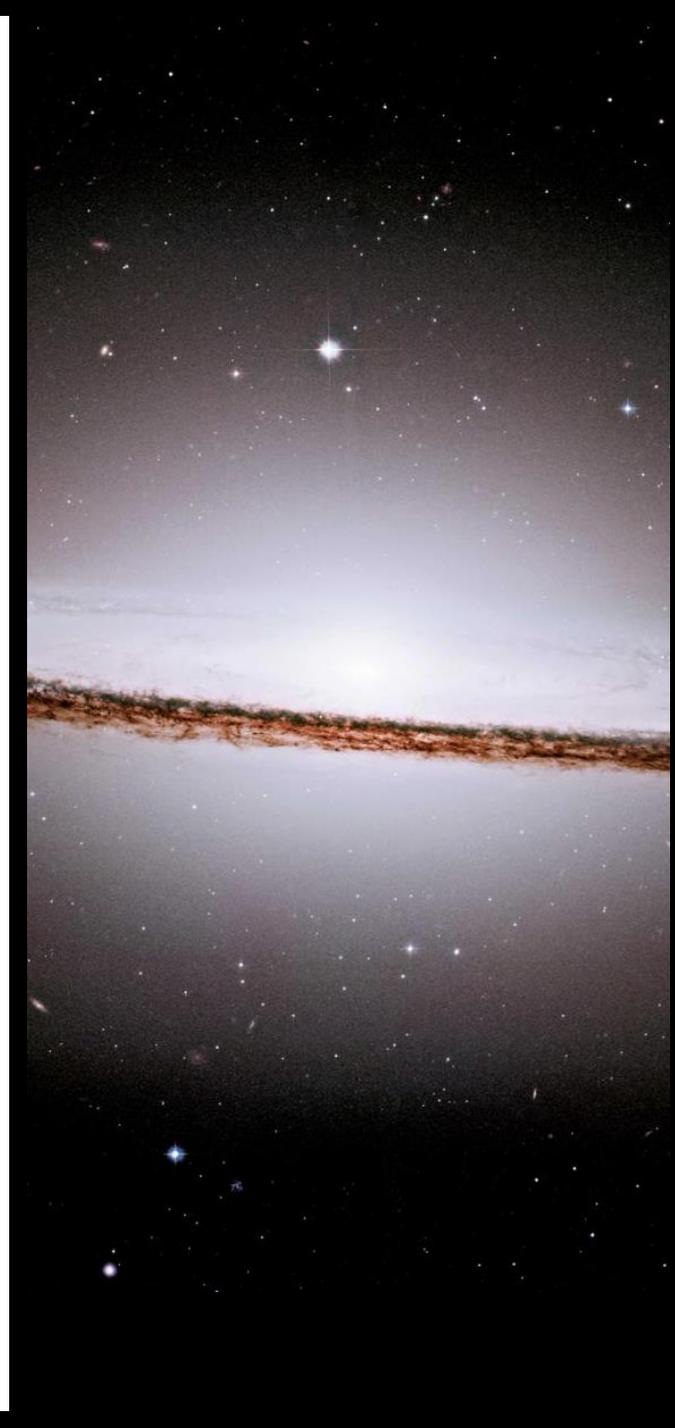
Sources

- Seuls quelques recoins isolés de l'espace des paramètres sont susceptibles d'abriter des solutions de de Sitter...

Résultats :

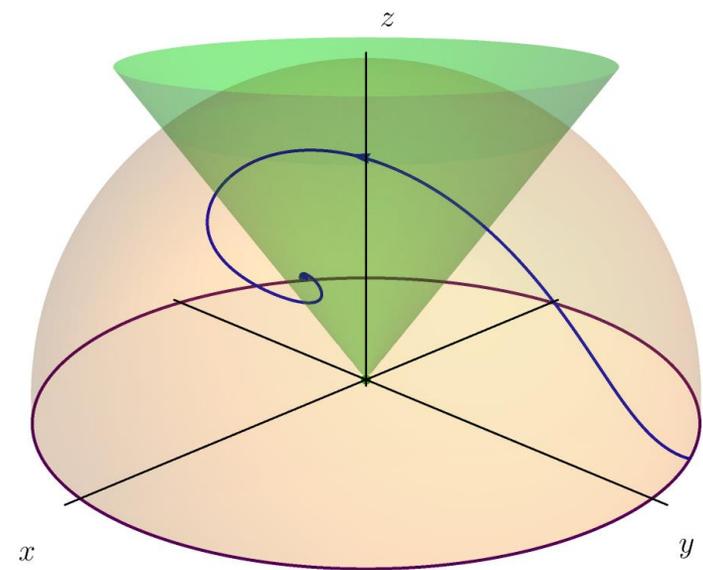
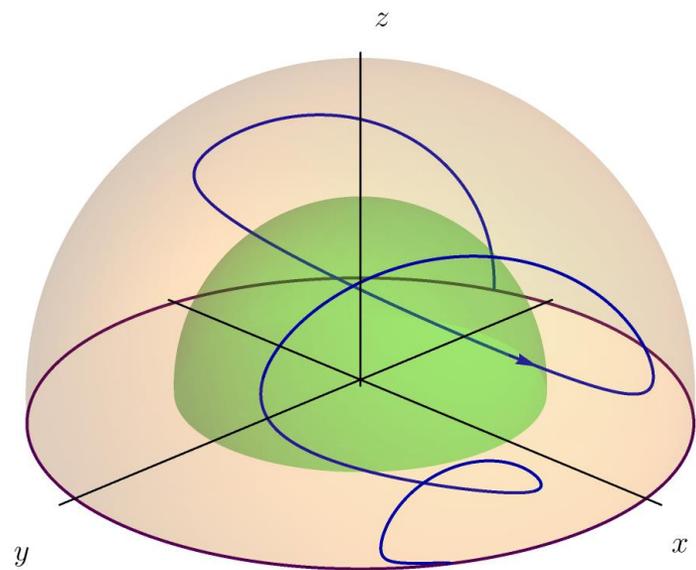
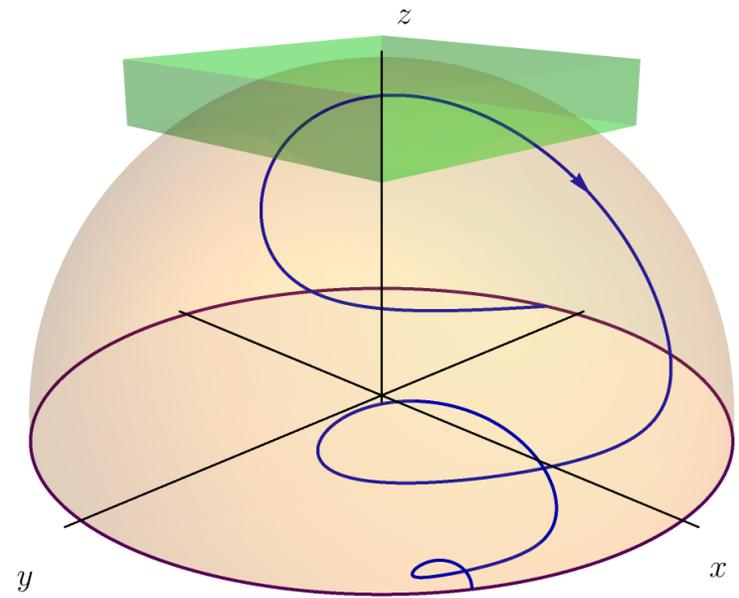
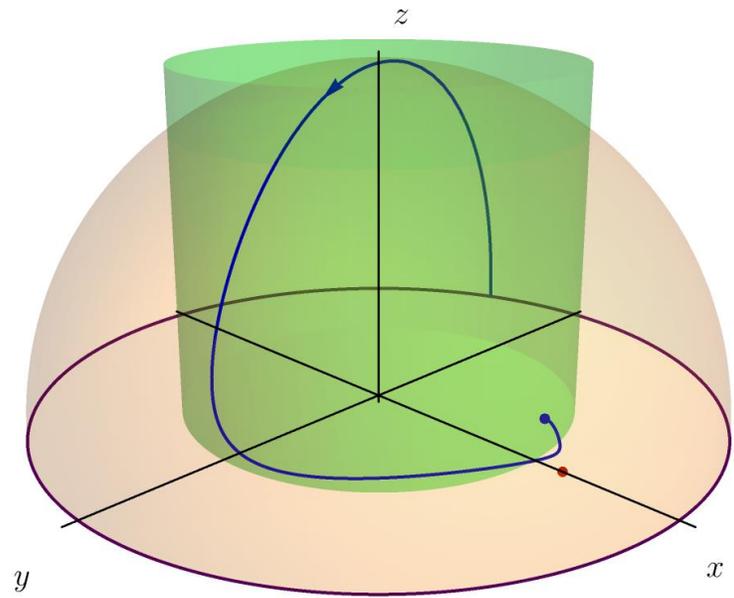
- Découverte de **nouvelles solutions de dS**, avec de nouvelles propriétés
[Andriot, PM, Wrase '20, arXiv 2005.12930]
- Développement d'outils mathématiques et numériques pour étudier ces propriétés : **stabilité, compacité, « classicalité »** [Andriot, PM, Wrase '21, arXiv 2006.01848],
[Andriot, Horer, PM '22, arXiv 2204.05327], [Andriot, PM, Rajaguru, Wrase '22, arXiv 2209.08015]
- **Classification** des solutions possibles et **cartographie de l'espace des paramètres** → organiser et orienter son **exploration**
[Andriot, Horer, PM '22, arXiv 2201.04152]
- Démonstration de **nouveaux théorèmes *no-go*** dans certaines régions de l'espace des paramètres
[Andriot, Horer, PM '22, arXiv 2204.05327], [En cours]
- Étude l'impact des **dimensions supplémentaires** de la TdC sur le spectre d'**ondes gravitationnelles** [Andriot, PM, Tsimpis '21, arXiv 2103.09240]

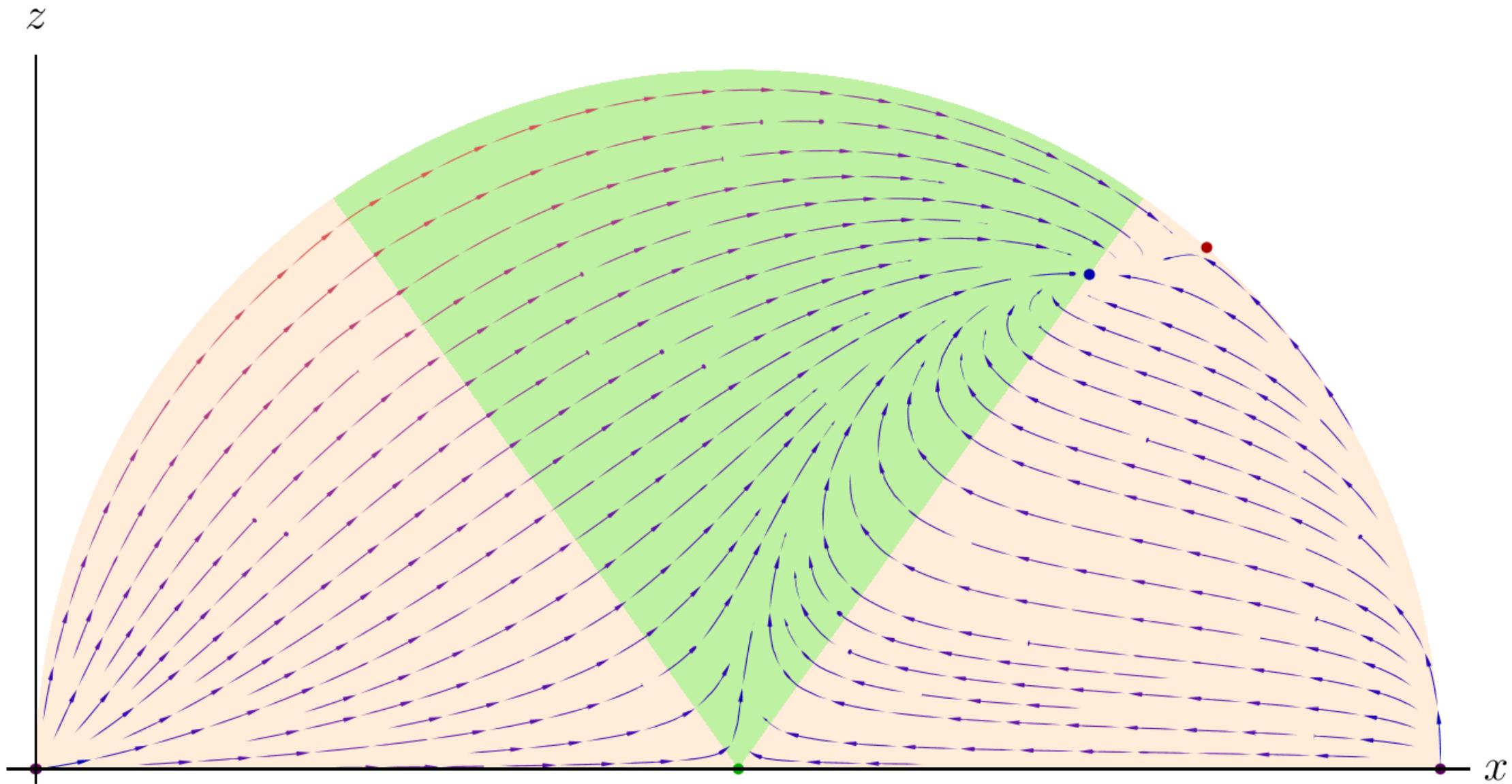
SOLUTIONS COSMOLOGIQUES

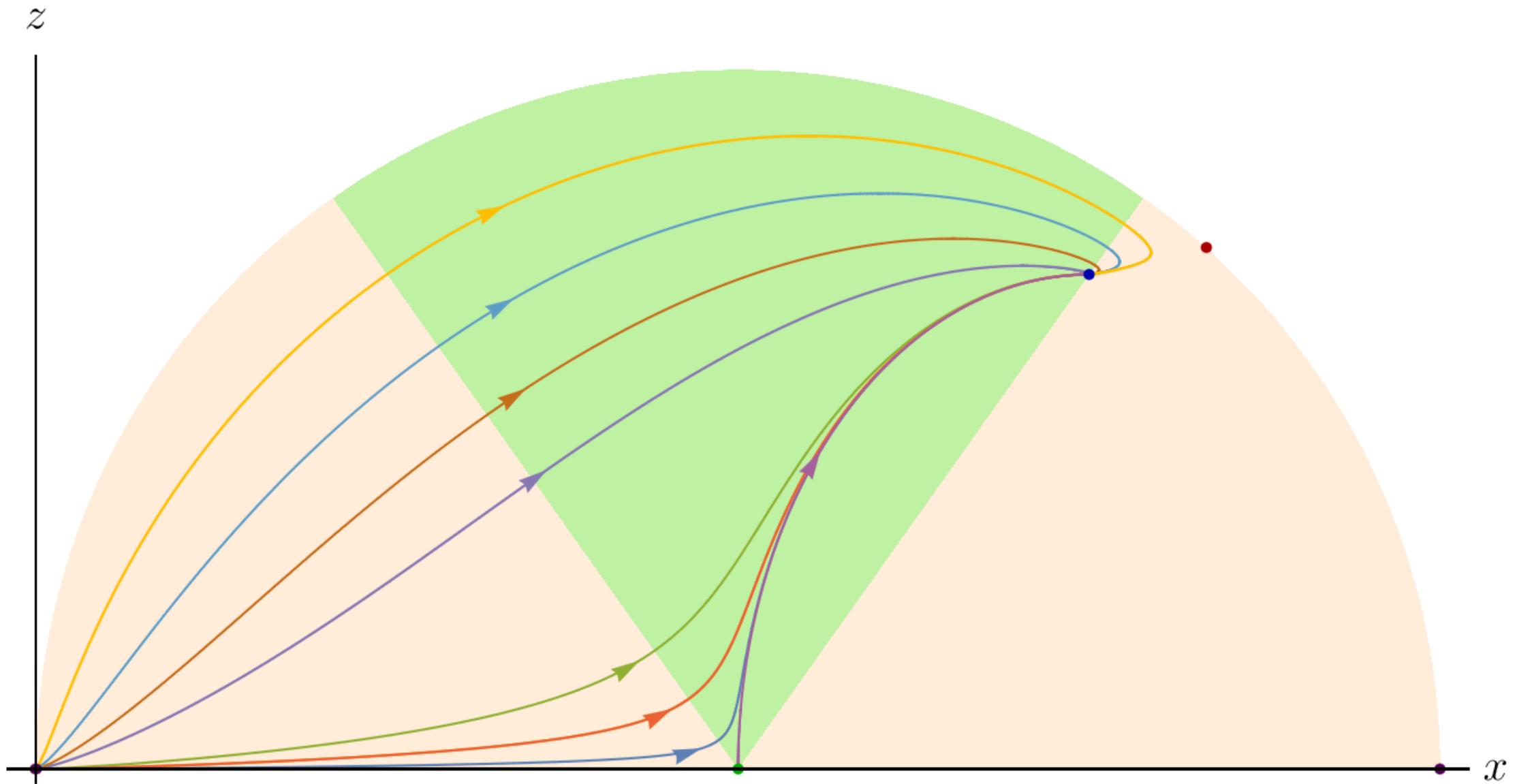


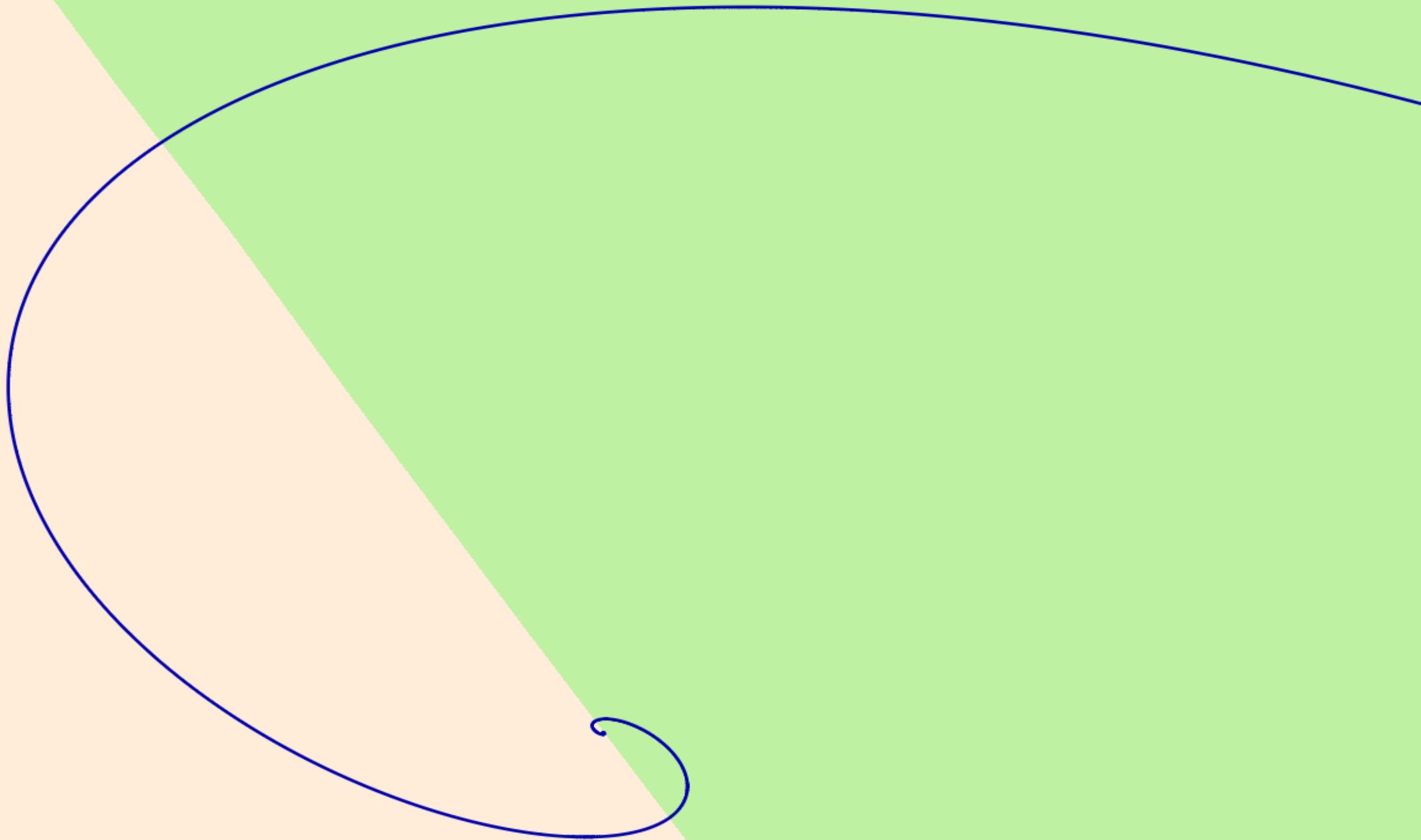
Résultats : [PM, Tsimpis '22, arXiv 2210.xxxxx]

- **Reformuler les équations** dans un autre langage, dans lequel **l'existence de solutions avec expansion accélérée est manifeste**, et dont les **propriétés physiques** sont facilement interprétables
- **Accélération transitoire** avec contrôle paramétrique sur le nombre de e-folding N (jusque-là seulement $N \sim \mathcal{O}(1)$ pas viable)
- **Accélération éternelle et semi-éternelle**
- Possibilité d'avoir **alternance de phases accélérées et non-accélérées**









CONCLUSION



Conclusion :

- **Énergie noire** : indice pointant vers de la **nouvelle physique**
- Rendre compte d'une constante cosmologique par le biais de la théorie des cordes représente **un réel défi**
- Quelles **conséquences pour la TdC** ? Un échec en temps que test expérimental ?
- Quelles **conséquences pour la cosmologie** ?
- Routes alternatives, **au-delà de de Sitter** : des progrès encourageants, **mais tout reste à découvrir !**

MERCI !

