

Sistemas fotométricos

- Johnson-Cousins UBVRI
- SLOAN
- Gaia
- Thuan-Gunn
- Washington
- Strømgren uvby- β , Vilnius
- DDO
- Banda angosta
- Infrarrojo
- El diseño de sistemas fotométricos
- Calibración
- Referencia excelente:
Bessell, M. S. 2005, Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics, 43, 293

17 October 2023

Michael Richer

1

Fotometría: ¿Qué es?

- La **fotometría** es un muestreo de la luz del objeto observado utilizando **filtros**.
- Un **filtro** deja pasar la luz de un cierto **intervalo espectral**.
- De la **fotometría**, se obtiene el **brillo** (aparente) y uno o más **colores** para el objeto observado.
- Por razones históricas, el **brillo** se mide en **magnitudes** ($UV < \lambda < MIR$).
- La **magnitud** es definida en términos del flujo según $m = -2.5 \log F + C$. La constante C depende del filtro y es **definido utilizando estrellas estándares**.
- Un **color** es una **diferencia de magnitudes**. Entonces, un color representa la **pendiente del espectro** sobre el intervalo espectral que abarcan los dos filtros involucrados.
- La **fotometría** permite determinar la **forma burda del espectro**. En ese sentido, se puede considerar a la fotometría como una forma de espectroscopía de muy baja resolución.
- Notar en lo anterior que son necesarios **filtros y estrellas estándares** para definir **un sistema fotométrico**. Este sistema será independiente del sitio y del equipo utilizado para la medición.

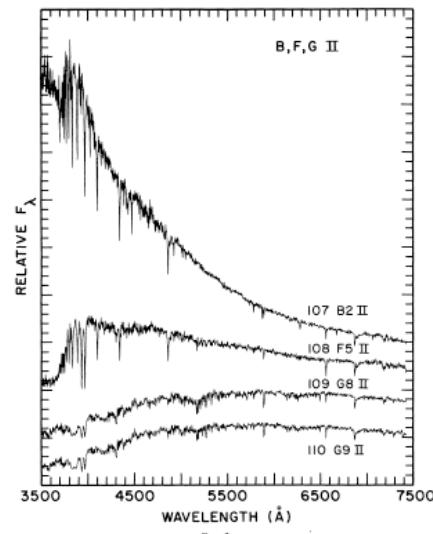
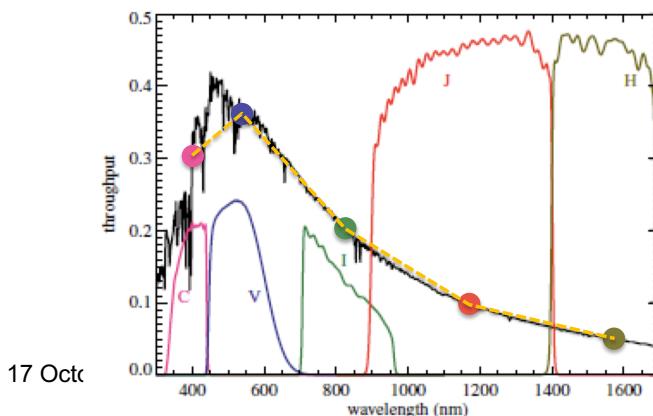
17 October 2023

Michael Richer

2

Fotometría: ¿Qué es?

- Es evidente que unos cuantos filtros sirven para caracterizar la forma de los espectros de las estrellas a la derecha.
- De alguna manera, la fotometría permite aproximar los espectros como segmentos de líneas rectas.



Jacoby et al. 1984, ApJS, 56, 257
Brown et al. 2009, AJ, 137, 3172

3

Sistemas fotométricos

- En general, se clasifican según la anchura de los filtros:
 - **Banda ancha:** $\text{FWHM} > 500\text{\AA}$
ejemplo: UBVRI de Johnson/Cousins
 - **Banda intermedia:** $\text{FWHM} \sim 100 - 300\text{\AA}$
ejemplo: uvby de Strømgren
 - **Banda angosta:** $\text{FWHM} \sim 10 - 100\text{\AA}$
ejemplo: $\text{H}\alpha$, $[\text{O III}]\lambda 5007$, TiO, etc.
- El ancho de los filtros se basará en
 - los propósitos astrofísicos (favorece filtros más angostos)
 - los objetos a observar (más débiles \Rightarrow filtros más anchos)
 - el sitio de observación (terrestre o espacial)

Banda ancha

- La figura presenta una buena parte de los sistemas fotométricos de banda ancha.
- En el caso del sistema del SLOAN, las curvas de transmitancia incluyen el efecto de la atmósfera.
- El lado rojo del filtro z' de SLOAN es definido por la caída de la eficiencia del CCD y de la absorción de la atmósfera.
- Los filtros de Gaia son MUY anchas (misma escala en λ).

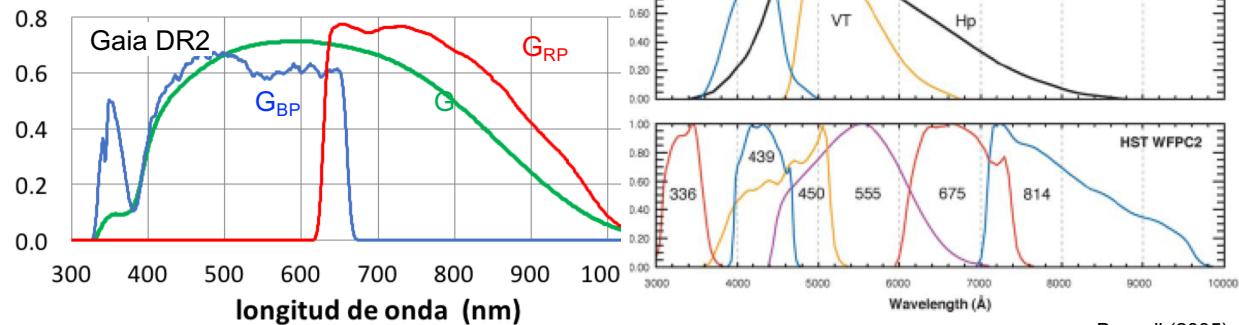
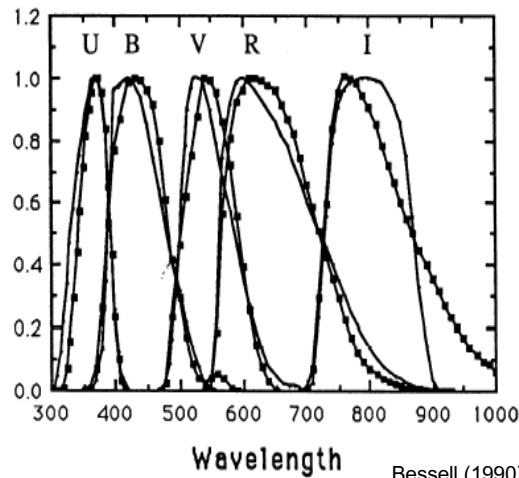


Figure 1 Schematic passbands of broad-band systems.

Bessell (2005)

Johnson-Cousins UBVRI

- Es un sistema de banda ancha.
- Es un pilar fundamental de la astrofísica moderna.
- Definiciones del sistema:
Johnson & Morgan (1953, ApJ, 117, 313)
Cousins (1976, Mem. RAS, 81, 25)
- Filtros modernos para CCDs:
Bessell 1990, PASP, 102, 1181
- Estándares (CCDs):
Landolt (1992, AJ, 104, 340)
Landolt (1983, AJ, 88, 439)
Landolt (1973, AJ, 78, 959)



Bessell (1990)

Thuan-Gunn

Thuan & Gunn (1976)

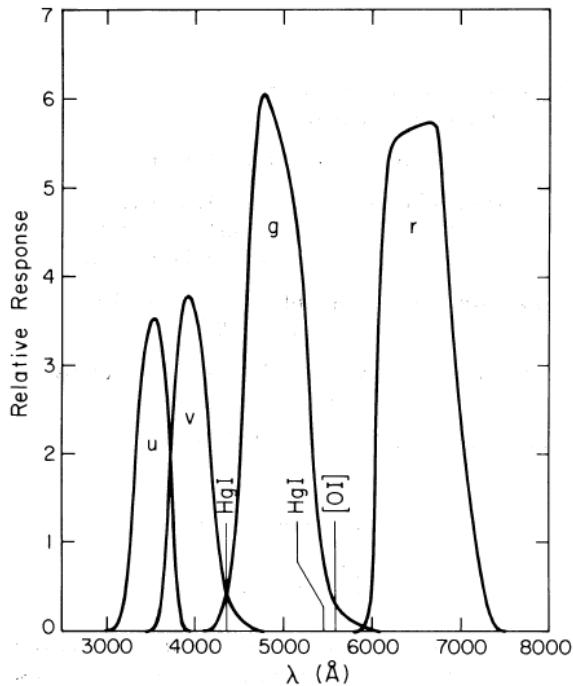


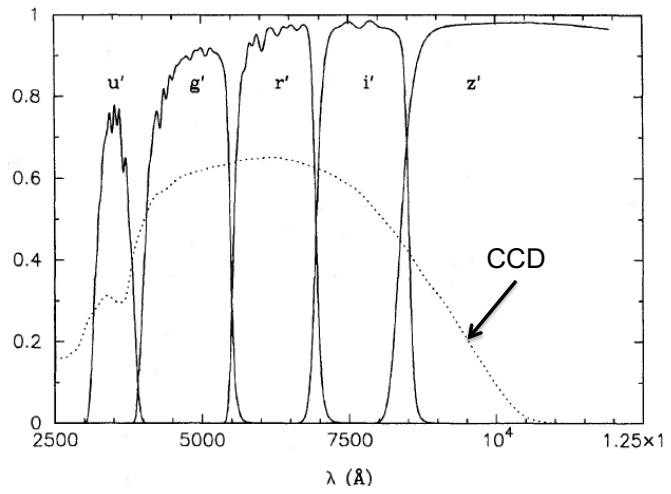
FIG. 1—The transmission function $S(\lambda)$ for the filters, S-20 photocathode, and one reflection from aluminum.

- Thuan & Gunn 1976, PASP, 88, 543
- Se usa para la fotometría de galaxias.
- Los filtros se diseñaron para evitar líneas del cielo (las galaxias son de bajo brillo de superficie).
- Notar que esta definición incluye la respuesta del detector (fotocátodo S20) y una reflexión en aluminio.

7

Sloan: $u'g'r'i'z'$

- Este sistema es una modificación del sistema Thuan-Gunn.
- Está definido en:
 - Fukugita et al. 1996, AJ, 111, 1748
 - Smith et al. 2002, AJ, 123, 2121
 - Smith et al. 2007, en “The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization, ASP Conf. Ser., 364, 91”
- Se usó para el catastro SLOAN y sus derivados, cuyo objetivo fue el estudio de galaxias y cuásares.
- Notar que el CCD definirá el lado rojo del filtro z' . Además, la atmósfera también dejará su firma (ver la figura anterior de Bessell 2005).



Fukugita et al. (1996)

Washington CMT₁T₂

- Este sistema es usado para fotometría de estrellas y cúmulos de estrellas.
- Definición y estándares: Canterna (1976, AJ, 81, 228) y Geisler (1990, PASP, 102, 344)
- La descripción moderna del sistema para CCDs: Bessell 2001, PASP, 113, 66

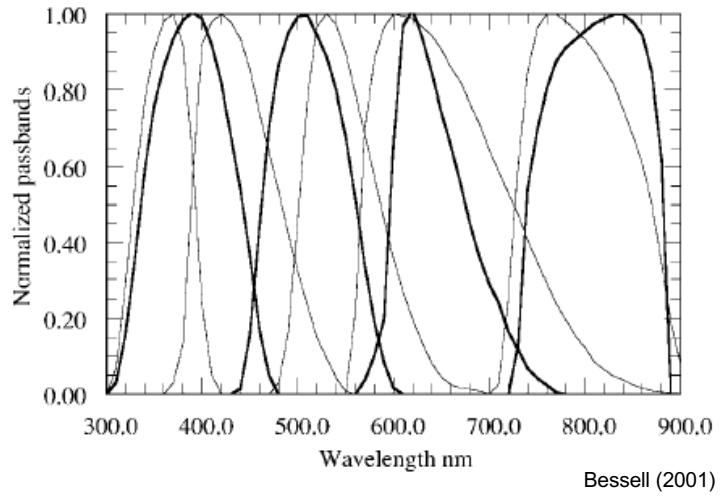


FIG. 1.—Adopted $\lambda R(\lambda)$ response for C , M , T_1 , and T_2 (thicker lines) compared to the standard $UBVRI$ passbands (thin lines).

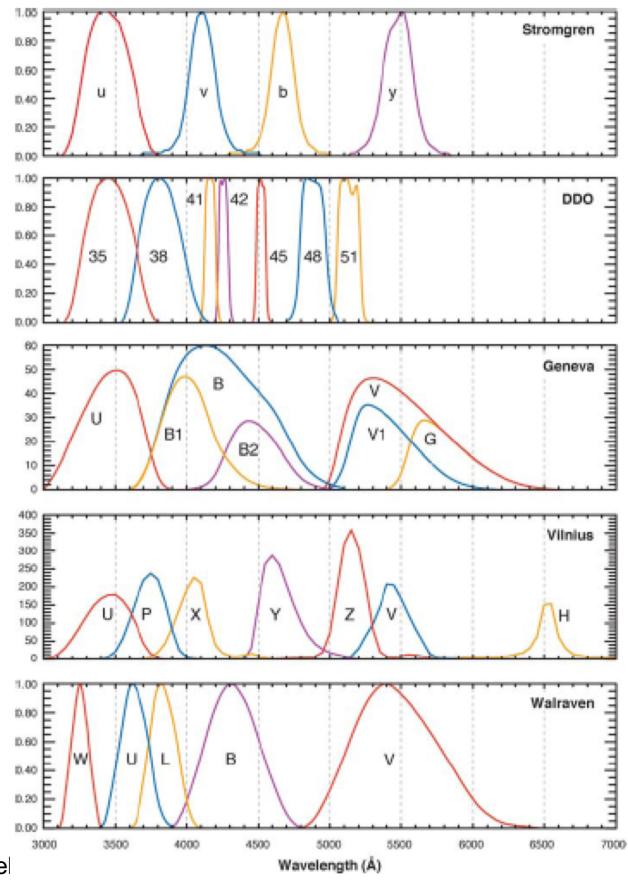
17 October 2023

Michael Richer

9

Banda intermedia

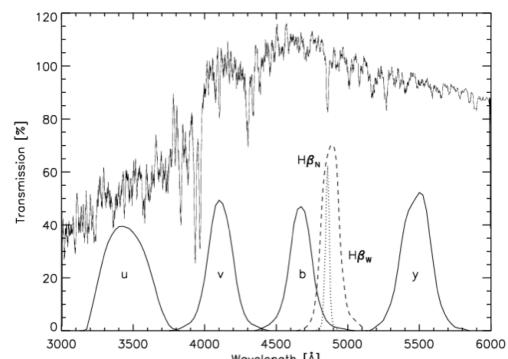
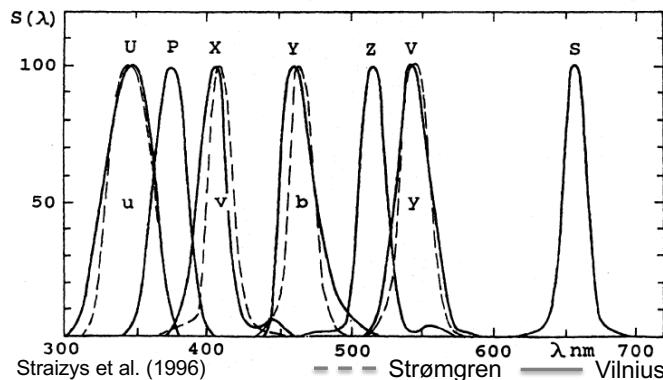
- La figura presenta una buena parte de los sistemas fotométricos de banda intermedia (de Bessell 2005).
- La gran mayoría fueron inicialmente diseñados para estudios estelares.
- Notar que no todos los filtros son más angostos que los de banda ancha.
- Notar que el intervalopectral es distinto (más azul) al intervalo utilizado para los filtros de banda ancha. (Las estrellas son más distintas en la luz azul del óptico.)



17 October 2023

Michael

Strømgren uvby- β y Vilnius



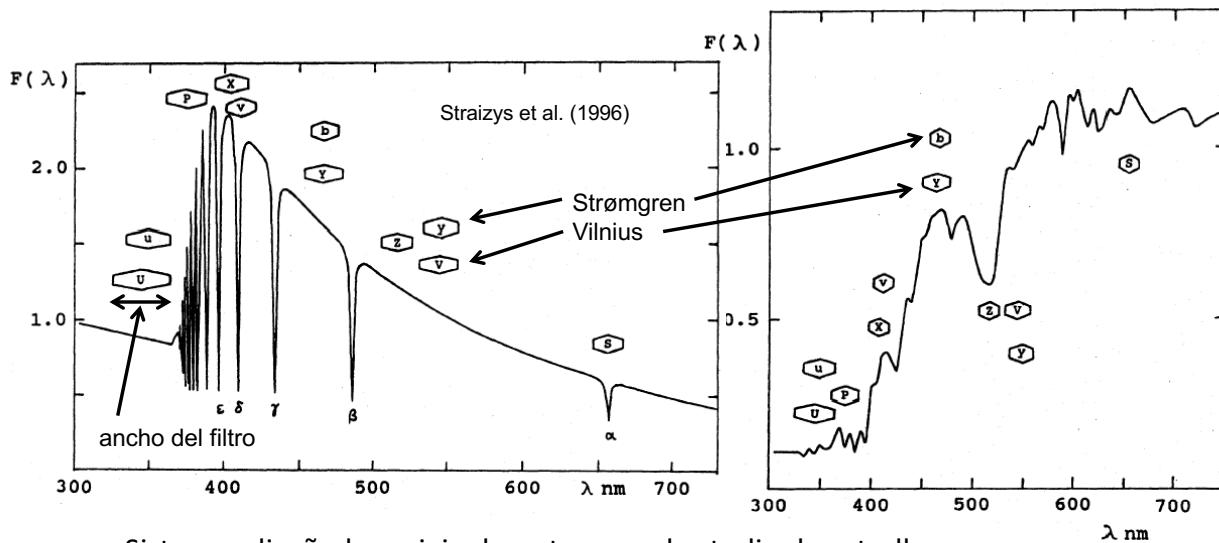
- Strømgren (1963, QJRAS, 4, 8) y Strømgren (1966, ARA&A, 4, 433) definieron el sistema uvby.
- Crawford & Mander (1966, AJ, 71, 114) agregaron dos filtros $H\beta$ que miden la fuerza (en absorción) de esa línea.
- Straizys (1963, Vilnius Astronomijos Observatorijos Biuletenis, 6, 1) definió la primera versión del sistema de Vilnius.
- Ver Straizys et al. (1996, Baltic Astronomy, 5, 83) para una discusión en inglés.
- Estándares: e.g., Clausen et al. (1997, A&AS, 122, 559)

Michael Richer

11

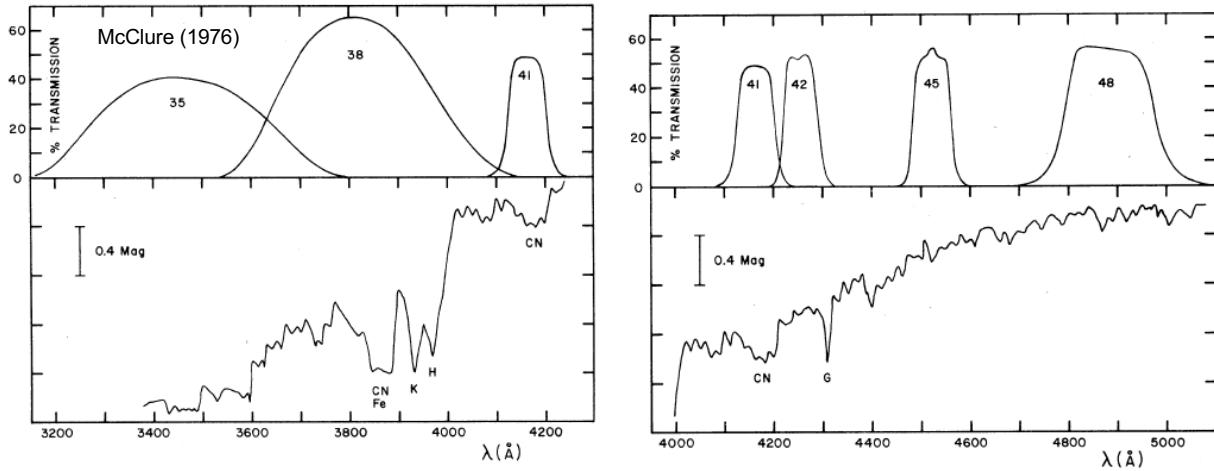
Onehag et al. Phys.Scripta T133 (2008) 014021 arXiv:0812.0388 [astro-ph]

Strømgren uvby- β y Vilnius



- Sistemas diseñados originalmente para el estudio de estrellas.
- Recientemente, se usa el sistema Strømgren para la fotometría de galaxias también.
- Aquí se ven los filtros sobrepuertos en espectros de estrellas A y K.

Sistema DDO



- Definición del sistema: McClure & van den Bergh 1968, AJ, 73, 313
- Estrellas estándares y filtros: McClure (1976, AJ, 81, 182)
- Su uso inicial fue motivado para el estudio de poblaciones estelares en galaxias,
- Se usa para estudios de las metalicidades de estrellas y cúmulos de estrellas.

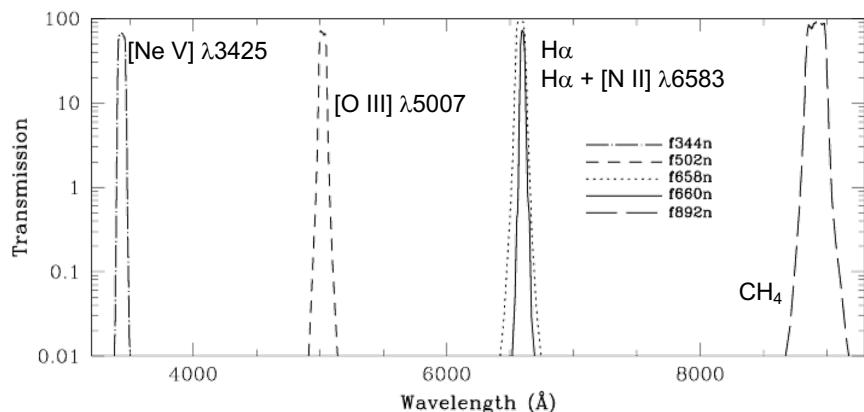
17 October 2023

Michael Richer

13

Bandas angostas

- Fotometría basada en filtros diseñados para observar líneas espectrales específicas, en emisión o en absorción.
- Típicamente los filtros tienen anchuras de 10-100 Å.
- El filtro más común es H α , aunque su calibración es problemático.
- Normalmente se calibra la fotometría de banda angosta como si fuera espectroscopia (en flujos: erg/s/cm 2 /Å, no en magnitudes).



17 Octo

Boffi, F.R., et al. 2007, "ACS Instrument Handbook", Version 8.0, (Baltimore: STScI)

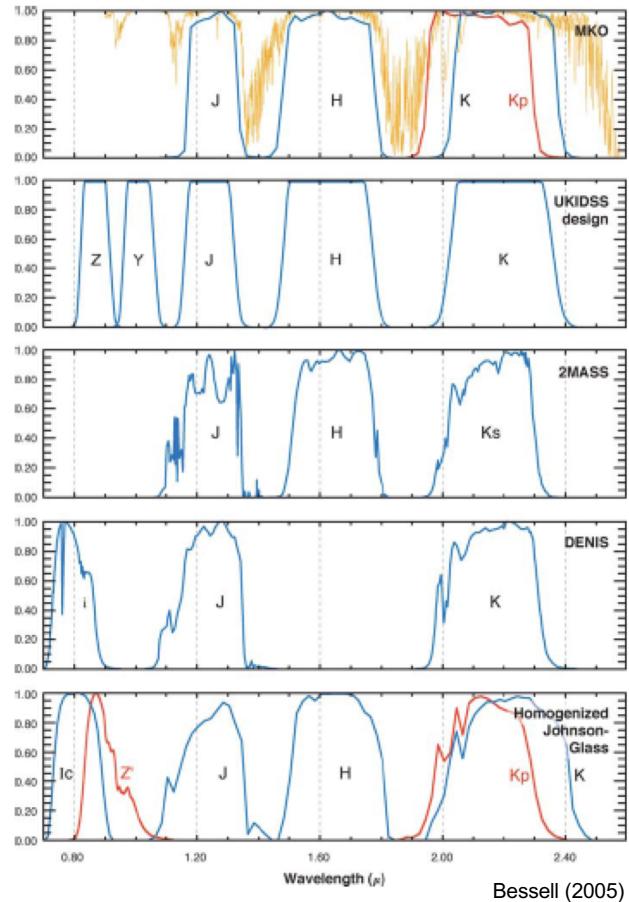
14

Sistemas del NIR

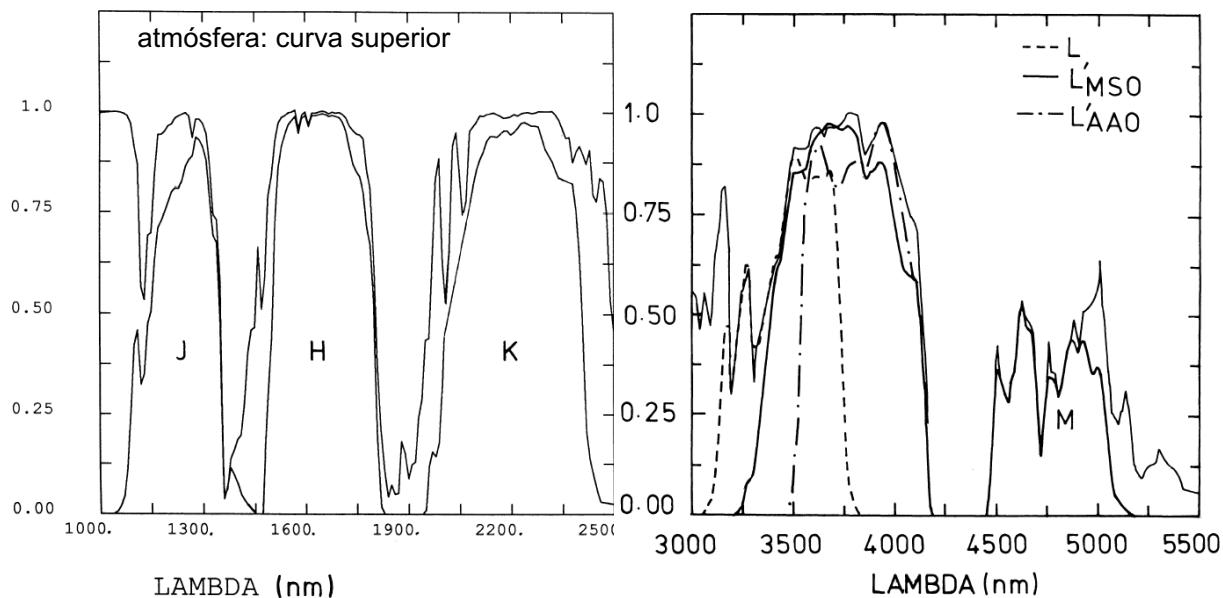
- La figura presenta algunos de los sistemas fotométricos del infrarrojo cercano.
- La figura también presenta la absorción atmosférica para Mauna Kea. Notar que, en la mayoría de los demás sitios, la absorción atmosférica es peor que en Mauna Kea.
- Se presentan los filtros *I* de Cousins y *z'* del SLOAN en la última fila como referencia. Notar que el filtro *z'* (SLOAN) y el *Z* más moderno son distintos.
- El filtro *Y* es diseñado para evitar las bandas de absorción de agua.
- La serie UKIDSS es la más moderna.

17 October 2023

Micha



Infrarrojo: JHKLMNQ



17 October 2023

Michael Richer

Bessell & Brett 1988, PASP, 100, 1134

16

Infrarrojo: JHKLMNQ

- En detalle, hay muchos sistemas fotométricos (ver cap. 3 de Glass: "Handbook of Infrared Astronomy") debido a la dependencia sobre
 - la atmósfera
 - los filtros
 - el detector
 - interés astronómico particular
- Estrellas estándares:
 - UKIRT/MKO (NIR):
Hunt et al. 1998, AJ, 115, 2594
Leggett et al. 2006, MNRAS, 373, 781
 - Las Campanas (NIR):
Persson et al 1998, AJ, 116, 2488
 - MIR:
Cohen et al. 1999, AJ, 117, 1864

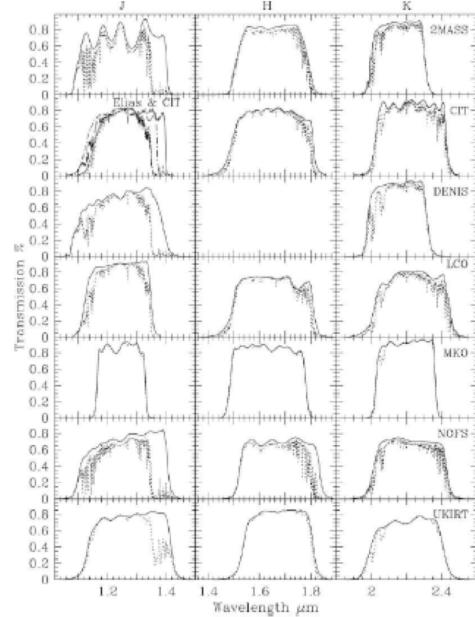


Figure 2. Filter profiles from Stephens & Leggett (2004) illustrating the variations in filter profiles of commonly used photometric systems. The atmospheric transmission is shown by the dotted lines.

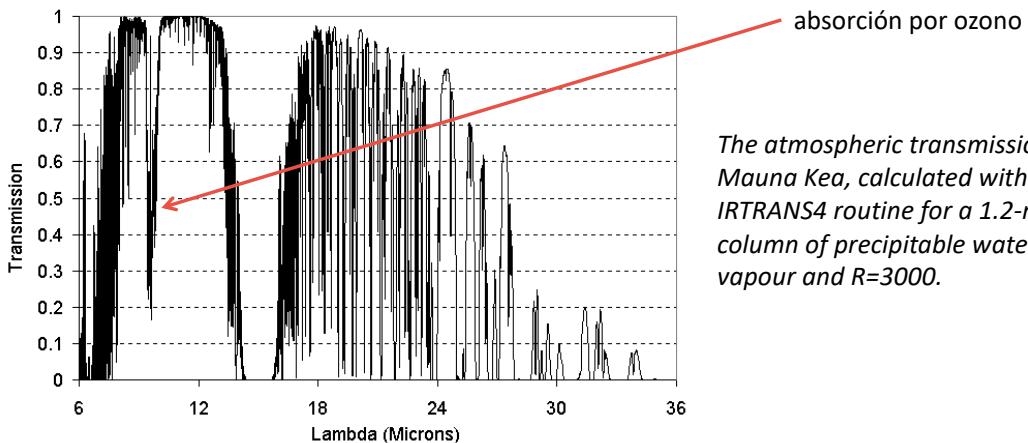
17 October 2023

Michael Richer

Tokunaga & Vacca 2007, en "The future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization, ASP Conf. Ser., 364, 409

Infrarrojo: JHKLMNQ

Atmospheric Transmission at Mauna Kea



- Para las bandas N (10 μm) y Q (20 μm), realmente no hay filtros ni remotamente "estándares", porque la atmósfera varía tanto en su absorción (de lugar a lugar y en el tiempo).
- Regularmente, se divide la banda N (10 μm) en dos.

17 October 2023

Michael Richer

18

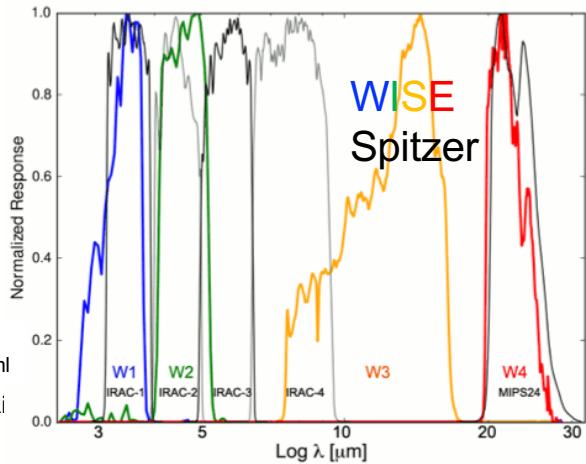
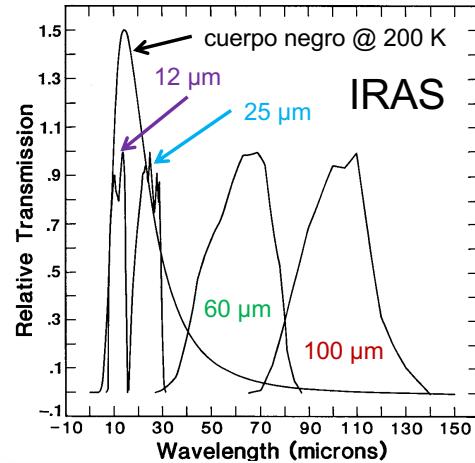
Infrarrojo en el espacio

- Obviamente, TODO el tema de la absorción atmosférica desaparece para observaciones desde satélites.
- Se dispone del espectro continuo.
- Igualmente, la emisión atmosférica es eliminada también.
- En estas longitudes de onda, interviene mucho la tecnología para fabricar los filtros.

<https://irsa.ipac.caltech.edu/IRASdocs/issa.exp.sup/Ap/G.html>
http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/prelim/expsup/sec4_3g.html

17 October 2023

Michael Richer



Sistemas fotométricos: diseño

- Para la máxima sensibilidad para fuentes débiles, uno quiere bandas anchas.
- Para la máxima sensibilidad para rasgos espectrales (líneas de emisión/absorción), uno quiere bandas angostas.
- Requisitos astrofísicos no son necesariamente tan excluyentes (banda ancha o angosta).
- La tecnología interviene necesariamente: No todos los detectores tienen la misma respuesta espectral. Ni siquiera todos los CCDs tienen la misma respuesta espectral.
- Las características del sitio pueden intervenir en la definición del sistema fotométrico, pero conviene evitarlo en la medida de lo posible.
- Se debe elegir estrellas estándares con colores intrínsecos adecuados para los objetos a calibrar. **¡Hay que cuidar el fin científico!**

Ejemplo: SDSS u' , según Fukugita et al. (1996, Ap, 111, 1748)

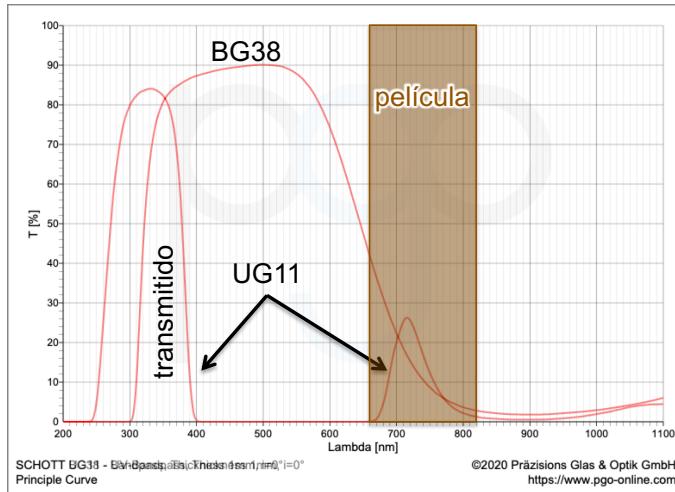


TABLE 1. Elements of SDSS filters.

filter	glass	coating
u'	1mm UG11 + 1mm BG38 + 3mm quartz	coating that suppresses 6600-8200Å
g'	2mm GG400 + 3mm BG38	short-pass coating cut off at 5500Å
r'	4mm OG550 + 1mm BK7	short-pass coating cut off at 7000Å
i'	4mm RG695 + 1mm BK7	short-pass coating cut off at 8500Å
z'	4mm RG830 + 1mm BK7	

17 October

21

Ejemplo: SDSS g' , según Fukugita et al. (1996, Ap, 111, 1748)

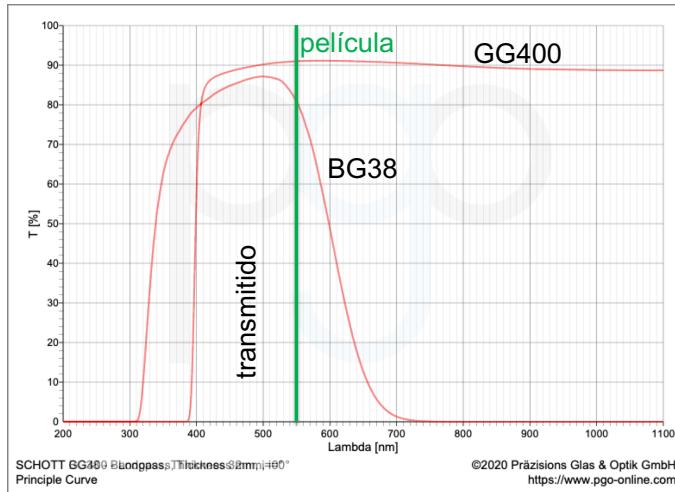


TABLE 1. Elements of SDSS filters.

filter	glass	coating
u'	1mm UG11 + 1mm BG38 + 3mm quartz	coating that suppresses 6600-8200Å
g'	2mm GG400 + 3mm BG38	short-pass coating cut off at 5500Å
r'	4mm OG550 + 1mm BK7	short-pass coating cut off at 7000Å
i'	4mm RG695 + 1mm BK7	short-pass coating cut off at 8500Å
z'	4mm RG830 + 1mm BK7	

17 October

22

Ejemplo: SDSS r', según Fukugita et al. (1996, Ap, 111, 1748)

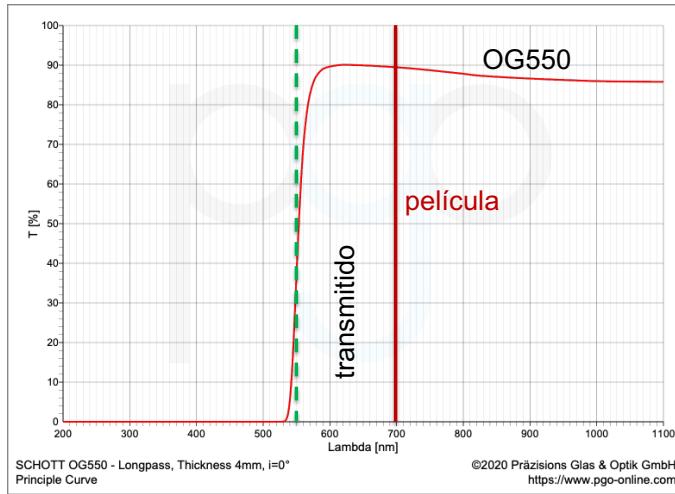


TABLE 1. Elements of SDSS filters.

17 October

23

BK7 es vidrio transparente.

Ejemplo: SDSS i', según Fukugita et al. (1996, Ap, 111, 1748)

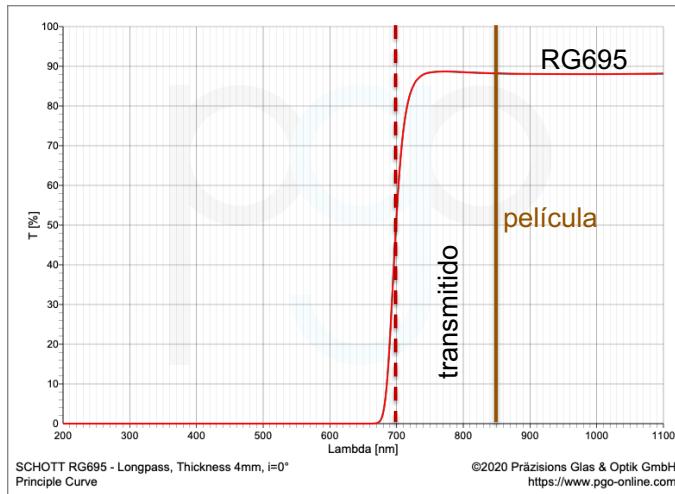


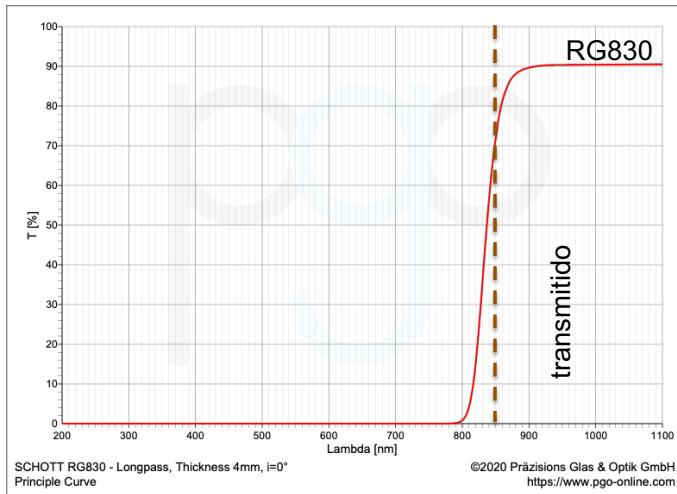
TABLE 1. Elements of SDSS filters.

17 October

24

BK7 es vidrio transparente.

Ejemplo: SDSS z', seg\xfcren Fukugita et al. (1996, Ap, 111, 1748)



La atm\xf3sfera y la respuesta del CCD definen el lado rojo del filtro.

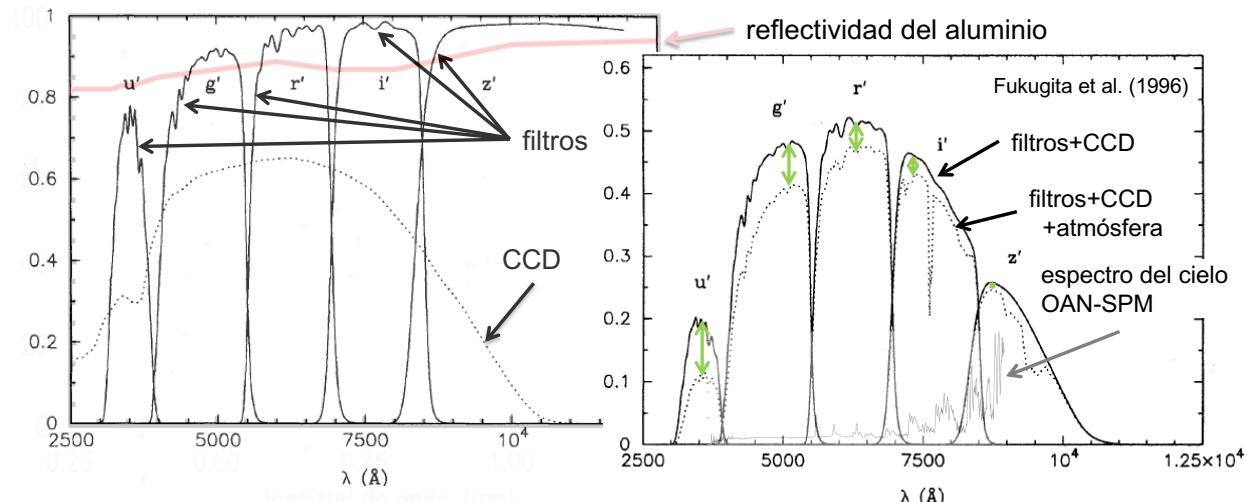
TABLE 1. Elements of SDSS filters.

17 October

25

BK7 es vidrio transparente.

Sistemas fotométricos: dise\u00f1o

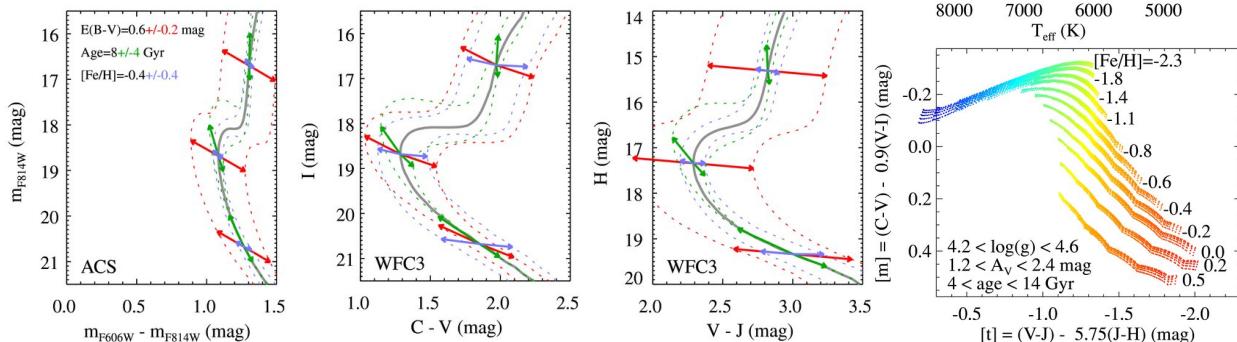


- Aqu\xed vemos la interacci\u00f3n de las caracter\u00edsticas del sitio y de los componentes instrumentales para conformar el sistema fotom\u00e9trico del proyecto SLOAN. Es evidente el efecto de la extinci\u00f3n.
- No est\u00e1 incluido el efecto del aluminio de los espejos del telescopio.
- El sistema est\u00e1 diseñado para el estudio de galaxias.
- En principio, el lado rojo indefinido del filtro z' es un defecto, porque obliga otras componentes locales del sistema a definirlo.

Ejemplo: WFC3 Galactic Bulge Treasury Program (HST)

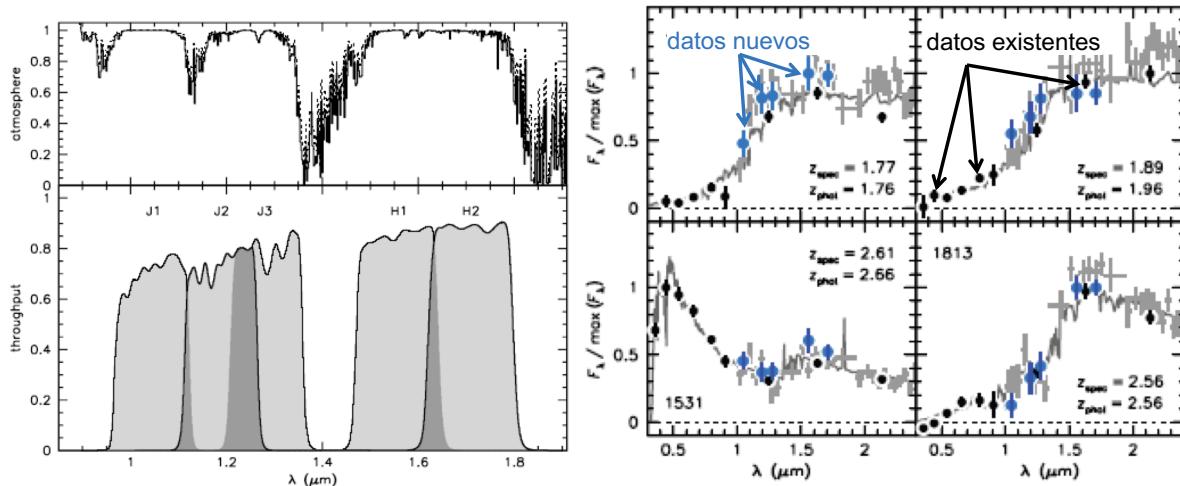
Brown et al. (2009, AJ, 137, 3172)

- Estudiar las estrellas del Bulbo de nuestra Vía Láctea.
- Desenmarañar el **enrojecimiento**, la **edad** y la **metallicidad** (ver las flechas en los diagramas HR abajo).
- Filtros anchos del WFC3 @ HST



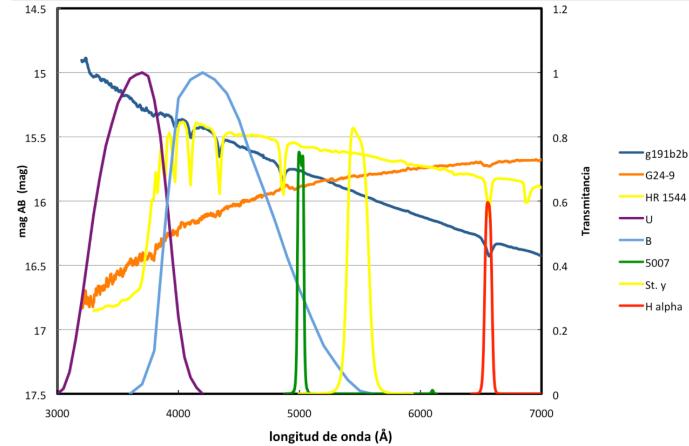
Ejemplo: The NEWFIRM Medium-band Survey (4m @ KPNO) van Dokkum et al. 2009 (PASP, 121, 2)

- Estudiar galaxias en el intervalo $1.5 < z < 3.5$.
- Calcular corrimientos al rojo fotométricos.
- Distinguir enanas “cafés”.



Calibraciones

- Una calibración precisa es fácil si hay
 - un filtro simétrico
 - un continuo estelar lineal
- Estas aproximaciones son usualmente razonables para bandas angostas ($H\alpha$ es una excepción).
- En banda ancha, ambas aproximaciones son frecuentemente inválidas en detalle.



- Como resultado, es relativamente fácil calibrar precisamente fotometría de banda angosta, pero complicado para banda ancha.

17 October 2023

Michael Richer

29

El flujo que observamos

- El flujo que medimos de una fuente en un filtro f es F_f , dado por

$$F_f = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_*(\lambda) k(\lambda) R(\lambda) T_f(\lambda) \epsilon(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda$$

- donde $\{k(\lambda), R(\lambda), T_f(\lambda), \epsilon(\lambda), \eta(\lambda)\} \leq 1.0$ y
 $F_*(\lambda)$ es el flujo intrínseco de la fuente,
 $k(\lambda)$ es la extinción atmosférica ($k(\lambda) \approx 1.0$ en el espacio),
 $R(\lambda)$ es la reflectancia del telescopio (y su área si es variable, rayos X),
 $T_f(\lambda)$ es la transmitancia del filtro (o instrumento),
 $\epsilon(\lambda)$ es la eficiencia cuántica del detector,
 $\eta(\lambda)$ representa las pérdidas debido a todas las interfaces y
 λ_1 y λ_2 son las longitudes de onda límite del filtro (o instrumento)
- Observamos una convolución del flujo intrínseco con todos los factores instrumentales.

17 October 2023

Michael Richer

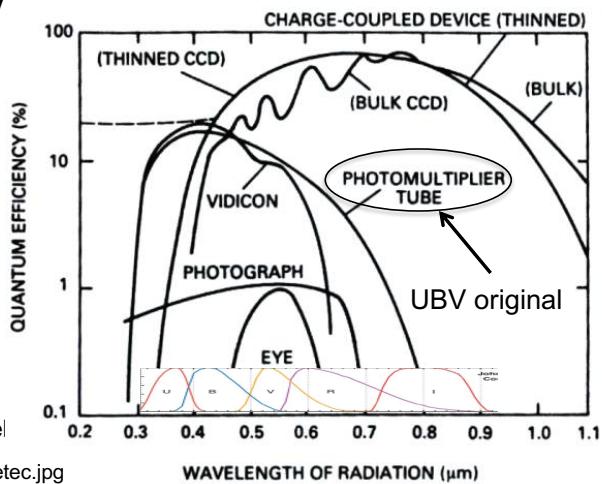
30

Calibración: banda ancha

- Generalmente, el **sistema fotométrico instrumental** consta de factores particulares de cada sitio:
 - la atmósfera
 - los filtros
 - el detector
- Un **sistema fotométrico estándar** está definido por los **factores anteriores** así como las **estrellas estándares** que se utilizaron para definir el sistema.
 - Notar que la tecnología utilizada y el sitio que dan origen a un sistema contribuyen a definir el sistema estándar. Vimos el caso del SDSS.
- Entonces, la fotometría de cualquier sitio (en cualquier sistema) tendrá que ser **transformada a un sistema estándar, usando las estrellas estándares**. De otra manera, no se puede comparar mediciones de distintos observatorios.
- La transformación es **más difícil**
 - **cuanto más anchos son los filtros** del sistema fotométrico y
 - **cuanto más distintos los intervalos espectrales**.

Calibración: banda ancha

- También se complican las transformaciones con cambios de tecnología entre el sistema estándar y el sistema instrumental:
 - Como ejemplo, se definió el sistema Johnson con fototubos sensibles en el azul, pero hoy en día las observaciones se hacen con CCDs, que tienen una respuesta mejor en el rojo.
 - Para compensar, se definieron filtros diferentes...



Calibración: banda ancha

- Las ecuaciones de transformación entre los sistemas instrumental y estándar típicamente tienen la forma:

$$m_{f,i} = m_{f,s} + a_f(\text{color})_i + k_f \chi + z_f$$

donde

los suscritos “*i*” indican el sistema instrumental,

los suscritos “*s*” el sistema estándar,

los suscritos “*f*” denotan el filtro,

color es un color relevante en el sistema instrumental, p.ej., $B - V$,

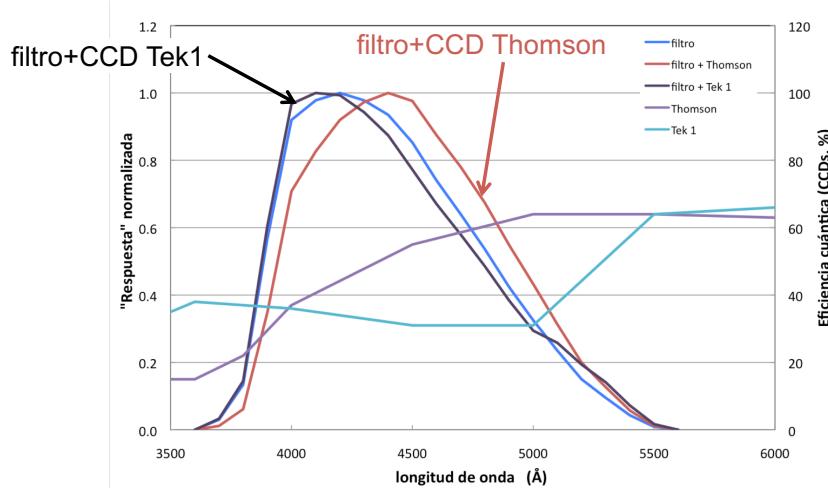
k_f el coeficiente de extinción atmosférica,

χ la masa de aire y

z_f es el punto cero (constante).

- En lo anterior, a_f es el coeficiente de transformación entre los sistemas instrumental y estándar. Este es el coeficiente del término de color.
- Obviamente, la transformación tiene que hacerse en base a las magnitudes y los colores del sistema instrumental.

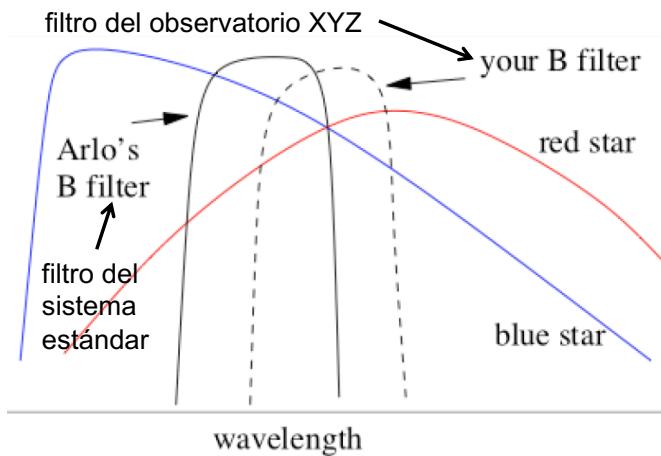
Calibración: banda ancha



- En este ejemplo, hay un filtro y dos CCDs.
- La banda espectral del filtro es modificada sustancialmente por la respuesta de los CCDs. (Las curvas de transmitancia del filtro están normalizadas al valor máximo.)
- Estas modificaciones complican la calibración precisa de fotometría de banda ancha y contribuyen al “término de color” (lámina siguiente).

Calibración: banda ancha

- Los términos de color, a_f , se deben a diferencias entre los filtros utilizados en la definición del sistema estándar y los filtros utilizados para una observación particular.
- La respuesta del sistema para la luz de una estrella roja será distinta a la respuesta para la luz de una estrella azul.
- El término de color también será afectado por la distribución de los colores de las estrellas estándares, razón para observar el mayor rango de colores posible.
- Una referencia excelente para temas de la calibración de fotometría es la dada al pie de esta lámina.



- También, es aconsejable hablar con William Schuster o Raúl Michel, expertos en el tema.

Michael Richer

35

Gráfica: http://www.ucolick.org/~bolte/AY257/ay257_2.pdf

Calibración: banda ancha

- ¿Cuál es la precisión del sistema instrumental?
 - óptico: inferior a ± 0.01 mag, particularmente para bandas intermedias
 - infrarrojo cercano: ± 0.03 mag para intervalos temporales cortos, ± 0.1 mag sobre una noche
 - infrarrojo medio: ± 0.1 mag en el mejor de los casos
- ¿Qué precisión esperar de la transformación al sistema estándar?
 - óptico: del orden de ± 0.01 mag, posiblemente mejor para bandas intermedias
 - infrarrojo cercano: aprox. ± 0.1 mag, pero puede ser peor
 - infrarrojo medio: $> \pm 0.1$ mag