

# Qu'est-ce que la masse ? Le mécanisme de Higgs au delà du principe d'équivalence...

Pr. Dr. André Füzfa

En collaboration avec M. Rinaldi & Sandrine Schlögel

Centre namurois des systèmes complexes (naXys)  
Université de Namur (Belgique)

# Idées visionnaires



■ « Principe » de Mach (1872):

- l'inertie et l'accélération ne devraient être que relatives et définies par rapport à l'ensemble de l'Univers
- La masse d'inertie d'un corps résulte de l'ensemble des interactions avec tous les autres corps de l'Univers (origine non-locale de la masse d'inertie)

■ Inspiration pour la relativité générale

- Covariance généralisée
- Caractère asymptotique de la gravitation et constante cosmologique

■ Visionnaire pour la physique des hautes énergies

- La masse via les interactions avec l'environnement (masse effective, supraconductivité et effet Meissner, mécanisme de Brout-Englert-Higgs)

# La masse en relativité restreinte et générale

■ Relativité restreinte:  $E=mc^2$

- masse au repos = composante de la quadri-impulsion
- Conservation de la norme de la quadri-impulsion et hamiltonien

■ Principes d'équivalence de Galilée et d'Einstein

- Universalité de la chute libre pour des masses tests
- Masse d'inertie équivalente à masse gravitationnelle
- Gravitation comme pseudo-force et théorie métrique

■ Relativité générale:

- Principe d'équivalence d'Einstein implique la covariance
- masse liée aux propriétés géométriques globales de l'espace-temps (exemple : masses ADM, Bondi, cosmologie?, etc.)

# La masse en mécanique quantique

## ■ Théorème de Wigner:

→ toute particule élémentaire est une représentation irréductible du groupe de Poincaré dans un espace d'Hilbert donné

→ Masse: opérateur de Casimir associé aux générateurs infinitésimaux de l'impulsion et commutant avec l'hamiltonien (conservation masse)

→ Toute particule élémentaire caractérisée uniquement par sa masse, son spin, ses nombres quantiques additifs (nbre baryonique, leptonique, étrangeté, isospin, etc.)

## ■ Equation de Schrodinger et état fondamental

→  $H\Psi = E \Psi$  : énergie au repos (masse) reliée aux termes harmoniques du potentiel

## ■ Equation de Klein-Gordon avec potentiel harmonique

→  $\square \Phi = m\Phi$ : solution en ondes évanescentes (amplitude décroissante exponentiellement)

→ Masse: terme quadratique d'auto-interaction

# La masse en physique des particules

## ■ Masses des baryons:

→ majoritairement due aux interactions fortes des gluons et quarks (>90%)

## ■ Masses des particules élémentaires?

→ les bosons véhiculant les interactions fondamentales doivent être sans masse (invariance de jauge)

→ Interaction faible: pourquoi à courte portée?

→ interaction de jauge: pas de masse pour les fermions

## ■ Masse via de nouvelles interactions?

→ Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

→ Champ de Higgs chargé sous les interactions: masse des bosons de jauge

→ Interactions de Yukawa avec les fermions

# Brisure spontanée de symétrie

■ Idée: la symétrie est cachée

→ solution particulière non symétrique mais symétrie présente au niveau de l'ensemble des solutions possibles

■ Exemples:

→ un crayon en équilibre instable (brisure à basse énergie)

→ Flambage d'une poutre (brisure à haute énergie)

→ Ferromagnétisme (brisure à basse énergie)

■ Supraconductivité

→ brisure spontanée de l'invariance de jauge de l'électromagnétisme

→ apparitions de paires de Cooper (état collectif bosonique) en dessous d'une température critique

→ Illustration de la masse du photon: effet Meissner

→ Symétrie cachée et potentiel de Landau-Ginzburg

# Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

■ Idée: ajout d'un nouveau champ

→ scalaire : spin 0 mais chargé sous les interactions électromagnétique et faible

→ Donc : un doublet de champs complexes en interaction avec les champs de jauge

→ Si le champ acquiert une « valeur dans le vide » (=valeur classique du champ de Higgs est non nulle), le terme d'interaction donne une masse pour les bosons de jauge

→ interactions de Yukawa avec les fermions: masses des particules élémentaires

→ si un mode survit au niveau quantique: nouvelle particule scalaire (plus tard: boson de Higgs)

# Interaction électrofaible et boson de Higgs

## ■ Potentiel de Landau-Ginzburg

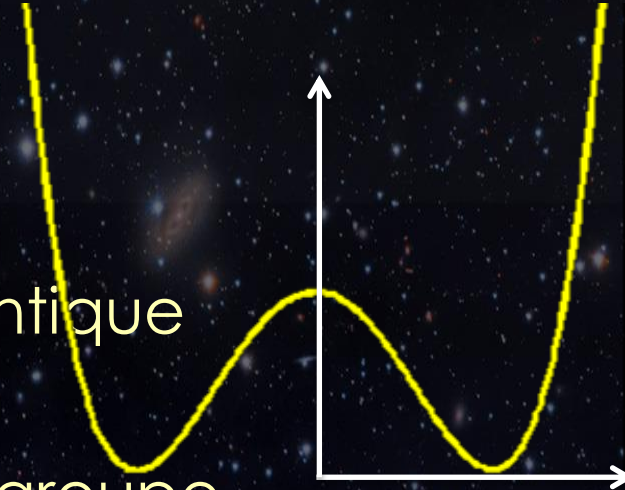
- potentiel effectif ?
- obtention d'une valeur classique non nulle par un mécanisme non quantique

## ■ Glashow-Salam-Weinberg

- application du mécanisme BEH au groupe électrofaible  $SU(2) \times U(1)$  (prix Nobel 1979)
- Description des couplages aux champs de jauge et à la matière (fermions) et des mécanismes donnant leurs masses
- Prédiction des particules W, Z et du boson de Higgs

## ■ 't Hooft et Veltman

- Obtention d'une théorie renormalisable (prix Nobel 1999)





# Motivations for Higgs gravity (1/3): rappels

## ■ Mach's Principle (1872):

- Inertia and acceleration are **relative**
- defined with respect to the whole Universe

## ■ Einstein's inspiring influence\*:

- Mach's principle prefigures general covariance
- Einstein : Equivalence Principles to impose covariance
- General Relativity: mass a geometrical property
- Non-locality as a motivation for the cosmological constant

## ■ Inertial mass emerging from interactions

- Solid-state physics and Higgs mechanism (effective mass and spontaneous symmetry breaking)

\*A. Pais, "Subtle is the Lord...", 1982

# Motivations for Higgs gravity (2/3)

## ■ Beyond Einstein's general relativity

- Brans & Dicke (1961): a running gravitational coupling for a relativistic Mach principle
- Tensor-scalar theories of gravitation
- Violation of the (Strong) Equivalence principle

## ■ Scalar fields\* and cosmology:

- cosmic acceleration in the early and late universe (inflation & dark energy)
- varying fundamental constants

## ■ Scalar fields\* in particle physics

- Goldstone boson in symmetry breaking
- Standard model Higgs boson: mass generation, cancellations of gauge anomalies, etc.

# Motivations for Higgs gravity (3/3)

Gravitation  
&  
Cosmology

Particle  
Physics

H

Inflation, dark energy,  
modified gravity

Electroweak symmetry Breaking  
&  
Standard model physics

$$\mathcal{L} = \sqrt{-g} \left[ \frac{F(H)}{2\kappa} R - \frac{1}{2} (\partial h)^2 - V(H) \right] + \mathcal{L}_m(g_{\mu\nu}; \Psi; H)$$

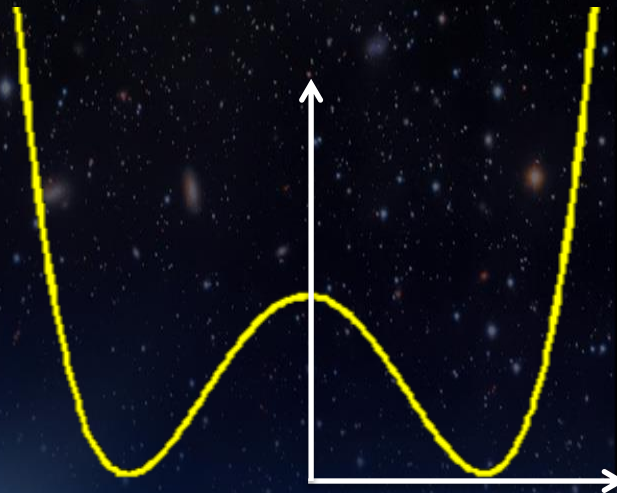
The Higgs field H rules both the gravitational coupling  
and the mass of elementary particles

# Application: Higgs inflation

Higgs mechanism assumes Landau-Ginzburg potential:

$$V(H) = \frac{\lambda}{4} (H^2 - v^2)^2$$

→ with  $\lambda, v$  specified by standard model physics



Cosmic acceleration  
when slow-rolling

$$\frac{\dot{H}^2}{2} \ll V(H)$$

Natural candidate for inflaton? No!

→ required number of efolds is obtained only for unnatural values of  $\lambda$  and initial field amplitude  $H_i$  (super-planckian)

# Application: Higgs inflation

■ Solution ? Inflaton = Higgs field non-minimally coupled to gravity

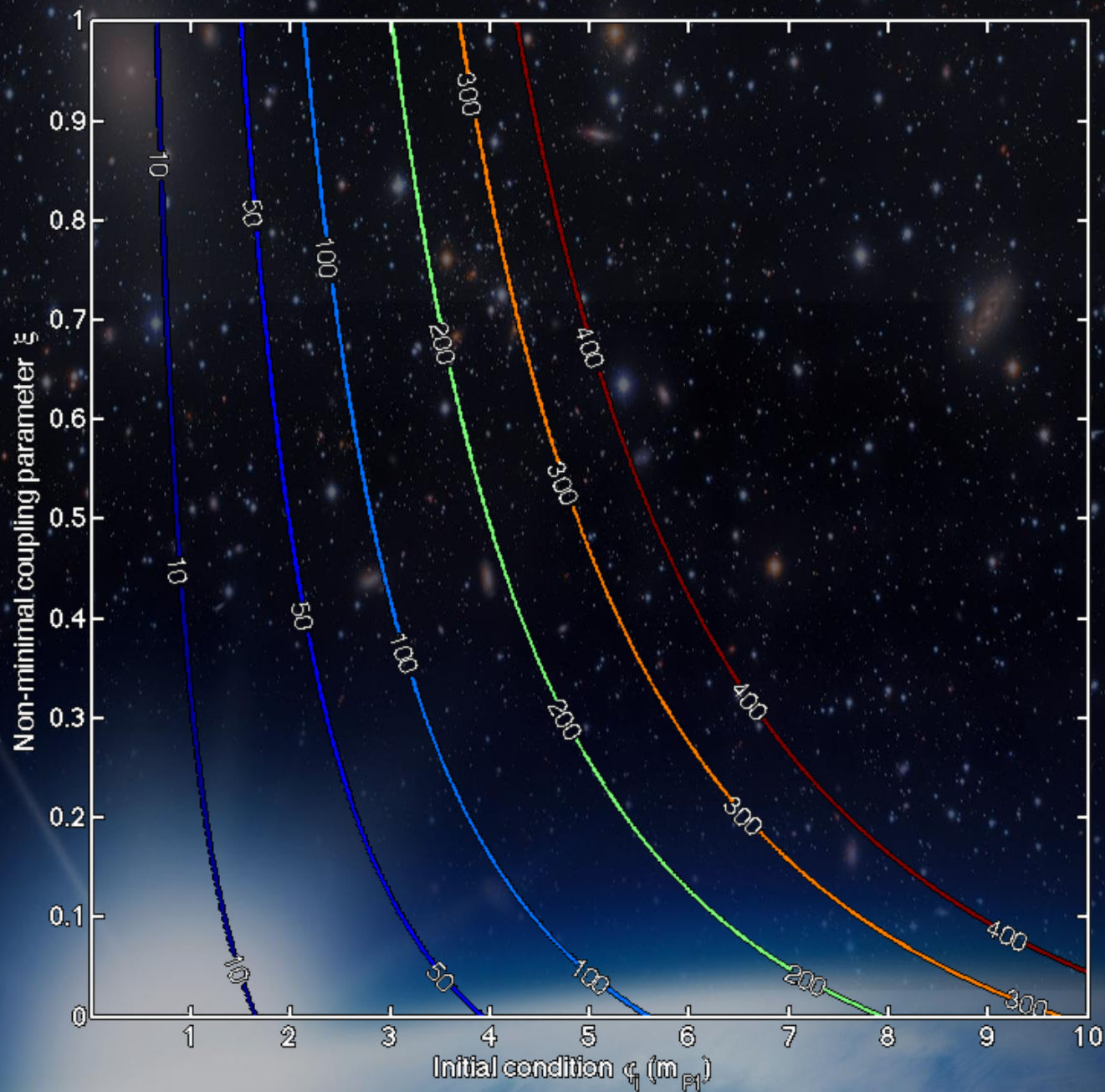
■ Einstein frame dynamics



■ Non-minimal coupling has to be very high\*  
Add equations for coupling functions &  
JF to EF, potential in EF, etc.

\* Fakir & Unruh, PRD 1990,  
Bezrukov & Shaposhnikov, PLB, 2008.

# Number of e-folds



# Implications for the vacuum

## Static configurations of the Higgs field

→ non-vanishing vacuum expectation value is required to break symmetry

$$\square H = \frac{dV}{dH} \quad \text{with} \quad ds^2 = -e^{2\nu(r)} dt^2 + e^{2\lambda(r)} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

Spherical symmetry  
in Schwarzschild gauge

Analogy with Newton's second law!

$H \Leftrightarrow$  position

$()' \Leftrightarrow d()/dt$

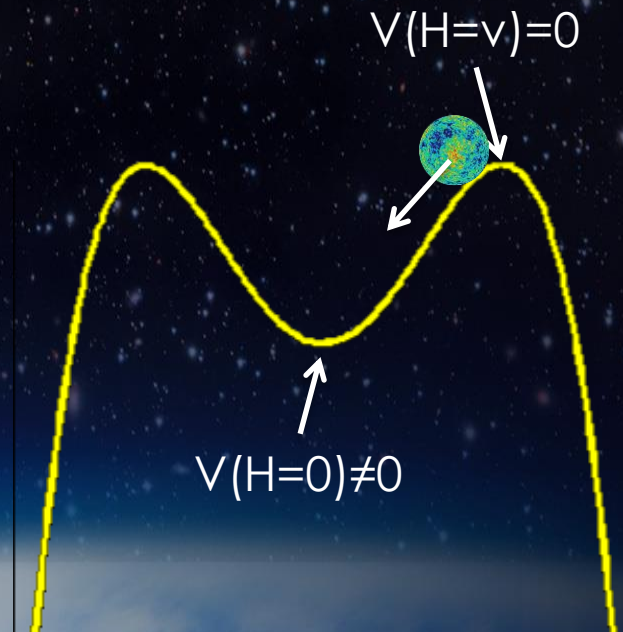
$H'(r=0)=0$  (regularity)

« Acceleration »

$$H'' - H' \left\{ \lambda' - \nu' - \frac{2}{r} \right\} = e^{2\lambda} \frac{dV}{dH}$$

Damping

Driving force



# Beyond a trivial vacuum

Starting at rest:

→ if  $|H_i| > v$  :  $H \rightarrow$  infinity ; infinite ADM mass

→ if  $|H_i| < v$  :  $H \rightarrow 0$  with  $V(H=0) > 0$  : asymptotically de Sitter

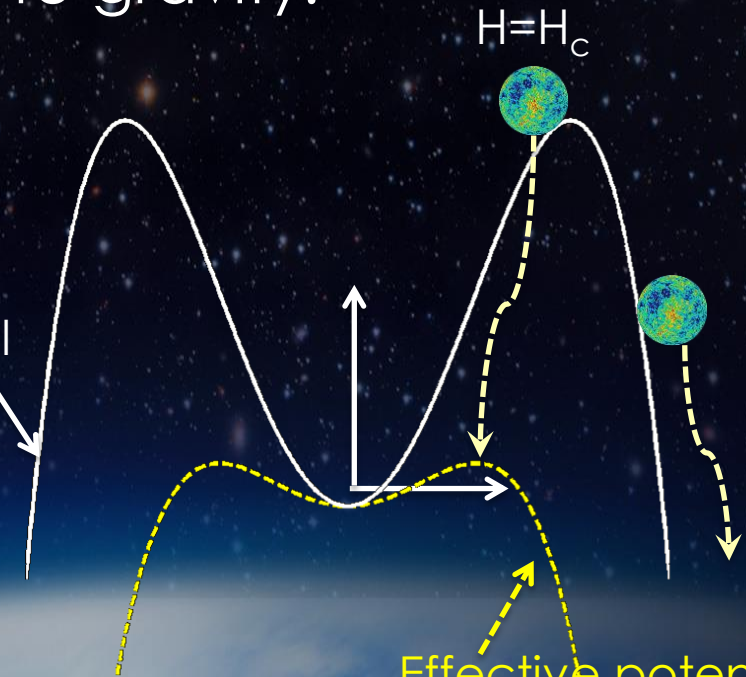
General relativity :  $|H(r)| = v$

→ trivial homogeneous solution with finite energy and asymptotically flat spacetime!

Solution: non-minimal coupling to gravity!

$$\square H = \frac{dV}{dH} - \frac{R}{2\kappa} \frac{dF}{dH}$$

Effective potential  
inside matter



**BEH monopoles:**

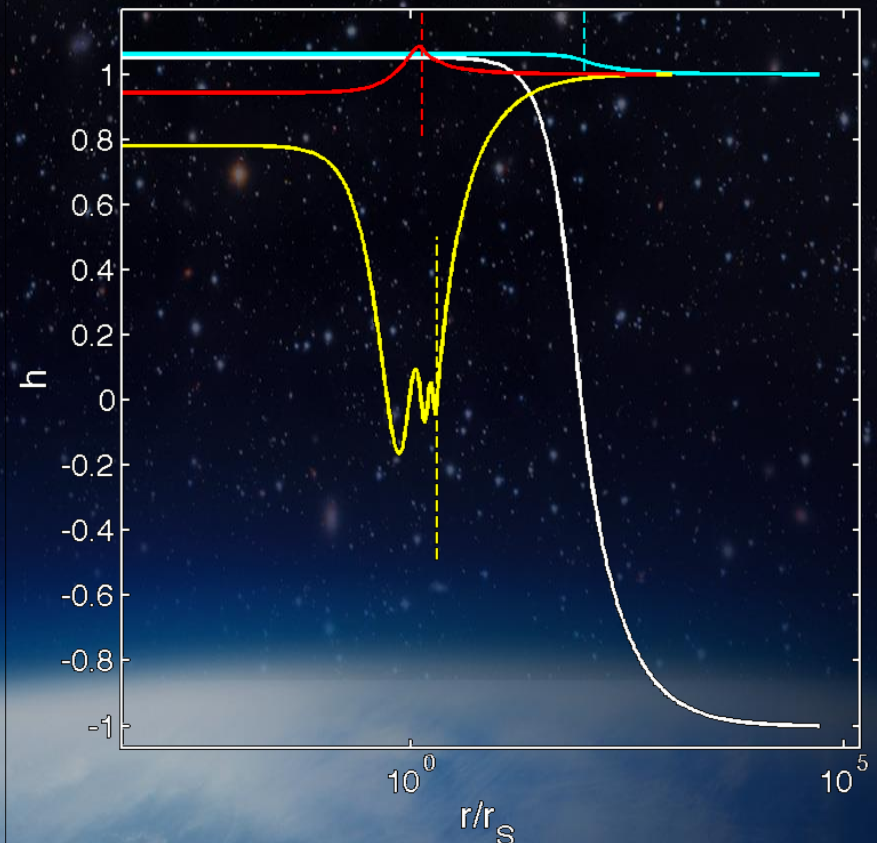
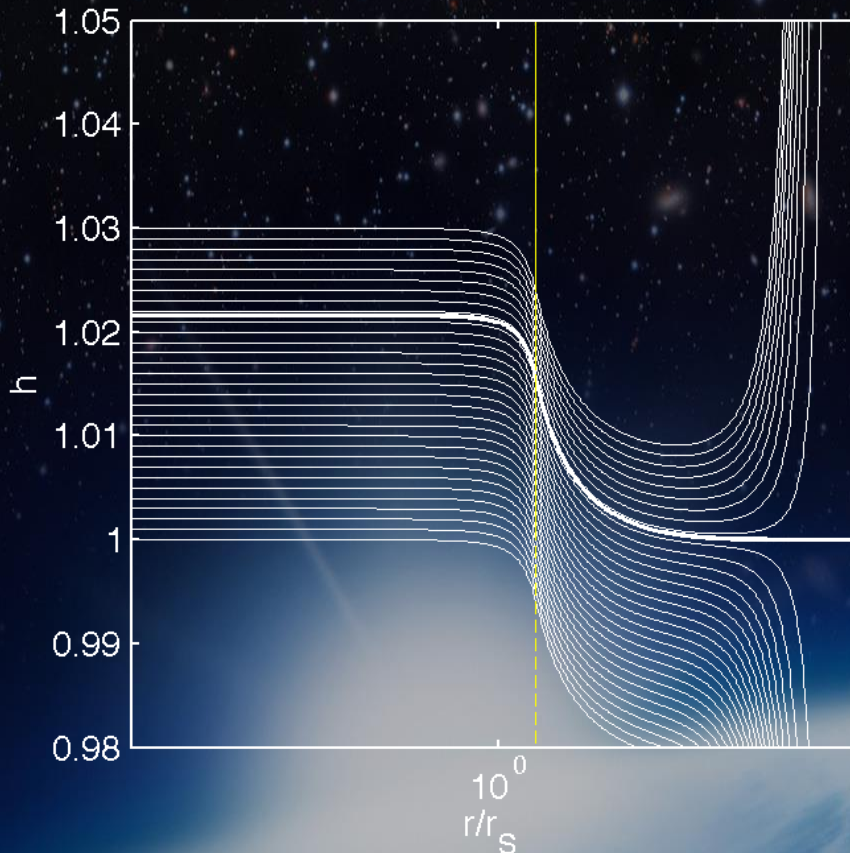
particle-like solutions where  $H$  interpolates between  $H_c$  and  $v$  at spatial infinity

Effective potential  
outside matter



# Brout-Englert-Higgs monopoles

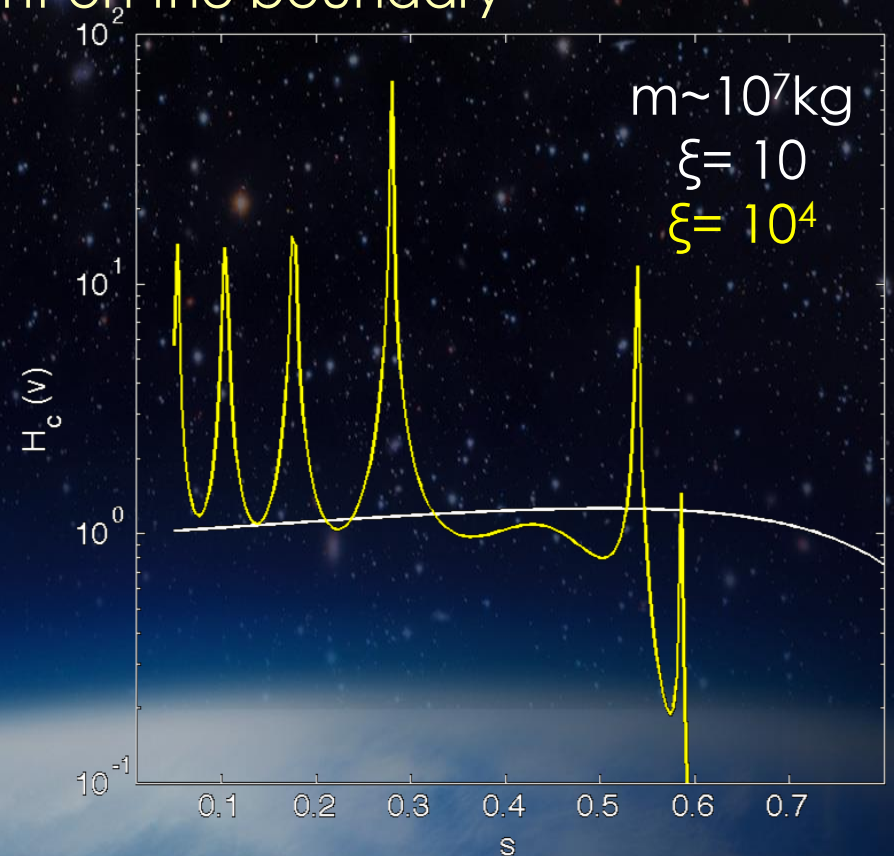
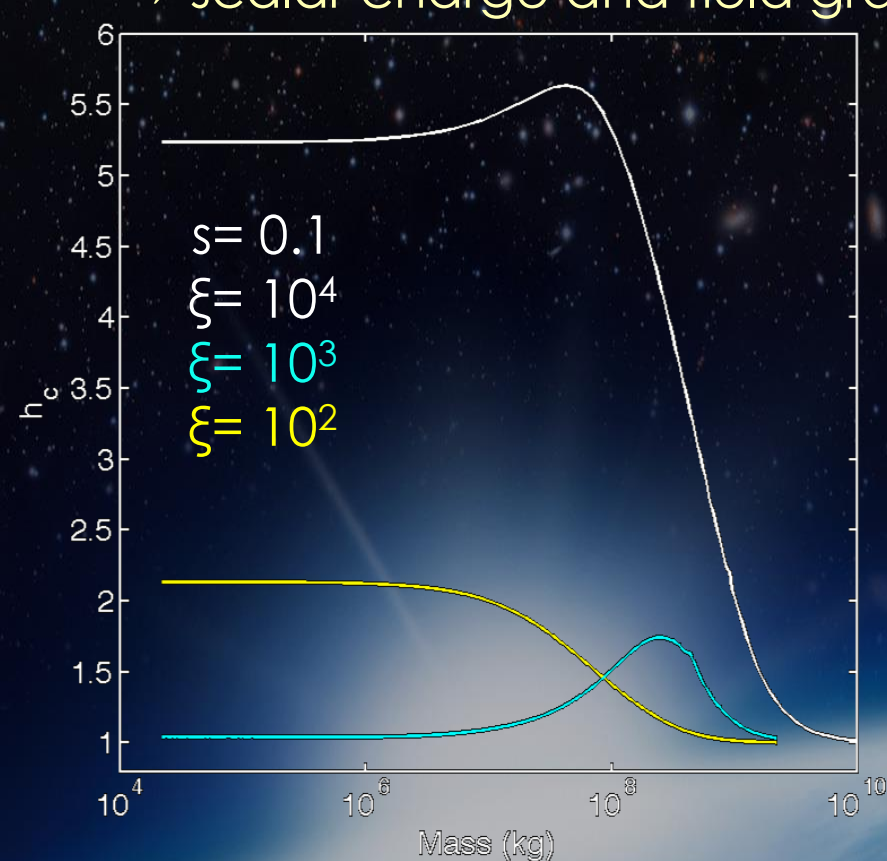
- Globally regular classical distributions of the BEH field with finite ADM mass
- Isolated gravitational and standard model scalar charges
- Existence due to non-minimal coupling in presence of sufficiently compact objects



# Physical properties of BEH monopoles

For a given non-minimal coupling strength, physical parameters are

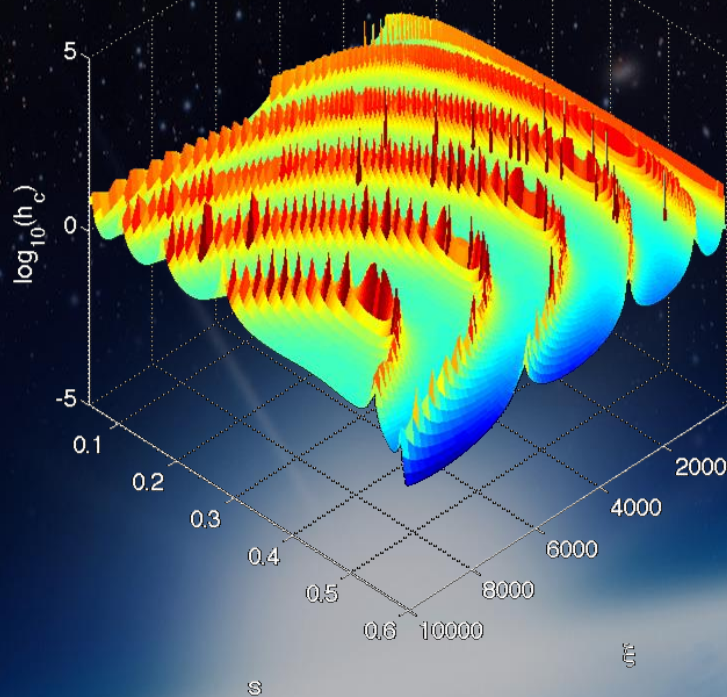
- mass (mainly of matter distribution)
- compactness  $s=r_s/R$  ( $R$  = radius of the monopole)
- scalar charge and field gradient on the boundary



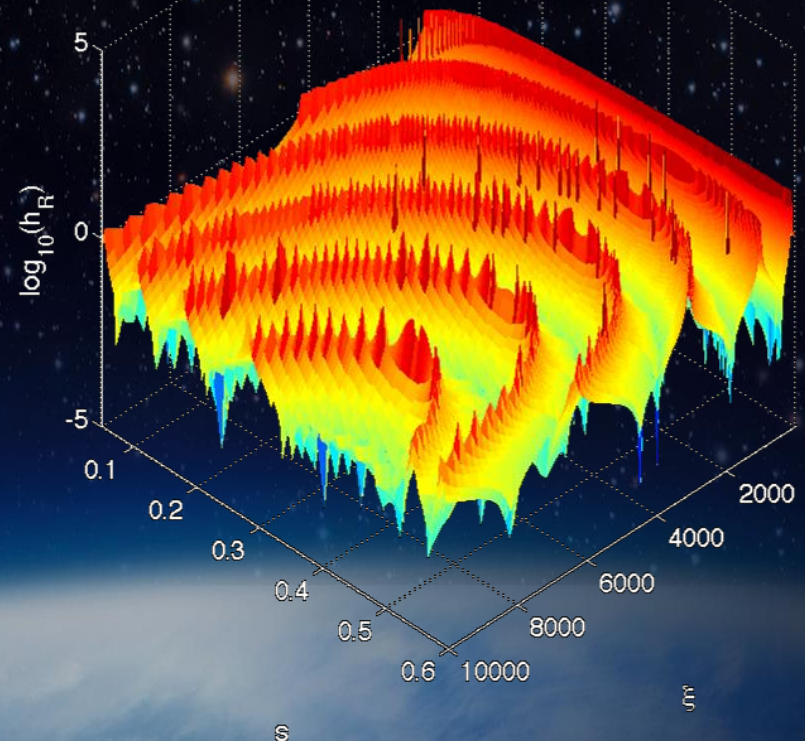
# Scalar charge amplification

- High coupling: damped oscillatory behavior inside matter
- Precise initial conditions on the boundary are required to reach asymptotic flatness
- Resonances for specific values of mass, compactness and coupling strength and give most interacting monopoles

Central field value



Boundary field value



# Conclusions

## Higgs gravity:

→ combining symmetry breaking in particle physics and violation of the equivalence principle

## Inflation : a known scalar, the Higgs field, at work?

→ non-minimal coupling to gravity required

## Static configuration for classical vacuum

→ BEH monopoles: globally regular, asymptotically flat particle-like solutions with finite ADM mass

→ non-trivial background for quantum perturbations

→ candidates for weakly interacting dark matter?

## Further studies

→ stability of the monopole under perturbations (time dependent solutions)

→ Formation during inflation? As a result of gravitational instability? Abundance?

→ generalisation beyond the unitary gauge and with matter directly coupled to the Higgs