

Cinvestav



# SOBRE UNA VERSIÓN DE **CAMB** PARA GRAVEDAD MODIFICADA

Ana A. Avilez-López

CINVESTAV

# AGENDA

- 1 Motivación para Considerar Teorías de Gravedad Modificada.
- 2 Teorías Escalares Tensoriales.
- 3 Implementación en CAMB.
- 4 Algunos Usos y Resultados.

## DYNAMICAL DARK ENERGY

MODIFY  
GRAVITATION  
LAWS

OBSERVATIONS:  
STRUCTURE FORMATION  
AND  
EXPANSION OF THE UNIVERSE

QUIT  
HOMOGENEITY  
AND  
ISOTROPY

COSMOLOGICAL CONSTANT

# COSMOLOGICAL CONSTANT PROBLEM

Usually interpreted as: Vacuum Energy (zero point correlation  
function derived from quantum field theory)

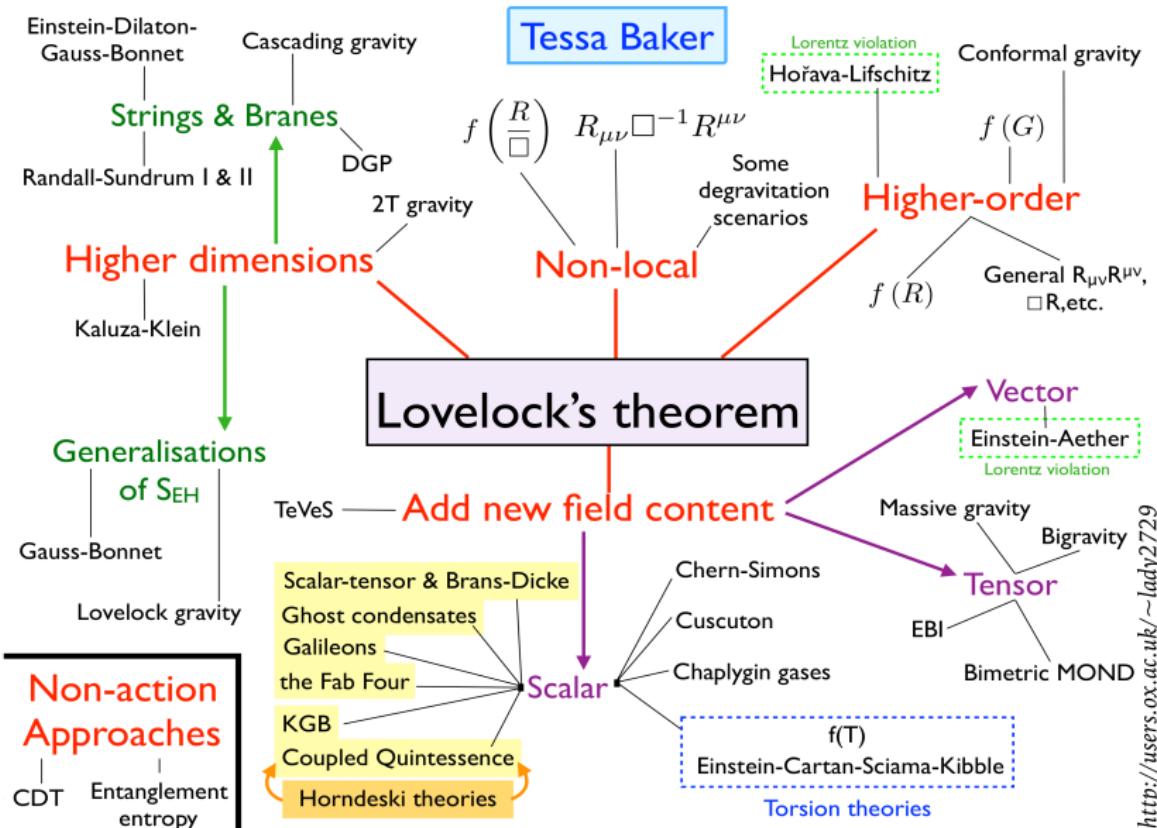
## COSMOLOGICAL CONSTANT PROBLEM :



Derived from theory:  $\langle \rho \rangle = 2 \times 10^{89} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ .

Inferred from Observations:  $\rho_V \sim 10^{-29} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ .

A gap of 118 orders of magnitude!!

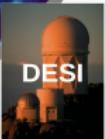




## HIGH PRECISION COSMOLOGY AND GRAVITACION ERA

**CMB-S4**

Next Generation CMB Experiment



STANDARD LCDM  
AND  
ITS ALTERNATIVES  
CHALLENGED

GENERAL THEORETICAL FRAME

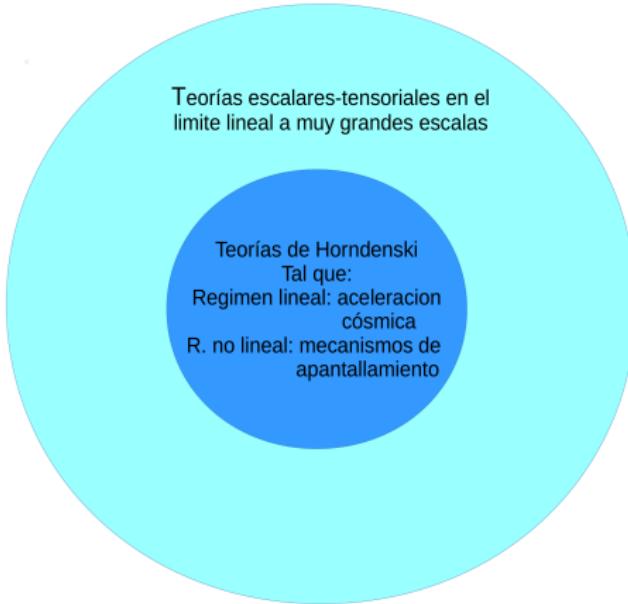
- MODEL INDEPENDENT
- MODEL PARAMETRIZATION

THEORIES OF GRAVITY MODIFIED BY  
A SCALAR D.O.F., WITH SECOND ORDER E.O.M,

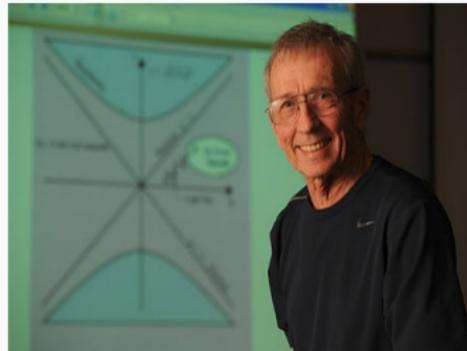
**HORNDESKI CLASS**

Avilez & Skordis 2014

Avilez, Padilla & SaffinSkordis 2015



# TEORÍAS TENSORIALES ESCALARES



Robert Henry Dicke



- Teoría modificada de gravedad más simple  
Teoría de Jordan-Brans-Dicke 1960.
  - ▶ Generalización gracias a: Damour y Nordvedt.
- Originalmente, con  $\Lambda = 0$ ,  $\omega = cte$ 
  - ▶ Implementación del principio de Mach: Acoplamiento gravitacional normalizado a cada punto.
  - ▶ Una función libre  $\omega$ .
- $\omega(\phi(a))$  se determina con un ansatz fenomenológico.  $\Lambda(\phi)$  masa y autointeracciones.

# BACKGROUND

We grant as true the Cosmological Principle: Friedman-Robertson-Walker

$$ds^2 = a^2(-d\tau^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2),$$

conformal time

$$\phi + \delta\phi.$$

$$(H + \frac{1}{2} \frac{\phi'}{\phi})^2 = \frac{8\pi G}{\phi} \rho + \frac{\Lambda}{\phi} + \frac{1}{4}(2\omega + 3) \left( \frac{\phi'}{\phi} \right)^2.$$

$$-2aH' - 3a^2H^2 - \frac{\phi''}{\phi} - Ha \frac{\phi'}{\phi} - \frac{\omega}{2} \left( \frac{a\phi'}{\phi} \right)^2 = \frac{8\pi Ga^2}{\phi} P - \frac{\Lambda}{\phi}.$$

“Klein-Gordon” equation

$$\phi'' + 2H\phi' = \frac{1}{2\omega + 3} \left[ 8\pi G(\rho - 3P) + 4\Lambda - \frac{d\omega}{d\phi} (\dot{\phi})^2 - 2\phi \frac{d\Lambda}{d\phi} \right],$$

►  $\omega \rightarrow \infty$

General Relativity.

# CONDICIONES INICIALES

- **MODELOS RESTRINGIDOS:** se asume que BDT es valida a toda escala:

$$\phi_0 \equiv \phi(a=1) = \frac{G}{G_{\text{eff}}} = \frac{4 + 2\omega(\phi)}{3 + 2\omega(\phi)}.$$

- **MODELOS NO-RESTRINGIDOS:** se asume a BDT como límite de teorías con física más complicada a escalas pequeñas donde  $G(t, x)$ :

$$\xi = G_{\text{eff}}/G$$

parámetro libre  $\rightarrow$  acoplamiento gravitacional dinámico a escalas pequeñas.

# ANSZATZ FENÓMENOLOGICO PARA $\omega$

La formación de estructura a muy grandes escalas para modos de las perturbaciones dentro del horizonte:

$$k^2\Phi = 4\pi G \mu(a, k)\delta_m$$

Y-S Song et al. arXiv:1001.0969, De Felice

Asumiendo que modificaciones a la tasa de crecimiento de estructura a muy grandes escalas es una ley de potencias, entonces

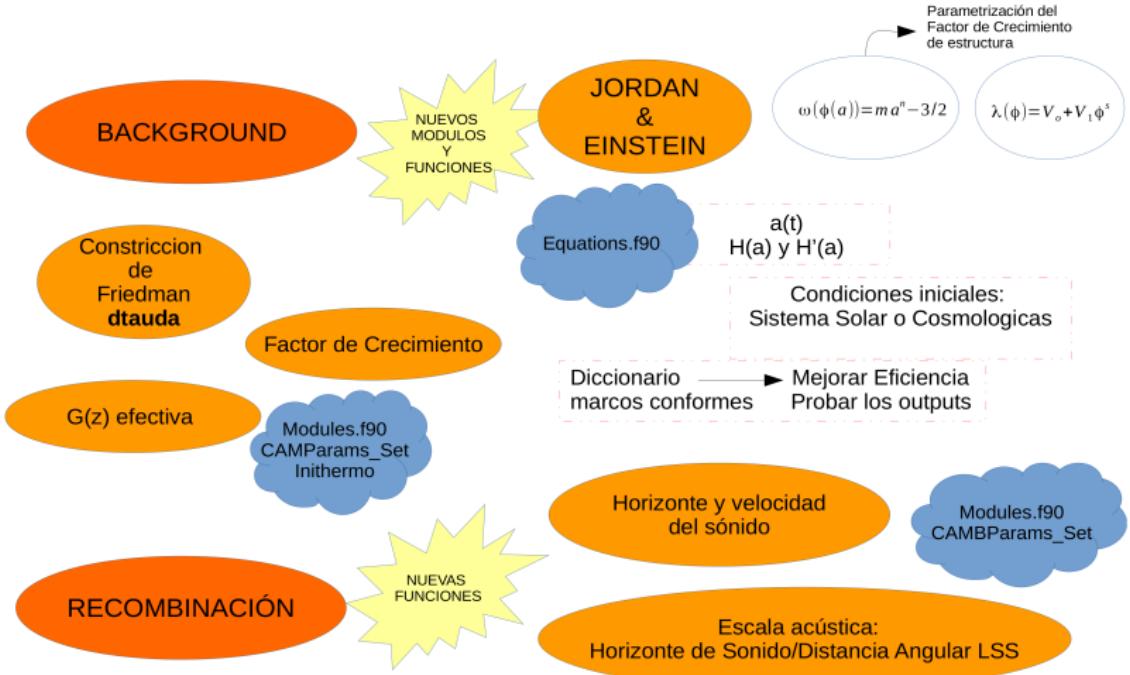
$$\mu(a) = 1 + \mu_0 a^s$$

Por otro lado para teorías escalares-tensoriales:

$$\mu(a) = \frac{4 + 2\omega(a)}{3 + 2\omega(a)} \quad \omega(a) = ma^n - \frac{3}{2}$$

$$m = 1/2\mu_0 \quad y \quad n = -s$$

# IMPLEMENTACIÓN EN CAMB



## NUEVA PARAMETRIZACIÓN

### PARÁMETROS COSMOLÓGICOS

#### Standard CAMB

H primario L derivado

No fisicos- primarios

Fisicos- primarios

#### Modified CAMB

Fisicos- primarios + L

H-derivados

No-Fisicos -derivados

#### OJO:

ESCALA ACÚSTICA

DISTANCIA  
A LAST-SCATTERING  
SURFACE

MUY SENSIBLES

### NUEVOS PARÁMETROS

Modelos Restringidos

$m$        $n$        $V_0$        $V_1$        $s$

No restringidos

$m$        $n$        $V_0$        $V_1$        $s$        $\xi$

Modules.f90  
ModelParams  
CAMBParams\_Set  
  
Inidriver.f90  
Params.ini

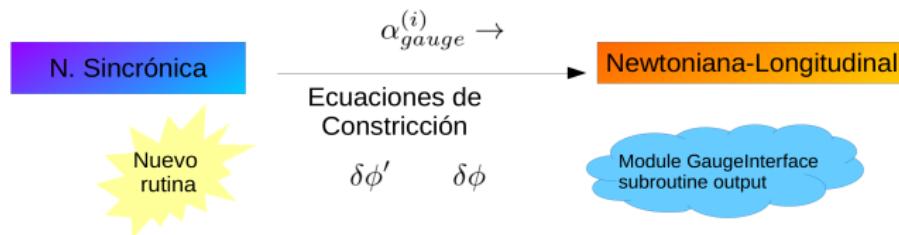
# PERTURBACIONES Y CMB Sources

## Perturbaciones

Modulo GaugeInterface:

Condiciones Iniciales: epoca de radiación (rutina initial)  
ecuaciones de las perturbaciones (rutina derivs)

Espectro del CMB por integración en la linea de visión. Seljak & Zaldarriaga (rutina sources)



CALCULA POR SEPARADO:

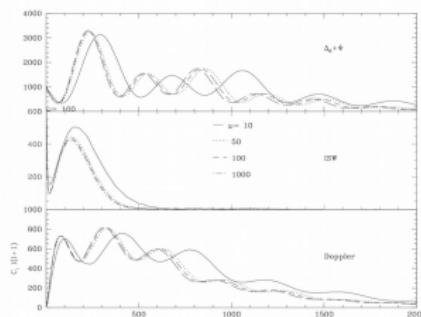
MONÓPOLO

ISW

DOPPLER

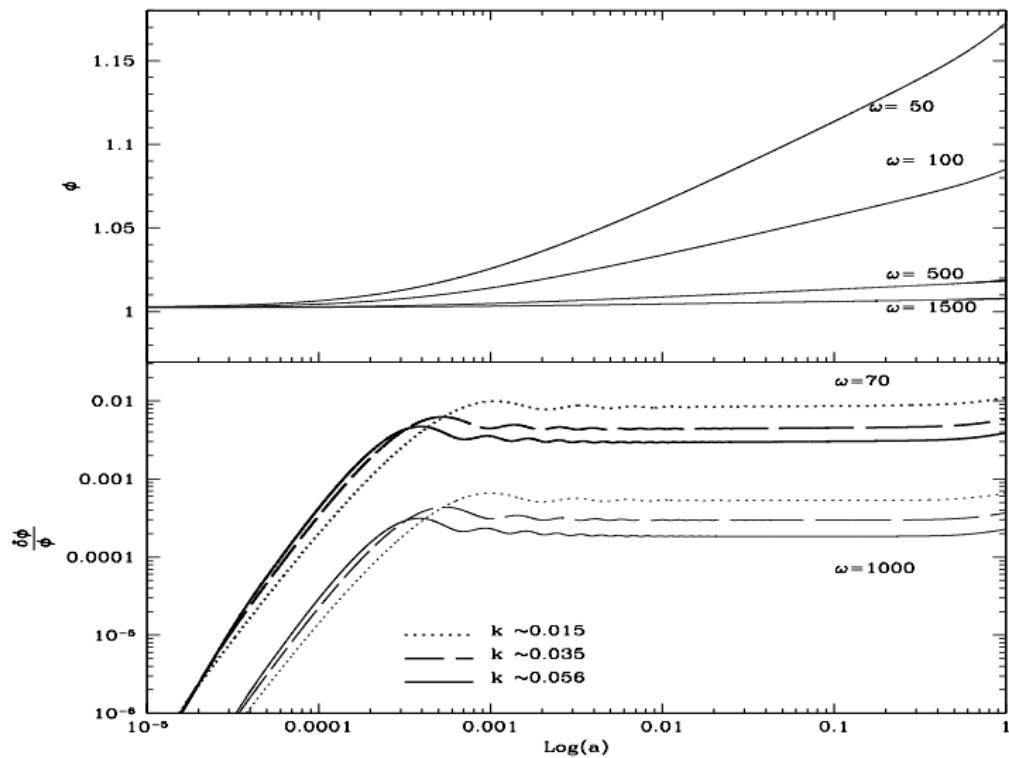
POLARIZACIÓN

LENSING POTENTIAL

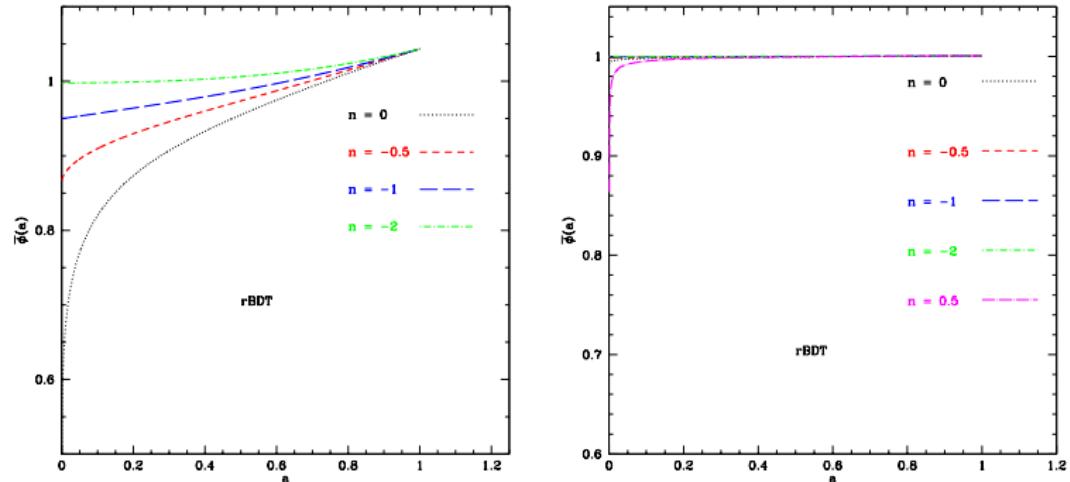


*¿QUÉ SE PUEDE HACER CON ESTE CÓDIGO?*

# Escalar de Brans-Dicke



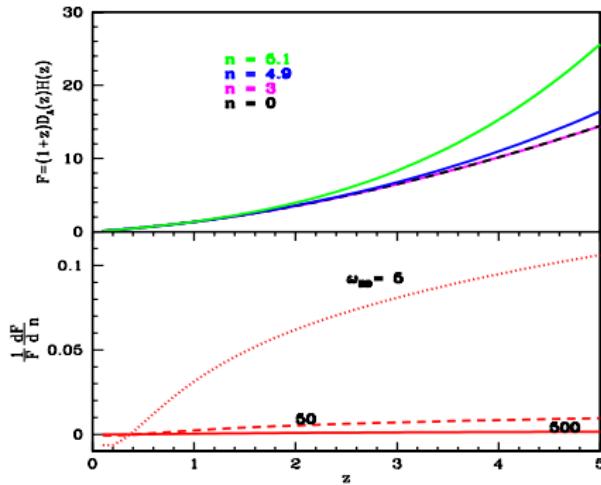
# Escalar Generalizado



- ▶ OUTPUT: modulo Jordan en equations.f90
- ▶ A mayores valores de  $m$  el campo se acerca mas a 1.
- ▶  $n < 0$  incrementa dicho efecto y viceversa.

# EVALUAR PRUEBAS DE DISTANCIAS

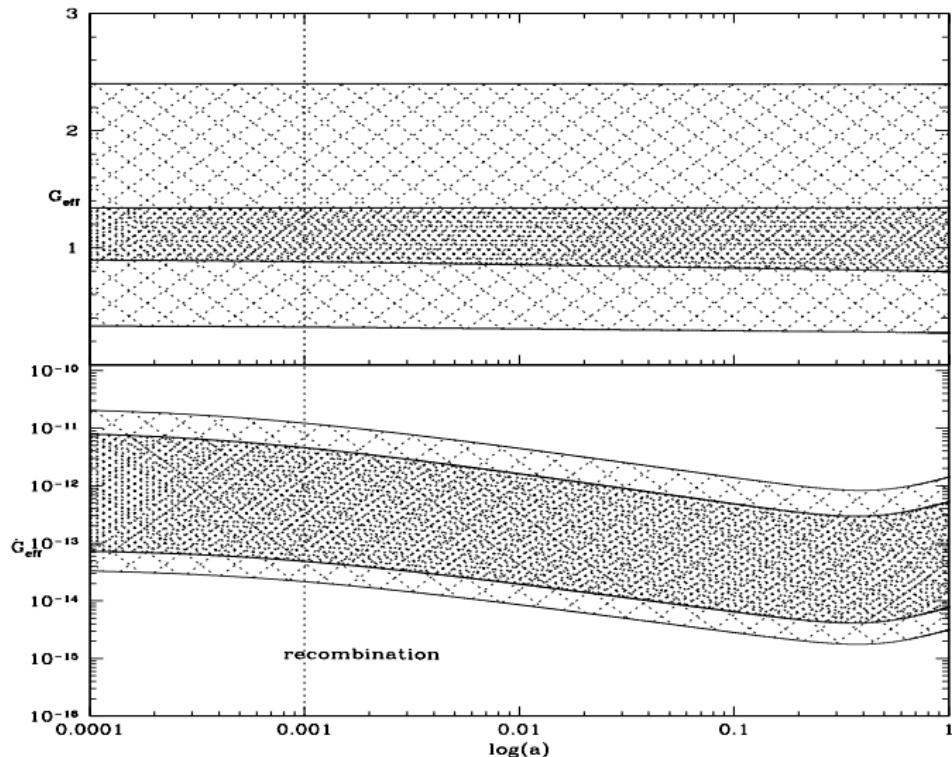
- ▶ Pruebas por distancias luminosas y BAO no discriminan GR de MG.
- ▶ Sin embargo, distorsiones tipo Alcock-Paczynski(APT) son sensibles a  $n$
- ▶ Objetos esfericos aparecen distorsionados en el espacio de redshift debido a velocidades peculiares de galaxias. APT: comparación entre mediciones de distancias tangenciales y radiales de objetos isopatrópicos.



$n$  es más sensible a mayor redshift.

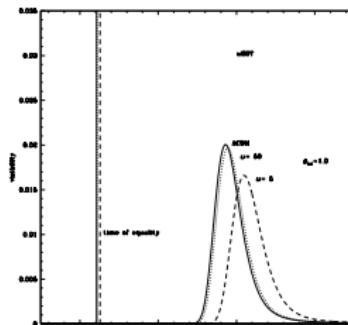
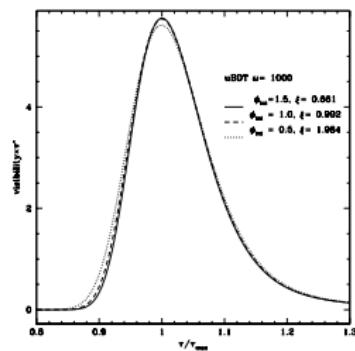
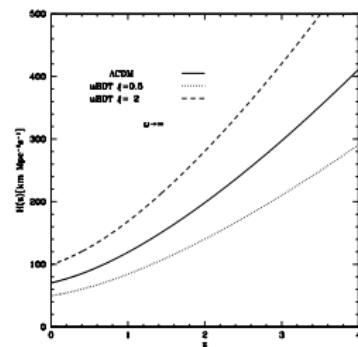
La distorsión de AP se amplifica si  $\omega_{BD} \approx O(1) \rightarrow$  teorías self-accelerating.

# Constricciones de $G_{eff}$ en el tiempo según el CMB y BBN. (COSMOMC)



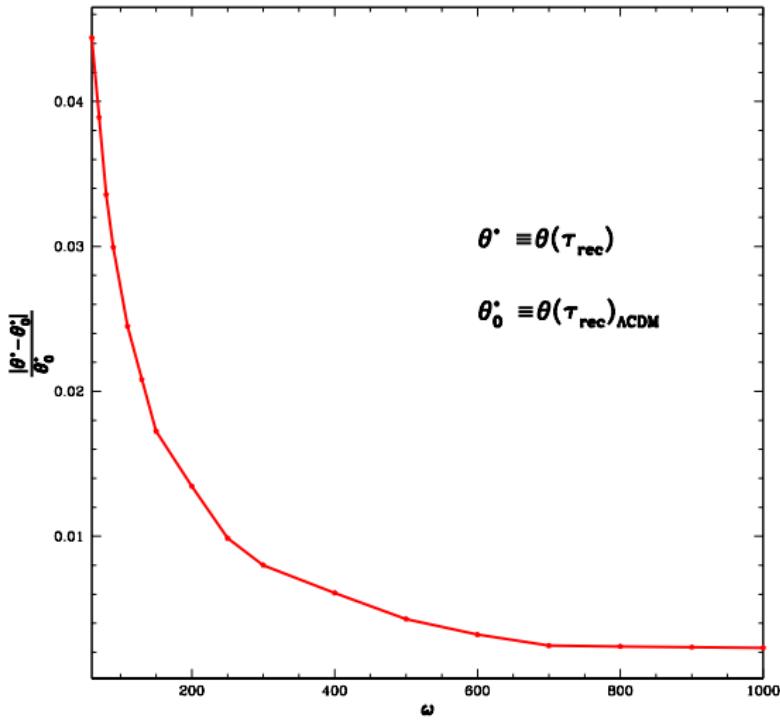
# Anticipar efectos en el CMB

1- Investigar como afecta cambiar  $G$  a la tasa de expansión y a la función de visibilidad



- ▶ OUTPUT ARRAY: modules.f90, subroutine inithermo
- ▶ El cambio en la expansión cambia el tiempo de recombinación.  
**Efecto 1:**  $\omega$  espectro de temperatura desfasado.
- ▶ Si  $G$  aumenta recombinacion ocurre antes y  $H$  es mayor, por lo que es mas dificil para los electrones recombinarse.  
**Efecto 2:**  $\xi$  amortigua las perturbaciones de temperatura a escalas pequeñas.

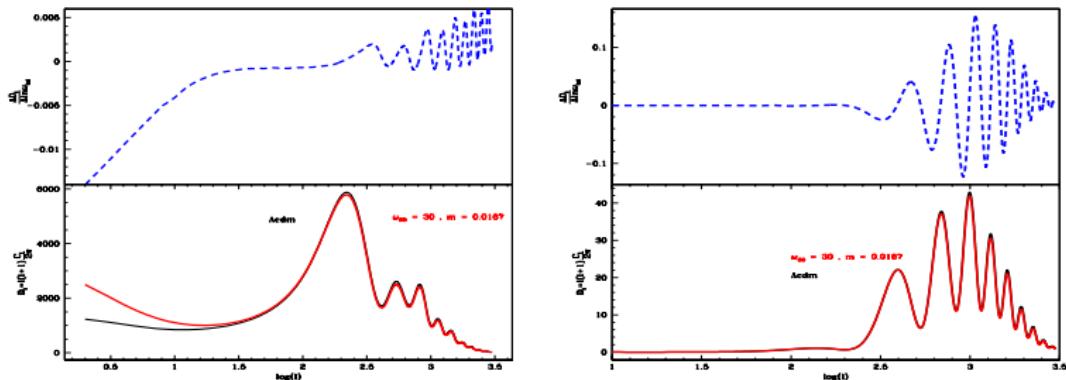
## 2- En consecuencia ... ¿Cómo cambia la escala acústica?



Esta observable es la que tiene mayor poder para constreñir a  $\omega$ .

# EFFECTO DE LAS PERTURBACIONES EN EL CMB

Para extraer los efectos del background  $\rightarrow \theta$  y  $G_{\text{eff}}$  fijas



$\omega_{BD}$

- ▶ Integrated Sachs-Wolfe effect
- ▶ modos longitudinales de polarization a escalas pequeñas.

## BD MODELS

Limiting case  
for theories  
with Vainshtein  
Mechanism

**UNRESTRICTED**

Relax G like Solar Sistem

$$\xi = G_{eff}/G_N = 1/\bar{\phi}_0.$$

**RESTRICTED**

$$\frac{4 + 2\omega}{3 + 2\omega}$$

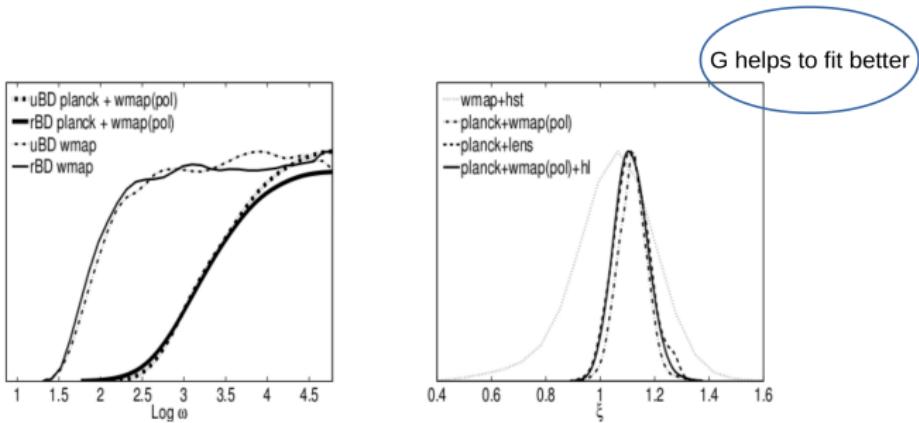
Traditional  
Ruled Out by  
Solar Sistem Data  
Since 1960

$$\omega > 40000 \text{ a } 2\sigma$$

	$\omega$			
	U		R	
	95%	99%	95%	99%
WMAP7	99	55	90	51
WMAP7 + HST	126	62	177	120
WMAP7 + SPT + HST	269	148	157	114
PlanckTemp + WMAP9pol	1834	890	1808	692
PlanckTemp + WMAP9pol + High-l	1923	843	1326	213
PlanckTemp + PlanckLens	2441	1033	1901	420
PlanckTemp + PlanckLens + Hight-l	1939	829	1408	330

Avilez&Skordis2014

2003	$\omega > \{50, 1000\} \text{ a } 4\sigma \text{ y } 2\sigma$	WMAP1	NagataChibaSugiyama2003
2004	$\omega > \{80, 120\} \text{ a } 99\% \text{ y } 95\%$	WMAP1 Y SDSSS	AcquavivaEtAl2004
2010	$\omega > 97.8 \text{ a } 95\%$	WMAP5 y SDSS-5	WuChen2010
2013	$\omega > 181.65 \text{ a } 95\%$	Planck y WMAP9	Lie et. al



model	$\theta(\tau_{rec})$ (rBD/uBD) $2\sigma$	$\theta(\tau_{rec})$ in $\Lambda CDM$ $1\sigma$
planck+wp+hl	$1.03939 \pm 0.00064 / 1.039867 \pm 0.00067$	$1.04132 \pm 0.00068$

$$69.18 < H_0 < 80.46$$

$$H_0^{mean} = (74.5 \pm 2.9) km s^{-1} Mpc^{-1}$$

¡GRACIAS!



clips