

# Astrofísica y Cosmología

Ute Lisenfeld

Despacho 11, edificio Mecenas, planta baja

[ute@ugr.es](mailto:ute@ugr.es)

Tel. 958 242745

Tutorías: preferiblemente con cita entre 9-14h

# Información sobre asignatura

## **Temario:**

1. Cosmología
2. Observaciones de estructura a gran escala; cúmulos y grupos de galaxias
3. Núcleo activos de galaxias (AGN= Active Galactic Nuclei)
4. Propiedades de galaxias a alto redshift
5. Evolución de galaxias

# Información sobre asignatura

- **Bibliografía** (todos están en la biblioteca, y para algunos se puede descargar el pdf a través de la biblioteca)

Directamente relacionado con la asignatura:

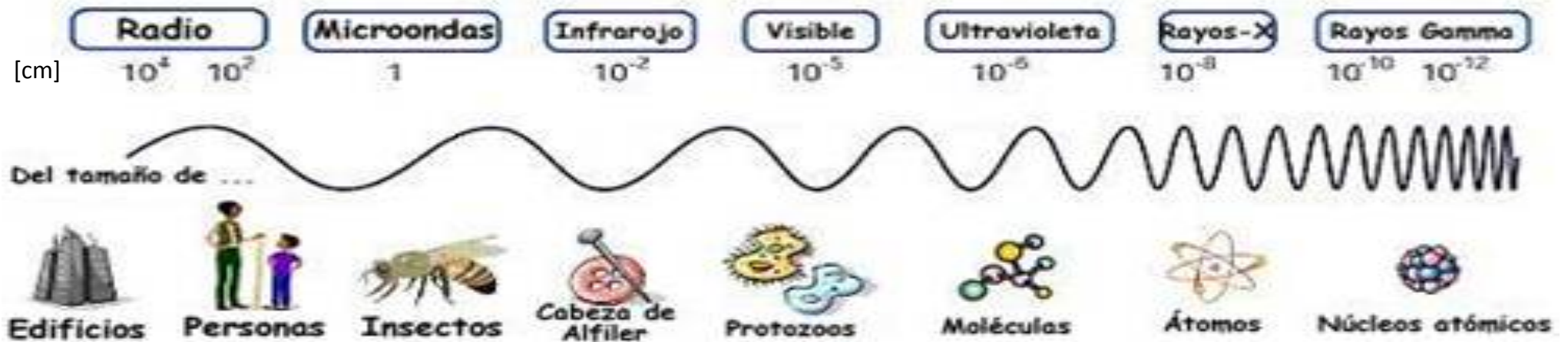
- **Peter Schneider: Extragalactic Astronomy and Cosmology – An introduction**  
Es el libro que más se sigue en esta asignatura (es sol12los disponible en pdf)
- L. Sparke, J. Gallagher: Galaxies in the Universe: An introduction
- Jones, Lambourne: An introduction to galaxies and cosmology

Libros introductorios para rellenar lagunas de conocimientos básicos:

- Eduardo Battaner: Introducción a la Astrofísica
  - H. Karttunen: Fundamental Astronomy (disponible en formato electrónico)
- Transparencias y problemas/preguntas están disponibles en:  
[www.ugr.es/~ute/astrofisica-y-cosmologia.html](http://www.ugr.es/~ute/astrofisica-y-cosmologia.html)

# Repaso: Radiación electromagnética y su medición

Espectro electromagnético entero



Gas y partículas frías

Hidrógeno atómico

Polvo interestelar

Moléculas

Gas muy caliente

Procesos relativistas:

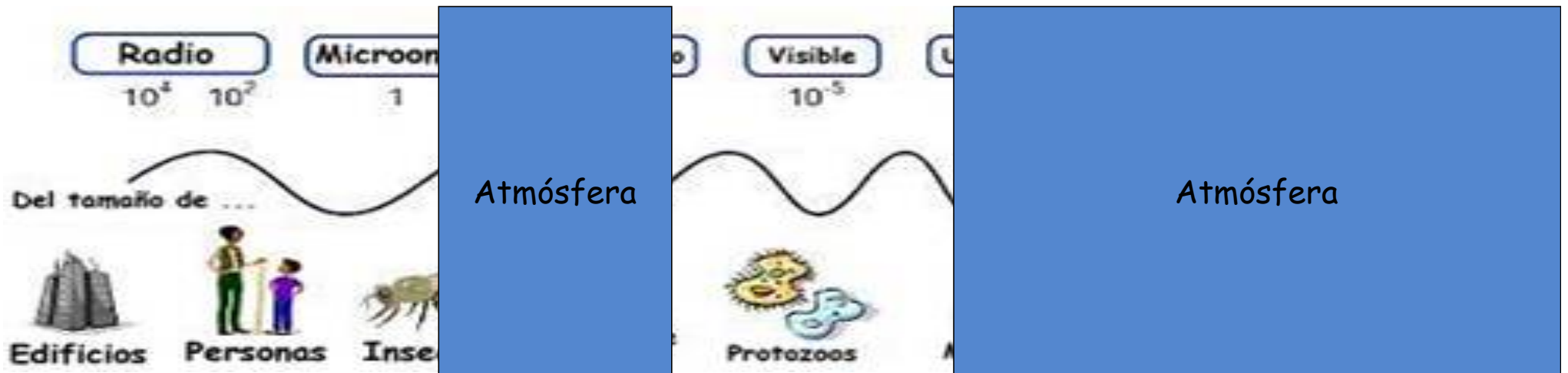
-estrellas de neutrones

-agujeros negros

.....

Estrellas  
Gas caliente

## Repaso: Espectro electromagnético entero



Gas y partículas frías

Hidrógeno atómico

Polvo interestelar

Moléculas

Estrellas  
Gas caliente

Gas muy caliente

Procesos relativistas:

-estrellas de neutrones

-agujeros negros

## Luminosidad y flujo (o brillo aparente)

La información que disponemos de los astros más allá del sistema solar, proviene de la observación del espectro electromagnético.

- **Luminosidad (L)** - [erg s<sup>-1</sup>] o [W], cantidad de energía que emite un objeto por unidad de tiempo. Es intrínseca al objeto.

$$L = \int L_{\lambda} d\lambda$$

Otra unidad:  $L_{\odot}$  = Luminosidad solar =  $3.839 \times 10^{33}$  erg s<sup>-1</sup> =  $3.839 \times 10^{26}$  W  
(bolométrica)

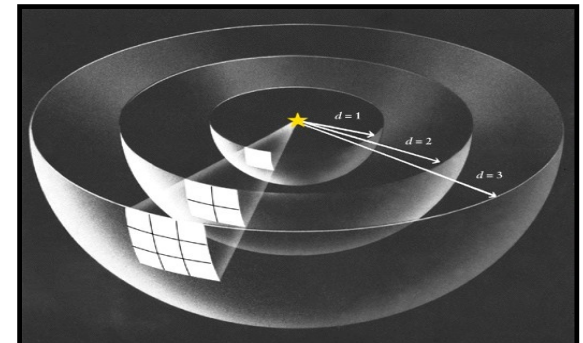
- **Flujo (total) o brillo aparente (F)** - [erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>] o [W m<sup>-2</sup>], Energía total recibida por unidad de tiempo y unidad de área en el telescopio del observador.

Es aparente; depende de la distancia a la que está el objeto.  $F = \int F_{\lambda} d\lambda = \int F_{\nu} d\nu$

$F_{\nu}$ [erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>] es flujo específico (o flujo)

Si una estrella u objeto emite de forma isótropa, la radiación a una distancia  $d$  de la fuente estará distribuida en una superficie esférica de área  $4\pi d^2$  y en ese caso

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$



## Sistema de magnitudes

- Magnitud aparente ( $m$ ) de un objeto con flujo  $F$

$$m = -2.5 \log \left( \frac{F}{F_0} \right)$$

donde  $F_0$  es un flujo de referencia, que establece el origen de magnitudes.

- Magnitud absoluta ( $M$ ) de un objeto es la magnitud aparente que éste tendría si se encontrase a una distancia de 10 pc de nosotros.

$$M = -2.5 \log \left( \frac{F(d = 10\text{pc})}{F_0} \right) = m - 5 \log \left( \frac{d}{10\text{pc}} \right) \quad \text{con } d \text{ en parsec}$$

### Es útil recordar:

- Un valor más grande de la magnitud significa menos flujo o luminosidad
- Una diferencia en 2.5 entre magnitudes significa un factor 10 en flujo o luminosidad

# Brillo superficial



Leo I: galaxia enana de bajo brillo superficial



Galaxia M101 de alto brillo superficial

Brillo superficial:

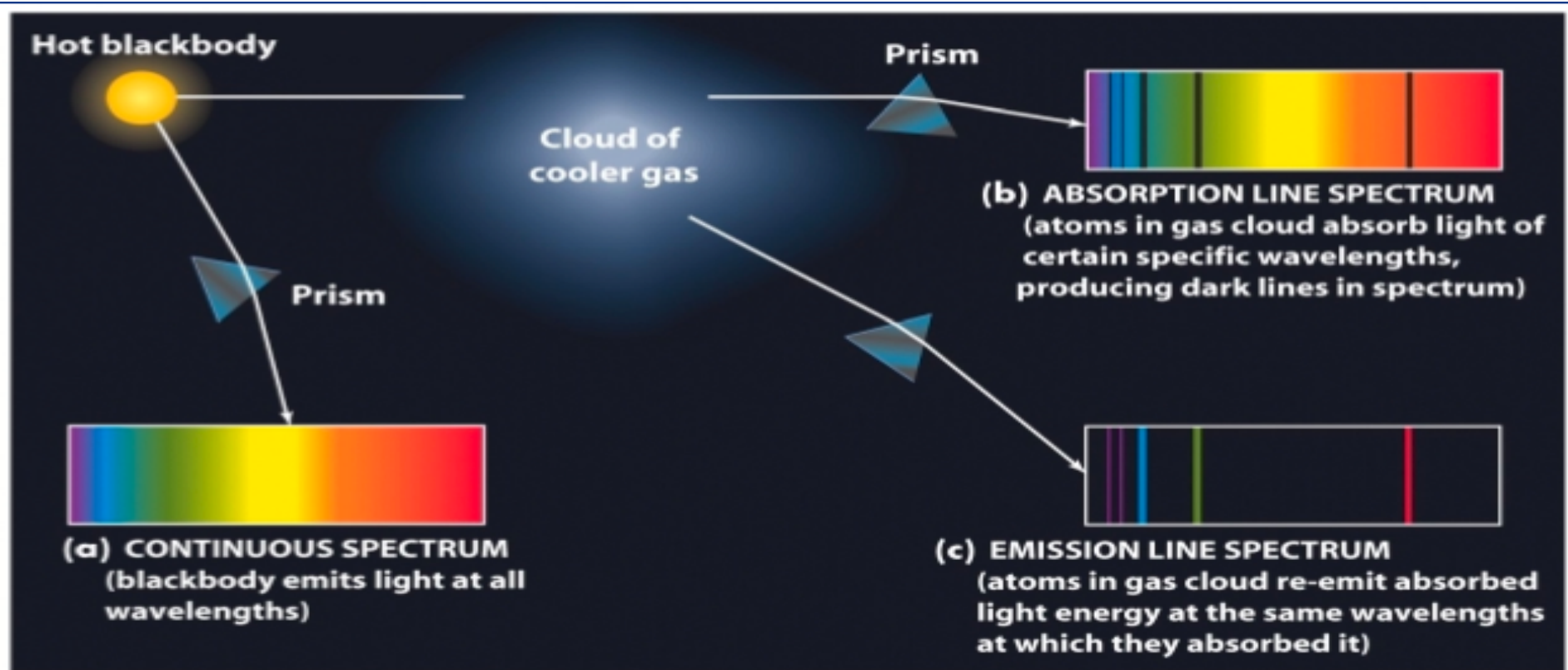
- definido como: flujo recibido por superficie (en segundos de  $\text{arcsec}^2$  o  $\text{sterad}$ )
- no depende de la distancia (mientras objeto sigue extendido)



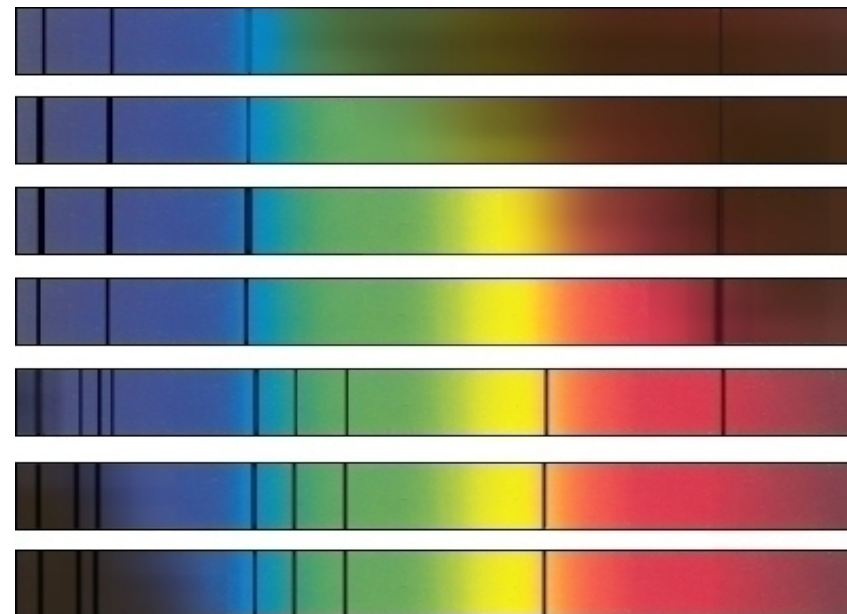
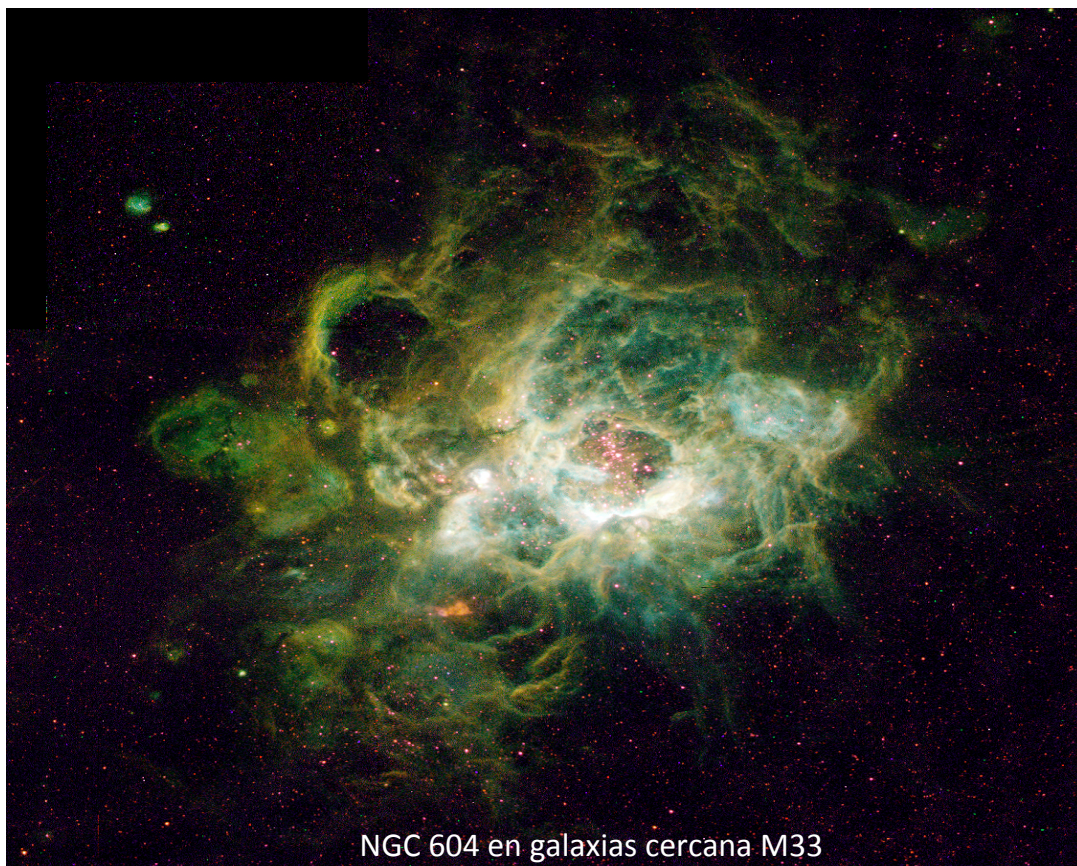
## Repaso: Mecanismos de radiación

- Líneas espectrales de átomos y moléculas
- Emisión continua:
  - Cuerpo negro
  - Otros:
    - Radiación sincrotrón
    - Emisión radio térmica

## Líneas de emisión, de absorción y emisión continua



# Ejemplos



Clasificación de estrellas: **Líneas de absorción** (en las atmósferas estelares)

Regiones de gas ionizado alrededor de estrella masivas (regiones HII) → **Líneas de emisión**

## Información que nos dan las líneas

- Frecuencia/patrón de líneas: **Qué átomos/moléculas hay y cuántos.**
- Frecuencia observada de una línea conocida: con el efecto Doppler → **velocidad de la fuente:**
  - Determinar distancia a través del corrimiento al rojo
  - Movimiento del gas:
    - Curvas de rotación de galaxias
    - Determinación de discos en rotación
  - Movimiento de estrellas, p.e. estrellas binarias espectroscópicas
- **Forma de la línea:**
  - Desanchamiento: Debido al efecto Doppler (temperatura, movimiento propio, presión)
  - Asimetrías (sobre todo en HI)

# Emisión de cuerpo negro

Cuerpo negro: Cuerpo que absorbe toda la radiación que entra. Es un absorbente “perfecto” (y también es un emisor perfecto).

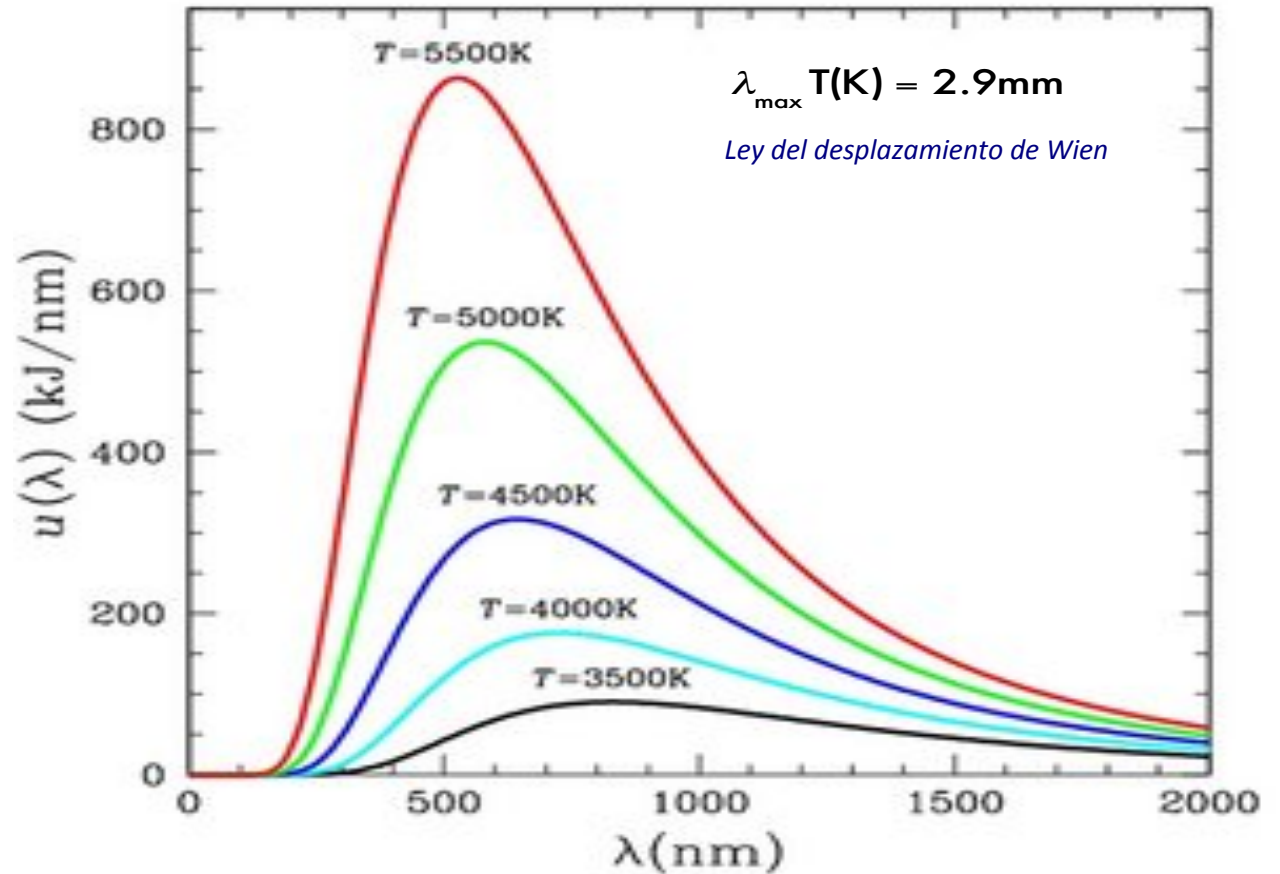
Los fotones que emite están en equilibrio termodinámico (la emisión se llama también “emisión térmica”)

El espectro depende solamente de la temperatura.

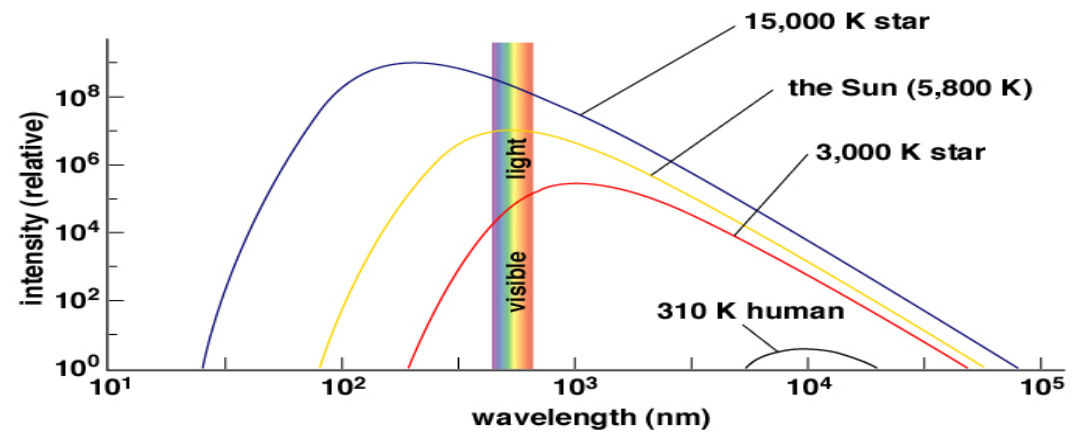
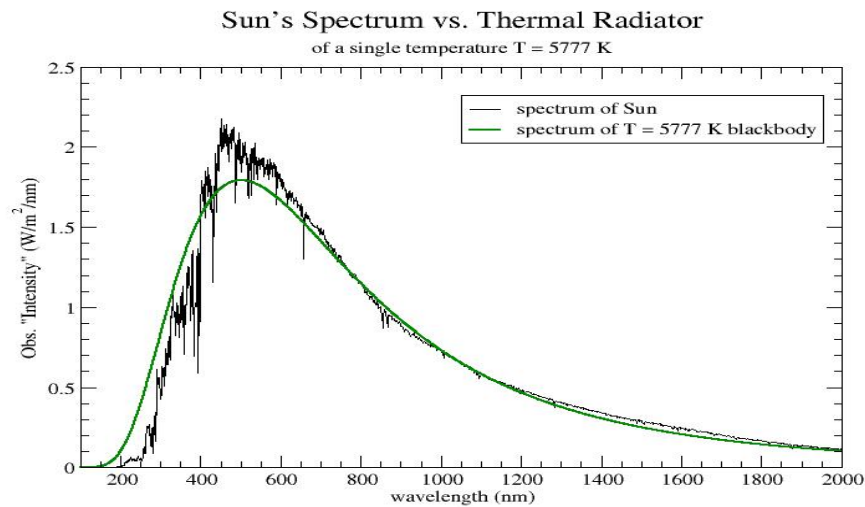
Ley de **Stephan-Boltzmann**:  $F(T) = \sigma T^4$   
donde  $\sigma$  es la constante de Stephan-Boltzmann

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

[erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ster<sup>-1</sup> Hz<sup>-1</sup>]



# Las estrellas como cuerpo negro



Copyright © Addison Wesley

Los espectros de las estrellas se aproximan muy bien con la de un cuerpo negro.  
Tienes líneas de absorción (porque la temperatura va disminuyendo hacia fuera)

Espectro de las estrellas:  
Cuanto más masivas

- más calientes
- Espectro más azul
- Luminosidad más alta

# Tema 1: Cosmología

- Descripción de un universo en expansión
  - Observaciones fundamentales y su interpretación
  - Cosmología Newtoniana: Cinemática y dinámica
  - Modificaciones debido a la relatividad General
  - Componentes del Universo
  - Discusión de la ecuación de expansión
  - Redshift y distancias
- Historia del universo

**Material adicional** útil sobre la descripción del universo en expansión:

*Introducing the expanding universe* by Markus Poesel:

video online at <https://www.youtube.com/watch?v=gA-0C-88WbE>

and resumen escrito de la clase (unos 100 páginas) available at <https://arxiv.org/abs/1712.10315>

# (Algunas) observaciones cosmológicas fundamentales

## Comentarios generales:

- Entender el universo es difícil porque
  - Los objetos son distantes y por eso débiles -> se necesitan telescopios grandes
  - El universo es complejo -> se necesitan ordenadores grandes para hacer simulaciones
- Debido a la velocidad finita de la luz
  - Podemos ver el el universo joven si observamos objetos lejanos
  - No podemos ver cualquier punto en el espacio-tiempo, sino solamente nuestro cono de luz hacia atrás (“backward light cone”):  $|r| = c(t_0 - t)$



# (Algunas) observaciones cosmológicas fundamentales

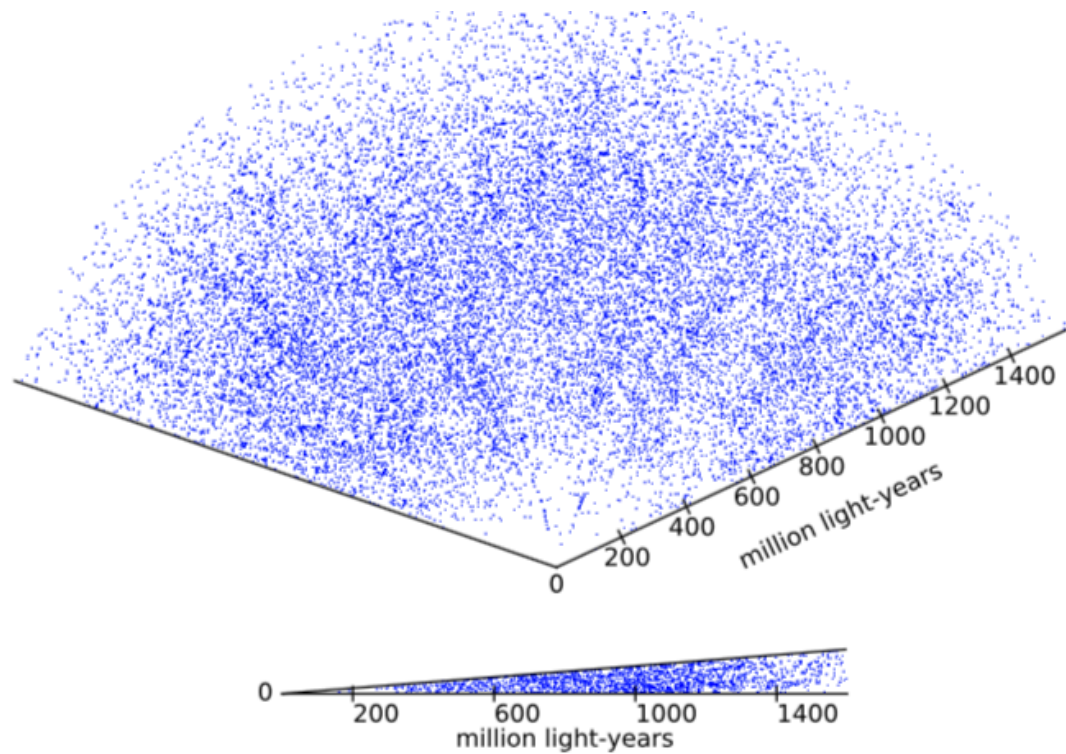
## Comentarios generales:

- Entender el universo es difícil porque
  - Los objetos son distantes y por eso débiles -> se necesitan telescopios grandes
  - El universo es complejo -> se necesitan ordenadores grandes para hacer simulaciones
- Debido a la velocidad finita de la luz
  - Podemos ver el el universo joven si observamos objetos lejanos
  - No podemos ver cualquier punto en el espacio-tiempo, sino solamente nuestro cono de luz hacia atrás (“backward light cone”):  $|r| = c(t_0 - t)$

## Observaciones fundamentales que tiene que explicar cualquier modelo del universo:

1. El cielo es oscuro (paradojo de Olbers)
2. La distribución de galaxias débiles es, a gran escala, uniforme en el cielo.
3. Los espectros de (casi) todas las galaxias muestran un corrimiento al rojo, indicando un movimiento alejándose de nosotros. La velocidad es proporcional a la distancia (ley de Hubble).
4. La fracción de He en la masa del gas es 25-30%
5. Las estrellas más viejas tienen edades de  $\sim 12$  Gyr
6. Fondo de microondas isotropo, con espectro como un cuerpo negro con  $T = 2.728 \pm 0.004$  K y con fluctuaciones espaciales en T muy pequeñas ( $\Delta T/T \sim 2 \times 10^{-5}$ )

# Distribución de galaxias



Es la distribución homogéneo?

- Hay estructura, pero la distribución a gran escala es bastante homogéneo.
- Si se harían estas observaciones hacia otra dirección en el cielo, el resultado sería indistinguible.

Hay menos galaxias:

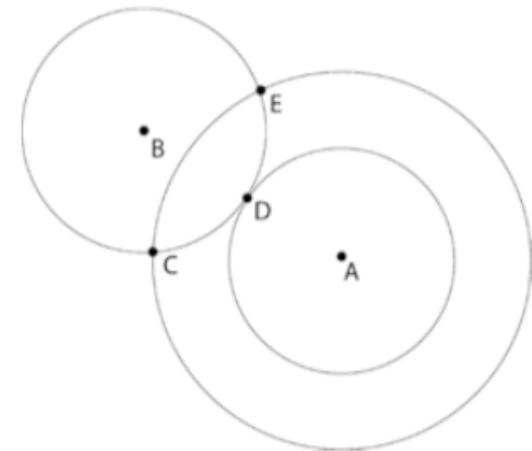
- Cerca porque el volumen es más pequeño.
- Lejos, porque el muestreo ya no es completo (no se van galaxias débiles).

25231 galaxias de los catálogos NED (para distancias) y 2MASX (Poessel, 2017)

# Conclusiones de las observaciones

Suponemos un universo isótropo y homogéneo, con una geometría Euclidiana y estático. ¿Puede ser? No!

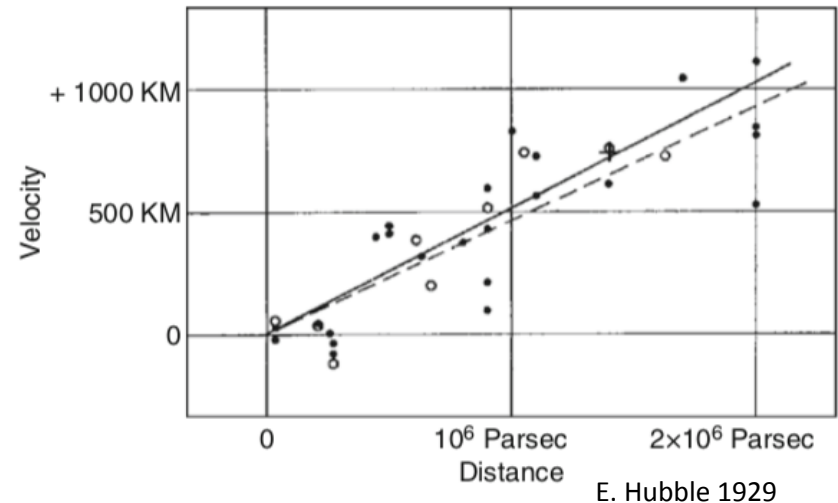
- (1) (paradojo de Olbers): El cielo sería casi tan brillante como la del sol (porque el brillo superficial no disminuye con la distancia) -> por lo menos uno de las hipótesis tiene que estar mal.
- (3) Ley de Hubble -> el universo no es estático
- (5) La edad de los cúmulos globulares -> el Universo tiene que tener una edad de al menos 12 Gyr (eso excluye algunos modelos)
- (2+6) El universo es isótropo. Si suponemos que el universo es isótropo desde cualquier punto en el universo, podemos concluir que es homogéneo.
  - Esa hipótesis se llama el principio cosmológico (isotropía y homogeneidad del universo)
  - No se puede demostrar observacionalmente porque objetos lejanos son al mismo tiempo más joven.
  - Los modelos homogéneos y isótropos son las soluciones más simples de las ecuaciones de la Relatividad General. Son compatibles con las observaciones (lo veremos a lo largo de este capítulo)



# Cinemática del universo

## La ley de Hubble-Lemaitre

- Los espectros de galaxias (menos los más cercanas) están movido al rojo.
- Se puede interpretar como efecto Doppler debido a una velocidad de alejamiento.
- Edwin Hubble publicó en 1929 un artículo basado en datos tomados en en el telescopio de Mount Wilson (el telescopio más grande en su momento) en el que relacionó la velocidad a distancias determinadas con la relación período luminosidad de estrellas variables.
- El valor de la constante de Hubble que encontró fue erróneo en casi un factor 10.



Ley de Hubble-Lemaitre:  $V = H_0 D$

$H_0$  es la constante de Hubble

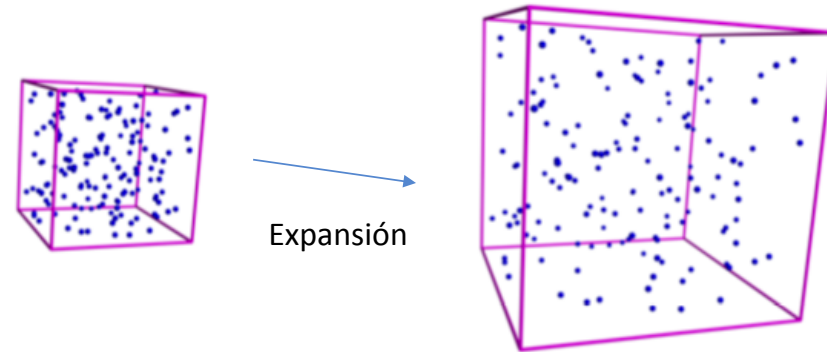
$$H_0 = (71 \pm 4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

Se usa también **h** para parametrizar la incertidumbre en  $H_0$  (que era un factor 2 durante  $\sim 50$  años)  $H_0 = h 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

# Cosmología newtoniana

- El universo a gran escala está gobernada por la gravitación (¿por qué las otras fuerzas no juegan un papel importante?)
- Hay que considerar la Relatividad General (RG) a escalas comparables a la curvaturas del espacio  
→ importante para describir el Universo
- Pero a escalas más pequeñas la descripción newtoniana es correcta.
- Describimos el universo como partes, suficientemente pequeñas, en la que las leyes newtonianas son un buena aproximación y unimos estas partes por la expansión del universo.
- Eso da una buena aproximación que luego solamente requiere pequeñas correcciones relativistas.

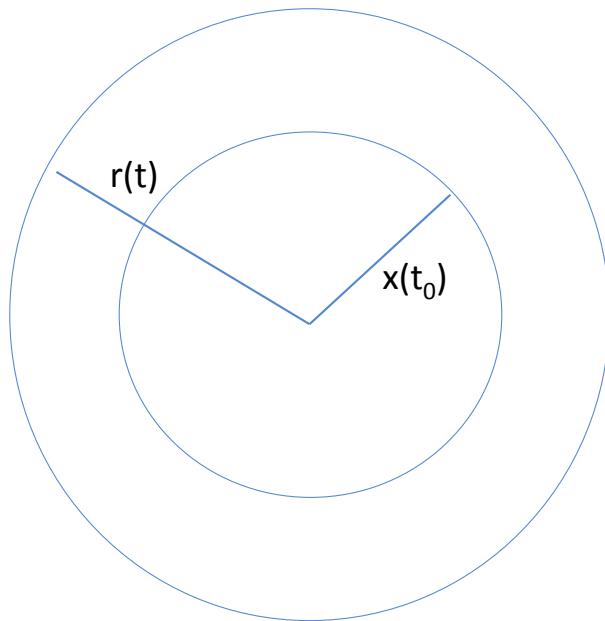
# Cinemática del universo



¿Cómo se puede cambiar un universo homogéneo sin perder la homogeneidad?

1. Podría ser estático  $\rightarrow$  las distancias entre las galaxias no cambian con el tiempo  $\rightarrow$  en contra de la ley de Hubble-Lemaître
2. Expansión: Todas las distancias entre galaxias cambian en proporción a un factor de escala  $a(t)$ .
  - $a(t)$  es universal, y depende solamente del tiempo cósmico
  - Las distancias aumentan en proporción, la homogeneidad se preserva  $\rightarrow$  "Hubble flow"
  - Aparte de "estar en el Hubble flow" las galaxias pueden tener un movimiento propio "movimiento peculiar".

# Descripción de la expansión del universo



Esfera en expansión:

$$r(t) = a(t) x$$

Tomamos  $t_0$  como momento actual

$$r(t_0) = a(t_0) x = x \rightarrow a(t_0) = 1$$

$a(t)$  es el factor de escala cósmico

$x$  es la **coordenada "comoving"**, la trayectoria  $(r,t) = [a(t)x, t]$  está determinado si conocemos  $(x,t_0)$

Tasa de expansión:  $v(t) = H(t) r$

Con:

$$H(t) := \frac{\dot{a}}{a}$$

$H(t)$  es generalización de la ley de Hubble, con  $H_0 = H(t_0)$

# Dinámica de la expansión

- Aparte del movimiento de expansión hay una deaceleración debido a la gravedad
- Ecuación del movimiento:
- Se puede escribir esta ecuación como una “conservación de energía”
- Hay tres caso para la constante K (mirar eq. 2, y tomar en cuenta que  $da(t_0)/dt > 0$ ):
  - $K < 0 \rightarrow$  siempre expansión
  - $K = 0 \rightarrow$  siempre expansión, pero  $v = 0$  para  $t = \infty$
  - $K > 0 \rightarrow da/dt = 0$  en algún momento, la expansión se para y se convierte en colapso.

$$\ddot{a}(t) = \frac{\ddot{r}(t)}{x} = -\frac{4\pi G}{3} \frac{\rho_0}{a^2(t)} = -\frac{4\pi G}{3} \rho(t) a(t) \quad (1)$$

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 \frac{1}{a} - Kc^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) a^2(t) - Kc^2 \quad (2)$$

$$\longrightarrow \frac{v^2(t)}{2} - \frac{GM}{r(t)} = -Kc^2 \frac{x^2}{2}$$



# Dinámica de la expansión

- Ponemos  $t = t_0$  y  $K = 0$  en (1) y usamos el resultado para definir la densidad crítica,  $\rho_{cr}$

$$\rho_{cr} := \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1.88 \times 10^{-29} h^2 \text{ g/cm}^3 .$$

$$\boxed{\Omega_0 := \frac{\rho_0}{\rho_{cr}}}$$

Con eso tenemos:

- $K = 0 \rightarrow \rho_0 = \rho_{cr}, \Omega_0 = 1$
- $K < 0 \rightarrow \rho_0 < \rho_{cr}, \Omega_0 < 1$
- $K > 0 \rightarrow \rho_0 > \rho_{cr}, \Omega_0 > 1$

→  $\Omega_0$  es un parámetro central para la cosmología

$$\ddot{a}(t) = \frac{\ddot{r}(t)}{x} = -\frac{4\pi G}{3} \frac{\rho_0}{a^2(t)} = -\frac{4\pi G}{3} \rho(t) a(t) \quad (1)$$

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 \frac{1}{a} - Kc^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) a^2(t) - Kc^2 \quad (2)$$

# Modificación debido a Relatividad General

- Interpretación:
  - La imagen de una esfera en expansión no es correcta. Esta imagen implica un centro de universo que no es correcto. PERO: ningún parámetro de esfera aparece en las ecuaciones resultantes.
  - La expansión no es un movimiento de galaxias dentro del universo, sino el mismo universo está en expansión. En particular, el corrimiento al rojo no es un efecto Doppler sin una alteración en frecuencia a los fotones debido a la expansión del espacio
- Modificaciones de la ecuación de movimiento:
  - Masa y energía son equivalentes debido a  $E = mc^2$  → Hay que tomar en cuenta la radiación en la ecuación de movimiento.
  - Tomaremos en cuenta una constante cosmológica, introducido originalmente por Einstein