

# Cosmología Observacional

Cristóbal Sifón  
PUCV  
2020A

*¿Qué observaciones nos permiten aprender  
sobre la naturaleza del Universo?*

*¿De qué herramientas disponemos?*

*¿Qué encontramos?*

*y*

*¿Cómo seguimos?*

# *¿Qué observaciones nos permiten aprender sobre la naturaleza del Universo?*

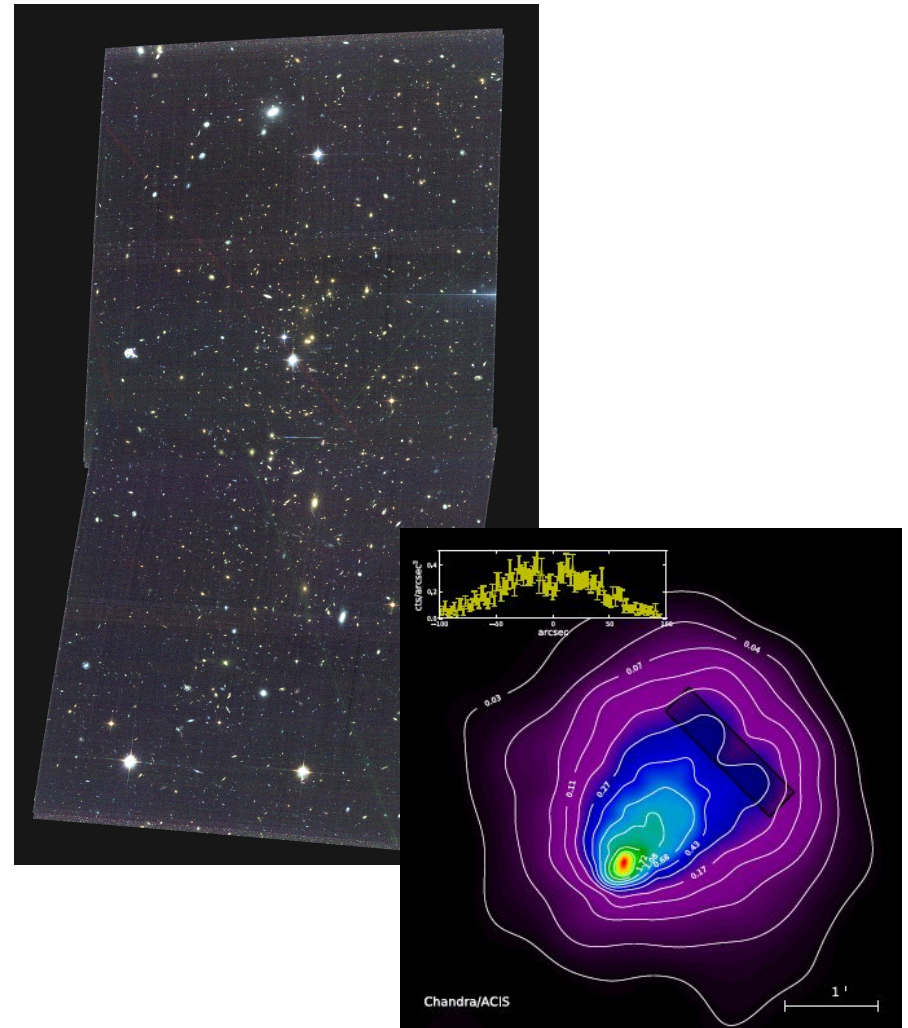
*El objetivo de este curso es familiarizarlos con las técnicas de cosmología observacional. Asume que manejan la base teórica de cosmología, aunque de ser necesario podremos repasar esa base en distintos momentos.*

# Un poco sobre mí

**CV:** BSc y MSc en PUC, PhD en Leiden (NL), trabajando en aspectos relacionados a lentes gravitacionales débiles en cúmulos de galaxias.

Cúmulos de galaxias contienen gran información cosmológica, codificada particularmente en su abundancia. Veremos bastante de esto en este curso. (También me interesa lo que los cúmulos y sus galaxias nos enseñan sobre evolución de galaxias.)

A la derecha, el cúmulo de galaxias “El Gordo”, uno de los objetos más destacados que se han descubierto usando el efecto Sunyaev-Zel’dovich, usando el Atacama Cosmology Telescope (Menanteau+12)



# Programa

(sujeto a leves modificaciones)

1. Introducción: Modelo  $\Lambda$ CDM
2. Escalera cosmológica de distancias
  - a. Medidas directas e indirectas de distancia
  - b. Constante de Hubble
  - c. Expansión acelerada
3. Estructura a gran escala
  - a. Formación y red cósmica de estructuras
  - b. *Pausa*: redshifts\* fotométricos
  - c. Aglomeración de galaxias y BAO
  - d. Abundancia de cúmulos de galaxias
  - e. Abundancia y estructura de vacíos de galaxias
  - f. Efectos de lentes gravitacionales fuerte y débil
4. Época de reionización
  - a. Fuentes de reionización
  - b. Bosque Lyman- $\alpha$  y efecto Gunn-Peterson
  - c. Observaciones en 21 cm
  - d. Mapeo de intensidad
5. Fondo cósmico de microondas
  - a. Espectro de potencias de temperatura y polarización
  - b. Efectos Sunyaev-Zel'dovich térmico y cinético
  - c. Efectos de lente gravitacional primordial y secundario
  - d. Efecto Sachs-Wolfe integrado
6. Análisis conjunto de observaciones: concordancia?

\*Trataré de mantener el *spanglish* al mínimo, pero a veces puede resultar muy conveniente.

# Evaluaciones

- Dos proyectos prácticos: 20% c/u
- Dos presentaciones: 20% c/u
- Examen: 20%

## **Sobre los proyectos prácticos:**

- Se definirá un problema a investigar
- Se entregará un set de datos, o las herramientas para conseguirlo
- Estos serán datos reales, de proyectos recientes y de alto impacto
- Dispondrán de aprox. 1 mes para desarrollarlos
- Se evaluará un informe de formato artículo científico con motivación científica, gráficos clave, discusión más allá del trabajo realizado, y código fuente. Cada aspecto tendrá aproximadamente el mismo peso en la nota, y debe entregarse como un repositorio en un servidor *git* (github, bitbucket, etc.).
- El lenguaje a utilizar es libre.

# Presentaciones orales

- Habrá dos presentaciones de 25 minutos por clase, con los 20 minutos restantes para preguntas y discusión.
- Primer tema: Estado actual de la cosmología observacional
- Segundo tema: El futuro de la cosmología observacional

## Escalera de distancias:

- [A Hubble constant measurement from superluminal motion of the jet in GW170817](#)
- [Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics beyond  \$\Lambda\$ CDM](#)

## Estructura a gran escala:

- [Cluster Cosmology Constraints from the 2500 deg<sup>2</sup> SPT-SZ Survey: Inclusion of Weak Gravitational Lensing Data from Magellan and the Hubble Space Telescope](#)
- [KiDS+VIKING-450: Cosmic shear tomography with optical and infrared data](#)

## Reionización:

- [Warm dark matter and the ionization history of the Universe](#)
- [Modelling the observed luminosity function and clustering evolution of Ly  \$\alpha\$  emitters: growing evidence for late reionization](#)

## Fondo cósmico de microondas:

- [Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters](#) (1: Sec 2-5; 2: Sec 2, 6-7)
- [The Atacama Cosmology Telescope: two-season ACTPol spectra and parameters](#)

# Material y recursos

- **Observational cosmology** (Serjeant, S, 2010, Cambridge U. Press)
- Otros libros de cosmología (generalmente más teóricos):
  - **Modern Cosmology** (Dodelson, S., 2003, Academic Press - 2da edición en Junio 2020)
  - **Principles of Physical Cosmology** (Peebles, P.J.E., 1993, Princeton U Press)
  - **Cosmology** (Weinberg, S., 2008, Oxford U. Press)
- Artículos *review*:
  - *Observational probes of cosmic acceleration*. Weinberg et al., 2013, [PhysRep, 530, 87](#)
  - [Muchos artículos](#) de Annual Review of Astronomy and Astrophysics
- Recursos en línea:
  - [ADS](#) y [arXiv](#)
  - [Curso de cosmología por Matthias Bartelmann](#) (Heidelberg)
  - Para ciencias (y matemáticas), *Wikipedia*
  - Para programación y otras dudas computacionales, *stackoverflow* y sitios hermanos
  - Google!



# **Unidad I.**

Introducción:

Modelo de concordancia  $\Lambda$ CDM

# El Universo, en resumen

El modelo favorecido actualmente solo requiere dos principios fundacionales:

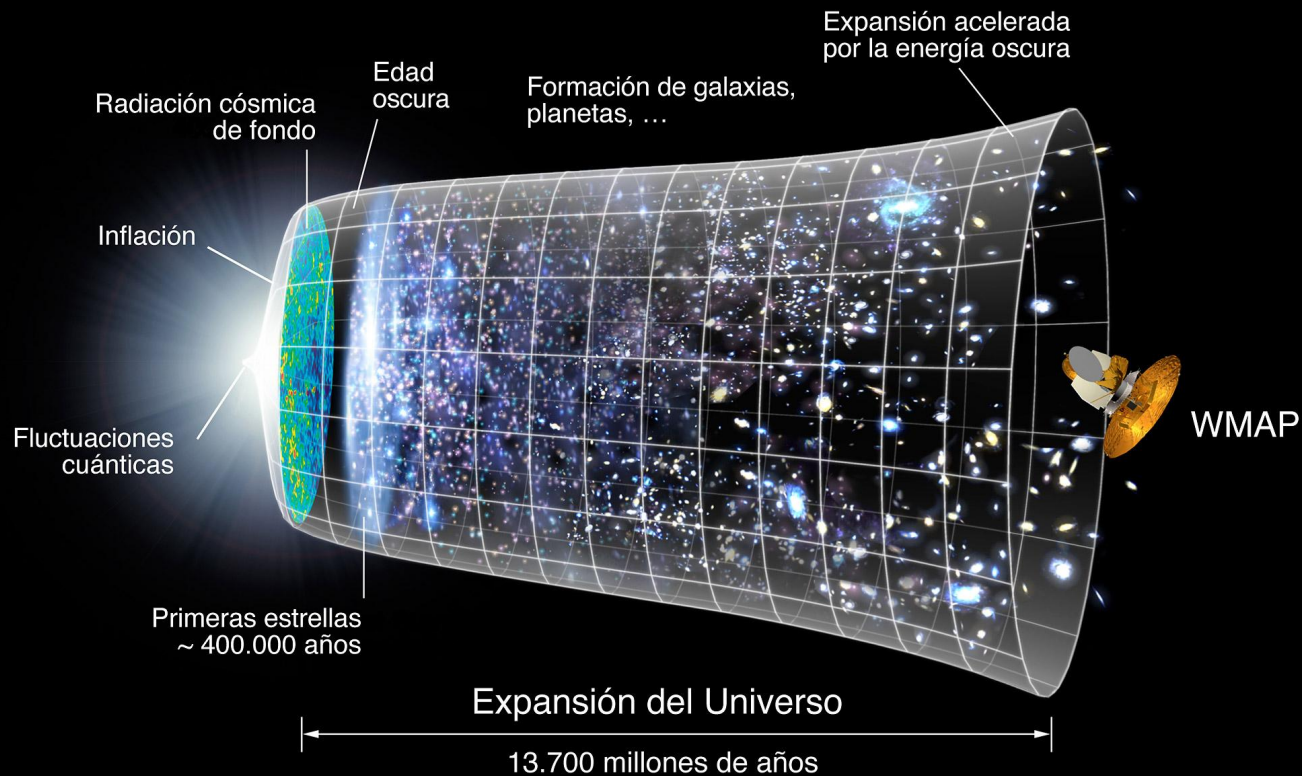
- **Relatividad General:**

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- **El Principio Cosmológico:** La suposición de que *todas las ubicaciones y direcciones son estadísticamente idénticas (a escalas suficientemente grandes)*.



$\Lambda$ CDM



NASA/WMAP Science Team

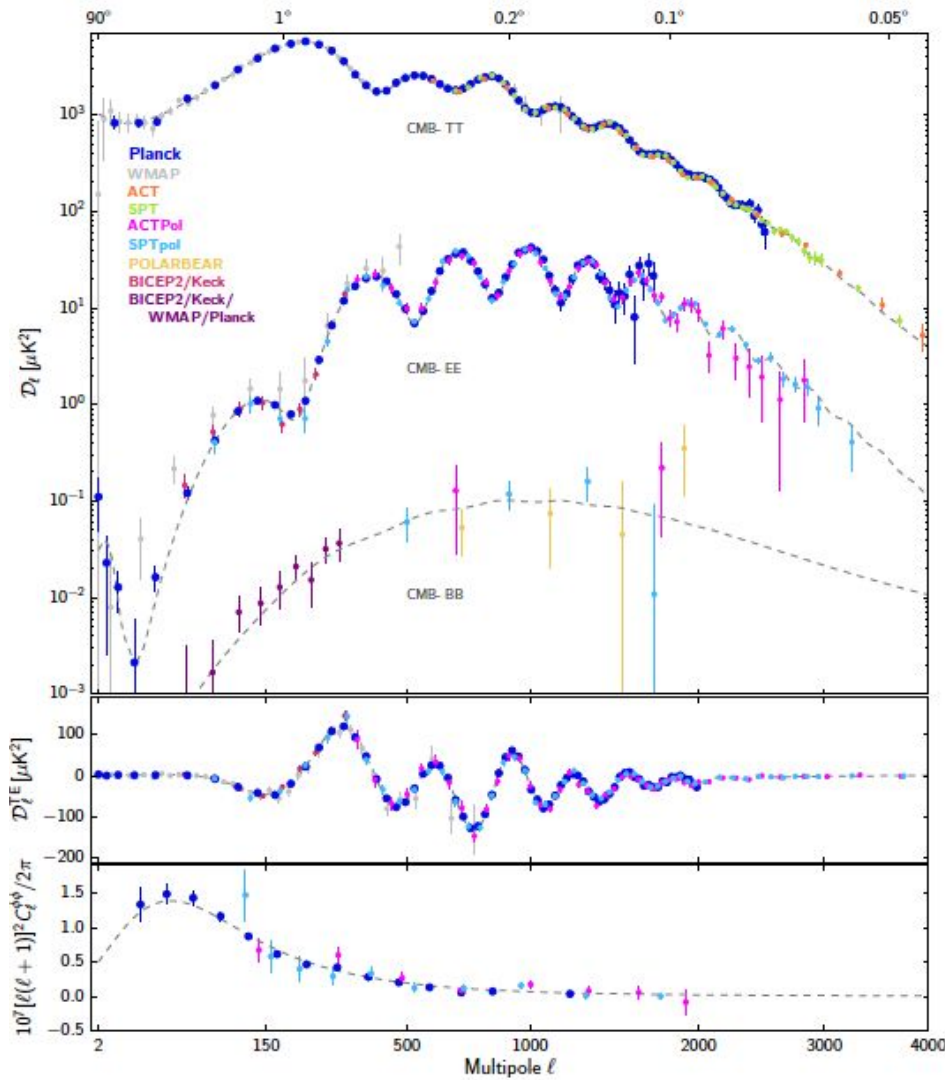
Crédito: NASA?

# Concordancia en $\Lambda$ CDM

El modelo  $\Lambda$ CDM realmente no tiene competencia en su capacidad predictiva y su acuerdo con observaciones. El nivel de concordancia es realmente espectacular.

A la derecha ven el espectro de potencias del fondo cósmico de microondas (más detalles, más adelante), usando distintos experimentos con distintas configuraciones, distintas resoluciones, distintos equipos de científicos, etc. Todo esto con seis parámetros libres.

Durante el curso desarrollaremos un gran número de técnicas y observaciones que convergen en este modelo. Encontraremos también algunos problemas en el camino.



# Métrica Friedman-Lemaître-Robertson-Walker

En relatividad especial, un intervalo en el espacio-tiempo

$$(\delta s)^2 = (c\delta t)^2 - (\delta x)^2 - (\delta y)^2 - (\delta z)^2 \quad (1.1)$$

es invariante, donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. En coordenadas esféricas e incorporando un factor de expansión espacial,

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t) \left( \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right) \quad (1.2)$$

donde la constante  $k$  determina la curvatura del espacio, con:

- $k = 0$ : Espacio plano
- $k > 0$ : Espacio esférico (cerrado)
- $k < 0$ : Espacio hiperbólico (abierto)

y  $a(t)$ , también a veces  $R(t)$ , corresponde al **factor de escala** y determina el tamaño del espacio en cuestión, con  $a(t)=1=a(t_0)$  correspondiente al presente y  $a(t) = 0$  correspondiente a  $t=0$ .

# Métrica Friedman-Lemaître-Robertson-Walker

En relatividad especial, un intervalo en el espacio-tiempo

$$(\delta s)^2 = (c\delta t)^2 - (\delta x)^2 - (\delta y)^2 - (\delta z)^2 \quad (1.1)$$

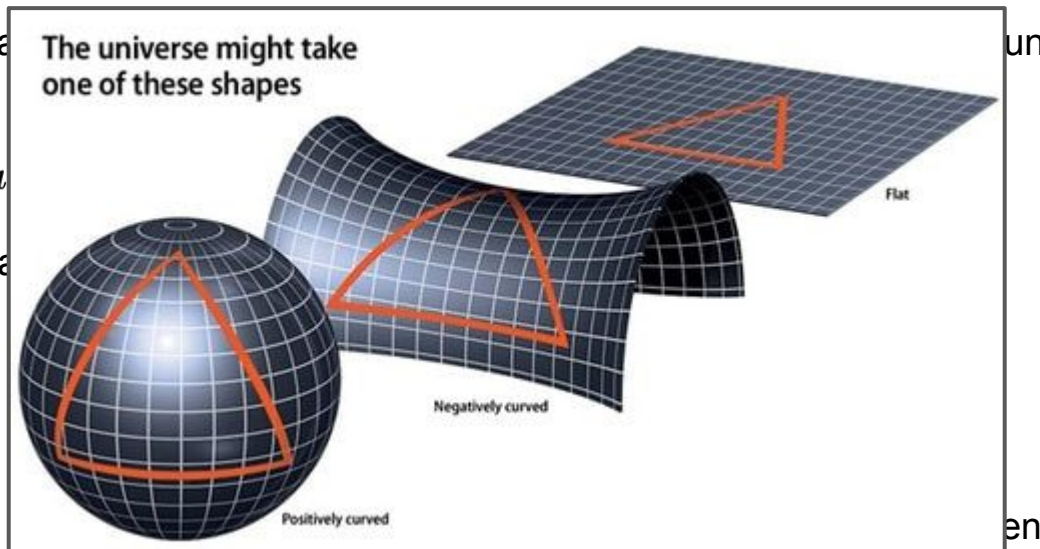
es invariante, donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $a(t)$  es el factor de expansión espacial,

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 [dx^2 + dy^2 + dz^2]$$

donde la constante  $k$  determina la curvatura

- $k = 0$ : Espacio plano
- $k > 0$ : Espacio esférico (cerrado)
- $k < 0$ : Espacio hiperbólico (abierto)

y  $a(t)$ , también a veces  $R(t)$ , corresponde a la longitud de escala. En esta cuestión, con  $a(t)=1=a(t_0)$  correspondiente al presente y  $a(t) = 0$  correspondiente a  $t=0$ .



# Métrica Friedman-Lemaître-Robertson-Walker

En relatividad especial, un intervalo en el espacio-tiempo

$$(\delta s)^2 = (c\delta t)^2 - (\delta x)^2 - (\delta y)^2 - (\delta z)^2 \quad (1.1)$$

es invariante, donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. En coordenadas esféricas e incorporando un factor de expansión espacial,

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t) \left( \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right) \quad (1.2)$$

donde la constante  $k$  determina la curvatura del espacio, con:

- $k = 0$ : Espacio plano
- $k > 0$ : Espacio esférico (cerrado)
- $k < 0$ : Espacio hiperbólico (abierto)

No depende de  $\theta$  ni  $\phi \rightarrow$  requiere un espacio homogéneo e isotrópico: **Principio Cosmológico**

y  $a(t)$ , también a veces  $R(t)$ , corresponde al **factor de escala** y determina el tamaño del espacio en cuestión, con  $a(t)=1=a(t_0)$  correspondiente al presente y  $a(t) = 0$  correspondiente a  $t=0$ .

# Corrimiento al rojo y dilación del tiempo

Imaginen un fotón emitido en el momento  $t_1$ , cuando el factor de escala era  $a$ , y otro fotón emitido en el momento  $t_1 + \delta t$ . Su distancia al momento de emisión era  $c\delta t$ . Estos fotones llegan a la Tierra en el momento  $t_0$  cuando  $a_0=1$ . Ahora, su distancia es  $(1/a)c\delta t$ ; es decir, su distancia se estiró por un factor  $1/a$ , debido a la expansión del Universo.

Lo mismo ocurre con la longitud de onda del fotón, de manera que

$$\frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{emitido}}} = \frac{1}{a} \equiv 1 + z \quad (1.3)$$

La cantidad  $z$  es el corrimiento al rojo o **redshift cosmológico**, y es igual a cero en el presente e infinito en el Big Bang.

Esta cantidad no debe confundirse con el corrimiento al rojo por efecto Doppler debido al movimiento de objetos *dentro* del Universo; este último se conoce como **velocidad peculiar**, y es una fuente de confusión al momento de determinar el redshift cosmológico, ya que no se puede corregir sino estadísticamente.



# Componentes cosmológicos

Supongamos que la distancia entre nosotros y una galaxia distante es  $\ell = a \cdot D$ , con  $D$  una constante. Entonces,  $\ell$  cambia a una tasa

$$\frac{d\ell}{dt} = D \frac{da}{dt} = \frac{\ell}{a} \frac{da}{dt} = \ell \left( \frac{\dot{a}}{a} \right) \equiv \ell \times H \quad (1.4)$$

donde definimos el **parámetro de Hubble**,  $H \equiv (\dot{a}/a)$ , y la **constante de Hubble**,  $H_0 \equiv H(t_0)$ , como el valor del parámetro de Hubble en el presente. Se puede mostrar, a partir de la métrica FLRW, que

$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G(\rho_m + \rho_r)}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{kc^2}{a^2} \quad (1.5)$$

A partir de (1.5) se definen las contribuciones al contenido energético del Universo:

$$\begin{aligned} \Omega_m &= \frac{8\pi G \rho_m}{3H^2} = \frac{\rho_m}{\rho_{\text{crit}}} & \Omega_\Lambda &= \frac{\Lambda c^2}{3H^2} \\ \Omega_r &= \frac{8\pi G \rho_r}{3H^2} = \frac{\rho_r}{\rho_{\text{crit}}} & \Omega_k &= \frac{-kc^2}{3H^2} \end{aligned} \quad \text{con} \quad \rho_{\text{crit}} \equiv \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (1.6)$$

# Componentes cosmológicos

Con estas definiciones tenemos

$$\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1 \quad (1.7)$$

Notar que

$$\rho_m(t) \propto a(t)^{-3}$$

$$\rho_r(t) \propto a(t)^{-4}$$

$$\Lambda(t) = \text{constante}$$

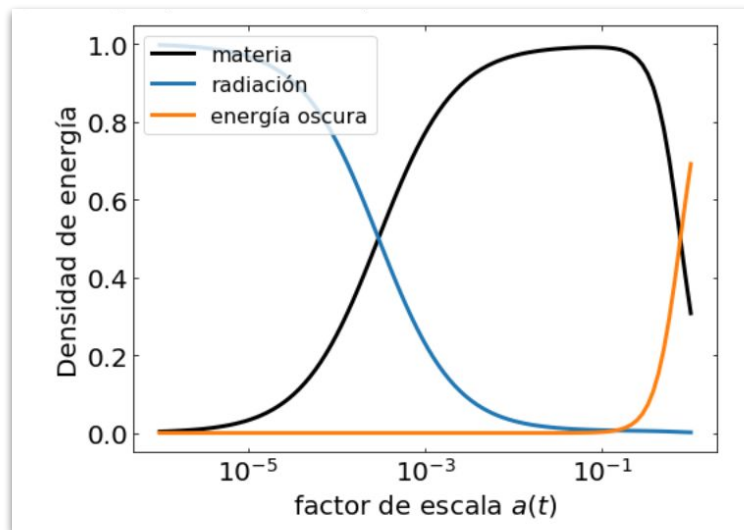
```
[1]: %matplotlib inline

from astropy.cosmology import Planck15
from matplotlib import pyplot as plt, rcParams
import numpy as np

a = np.logspace(-6, 0, 100)
z = 1/a - 1
z_a = lambda x: 1/x - 1
a_z = lambda x: 1 / (1+x)

Omega_m = Planck15.Om(z)
Omega_r = Planck15.Ogamma(z) + Planck15.Onu(z)
Omega_Lambda = Planck15.Ode(z)

rcParams['font.size'] = 20
rcParams['lines.linewidth'] = 3
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8,6))
plt.plot(a, Omega_m, 'k-', label='materia')
plt.plot(a, Omega_r, 'C0-', label='radiación')
plt.plot(a, Omega_Lambda, 'C1-', label='energía oscura')
ax.legend(loc='upper left', fontsize=16)
ax.set_xscale('log')
ax.set_xlabel('factor de escala $a(t)$')
ax.set_ylabel('Densidad de energía')
```



# En un poco más de detalle,

$$\Omega_r = \Omega_\gamma + \Omega_\nu \longrightarrow \text{fotones + neutrinos}$$

$$\Omega_m = \Omega_{\text{dm}} + \Omega_b \longrightarrow \text{materia oscura + bariones}$$

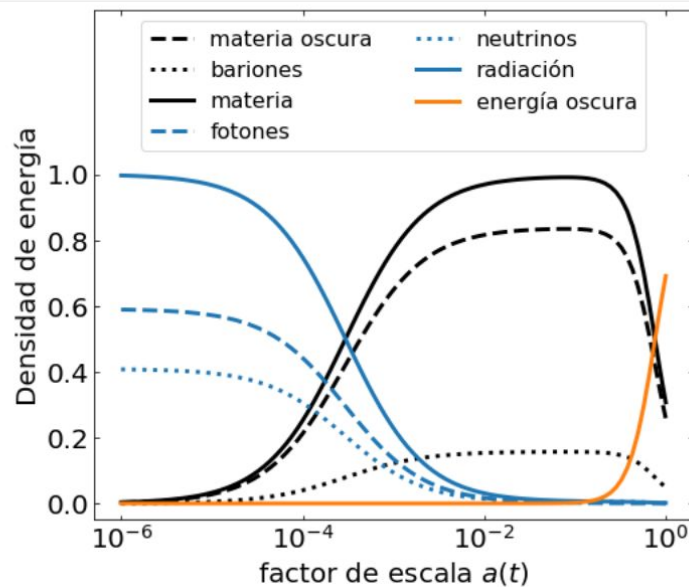
```
[1]: %matplotlib inline

from astropy.cosmology import Planck15
from matplotlib import pyplot as plt, rcParams
import numpy as np

a = np.logspace(-6, 0, 100)
z = 1/a - 1
z_a = lambda x: 1/x - 1
a_z = lambda x: 1 / (1+x)

Omega_dm = Planck15.Odm(z)
Omega_b = Planck15.Ob(z)
Omega_gamma = Planck15.Ogamma(z)
Omega_nu = Planck15.Onu(z)
Omega_Lambda = Planck15.Ode(z)

rcParams['font.size'] = 20
rcParams['lines.linewidth'] = 3
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8,7))
plt.plot(a, Omega_dm, 'k--', label='materia oscura')
plt.plot(a, Omega_b, 'k:', label='bariones')
plt.plot(a, Omega_dm+Omega_b, 'k-', label='materia')
plt.plot(a, Omega_gamma, 'C0--', label='fotones')
plt.plot(a, Omega_nu, 'C0:', label='neutrinos')
plt.plot(a, Omega_gamma+Omega_nu, 'C0-', label='radiación')
plt.plot(a, Omega_Lambda, 'C1-', label='energía oscura')
ax.legend(loc='upper center', fontsize=16, ncol=2)
ax.set_xscale('log')
ax.set_xlabel('factor de escala $a(t)$')
ax.set_ylabel('Densidad de energía')
ax.set_xticks(np.logspace(-6, 0, 4))
ax.set_ylim(-0.05, 1.5)
ax.set_yticks(np.arange(0, 1.01, 0.2));
```



# Parámetros cosmológicos

La densidad ‘crítica’ es aquella que, en un Universo dominado por materia (como se creía pre-1998), resulta en un espacio plano:

$$\Omega_k = 1 - \Omega_m = 1 - \frac{\rho_{\text{crit}}}{\rho_{\text{crit}}} = 0$$

Valores canónicos actuales para estos parámetros son:

$$\Omega_{\Lambda,0} \sim 0.7 \quad \Omega_{m,0} \sim 0.3 \quad \Omega_{k,0} \approx 0 \quad \Omega_{r,0} \approx 0$$

$$H_0 \equiv 100h \sim 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

(Nota: ignoraremos  $\Omega_r$  la mayor parte del tiempo en ecuaciones, pero no necesariamente  $\Omega_k$ .) Hay otros parámetros que iremos encontrando más adelante y que completan el modelo  $\Lambda$ CDM:

$\sigma_8$  La amplitud de fluctuaciones en una escala de  $8h^{-1} \text{ Mpc}$ .

$\tau_{\text{reion}}$  La profundidad óptica ( $\sim$ distancia $\sim$ redshift) de reionización

$n_s$  La pendiente del espectro de potencias primordial de materia

# Distancias cosmológicas

En un espacio-tiempo curvo, existen varias maneras de medir distancias:

- La **distancia comóvil** es aquélla medida en un marco de referencia que se expande junto con el Universo. Corresponde por lo tanto a la distancia en la métrica FLRW  $ds$  tal que  $dt=d\theta=d\phi=0$ :

$$ds^2 = -\frac{a^2(t_0)dr^2}{1-kr^2} \rightarrow ds = \frac{a_0 dr}{\sqrt{1-kr^2}} \Rightarrow D_C = a_0 \int_0^r \frac{dx}{\sqrt{1-kx^2}}$$

se puede mostrar (e.g., Serjeant10) que esto se puede reescribir:

$$D_C = c \int_0^z \frac{d\zeta}{H(\zeta)}$$

donde la integral es sobre redshift, con

$$H(z) = H_0 E(z) \equiv \sqrt{(1+z)^3 \Omega_m + (1+z)^2 \Omega_k + \Omega_\Lambda}$$

el parámetro de Hubble como función del redshift (ignorando el término de radiación).

# Distancias cosmológicas

- La **distancia angular** (“angular diameter distance”) es aquella que se obtiene tomando en cuenta los tamaños conocido ( $D$ ) y aparente ( $\theta$ ) de una fuente:

$$D_A = \frac{D}{\theta}$$

y tiene la particularidad de que no es una función monótona del redshift.

- La **distancia de luminosidad** es aquella derivada usando el flujo de una fuente y su luminosidad:

$$D_L = \left( \frac{L}{4\pi F} \right)^{1/2}$$

- Finalmente, la **distancia de movimiento propio** corresponde a la razón entre la velocidad transversal (conocida),  $u$ , y la velocidad angular (medida),  $d\theta/dt$ :

$$D_M = \frac{u}{d\theta/dt}$$

En un espacio plano,  $D_M = D_C$ .

# Distancias cosmológicas

Se puede mostrar que estas distancias cumplen la siguiente relación:

$$D_L = (1 + z)D_M = (1 + z)^2 D_A$$

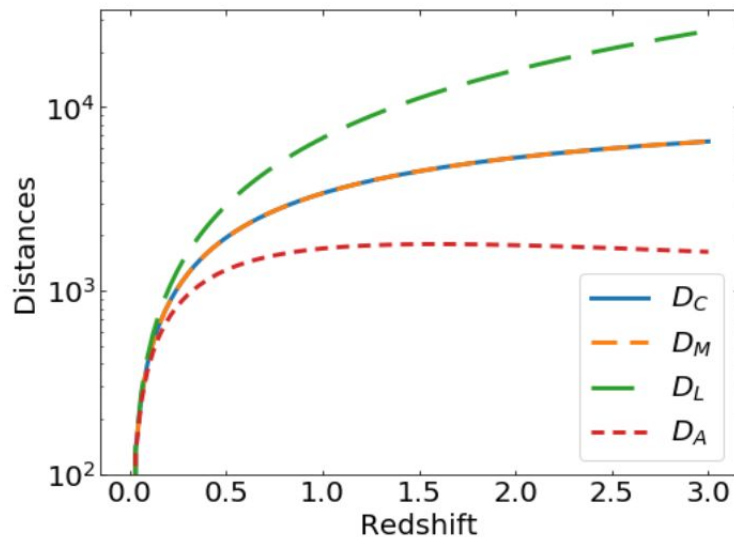
```
[1]: %matplotlib inline

from astropy.cosmology import Planck15
from matplotlib import pyplot as plt, rcParams
import numpy as np

z = np.linspace(0, 3, 100)

Dc = Planck15.comoving_distance(z)
Dl = Planck15.luminosity_distance(z)
Dm = Planck15.comoving_transverse_distance(z)
Da = Planck15.angular_diameter_distance(z)

rcParams['font.size'] = 20
rcParams['lines.linewidth'] = 3
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8,6))
ax.set_yscale('log')
ax.plot(z, Dc, label='$D_C$')
ax.plot(z, Dm, label='$D_M$', dashes=(6,3))
ax.plot(z, Dl, label='$D_L$', dashes=(10,5))
ax.plot(z, Da, label='$D_A$', dashes=(3,2))
ax.legend()
ax.set_xlabel('Redshift')
ax.set_ylabel('Distances');
```



# La edad del Universo

Como primera aproximación, se define el **tiempo de Hubble**:

Ley de Hubble-Lemaître:  $v = H_0 d$   
(ver Unidad II)

$$t_H \sim d_H / v_H \sim d_H / (H_0 d_H)$$

$$t_H \equiv 1/H_0$$

En detalle, la edad del Universo depende de su composición. A partir de las ecuaciones de Friedmann:

$$\begin{aligned} t_0 &= \int_0^t dt' \\ &= \int_0^{a_0} \frac{da}{\dot{a}} \\ &= \int_0^{a_0} \frac{da}{a(\dot{a}/a)} \\ &= \int_0^{a_0} \frac{da}{aH(a)} \\ &= \frac{1}{H_0} \int_0^{a_0} \frac{da}{aE(a)} \end{aligned}$$

con

$$E(a) = \sqrt{\Omega_r a^{-4} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda}$$

Por ejemplo, para un Universo vacío:

$$E(a) = (\Omega_k a^{-2})^{1/2} = a^{-1}$$

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \int_0^{a_0} \frac{da}{a/a} = \frac{a_0}{H_0} = \frac{1}{H_0}$$

La tasa de expansión es constante.



# La edad del Universo

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \int_0^{a_0} \frac{da}{aE(a)} \quad \text{con} \quad E(a) = \sqrt{\Omega_r a^{-4} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda}$$

Para un espacio plano:

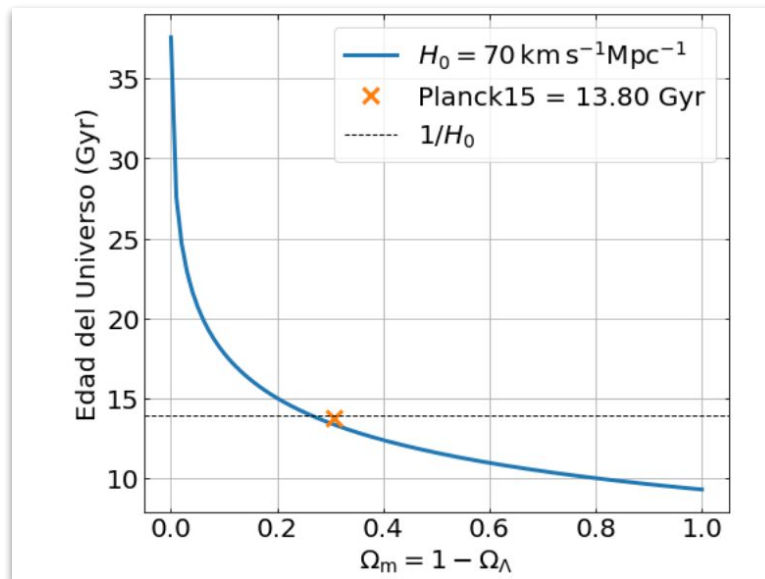
```
[1]: %matplotlib inline

from astropy.cosmology import FlatLambdaCDM, Planck15
from astropy import units as u
from matplotlib import pyplot as plt, rcParams
import numpy as np

Om_rng = np.linspace(0, 1, 100)
H0 = 70 * u.km / u.s / u.Mpc
tH = (1 / H0).to(u.Gyr).value
age = np.zeros(Om_rng.size)
P15_age = Planck15.age(0).value

for i, Om in enumerate(Om_rng):
    cosmo = FlatLambdaCDM(H0, Om=Om, Tcmb0=2.725*u.K)
    age[i] = cosmo.age(0).value # in Gyr

rcParams['font.size'] = 20
rcParams['lines.linewidth'] = 3
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8,7))
ax.plot(Om_rng, age, label='$H_0=70$, $\mathbf{km\,s^{-1}Mpc^{-1}}$')
ax.plot(Planck15.Om0, P15_age, 'C1x', ms=12, mew=3,
        label='Planck15 = {0:.2f} Gyr'.format(P15_age))
ax.axhline(tH, ls='--', color='k', lw=1, label='$1/H_0$')
ax.set_xlabel(r'$\Omega_m = 1 - \Omega_\Lambda$')
ax.set_ylabel('Edad del Universo (Gyr)')
ax.grid(True)
ax.legend();
```



# Referencias

- Astropy Collaboration, 2016, *The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package*. [AJ, 156, 123](#)
- Hogg, D, 1999, *Distance Measures in Cosmology*. [astro-ph/9905116](#)
- Menanteau, F, et al., 2012, *The Atacama Cosmology Telescope: ACT-CL J0102-4915 "El Gordo," a Massive Merging Cluster at Redshift 0.87*. [ApJ, 748, 7](#)
- Planck Collaboration, 2016, *Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters*. [A&A, 594, A13](#)