



TÉCNICO
LISBOA



centra

Gravité modifiée en champ fort

Antoine Lehébel

Instituto Superior Técnico, CENTRA

Concours CRCN, Section 02

22 mars 2021

Mon parcours



Doctorat, LPT Orsay (Prix de thèse LabEx P2IO)

2018

Directeur: Christos Charmousis



Master ICFP, ENS

2015



Agrégation de physique-chimie (7^{ème})

2014



Master FESup, ENS Cachan

2014



Normalien, ENS Cachan

2011

Post-doctorat



Institut Supérieur Technique, Lisbonne

2020-

Prof. Vitor Cardoso

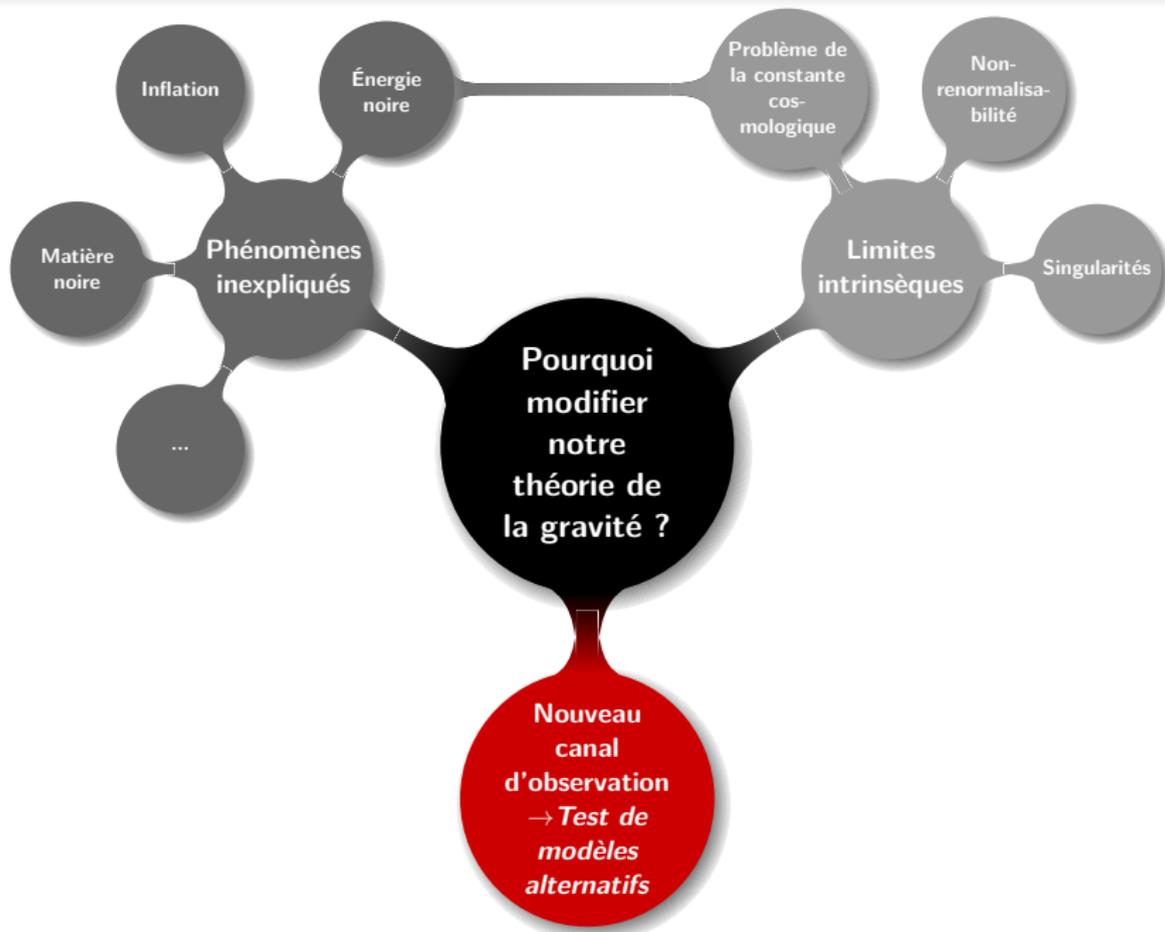


Université de Nottingham

2018-2020

Profs. Thomas Sotiriou et Antonio Padilla

**Modifier notre théorie de
la gravité**



Comment modifier notre théorie de la gravité ?

Point de départ: la relativité générale

Distances spatio-temporelles mesurées par

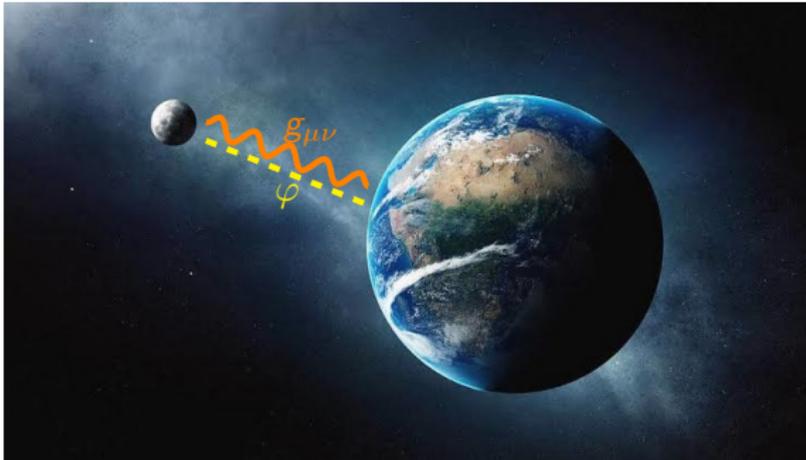
$$ds^2 = \mathbf{g}_{\mu\nu}(x^\rho) dx^\mu dx^\nu$$

Métrique $\mathbf{g}_{\mu\nu}$ dynamique et couplée minimalement à la matière ψ :

$$S = S_{\text{gravité}}[\mathbf{g}, \partial\mathbf{g}] + S_{\text{matière}}[\mathbf{g}, \psi, \partial\psi]$$

- Théorème de Lovelock : relativité générale unique
- **Que changer ?**

Théories scalaire-tenseur



Ajout d'un champ scalaire φ

$$S = S_{\text{gravité}}[\mathbf{g}, \partial\mathbf{g}, \varphi, \partial\varphi, \dots] + S_{\text{matière}}[\mathbf{g}, \varphi, \partial\varphi, \dots, \psi, \partial\psi]$$

- Procédure **simple et utile** (*inflation, quintessence, axion...*)
- **Beaucoup de modèles** alternatifs de gravité **reliés** (*gravité massive, dimensions supplémentaires, gravité de Horava...*)

Mes activités de recherche

Mes activités de recherche

1 Tests du théorème no-hair

[Babichev, Charmousis & AL, JCAP '17]

[AL, Sotiriou & Ventagli, PRD '17]

2 Lien avec l'énergie noire

[Bordin, Cunillera, AL & Padilla, PRD '20]

[Emond, AL & Saffin, PRD '20]

3 Stabilité et ondes gravitationnelles

[Babichev, Charmousis, Esposito-Farèse & AL, PRL '18]

[Babichev, Charmousis, Esposito-Farèse & AL, PRD '18]

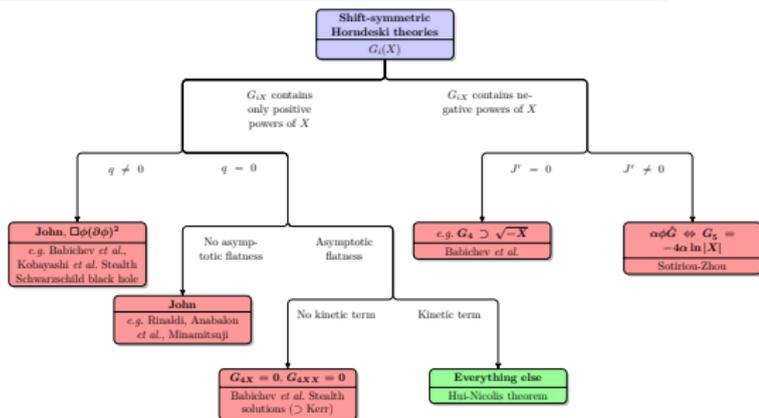
Réseau de collaborateurs en France, au Royaume-Uni, au Portugal, en Italie, en Tchéquie...

1 Théorème no-hair

Théorème(s) no-hair

- Trou noir caractérisé par M , J et Q en relativité générale
Uniquement Kerr-Newman
- - Champ électromagnétique : Nouvelle charge Q
- Champ scalaire : **Rien**
- **No-hair pour Horndeski** avec invariance $\phi \rightarrow \phi + C$

- Classification des **exceptions**
- Extension aux **étoiles** et aux modèles **“beyond Horndeski”**
[Babichev, Charmousis & AL, JCAP '17]



① Théorème no-hair

Nouvelles solutions exactes [Babichev, Charmousis & AL, JCAP '17]

- Trou noir **imitant Reissner-Nordström** :

$$ds^2 = g_{tt}dt^2 + g_{rr}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$
$$-g_{tt} = (g_{rr})^{-1} = 1 - \frac{2M}{r} - \frac{8\pi\beta^2}{\eta r^2}$$

- Solutions “**mimétiques**”, dont solutions **en rotation** :

$$ds^2 = ds_{\text{Kerr}}^2$$
$$\varphi(r, \theta) = a \left[\sin^2\theta - \sqrt{a^2 - 2mr + r^2} \right. \\ \left. - m \ln \left(\sqrt{a^2 - 2mr + r^2} - m + r \right) \right]$$

1 Théorème no-hair

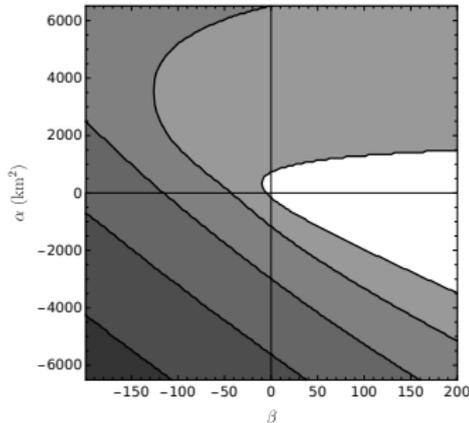
La scalarisation

- Instabilité tachyonique déclenchée lorsque la **courbure** est **forte** (trous noirs ou étoiles à neutrons)
- Passe automatiquement les tests de champ faible
- Deux opérateurs importants : **Ricci** R et **Gauss-Bonnet** \mathcal{G}

$$\square\varphi = m_{\text{eff}}^2\varphi$$
$$m_{\text{eff}}^2 = \alpha R + \beta\mathcal{G}$$

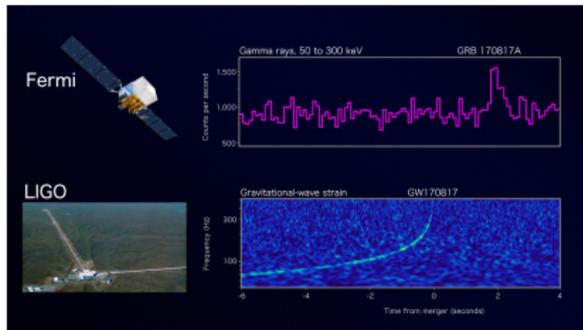
Exploration de l'espace des paramètres

[AL, Sotiriou & Ventagli, PRD '17]



② Lien avec l'énergie noire

- Chevelure **obligatoire** si $\varphi =$ énergie noire
- Propriétés d'**auto-ajustement** $\Lambda \rightarrow \Lambda_{\text{eff}}$
- Trous noirs dans univers en expansion pour galiléon cubique
[Babichev, Charmousis, AL & Moskalets, JCAP '17]
[Emond, AL & Saffin, PRD '20]
- Modèles contraints depuis (en tant qu'énergie noire)



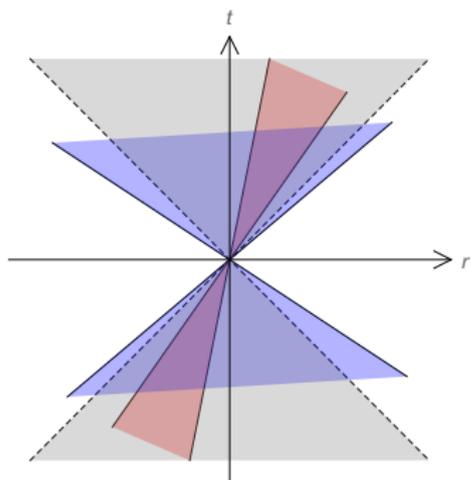
LIGO Scientific Collaboration

- $|c_{\text{grav}}/c_{\text{lum}} - 1| \lesssim 10^{-15}$
- Caveat: théorie effective + distance intermédiaire

③ Stabilité et ondes gravitationnelles

[Babichev, Charmousis, Esposito-Farèse & AL, PRL '18]

[Babichev, Charmousis, Esposito-Farèse & AL, PRD '18]



- Littérature: instabilité car Hamiltonien non-borné inférieurement
- Localement, propagation le long de **3 cônes causaux** : matière, **gravité**, **scalaire**
- OK si **temps et hypersurface spatiale communs**

Valide pour un degré de liberté supplémentaire **quelconque**

3 Stabilité et ondes gravitationnelles

Solution auto-ajustée de Schwarzschild-de Sitter

$$ds^2 = g_{tt}dt^2 + g_{rr}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$
$$-g_{tt} = (g_{rr})^{-1} = 1 - \frac{2M}{r} - \frac{\Lambda_{\text{eff}}}{3}r^2$$
$$\varphi = qt - \int dr \sqrt{g_{rr}(1 - g_{rr})}$$

[Babichev, Charmousis, Esposito-Farèse & AL, PRL '18]

[Babichev, Charmousis, Esposito-Farèse & AL, PRD '18]

- Décomposition des perturbations en harmoniques sphériques
- 3 métriques de propagation : $g_{\mu\nu}$, $\mathcal{G}_{\mu\nu}$ et $\mathcal{S}_{\mu\nu}$
- Existence de **trous noirs avec chevelure stables**
- Modèles avec $\mathbf{c_{grav} = c_{lum}}$ même proche d'un trou noir

Le futur

Long terme

Détecteurs d'ondes gravitationnelles

- **Interféromètres terrestres** : LIGO, Virgo, KAGRA (~ 2021), INDIGO (~ 2024), Cosmic Explorer (?)
- **Interféromètres spatiaux** : LISA (2032), DECIGO (~ 2035), TianQin (~ 2030), BBO (?)
- **PTAs** : IPTA = NANOGrav + Parkes PTA + European PTA

Long terme

① Régime dynamique et non-linéaire des théories alternatives

Problème de Cauchy bien posé : existence, unicité et dépendance continue par rapport aux données initiales

- Approche classique pour les théories scalaire-tenseur
- Méthode de coupure des fréquences spatiales élevées

Long terme

1 Régime dynamique et non-linéaire des théories alternatives

Problème de Cauchy bien posé : existence, unicité et dépendance continue par rapport aux données initiales

- Approche classique pour les théories scalaire-tenseur
- Méthode de coupure des fréquences spatiales élevées

2 Ondes gravitationnelles de systèmes binaires

- Force de réaction au rayonnement pour théories scalaire-tenseur généralisées
- Modes quasi-normaux (Kerr et fond scalarisé)

Long terme

1 Régime dynamique et non-linéaire des théories alternatives

Problème de Cauchy bien posé : existence, unicité et dépendance continue par rapport aux données initiales

- Approche classique pour les théories scalaire-tenseur
- Méthode de coupure des fréquences spatiales élevées

2 Ondes gravitationnelles de systèmes binaires

- Force de réaction au rayonnement pour théories scalaire-tenseur généralisées
- Modes quasi-normaux (Kerr et fond scalarisé)

3 Nouveaux modèles

- Champs complexes
- Autres mécanismes de scalarisation (degrés de liberté différents, autres types d'instabilité)

Court terme/projets en cours

① Champs scalaires complexes

- Théorie scalaire complexe-tenseur la plus générale
- Théorème no-hair

Court terme/projets en cours

1 Champs scalaires complexes

- Théorie scalaire complexe-tenseur la plus générale
- Théorème no-hair

2 Solution issue de réduction dimensionnelle

- $S = \int d^D x (R^{(D)} - \alpha \mathcal{G}^{(D)})$
- Objectif: $|\alpha| \lesssim 10^{20} \text{ m}^2 \rightarrow |\alpha| \lesssim 10^8 \text{ m}^2$ (étoiles à neutrons)

Stergioulas (Thessalonique) & Charmousis (IJCLab)

Court terme/projets en cours

1 Champs scalaires complexes

- Théorie scalaire complexe-tenseur la plus générale
- Théorème no-hair

2 Solution issue de réduction dimensionnelle

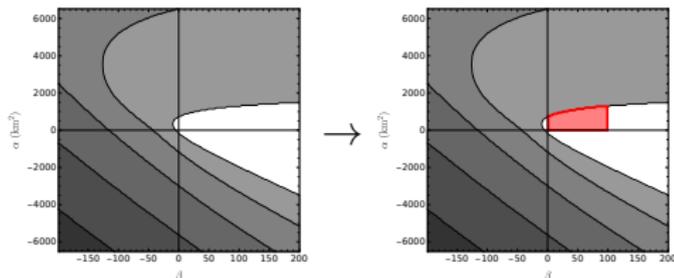
- $S = \int d^D x (R^{(D)} - \alpha \mathcal{G}^{(D)})$
- Objectif: $|\alpha| \lesssim 10^{20} \text{ m}^2 \rightarrow |\alpha| \lesssim 10^8 \text{ m}^2$ (étoiles à neutrons)

Stergioulas (Thessalonique) & Charmousis (IJCLab)

3 Contraindre les paramètres de scalarisation

- Histoire cosmologique cohérente
- Scalarisation des trous noirs mais pas des pulsars

Sotiriou (Nottingham)



Court terme/projets en cours

1 Champs scalaires complexes

- Théorie scalaire complexe-tenseur la plus générale
- Théorème no-hair

2 Solution issue de réduction dimensionnelle

- $S = \int d^D x (R^{(D)} - \alpha \mathcal{G}^{(D)})$
- Objectif: $|\alpha| \lesssim 10^{20} \text{ m}^2 \rightarrow |\alpha| \lesssim 10^8 \text{ m}^2$ (étoiles à neutrons)

Stergioulas (Thessalonique) & Charmousis (IJCLab)

3 Contraindre les paramètres de scalarisation

- Histoire cosmologique cohérente
- Scalarisation des trous noirs mais pas des pulsars

Sotiriou (Nottingham)

4 Modèle avec problème de Cauchy bien posé

- Régime de couplage fort
- Intéressant pour la communauté de relativité numérique

Hilditch (Lisbonne)

Collaborations et financements

- Collaborations de long-terme avec l'**IJCLab** (Orsay)
- Collaborations occasionnelles avec l'**IAP** (Paris)
- Membre du **GDR Ondes gravitationnelles**
- Membre du programme **MSCA-RISE-2020** *Gravitational Universe: Challenges and Opportunities*
- Candidature pour un financement de la **FCT** (Portugal)
- Ouvert à de **nouvelles collaborations** avec les membres du laboratoire qui m'accueillera

Merci pour votre attention !