

Seminario de la Facultad de Ciencias en Física y  
Matemáticas, UNACH

## Expansión en serie de Fourier de la ecuación de estado de la energía oscura

David Alejandro Tamayo Ramírez



**Cinvestav**

11 de Abril del 2019, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

# Sumario

- 1.- Ideas básicas de la cosmología
- 2.- La energía oscura y sus problemas
- 3.- Energía oscura dinámica a través de  $w(t)$
- 4.- Expansión en serie de Fourier de  $w$  de la energía oscura  
Modelo  
Comparación con los datos observacionales
- 5.- Conclusiones

# 1.- Ideas básicas de la cosmología

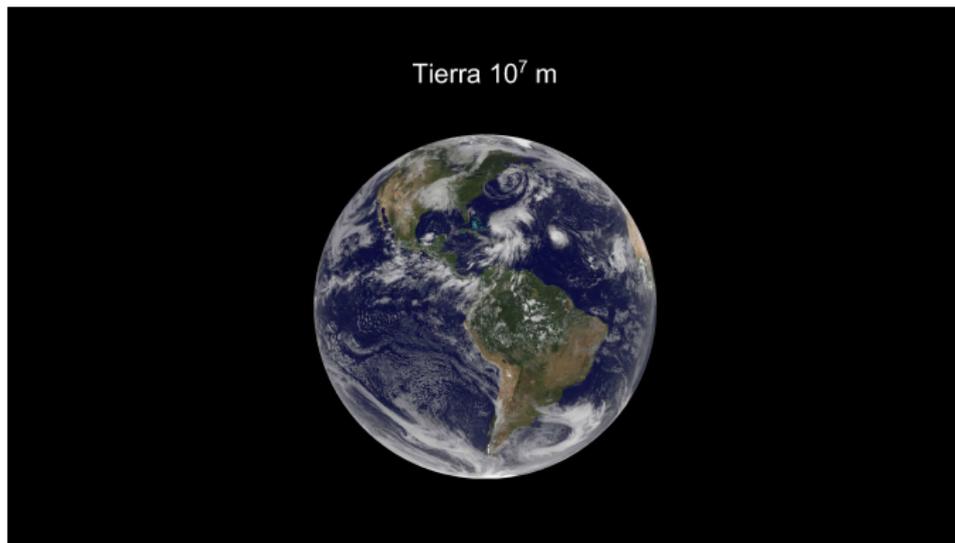
## ¿Qué es la cosmología?

- ▶ Es la ciencia del Universo. La cosmología estudia las propiedades físicas del Universo desde su origen, evolución, estado actual y devenir, así como todo lo que lo compone.
- ▶ Sustento teórico: teoría de gravitación, física (termodinámica, física de partículas, mecánica cuántica, electromagnetismo. etc.), herramientas matemáticas, computación.
- ▶ Sustento empírico: astronomía observacional. No experimental.
- ▶ Es una ciencia reconstructiva.
- ▶ Simulaciones numéricas.

Fundamental entender las escalas del Universo

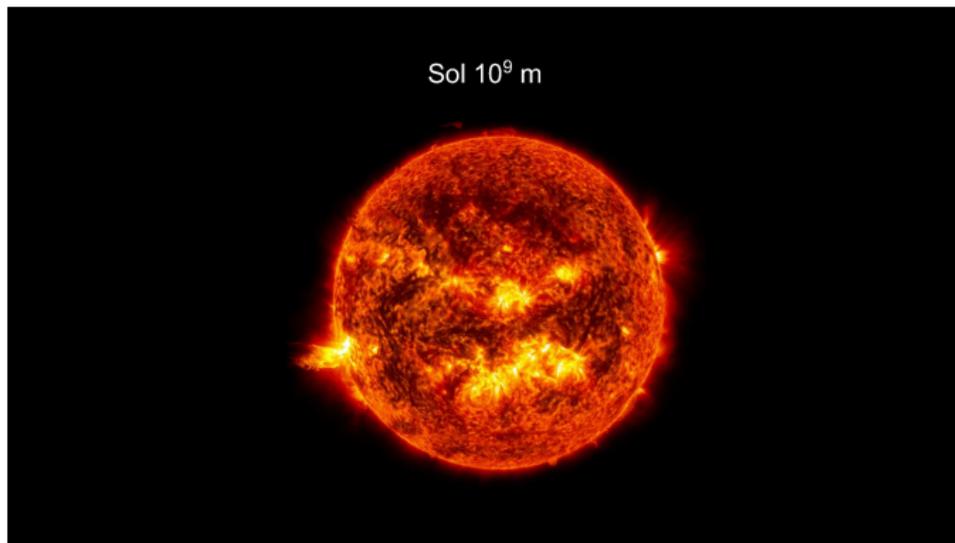
# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Tamaño del Universo



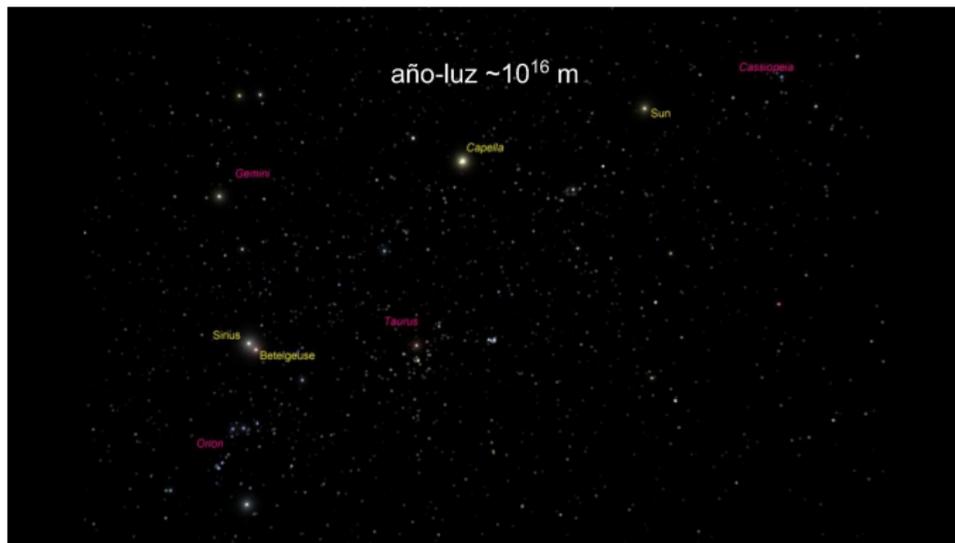
# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Tamaño del Universo



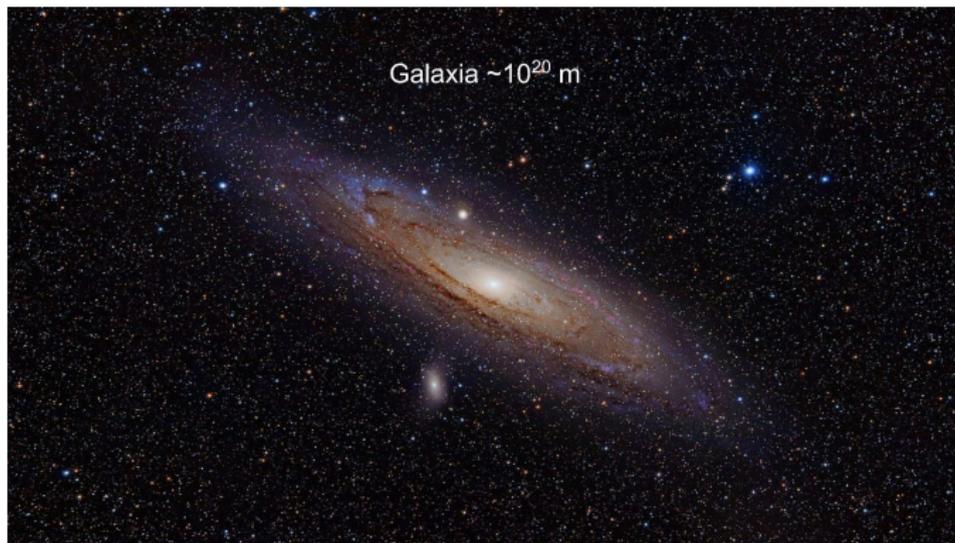
# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Tamaño del Universo



# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Tamaño del Universo

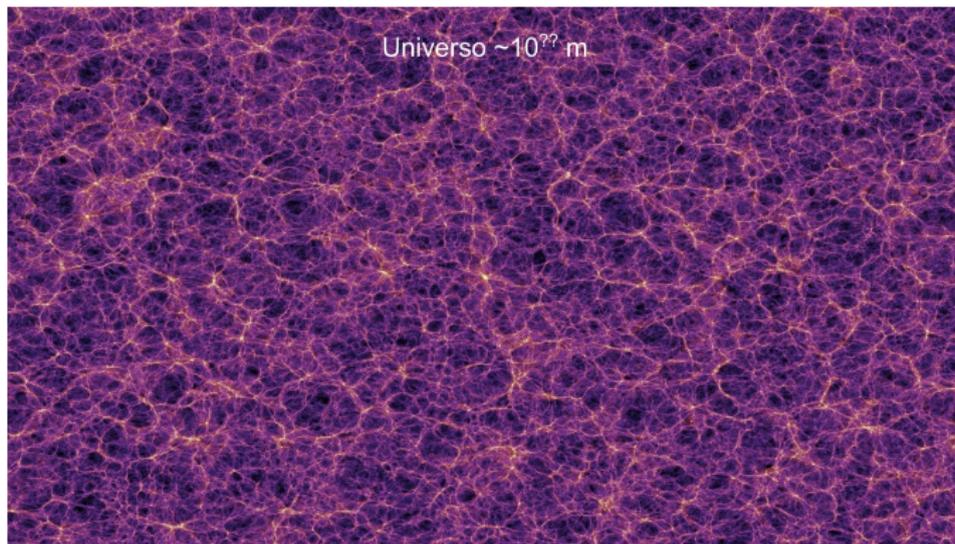






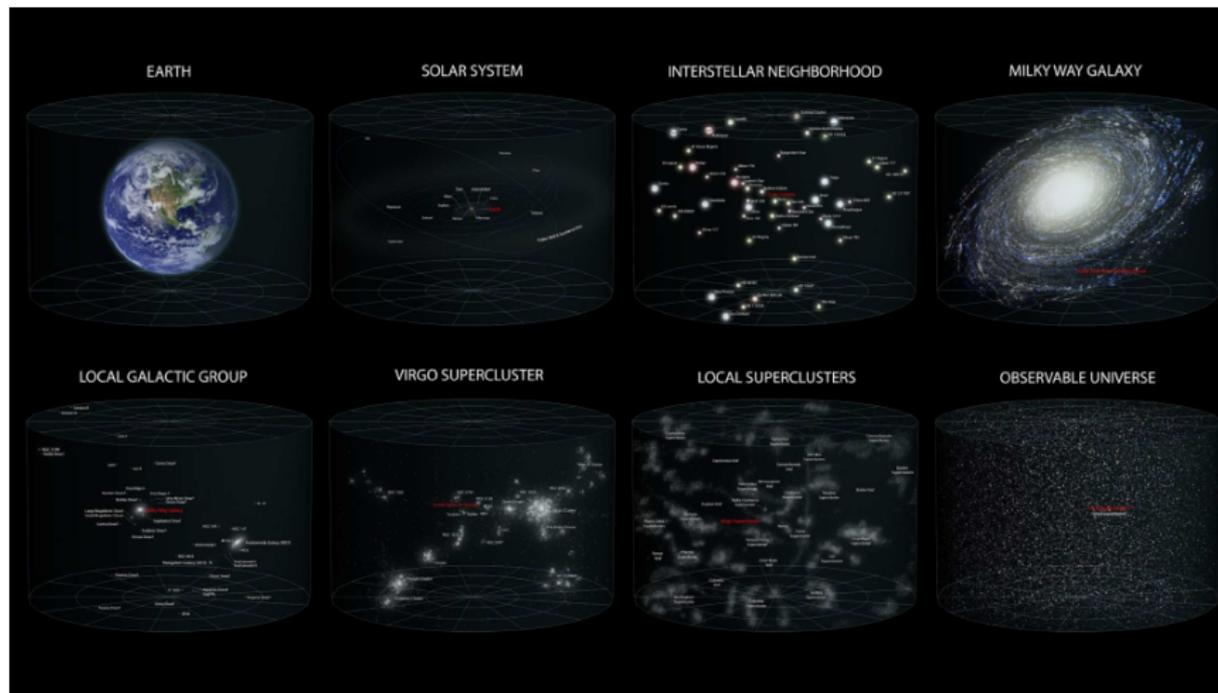
# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Tamaño del Universo



# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Tamaño del Universo



# 1.- Ideas básicas de la cosmología

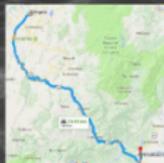
## Tamaño del Universo

Si reducimos el tamaño del Universo observable ( $10^{27}$ ) al del tamaño de la Tierra ( $10^7$ ) debemos disminuir  $10^{20}$  órdenes de magnitud.

Universo observable  $10^{27}$   
-> Tierra  $10^7$



Supercúmulo local  $10^{25}$   
->  $10^5$



Cúmulo de Virgo  $10^{24}$   
->  $10^4$



Grupo local  $10^{22}$   
->  $10^2$



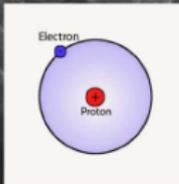
Galaxia  $10^{20}$   
->  $10^0$



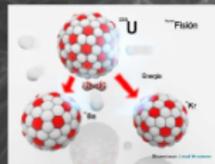
Año luz  $10^{16}$   
->  $10^{-4}$



Sol  $10^9$   
->  $10^{-11}$



Tierra  $10^7$   
->  $10^{-13}$



# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Hipótesis fundamentales de la cosmología

- ▶ El Universo es homogéneo e isotrópico a gran escala.

# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Hipótesis fundamentales de la cosmología

- ▶ El Universo es homogéneo e isotrópico a gran escala.
- ▶ La fuerza gravitacional es la fuerza dominante.

# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Hipótesis fundamentales de la cosmología

- ▶ El Universo es homogéneo e isotrópico a gran escala.
- ▶ La fuerza gravitacional es la fuerza dominante.
- ▶ Las leyes de la física son universales en el espacio y tiempo.

# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Hipótesis fundamentales de la cosmología

- ▶ El Universo es homogéneo e isotrópico a gran escala.
- ▶ La fuerza gravitacional es la fuerza dominante.
- ▶ Las leyes de la física son universales en el espacio y tiempo.
- ▶ El Universo tiene una lógica y es cognoscible.



# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Ecuaciones de Friedmann

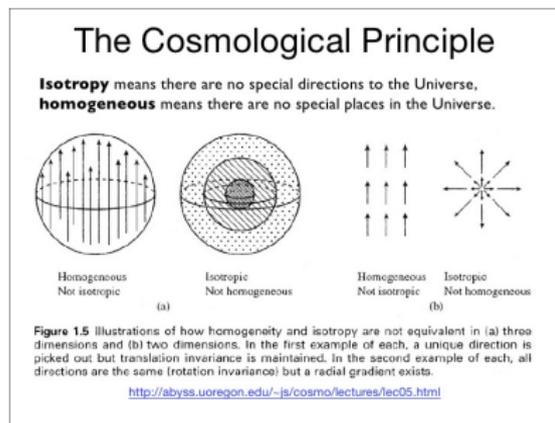
Se asume homogeneidad e isotropía.

La 1.<sup>a</sup> ec. de Friedmann relaciona la densidad  $\rho$ , el factor de curvatura  $k$  y la constante cosmológica  $\Lambda$  con el ritmo de expansión.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G \rho + \Lambda c^2}{3} - \frac{kc^2}{a^2} \quad (2)$$

La 2.<sup>a</sup> ec. de Friedmann relaciona la densidad, presión y constante cosmológica con la aceleración del Universo.

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (3)$$



La evolución del Universo descrita por un factor de escala  $a(t)$ .

## 1.- Ideas básicas de la cosmología

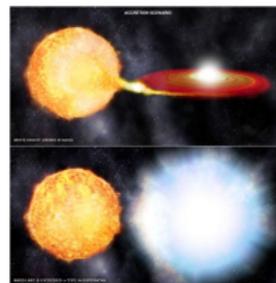
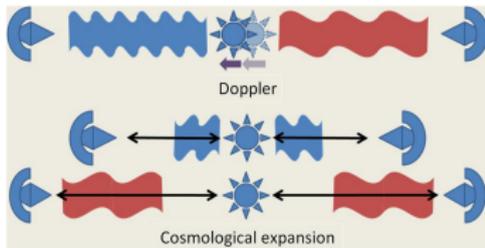
# LA COMPOSICIÓN DEL UNIVERSO



# 1.- Ideas básicas de la cosmología

## Expansión acelerada

- ▶ Estudiando SNIa, en 1998 se descubrió la expansión acelerada del Universo.
- ▶ Premio Nobel del 2011, Adam Riess, Brian Schmidt, Saul Perlmutter.
- ▶ La gravedad frena la expansión.
- ▶ Para explicar esto es necesario proponer un tipo de *energía antigravitatoria*. ENERGÍA OSCURA.



## 2.- La energía oscura y sus problemas

¿Por qué la expansión del Universo se está acelerando?

## 2.- La energía oscura y sus problemas

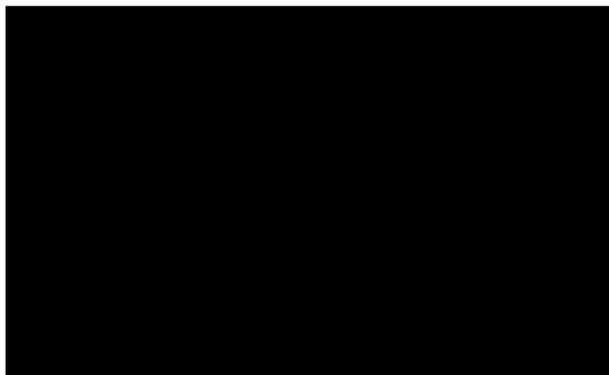
¿Por qué la expansión del Universo se está acelerando?

- ▶ Denominamos *energía oscura* a la causa de la expansión acelerada.
- ▶ La energía oscura es la mayor componente del Universo y aun su naturaleza escapa de nuestro entendimiento.

## 2.- La energía oscura y sus problemas

¿Por qué la expansión del Universo se está acelerando?

- ▶ Denominamos *energía oscura* a la causa de la expansión acelerada.
- ▶ La energía oscura es la mayor componente del Universo y aun su naturaleza escapa de nuestro entendimiento.
- ▶ Lo que sabemos de la energía oscura es más o menos así:



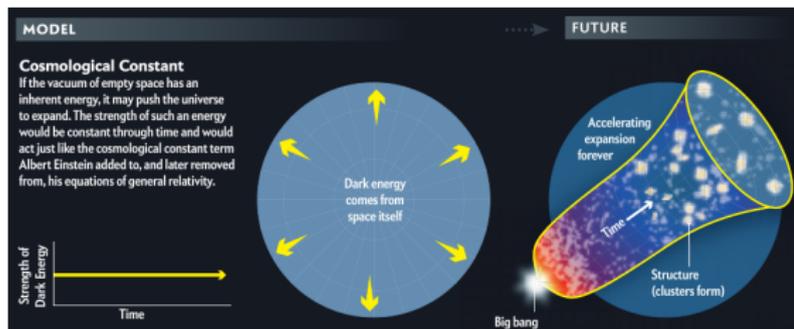
## 2.- La energía oscura y sus problemas

### Cosmología con constante cosmológica

- ▶ La hipótesis más simple es asociar la energía oscura con la constante cosmológica de las ecuaciones de Einstein,

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

- ▶ En este caso  $\Lambda$  está relacionada con la densidad de energía del vacío:  
 $\rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G}$ ,  $p_\Lambda = -\rho_\Lambda$ . Elemento importante del modelo  $\Lambda$ CDM.



## 2.- La energía oscura y sus problemas

### Problemas de la constante cosmológica

Problema de la energía del vacío:  $\frac{\rho_{vac}^{QFT}}{\rho_{vac}^{\Lambda}} \sim 10^{100-120}$ .

## 2.- La energía oscura y sus problemas

### Problemas de la constante cosmológica

Problema de la energía del vacío:  $\frac{\rho_{vac}^{QFT}}{\rho_{vac}^{\Lambda}} \sim 10^{100-120}$ .

Problema de la Coincidencia Cósmica:  $\rho_{\Lambda} = cte$  y  $\rho_m \propto a^{-3}$ . Para el tiempo presente  $\frac{\Omega_{\Lambda}}{\Omega_m} \sim \mathcal{O}(1)$ .

## 2.- La energía oscura y sus problemas

### Problemas de la constante cosmológica

Problema de la energía del vacío:  $\frac{\rho_{vac}^{QFT}}{\rho_{vac}^{\Lambda}} \sim 10^{100-120}$ .

Problema de la Coincidencia Cósmica:  $\rho_{\Lambda} = cte$  y  $\rho_m \propto a^{-3}$ . Para el tiempo presente  $\frac{\Omega_{\Lambda}}{\Omega_m} \sim \mathcal{O}(1)$ .

Tensión ente  $\Lambda$ CDM y observaciones: parece que  $\rho_{de}$  no es exactamente constante.

## 2.- La energía oscura y sus problemas

### Problemas de la constante cosmológica

Problema de la energía del vacío:  $\frac{\rho_{vac}^{QFT}}{\rho_{vac}^{\Lambda}} \sim 10^{100-120}$ .

Problema de la Coincidencia Cósmica:  $\rho_{\Lambda} = cte$  y  $\rho_m \propto a^{-3}$ . Para el tiempo presente  $\frac{\Omega_{\Lambda}}{\Omega_m} \sim \mathcal{O}(1)$ .

Tensión ente  $\Lambda$ CDM y observaciones: parece que  $\rho_{de}$  no es exactamente constante.

- ▶ ¿El problema es del modelo cosmológico o de la teoría de gravedad?

## 2.- La energía oscura y sus problemas

### Problemas de la constante cosmológica

**Problema de la energía del vacío:**  $\frac{\rho_{vac}^{QFT}}{\rho_{vac}^{\Lambda}} \sim 10^{100-120}$ .

**Problema de la Coincidencia Cósmica:**  $\rho_{\Lambda} = cte$  y  $\rho_m \propto a^{-3}$ . Para el tiempo presente  $\frac{\Omega_{\Lambda}}{\Omega_m} \sim \mathcal{O}(1)$ .

**Tensión ente  $\Lambda$ CDM y observaciones:** parece que  $\rho_{de}$  no es exactamente constante.

- ▶ ¿El problema es del modelo cosmológico o de la teoría de gravedad?
- ▶ ¿La energía oscura es un elemento geométrico o un tipo de material exótico?

## 2.- La energía oscura y sus problemas

### Una alternativa: Gravedad Modificada

Modified gravity roadmap

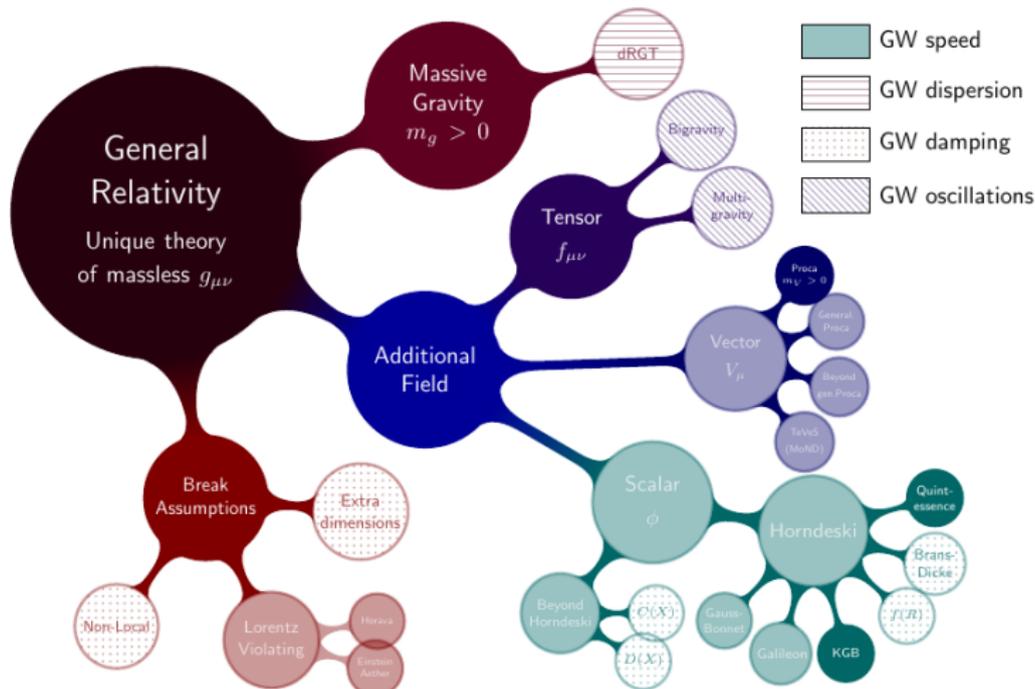


Figura: J.M. Ezquiaga and M. Zumalacárregui, *Front. Astron. Space Sci.* 5 (2018) 44.

## 2.- La energía oscura y sus problemas

### Estrategias para estudiar la energía oscura

No hay un equivalente en el modelo estándar de partículas similar a la energía oscura.

Aproximaciones:

- ▶ Escoger un modelo: algo arbitrario, sujeto a ajustes finos, a nivel background muchos sobreviven.
- ▶ Fenomenológica:
  - Expansión cósmica → ecuación de estado,  $w(z)$ .
  - Clustering → velocidad del sonido  $c_s(z)$ .

La reconstrucción puede ser complicada.

- ▶ Partir desde la física fundamental: QFT, teoría de gravitación (GR y extensiones) → gravedad cuántica.

Nunca olvidarse de las observaciones y física experimental.

## 2.- La energía oscura y sus problemas

### Ecuación de estado de la energía oscura

Las componentes materiales del Universo se modelan como fluidos perfectos: muy diluidos, colisiones elásticas, sin viscosidad.  $pV = nRT$

$$p = (c_p - c_v) \frac{T}{V} = \left( \frac{c_p}{c_v} - 1 \right) \frac{(c_v T)}{V} = w \frac{e}{V} = w\rho, \quad \Rightarrow p = w\rho. \quad (4)$$

Donde  $nR = c_p - c_v$  es la relación de Mayer y  $e$  energía interna.  
De la ley de conservación  $\nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0$  tenemos

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = \dot{\rho} + 3H(1 + w)\rho = 0 \quad \Rightarrow \rho = A e^{-3 \int \frac{da}{a} (1+w)}. \quad (5)$$

Para  $w = cte$ :  $\rho = A a^{-3(1+w)}$ .

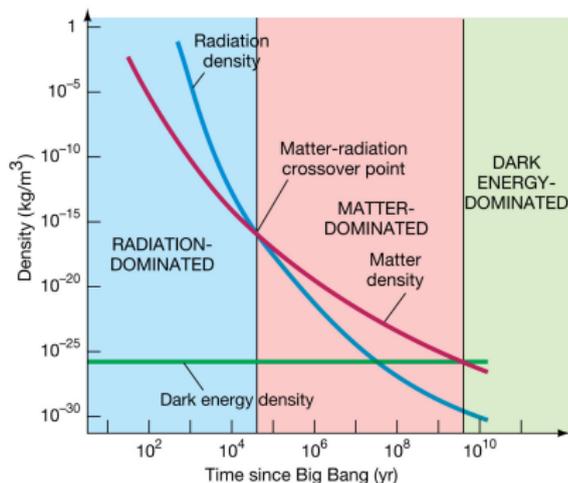
Para *polvo*, radiación y cc:  $w_m = 0$ ,  $w_r = 1/3$  y  $w_\Lambda = -1$

$$\rho_m = \rho_m^{(0)} a^{-3}, \quad \rho_r = \rho_r^{(0)} a^{-4}, \quad \rho_\Lambda = \rho_\Lambda^{(0)}. \quad (6)$$

La ecuación de estado es fundamental para conocer la dinámica.

### 3.- Energía oscura dinámica a través de $w(t)$

- ▶ Se asume que la energía oscura puede representarse como una *componente material*, es decir, tenemos  $\rho_{de}$  y  $p_{de}$ .
- ▶  $w$  cambia con el tiempo.
- ▶ Alivia el problema del valor actual de la densidad de energía, de un valor grande en el pasado cae a un valor pequeño en el futuro ( $\rho_{de} \propto a^{-p}$ ).



© 2011 Pearson Education, Inc.

### 3.- Energía oscura dinámica a través de $w(t)$

#### Ejemplo: quintessence

Generado por un campo escalar  $\phi$  y  $V(\phi)$ .

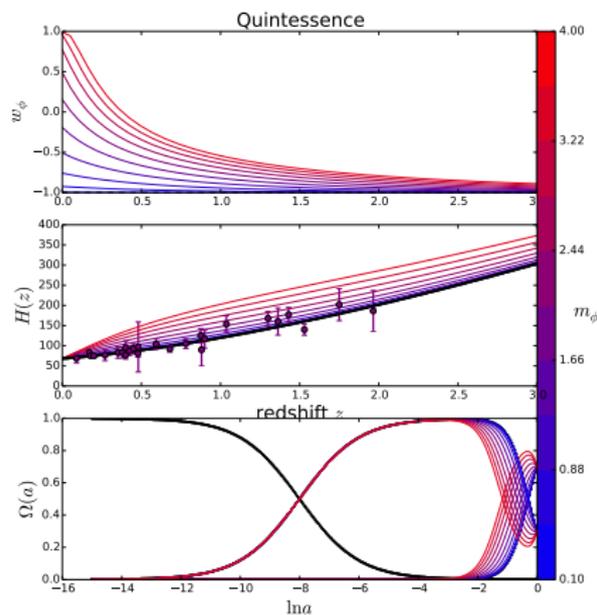
$$w_{\text{quintessence}} = \frac{p_{de}}{\rho_{de}} = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)}, \quad (7)$$

Ec. de Klein-Gordon

$$\frac{-1}{\sqrt{-g}}\partial_{\mu}(g^{\mu\nu}\sqrt{-g}\partial_{\nu}\phi) + m^2\phi = 0, \quad (8)$$

mínimamente acoplado

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{dV}{d\phi} = 0 \quad (9)$$



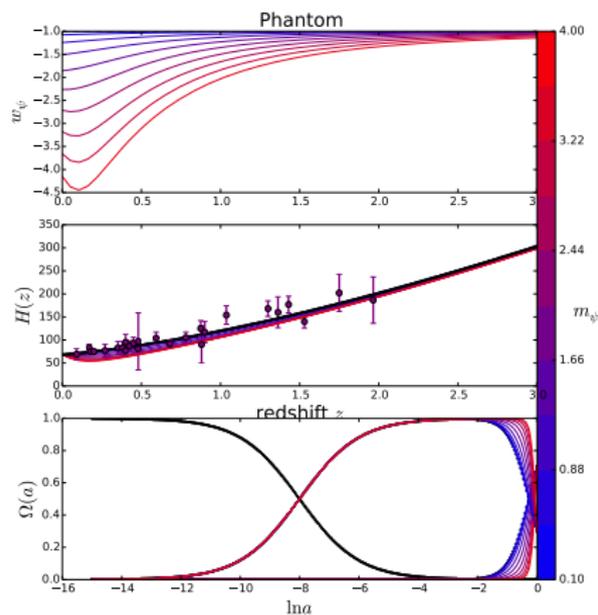
### 3.- Energía oscura dinámica a través de $w(t)$

#### Ejemplo: energía phantom

Energía oscura con energía cinética negativa que aumenta con la expansión del Universo.

$$w_{phantom} = \frac{-\frac{1}{2}\dot{\psi}^2 - V(\psi)}{-\frac{1}{2}\dot{\psi}^2 + V(\psi)}, \quad (10)$$

- ▶ Problema del Big Rip.
- ▶ Energía cinética negativa.
- ▶  $w < -1$ , problemas termodinámicos.

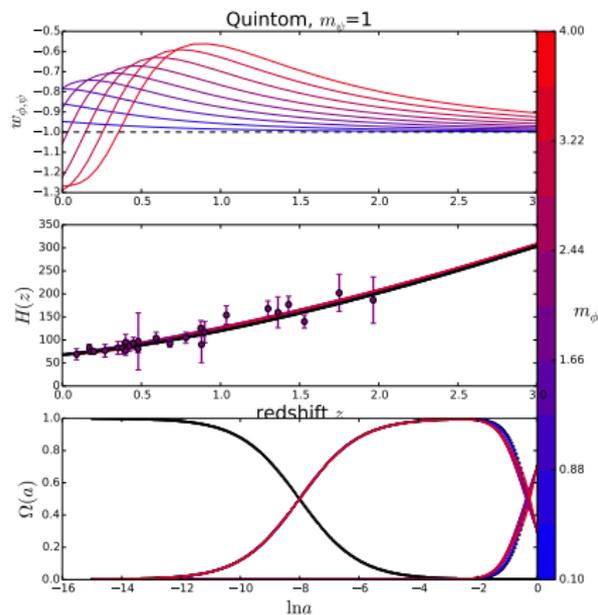


### 3.- Energía oscura dinámica a través de $w(t)$

quintessence + phantom = quintom

$$W_{\text{quintom}} = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - \frac{1}{2}\dot{\psi}^2 - U(\phi, \psi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - \frac{1}{2}\dot{\psi}^2 + U(\phi, \psi)}, \quad (11)$$

$w$  puede cruzar el valor  $w = -1$  lo que puede ser interesante.



### 3.- Energía oscura dinámica a través de $w(t)$

- ▶ Una forma efectiva de describir la energía oscura es a través del parámetro de la ecuación de estado  $w = \frac{p_{de}}{\rho_{de}}$ .
- ▶ Ecuaciones:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \left( \sum_i \rho_i + \rho_{de} \right), \quad (12)$$

$$\rho_{de} = A \exp \left( -3 \int \frac{da}{a} [1 + w(a(t))] \right). \quad (13)$$

- ▶ Esto es suficiente para describir la expansión cósmica en cualquier modelo siempre y cuando la energía oscura no esté acoplada con las otras componentes.
- ▶ Fundamental proponer o conocer parcialmente  $w(a)$ .

### 3.- Energía oscura dinámica a través de $w(t)$

$w$  como una expansión de Taylor  $w(a) = \sum_{i=0}^N (1-a)^i w_i$ .

- $N = 0$ ,  $w$ CDM.
- $N = 1$ , modelo Chevallier-Polarski-Linder (CPL)  
 $w(z) = w_0 + w_1 \frac{z}{1+z}$ . Donde  $a = 1/(1+z)$ .
- $N = 2, 3, 4$ , casos más generales.

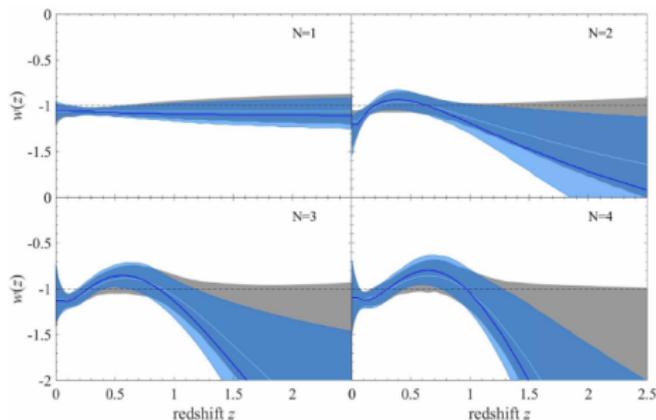


Figura: Dai, Yang, Xia, *Astrophys. Journal*, 857:9 (9pp), 2018.

La expansión polinomial alrededor de  $a = 1$  diverge a grandes redshifts.

### 3.- Energía oscura dinámica a través de $w(t)$

#### Reconstrucción de $w(z)$

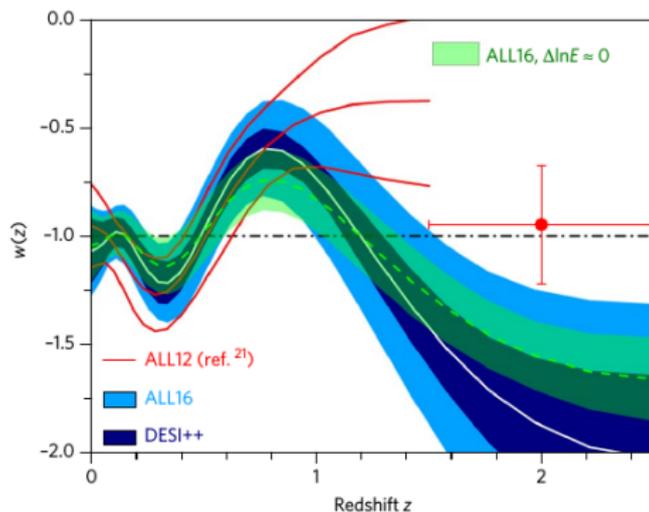


Figura: G.B. Zhao *et al.*, *Nat. Astron.* **1**, no. 9, 627 (2017).

Datos: Planck 2015 (CMB), BAO,  $H_0$ , SNIa.  
Reconstrucción no paramétrica.

## 4.- Expansión en serie de Fourier de $w$

### Modelo

- ▶ La idea básica es considerar  $w(a)$  como una serie de Fourier.
- ▶ Motivado por el aparente carácter oscilatorio de  $w(a)$ .
- ▶ Generaliza otras aproximaciones por funciones trigonométricas.
- ▶ Cosmología FLRW plana.
- ▶ Serie de Fourier en  $1 \geq a \geq a_{med}$ , lineal en  $a_{med} \geq a \geq a_{ini}$  y  $w = -1$  otro caso.

$$w(a) = \begin{cases} -1, \\ m(a - a_{ini}) + b, \\ \frac{w_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \sin \left[ \frac{2n\pi}{T}(a - a_{med}) \right] + b_n \cos \left[ \frac{2n\pi}{T}(a - a_{med}) \right] \right). \end{cases} \quad (14)$$

Las constantes  $m$  y  $b$  se calculan con uniendo las funciones

$$m = \frac{w_{med} - w_{ini}}{a_{med} - a_{ini}} = \frac{\frac{w_0}{2} + \sum_n b_n + 1}{a_{med} - a_{ini}}, \quad (15)$$

$$b = w_{ini} = -1. \quad (16)$$

## 4.- Expansión en serie de Fourier de $w$

Recordando  $\rho_{de} = A \exp \left[ -3 \int (1 + w) \frac{da}{a} \right]$ , integrando

$$\rho_F = A_F a^{-3(1+\frac{w_0}{2})} \exp \left[ -3 \sum_{n=1}^{\infty} \text{Ci}(a n \theta) [b_n \cos(a_{med} n \theta) - a_n \sin(a_{med} n \theta)] \right] \times \\ \exp \left[ -3 \sum_{n=1}^{\infty} \text{Si}(a n \theta) [a_n \cos(a_{med} n \theta) + b_n \sin(a_{med} n \theta)] \right],$$

$$\rho_L = A_L a^{1+b+3m a_{ini}} e^{3m a},$$

$$\rho_C = A_C.$$

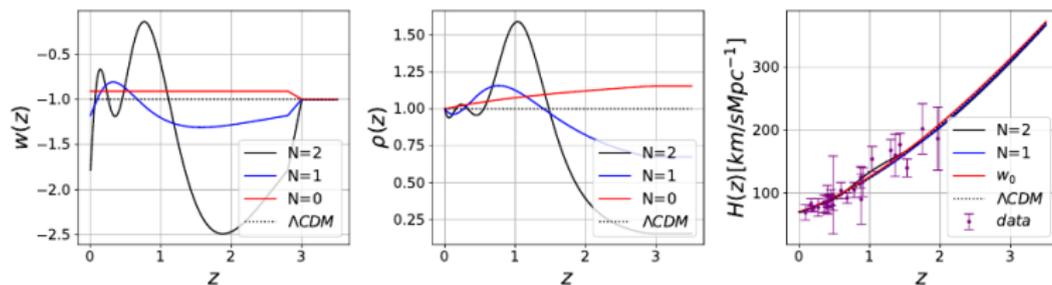
$A_F, A_L, A_C$  son constantes de int.,  $\theta = 2\pi/T$ .

$$\text{Ci}(x) = - \int_x^{\infty} \frac{\cos t}{t} dt,$$

$$\text{Si}(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt.$$

## 4.- Expansión en serie de Fourier de $w$

Ejemplo:



**Figure 1.** Left panel: dark energy EoS parameter  $w(z)$ , middle panel: energy density  $\rho(z)$  of the dark energy and right panel: Hubble function  $H(z)$  with data from Gómez-Valent & Amendola (2018). In solid black and blue lines the first two harmonics of the Fourier series  $N = 2, 1$  (number of pairs of  $a_n$  and  $b_n$  of the expansion), in red the case with only the constant term  $w_0$  of the series and the dotted black line corresponds to the  $\Lambda$ CDM model. The used values of  $a_n$ ,  $b_n$  and  $w_0$  for this plot were taken from Table 1.

Figura: DT and J.A. Vazquez, arXiv:1901.08679 (2019). Aceptado en el MNRAS

## 4.- Expansión en serie de Fourier de $w$

### Comparación con los datos observacionales

- ▶ Usamos SimpleMC (<https://github.com/ja-vazquez/SimpleMC>), una versión simplificada de Markov Chain Monte Carlo (MCMC).
- ▶ Datos: Planck, SNIa, BAO y mediciones de  $H(z)$ .
- ▶ El código ignora perturbaciones de la energía oscura.
- ▶ Parámetros libres  $w_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$ .
- ▶ Transiciones en  $z_{ini} = 3.0$  y  $z_{med} = 2.8$ .
- ▶ Priors  $w_0 = [-3, -1]$  y  $a_n, b_n = [-1.5, 1.5]$ .
- ▶ Balance entre complejidad y mejor ajuste a los datos. Akaike Information Criterion (AIC).

$$AIC_C = -2 \ln \mathcal{L}_{\max} + 2k + \frac{2k(k+1)}{N-k-1}. \quad (17)$$

donde  $\mathcal{L}$  es el likelihood,  $k$  es el número extra de parámetros y  $N$  el número de datos

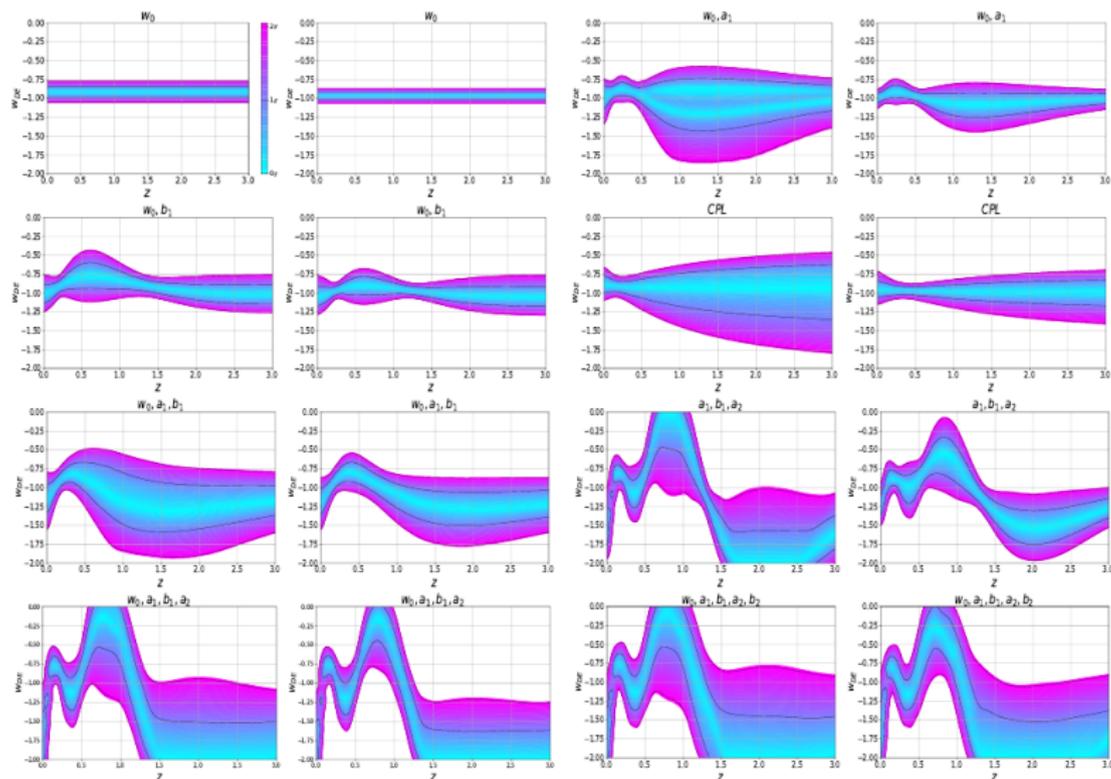
- ▶ El modelo preferido es el que minimice  $AIC_C$ .

## 4.- Expansión en serie de Fourier de $w$

**Table 1.** Constraints on the set of parameters used on each description for  $w(z)$ . For one-tailed distributions the upper limit 95% C.L. is given and for two-tailed the 68% is shown. Its corresponding plot is displayed in Figure 2. For each parameterization of  $w(z)$  we have considered two sets of data: first row contains SNIa+BAO+HD, while the second row additionally includes PLK data.

	Model	Extra Parameters	$w_0$	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$-2 \ln \mathcal{L}_{\max}$	$S/N$ <sup>1</sup>	$\Delta AIC_C$
	$\Lambda$ CDM	0	-2 -2	0 0	0 0	0 0	0 0	68.98 73.44	0 0	0 0
(a)	$w_0$	1	$-1.82 \pm 0.12$ $-1.93 \pm 0.08$	0 0	0 0	0 0	0 0	67.06 73.84	$1.4\sigma$ $0.5\sigma$	0.3 2.6
(b)	CPL <sup>2</sup>	2	$-0.87 \pm 0.11$ $-0.94 \pm 0.10$	$-0.28 \pm 0.58$ $-0.11 \pm 0.34$	0 0	0 0	0 0	67.08 73.66	$1.4\sigma$ $0.5\sigma$	2.7 4.8
(c)	$w_0, a_1$	2	$-2.06 \pm 0.32$ $-2.01 \pm 0.12$	$-0.16 \pm 0.20$ $-0.10 \pm 0.11$	0 0	0 0	0 0	66.74 73.24	$1.5\sigma$ $0.4\sigma$	2.3 4.4
(d)	$w_0, b_1$	2	$-1.78 \pm 0.13$ $-1.94 \pm 0.08$	0 0	$-0.11 \pm 0.12$ $-0.06 \pm 0.11$	0 0	0 0	66.12 73.50	$1.7\sigma$ $0.2\sigma$	1.7 4.6
(e)	$w_0, a_1, b_1$	3	$-2.12 \pm 0.33$ $-2.09 \pm 0.14$	$-0.22 \pm 0.21$ $-0.19 \pm 0.13$	$-0.12 \pm 0.13$ $-0.17 \pm 0.12$	0 0	0 0	65.84 71.56	$1.8\sigma$ $1.4\sigma$	3.8 5.1
(f)	$a_1, b_1, a_2$	3	-2 -2	$-0.09 \pm 0.08$ $-0.07 \pm 0.09$	$-0.54 \pm 0.23$ $-0.26 \pm 0.12$	$-0.54 \pm 0.27$ $-0.27 \pm 0.17$	0 0	61.52 69.66	$2.7\sigma$ $1.9\sigma$	-0.5 3.2
(g)	$w_0, a_1, b_1, a_2$	4	$-2.34 \pm 0.31$ $-2.53 \pm 0.24$	$-0.29 \pm 0.20$ $-0.38 \pm 0.17$	$-0.70 \pm 0.29$ $-0.70 \pm 0.23$	$-0.72 \pm 0.34$ $-0.76 \pm 0.28$	0 0	61.24 63.94	$2.8\sigma$ $3.1\sigma$	1.7 -0.1
(h)	$w_0, a_1, b_1, a_2, b_2$	5	$-2.31 \pm 0.31$ $-2.50 \pm 0.28$	$-0.28 \pm 0.22$ $-0.41 \pm 0.22$	$-0.65 \pm 0.30$ $-0.66 \pm 0.27$	$-0.67 \pm 0.34$ $-0.70 \pm 0.30$	$0.02 \pm 0.23$ $0.13 \pm 0.26$	61.40 64.26	$2.8\sigma$ $3.0\sigma$	4.4 0.2

## 4.- Expansión en serie de Fourier de $w$



**Figure 2.** These plots show the posterior probability  $\text{Pr}(w|z)$ : the probability of  $w$  as normalised in each slice of constant  $z$ , with colour scale in confidence interval values. The  $1\sigma$  and  $2\sigma$  confidence intervals are plotted as black lines. Left panel for each set contains SN+BAO+HD datasets, while the right panel includes additionally PLK data.

## 4.- Expansión en serie de Fourier de $w$

- ▶ El mejor ajuste no es  $\Lambda$ CDM, aunque éste es bueno.
- ▶ Los modelos (f) ( $a_1, b_1, a_2$ ) y (g) ( $w_0, a_1, b_1, a_2$ ) son particularmente interesantes.
- ▶ El modelo (h) a pesar de ser el más complejo no es el mejor favorecido ( $b_2$  cerca de cero).
- ▶ Los modelos (f), (g) y (h) se asemejan a la figura de la reconstrucción.
- ▶ En (f), (g), (h) hay dos picos, el mayor en  $z \sim 0.2$ .
- ▶ Para hoy ( $z = 0$ ) y ( $z > 1$ ) se ve favorecido el caso  $w < -1$ .
- ▶ El modelo (g) es el que más se desvía de  $\Lambda$ CDM ( $3.1\sigma$ ).

## 5.- Conclusiones

### Cosmología

- ▶ El entendimiento de la energía oscura es uno de los grandes desafíos de la física.
- ▶ A pesar de los avances en 20 años aun hay grandes incógnitas.
- ▶ Teoría: Desarrollar con más detalle la cosmología.
- ▶ Teoría: Justificar a partir de teorías fundamentales y la microfísica.
- ▶ Observacional: hacer una "limpieza" de la gran cantidad de modelos.
- ▶ Observacional: grandes proyectos, Dark Energy Survey (DES) y Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI), Euclid.

## 5.- Conclusiones

### Expansión en serie de Fourier de $w$

- ▶ Esta aproximación reproduce el comportamiento oscilatorio mostrado en la reconstrucciones.
- ▶ Generaliza algunas propuestas de energía oscura dinámica modelados por funciones trigonométricas.
- ▶ Evita los problemas de la expansión de Taylor: muchos términos para reproducir oscilaciones, divergencias lejos del punto de expansión.
- ▶ El modelo (g) ajusta mejor los datos en más de  $3\sigma$  y  $\Delta AIC_C = -0.1$ .
- ▶ Tensión con la constante cosmológica, campos escalares simples, CPL y Taylor a bajo orden.
- ▶ Parece que hay múltiples cruces del PLD.

## 5.- Conclusiones

### Expansión en serie de Fourier de $w$

- ▶ Esta aproximación reproduce el comportamiento oscilatorio mostrado en la reconstrucciones.
- ▶ Generaliza algunas propuestas de energía oscura dinámica modelados por funciones trigonométricas.
- ▶ Evita los problemas de la expansión de Taylor: muchos términos para reproducir oscilaciones, divergencias lejos del punto de expansión.
- ▶ El modelo (g) ajusta mejor los datos en más de  $3\sigma$  y  $\Delta AIC_C = -0.1$ .
- ▶ Tensión con la constante cosmológica, campos escalares simples, CPL y Taylor a bajo orden.
- ▶ Parece que hay múltiples cruces del PLD.
- ▶ Este modelo requiere ajustes: justificar periodo, es una función definida a trozos, mejores reconstrucciones, modelo fenomenológico.

¡Muchas gracias por su  
atención!