

# Radiación electromagnética

Michael Richer

## Índice

- Introducción
- Teorías de la luz
- El espectro electromagnético
- Cuantificando a la luz
- Objetos puntuales o extendidos
- Brillos, magnitudes, energías...
- Conexión teoría-práctica
- Rasgos espectrales: líneas de absorción y emisión

# Astronomía: ciencia basada en la luz

- Casi la totalidad de nuestro conocimiento del cosmos es resultado de observaciones de la radiación electromagnética que emiten los cuerpos celestes.
- Información adicional del cosmos:
  - Rayos cósmicos (el reto es de interpretación)
  - Meteoritos (¿de dónde vienen?)
  - Varios decenas de kg de rocas lunares.
  - Neutrinos: solares, **25** neutrinos de la supernova SN 1987A y cada vez más de otras fuentes
  - Sondas enviadas a cuerpos del sistema solar.
  - Ondas gravitacionales (~100 fuentes, muchas más a futuro)

## La información disponible de la luz

- Posición de la fuente
- Variabilidad temporal
- Distribución espectral de la energía
- Polarización de la luz
  
- Debido a las distancias hacia los cuerpos celestes, los vemos como **eran** cuando emitieron la luz que observamos:
  - para la Luna, el retraso es de 0.25 segundos;
  - para el Sol, 8 minutos;
  - para lo demás, varía, pero es usualmente más tiempo, a veces miles de millones de años.
  
- Esto nos permite estudiar la historia de clases de objetos.

# Teorías de la luz

- Teoría corpuscular (partículas/fotones)
  - Isaac Newton extendió el trabajo de Pierre Gassendi.
  - Pudo explicar la reflexión, pero no adecuadamente la refracción o la difracción.
  - Esta teoría explicaba fácilmente que la luz viaja en trayectorias rectas.

# Teorías de la luz

- Teoría ondulatoria (ondas)
  - Robert Hooke, Christiaan Huygens, Thomas Young, Leonhard Euler, Augustin-Jean Fresnel, Siméon Denis Poisson, Michael Faraday y James Clerk Maxwell fueron los arquitectos principales de la teoría ondulatoria de la radiación electromagnética.
  - Esta teoría explica los efectos de refracción y difracción, aunque requería aparentemente de un medio de propagación, sobre lo cual los experimentos de Michelson y Morley echaron muchas dudas.
  - Fue Maxwell quien extendió la teoría para incluir todo el espectro electromagnético (y no solamente la luz óptica o infrarroja). También eliminó la necesidad del medio transmisor.

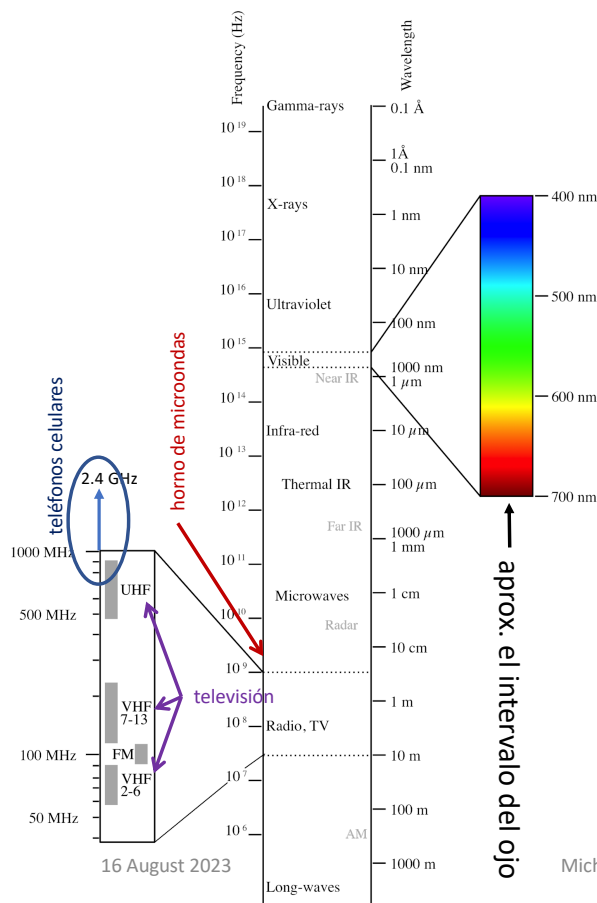
# Teorías de la luz

- **Mecánica cuántica (dominio microscópico)**
  - Max Planck, Albert Einstein y Arthur Holly Compton indicaron la necesidad de propiedades de partícula para experimentos microscópicos de la luz.
  - Niels Bohr ilustró que era fácil explicar los espectros de los átomos si la luz existía en “bultos” individuales (cuantas).
  - La mecánica cuántica (Heisenberg, Schrödinger, Dirac) contempla que la luz puede expresar características tanto de partículas como de ondas, según el experimento en cuestión.
    - Es decir, en cualquier experimento dado, el comportamiento de la luz como partícula o como onda dependerá del experimento.
    - Generalmente, no es posible observar ambos comportamientos simultáneamente.

16 August 2023

Michael Richer

7



## El espectro electromagnético

- La radiación electromagnética se extiende sobre un rango enorme de frecuencia/longitud de onda.
  - rayos gama tienen longitudes de onda de  $10^{-19}$  m (0.1 attometro; 10 TeV)
  - las ondas de radio tienen longitudes de onda de hasta decenas de metros
  - Entre estos límites, caen los rayos X, el ultravioleta, el óptico y el infrarrojo.
- El rango anterior implica al menos 21 órdenes de magnitud en energía, frecuencia y longitud de onda.
- La atmósfera no es transparente a todas estas energías o longitudes de onda.

Michael Richer

8

[https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_spectrum](https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum)

# El espectro electromagnético

rango	energía	$\lambda$	Hz	observación	detección
rayos gama	> 1 MeV	< $10^{-12}$ m	> $10^{20}$	espacial terrestre	partícula
rayos X	10-500 keV	0.01-1 Å	$10^{18}$ - $10^{20}$	espacial	partícula
ultravioleta	4-125 eV	10-3500 Å	$10^{15}$ - $10^{17}$	espacial	partícula
óptico	1-4 eV	3500 Å-1 $\mu$ m	$3 \cdot 10^{14}$ - $9 \cdot 10^{14}$	terrestre	partícula
infrarrojo	$4 \cdot 10^{-3}$ -1 eV	1-300 $\mu$ m	$10^{12}$ - $3 \cdot 10^{14}$	terrestre espacial	partícula onda
radio	$10^{-7}$ - $4 \cdot 10^{-3}$ eV	> 0.3 mm	$3 \cdot 10^7$ - $10^{12}$	terrestre	onda

- El rango espectral del óptico (un factor de 3) es más angosto que las demás divisiones espectrales (varios órdenes de magnitud).
- Las divisiones son por convención. La tecnología cambia con la longitud de onda, a veces dentro de una división.

16 August 2023

Michael Richer

9

## La interacción con la luz: telescopios, instrumentos y detectores

- En general, la detección de la luz como partícula no entrega información sobre la energía del fotón.
  - Excepción: rayos gama y rayos X
- Usualmente, la detección de fotones individuales sucede por medio del efecto fotoeléctrico.
  - Excepción: calorímetros en el sub-mm (parte del rango del radio).
- En general, la detección de la luz como onda permite conocer la energía de los fotones.
- La detección de ondas sucede por medio de la interferencia con ondas de frecuencia conocida (métodos "heterodyne"), factibles para longitudes de onda del infrarrojo lejano y del radio.
- Típicamente, los instrumentos y telescopios interactúan con la luz como onda.

16 August 2023

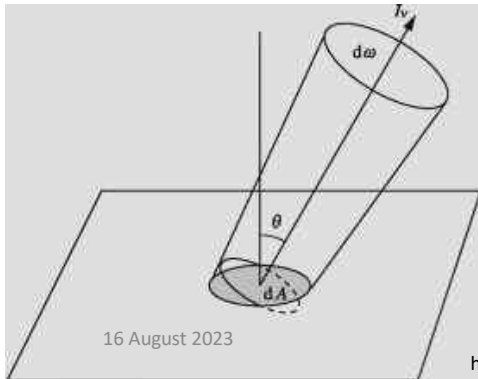
Michael Richer

10

# Cuantificando a la luz: Intensidad

- Supongamos que tenemos un flujo de radiación que pasa por una superficie.
- Si la radiación  $I_\nu$  pasa por una unidad de área,  $dA$ , en dirección  $\theta$  en un ángulo sólido,  $d\omega$ , la cantidad de energía por unidad de tiempo en el rango de frecuencia  $[\nu, \nu + d\nu]$ , la energía es  $dE_\nu = I_\nu \cos \theta dA d\nu d\omega dt$

donde  $\cos \theta dA$  es el área proyectada en la dirección  $\theta$ .



- Las unidades son  $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{sterad}^{-1}$
- $I_\nu$  es la **intensidad** específica de la radiación con frecuencia  $\nu$  en la dirección del ángulo sólido  $d\omega$ .
- El ángulo sólido, es un ángulo bidimensional. En coordenadas esféricas, es dado por  $d\omega = \sin \theta d\theta d\phi$ .

Michael Richer

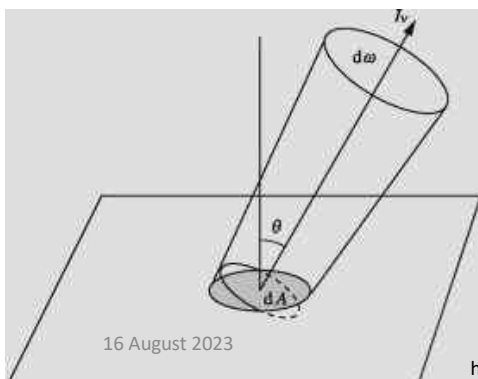
11

<https://www.astronomyclub.xyz/main-sequence/intensity-flux-density-and-luminosity.html>

# Cuantificando a la luz: Flujo

- La intensidad total es  $I = \int_0^\infty I_\nu d\nu$ , integrada sobre la frecuencia.
- Desde el punto de vista observacional, nos interesa el **flujo por unidad de área** (unidades  $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ) porque observamos la radiación recolectado por un instrumento (usualmente un telescopio) que tiene cierto área de superficie.
- En ese caso, el flujo,  $F_\nu$ , en la frecuencia  $\nu$  es

$$F_\nu = \frac{1}{dA d\nu dt} \int_S dE_\nu = \int_S I_\nu \cos \theta d\omega$$



- Cuando integramos sobre todas las frecuencias, el flujo recolectado por el instrumento es

$$F = \int_0^\infty F_\nu d\nu = \int_S I \cos \theta d\omega$$

- Como veremos, el flujo observado depende de la distancia de la fuente.

Michael Richer

12

<https://www.astronomyclub.xyz/main-sequence/intensity-flux-density-and-luminosity.html>

# Cuantificando a la luz: Luminosidad

- Una cantidad de suma importancia es el flujo integrado sobre una superficie que envuelve a la fuente, que usualmente llamamos la **luminosidad** de la fuente:

$$\begin{aligned}L_{\nu} &= \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} F_{\nu} \sin \theta \, d\theta d\phi \\ &= \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} I_{\nu} \cos \theta \sin \theta \, d\theta d\phi\end{aligned}$$

- **La luminosidad de la fuente es absoluta**, no depende de la distancia del observador.
- Si la fuente radia de manera isotrópica (direccionalmente uniforme), la luminosidad es

$$L_{\nu} = 4\pi r^2 F_{\nu} \text{ o } L = 4\pi r^2 F$$

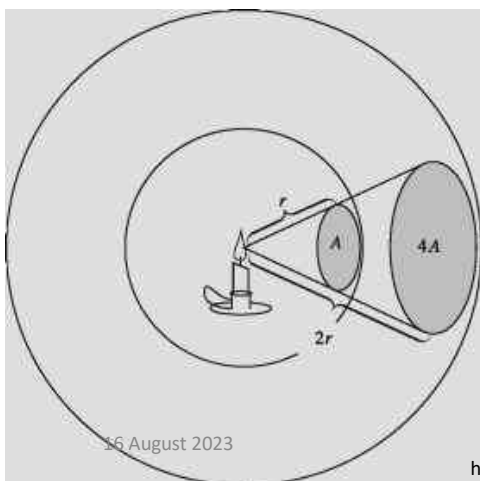
donde  $r$  es la distancia del observador de la fuente y suponemos que es mayor al tamaño de la fuente.

## Cuantificando a la luz

- Del resultado anterior vemos que  $F = \frac{L}{4\pi r^2}$ , lo cual es un resultado fundamental:

**El flujo que observamos disminuye en proporción inversa con la distancia al cuadrado.**

- Es decir, si el objeto es dos veces más lejos, el flujo que observamos disminuye por un factor de 4.
- Las unidades son  $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ .



# Cuantificando a la luz: La densidad energética

- Otro concepto que resulta útil es la densidad de energía o densidad energética (aquí integrada sobre la frecuencia)

$$u = \frac{dE}{dV} = \frac{1}{c} \int_S I d\omega$$

- Utilizamos  $dV = c dt dA$  porque, en un tiempo  $dt$ , la radiación incidente perpendicular a una superficie  $dA$  viajará una distancia  $c dt$ .

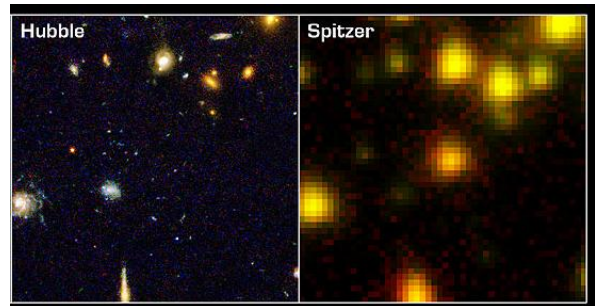
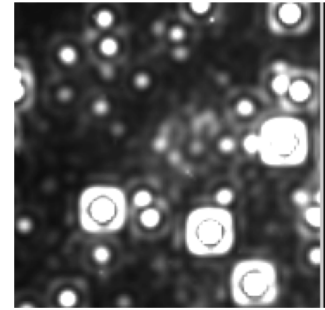
## La práctica: Detalles importantes

- La intensidad, el flujo, la luminosidad y la densidad energética son conceptos sensatos desde el punto de vista teórica.
- En la práctica, las fuentes mismas implican particularidades para caracterizarlas, según si
  - son fuentes puntuales o resueltas
  - están a distancias desconocidas
  - su espectro tiene continuo, líneas de absorción o líneas de emisión
- Luego, los telescopios, instrumentos y detectores imponen sus limitaciones, típicamente en función de longitud de onda/frecuencia.
- Finalmente, intervienen las tradiciones y prácticas de varias disciplinas que no siempre nos parecerán muy lógicas hoy en día.
- Entonces, la sensatez teórica anterior se “filtra” a través de varias realidades prácticas.



# Objetos puntuales o extendidos

- Si un objeto es puntual o extendido depende de la resolución espacial del telescopio o instrumento.
- Objetos puntuales:
  - **Definición:** Estos objetos no son resueltos por el telescopio. Su forma es producto de la óptica del instrumento/telescopio.
  - Las estrellas son el ejemplo clásico de objetos puntuales (aunque la interferometría permite resolver las estrellas más grandes más cercanas).
- Objetos extendidos:
  - **Definición:** Estos objetos son resueltos por nuestro telescopio o instrumento.
  - Las nebulosas y las galaxias son ejemplos de objetos extendidos, aunque depende de su tamaño y distancia.
  - Objetos extendidos tienen estructura propia. **Su forma no depende del instrumento/telescopio.**



16 August 2023

Michael Rich <http://coolwiki.ipac.caltech.edu/images/7/7b/Nicmos.gif>  
<http://coolwiki.ipac.caltech.edu/images/b/bd/ GOODS.jpg>

## La práctica: Brillos en astronomía...

- Los griegos (Hipparcos o Ptolomeo) catalogaron a las estrellas según su brillo en grupos desde “magnitud 0” hasta “magnitud 5”, las primeras siendo las más brillantes.
- En el siglo XIX, se cuantificó lo anterior (Pogson 1856): una estrella de magnitud 0 es 100 veces más brillante que una estrella de magnitud 5.
- En el ultravioleta, óptico e infrarrojo, es normal encontrar brillos expresados en magnitudes.
  - Notar que la escala de **magnitudes** (cualquiera, en cualquier intervalo espectral) es una **escala relativa**.
  - Notar que **la escala corre al revés**: números mayores indican ¡brillos menores!
  - Considérenlo como una herencia histórica...
- En rayos gama, rayos X y el radio (sub-disciplinas más modernas), el brillo se expresa en términos de energías/tiempo/área/frecuencia:
  - En radioastronomía, la unidad básica es el Jansky,  $10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz} = 10^{-26} \text{ J/s/m}^2/\text{Hz}$ .

16 August 2023

Michael Richer

18

# Brillos, dos detalles

- Muchas veces, nos interesa el **brillo total** de un objeto.
  - Brillos totales son relevantes tanto para objetos puntuales como para objetos resueltos/extendidos.
  - No es siempre trivial definir el brillo total de los objetos extendidos.
  - Se puede expresar un brillo total en magnitudes o Janskys (u otras unidades, p.ej., “crabs” en rayos  $\gamma$ ).
- Para objetos extendidos, puede ser relevante conocer su **brillo de superficie**: el brillo que tiene cierta parte del objeto.
  - Se expresan los brillos de superficie en magnitudes/área o Jansky/área.
  - Por ejemplo, el brillo del cielo en el OAN-SPM en una noche sin luna en la banda  $B$  (óptico) es de  $22 \text{ mag}/\square$  (magnitudes por segundo de arco cuadrado). Es decir, cada segundo de arco cuadrado en el cielo tiene el brillo equivalente a una estrella con un brillo de 22 mag.

## Magnitudes...

- En la astronomía observacional, trabajamos principalmente con las **magnitudes aparentes** de los objetos que nos interesan:
  - La magnitud aparente representa el brillo que observamos de los objetos.
  - La magnitud absoluta representa el brillo intrínseco de los objetos. Es necesario conocer la distancia para trabajar con magnitudes absolutas.
  - La magnitud bolométrica es la magnitud aparente o absoluta integrada sobre todo el espectro del objeto.
- Hay varios tipos de magnitudes (aparentes, absolutas o bolométricas)
  - **Magnitudes “Vega”** son magnitudes relativas basado en el brillo de Vega (la estrella más brillante en el hemisferio norte celeste). Tradicionalmente, es el sistema más común.
  - **Magnitudes AB** son magnitudes relativas basados en unidades de energía por intervalo de frecuencia. Se usan cada vez más (p.ej., Sloan/SDSS)...
  - **Magnitudes ST** son magnitudes relativas basados en unidades de energía por intervalo de longitud de onda. Son usados principalmente para los instrumentos del telescopio espacial Hubble.
- Las magnitudes están íntimamente ligadas a los filtros usados para medirlos (el sistema fotométrico). No siempre es obvio cual tipo de las magnitudes anteriores utilizan.

# Magnitudes Vega (Vegamag)

- Dada la calibración de las magnitudes en el siglo XIX (Pogson)

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{F_1}{F_2}$$

donde  $m_1$  y  $m_2$  son las magnitudes de dos objetos y  $F_1$  y  $F_2$  son los flujos observados de los dos objetos.

- De lo anterior, podemos inferir que dos objetos que difieren en brillo por una magnitud,  $m_1 - m_2 = -1$  (el objeto "1" es el más brillante,  $m_1 < m_2$ ), difieren en flujo por un factor de

$$\frac{F_1}{F_2} = 10^{0.4} = 2.512 .$$

- Por lo tanto, cuando hace falta considerar la magnitud total de varios objetos, es necesario proceder a determinar los flujos relativos para poder calcular la magnitud total.
- En el caso anterior,  $F_{tot} = F_1 + F_2 = 3.512F_2$ , por lo que  $m_{tot} - m_2 = -2.5 \log(3.512) = -1.36$ : la magnitud total de los dos objetos es 1.36 magnitudes más brillante (una magnitud menos positiva) que la magnitud total del objeto "2". Notar que el cálculo se realiza relativa a la magnitud de alguno de los objetos. **Flujos suman, magnitudes no.**

# Magnitudes Vega (Vegamag)

- Tradicionalmente, en el sistema Vegamag, Vega tiene una magnitud 0 (cero) en todos los filtros y todas las longitudes de onda. Realmente, hay pequeñas desviaciones (varios %).

- Hay muchas calibraciones del espectro de Vega, p.ej., Tüg et al. 1977, A&A, 61, 679 (ver derecha).

- Suponiendo  $m = 0$  mag para Vega, se puede utilizar los datos de la tabla (Tüg et al. 1977) y la magnitud del objeto en cuestión para calcular el número de fotones/s/cm<sup>2</sup>/Å con la ecuación

$$m_1 - m_{Vega} \approx m_1 - 0 = -2.5 \log \left( \frac{F_1}{F_{Vega}} \right)$$

o

$$F_1 = 10^{(-0.4m_1 + \log F_{Vega})} \text{ fotones/s/cm}^2/\text{Å} ,$$

donde  $F_{Vega}$  viene de las columnas 3 o 4 de la tabla de Tüg et al. (1977).

**Table 2.** Flagstaff flux calibration for  $\alpha$  Lyr

Wavelength		Photons per cm <sup>2</sup> s Å		erg per cm <sup>2</sup> s Å × 10 <sup>-9</sup>
$\lambda(\text{Å})$	$1/\lambda(\mu^{-1})$	$N_{\lambda, Fe}$	$N_{\lambda, Cu}$	$F_{\lambda}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
3295	3.035	577	...	3.48
3345	2.990	558	---	3.31

[https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/1977A%26A...61..679T/ADS\\_PDF](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1977A%26A...61..679T/ADS_PDF)

# Magnitudes AB (Abmag)

- La definición del sistema es

$$m_{AB} = -2.5 \log \left( \frac{F_\nu}{3631 \text{ Jy}} \right) = -2.5 \log \left( \frac{F_\nu}{\text{Jy}} \right) + 8.90$$

- Donde las unidades de  $F_\nu$  son Jansky ( $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ ).
- Si las unidades de  $F_\nu$  son  $\text{erg/s/cm}^2/\text{Hz}$  (es común el uso de unidades *cgs*)

$$m_{AB} = -2.5 \log F_\nu - 48.600 .$$

- Una fuente con un flujo  $F_\nu = 3.63 \times 10^{-20} \text{ erg/s/cm}^2/\text{Hz}$  integrado sobre algún intervalo espectral tendrá  $m_{AB} = 0 \text{ mag}$  en ese filtro/intervalo.
- Si las unidades del flujo son en términos de la longitud de onda,  $F_\lambda$ , podemos convertir lo anterior, recordando que

$$F_\nu = \frac{\lambda^2}{c} F_\lambda = \frac{\lambda}{c} \lambda F_\lambda .$$

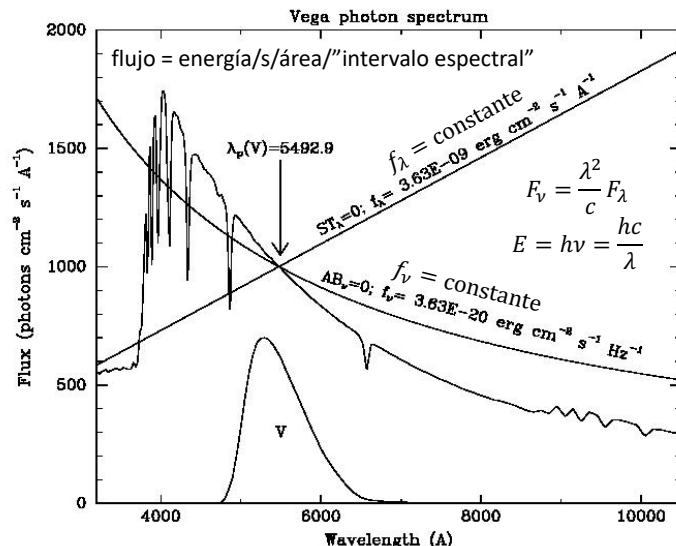
Así, la segunda  $\lambda$  y  $F_\lambda$  tienen las mismas unidades de longitud ( $\text{\AA}$ ,  $\mu\text{m}$ ,  $\text{cm}$ , etc.).

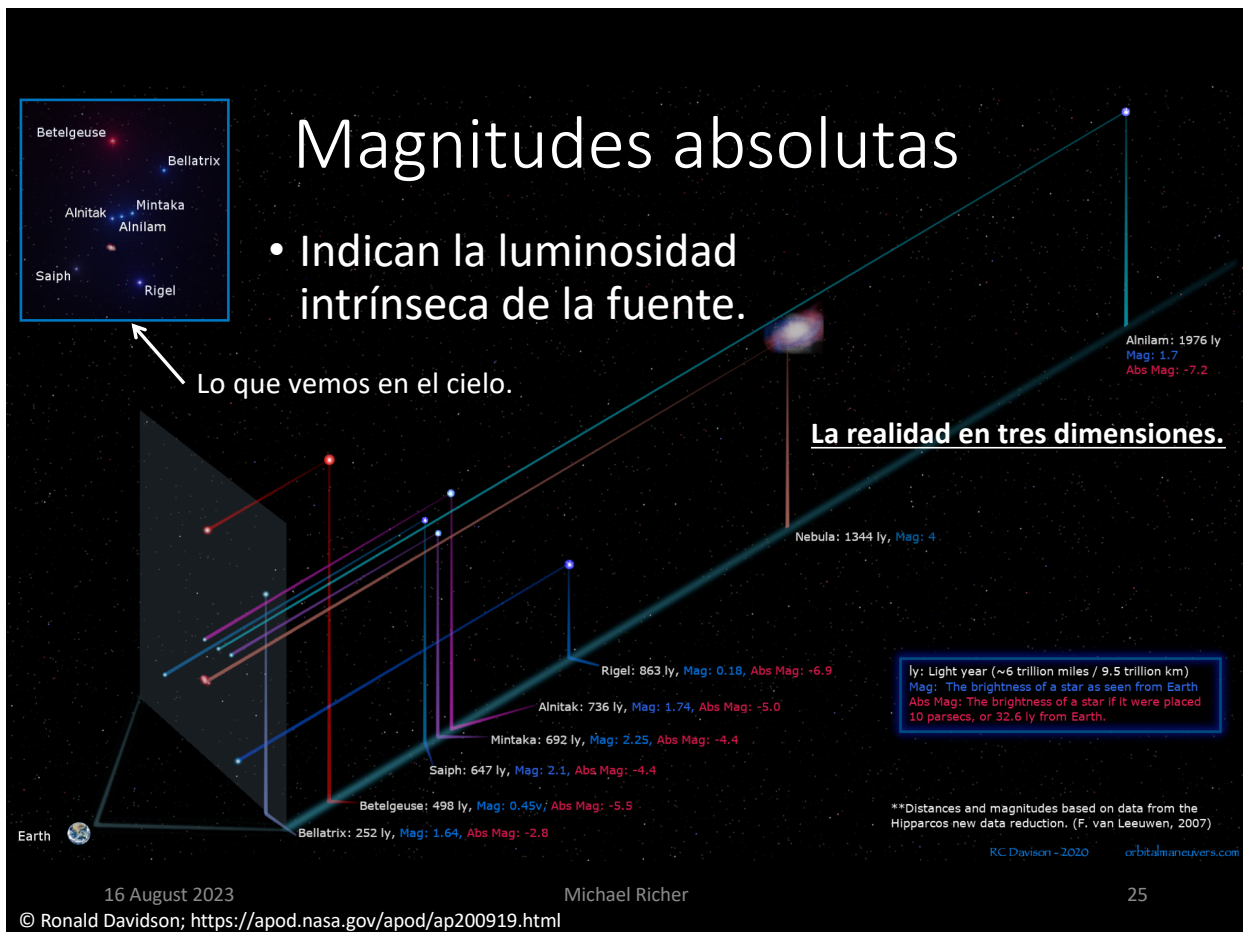
- La manipulación de magnitudes AB es idéntico al manejo de magnitudes Vega. (Las magnitudes son relativas; los flujos suman.)

# Magnitudes ST (Stmag)

- En general,  
 $m_{ST} = -2.5 \log F_\lambda - 21.1 \text{ mag}$ .
- Una fuente con un flujo  $F_\lambda = 3.63 \times 10^{-9} \text{ erg/s/cm}^2/\text{\AA}$  integrado sobre algún intervalo espectral tendrá  $m_{ST} = 0 \text{ mag}$  en ese filtro/intervalo.
- La gráfica indica como varían los puntos cero (0.0 mag) para los sistemas Vegamag, ABmag y STmag en función de la longitud de onda.
- La gráfica es lineal en longitud de onda, lo cual produce la curvatura de  $m_{AB} = 0 \text{ mag}$ .
- Obviamente, **el número de fotones equivalente a 0 mag en cualquier de estos sistemas varía con la longitud de onda.**

Figure 2.1: Standard photometric systems generally use the spectrum of Vega to define magnitude zero. The spectrophotometric magnitudes  $AB_\nu$  and  $ST_\lambda$  refer instead to spectra of constant  $f_\nu$  and  $f_\lambda$  respectively. Magnitude zero in both systems is defined to be the mean flux density of Vega in the Johnson V passband. Thus all three of the spectra shown here produce the same count rate in the Johnson V passband. The pivot wavelength of Johnson V is defined to be the crossing point of the  $AB_\nu = 0$  and  $ST_\lambda = 0$  spectra.





# Magnitudes absolutas

- La magnitud absoluta es la magnitud aparente que tendría una fuente si estuviera a 10 pc de distancia.
- Las magnitudes absoluta y aparente,  $M$  y  $m$ , respectivamente, se relacionan según
 
$$m - M = 5 \log d - 5 + A.$$
- En lo anterior,  $A$  es la extinción interestelar (lo cual no trataremos en este curso). Se supone que las magnitudes aparente y absoluta ya fueron corregidas por la extinción atmosférica.
- Se puede inventar una magnitud absoluta para cualquier sistema de magnitudes (y cualquier sistema de filtros o intervalo espectral).
- La magnitud absoluta es una propiedad intrínseca de una fuente particular.
- Para los estudios de factibilidad, usualmente partiremos de una luminosidad intrínseca, que con frecuencia tendremos que derivar de a una magnitud absoluta.

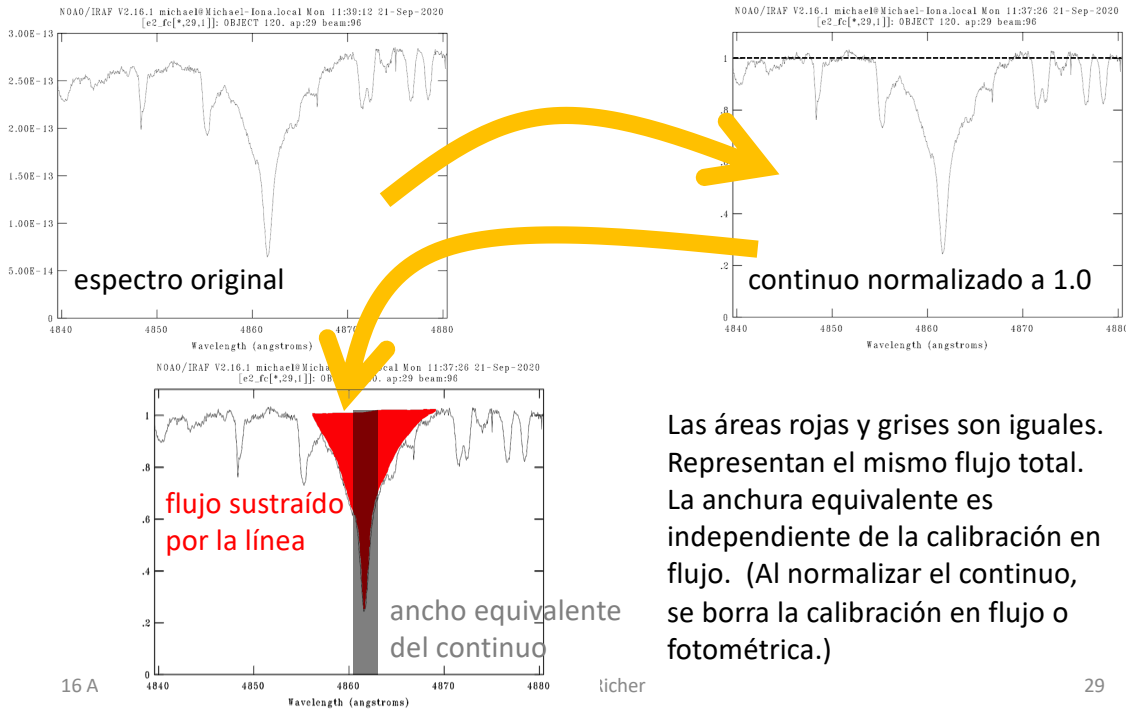
# El intervalo espectral

- Usualmente, el brillo (magnitud, Jansky, energía) NO se refiere al espectro completo del objeto, integrado sobre todas las longitudes de onda (o todas las frecuencias).
- **Usualmente, el brillo se refiere a un intervalo espectral**, típicamente determinado por
  - el filtro utilizado (imagen directa)
  - la resolución espectral (espectroscopia)
  - la tecnología empleada (placa fotográfica, detección heterodyne, etc.)
- Si se tratara de **toda la energía** que emite un objeto en **todas longitudes** de onda, usualmente se refiere a la **luminosidad bolométrica**. Para calcularlo, es necesario conocer la distancia hacia el objeto.
  - Derivar magnitudes bolométricas no es trivial. En principio, requieren observaciones en todas longitudes de onda.
  - Magnitudes bolométricas se refieren a luminosidades bolométricas. No dependen del intervalo espectral.

## Rasgos espectrales: los detalles

- Típicamente, utilizamos magnitudes para intervalos espectrales grandes, digamos decenas de Å o más.
- Para intervalos espectrales pequeños, digamos 1 Å, utilizamos flujos (energía/s/cm<sup>2</sup>/Å).
- Por otra parte, los espectros de los astros no son espectros de puro continuo, sino que presentan líneas de absorción y, a veces, líneas de emisión.
  - Para líneas de absorción, lo más común es describir su fuerza utilizando su “anchura equivalente”. Esto es, la extensión del continuo que sustrae la línea del espectro.
  - Para líneas de emisión, normalmente se indica su flujo. Esto es, la energía total, integrada sobre la línea, en exceso al flujo del continuo.
  - Esta diferencia es otra herencia histórica.

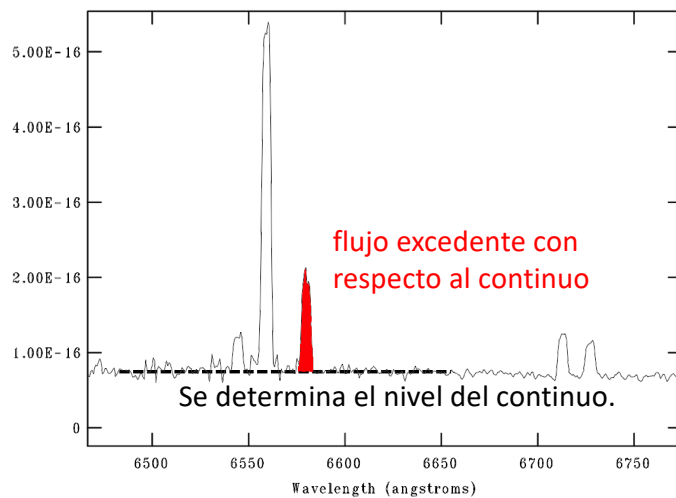
# Las anchuras equivalentes



Las áreas rojas y grises son iguales. Representan el mismo flujo total. La anchura equivalente es independiente de la calibración en flujo. (Al normalizar el continuo, se borra la calibración en flujo o fotométrica.)

# Líneas de emisión

- Para caracterizar las líneas de emisión, se determina el nivel del continuo.
- Luego, se integra la emisión excedente con respecto a ese nivel.
- El flujo excedente caracteriza la fuerza de la línea de emisión.
- Se puede indicar este flujo excedente en términos de una anchura equivalente (ver anterior, en cuyo caso negativo) o como un flujo (energía/s/área/intervalo espectral).



# Conexión teoría-práctica

- Es importante dejar claro que  
**magnitudes y brillos representan flujos.**  
Tienen unidades de energía/s/cm<sup>2</sup>/“intervalo espectral”.
- Lo anterior es cierto para magnitudes de cualquier tipo, aparentes o absolutas.
- Igualmente, es cierto para objetos puntuales como extendidos.
- Para calcular la **luminosidad** de una fuente, que frecuentemente es lo interesante para la astrofísica, habrá que integrar el flujo sobre una superficie que envuelve completamente a la fuente.
  - Usualmente, suponemos que el flujo es isotrópico, pero hay muchos casos donde no, p.ej., una estrella joven rodeada de un disco de acreción. Depende donde ponemos la superficie...

## Janskys, energías

- Recuerde que para hacer un estudio de factibilidad, necesitamos fotones/s/área/“intervalo espectral”
- Janskys:
  - El Jansky, 10<sup>-26</sup> W/m<sup>2</sup>/Hz, es un flujo, una unidad absoluta y lineal.
  - Es mucho más fácil trabajar con flujos dado que se suman directamente.
- Energías
  - En la espectroscopia, en ciertos casos de imagen directa o en rayos gama y rayos X, se utilizan unidades de energía, por ejemplo, erg/s/cm<sup>2</sup> o erg/s/cm<sup>2</sup>/Å.
  - Como en el caso de flujos, el manejo de energías es sencillo porque suman.
- Convirtiendo de energías a fotones/s es fácil. Basta con dividir por la energía del fotón:
  - Por ejemplo, si conocemos que la energía en la línea de H $\alpha$  ( $\lambda = 6562\text{\AA}$ ) de algún objeto es de  $3.74 \times 10^{-16}$  erg/s/cm<sup>2</sup>, el flujo de fotones es de  $1.23 \times 10^{-4}$  fotones/s/cm<sup>2</sup> dado que el fotón de H $\alpha$  tiene una energía de  $3.03 \times 10^{-12}$  erg.