I FILTRI FOTOMETRICI UBVRI DELL'AFAM

1 Premessa

Una stella emette un flusso di radiazioni elettromagnetiche che dipendono dalla sua temperatura superficiale. Queste radiazioni vengono percepite dall'occhio umano come luce visibile. La luce emessa ha un picco in una certa frequenza elettromagnetica e questo determina il colore della stella, come appare alla nostra vista.

Tuttavia, la luce emessa dalla stella ha uno spettro continuo che si estende per una notevole gamma di frequenze. La capacità di suddividere il flusso luminoso in varie bande e misurare il flusso in ciascuna banda consente di determinare la temperatura superficiale della stella e, attraverso l'analisi dei cambiamenti di intensità nel tempo, consente anche di scoprire come la stella si comporta.

Per isolare la radiazione luminosa nelle varie bande vengono usati i filtri fotometrici, ove il termine «fotometrici» indica che si tratta non di semplici filtri colorati, ma di filtri accuratamente tarati in modo che la percentuale di flusso luminoso registrato in ogni frequenza sia conforme a un certo standard prestabilito.

Esistono molti sistemi fotometrici. Il più diffuso è il sistema UBVRI di Johnson-Cousins, detto «sistema standard», composto da filtri che suddividono la luce in cinque bande (Ultravioletto, Blu e Visuale di Johnson-Cousins, Rosso e Infrarosso di Cousins, spesso identificati con le sigle Uj, Bj, Vj, Rc e Ic per distinguerli da altri filtri che agiscono su bande simili, ma con caratteristiche diverse.

E' chiaro che, per ottenere misure che siano confrontabili tra di loro, tutti gli osservatori dovrebbero disporre di strumenti e filtri identici e uguali a quelli usati dai primi osservatori che hanno registrato la luce emessa nelle varie bande dalle stelle catalogate, il che non è possibile. Al momento, le misurazioni vengono effettuate con macchine fotografiche ad accoppiamento di carica o CCD, servendosi di filtri costruiti in modo da far passare per quanto possibile la stessa percentuale di luce alle varie frequenze (trasmittanza) che passerebbe con i filtri standard.

Vi sono molti produttori di filtri UBVRI, ma non tutti i filtri prodotti si conformano bene a quelli standard di Johnson e Cousins. Poiché quanto più la trasmittanza di un filtro fotometrico si allontana da quella Johnson-Cousins, tanto più difficile è ricondurre le misure effettuate a quelle standard, diventa importante scegliere filtri che si avvicinino quanto più possibile allo standard. Le curve di trasmittanza del sistema Johnson-Cousins sono state ricostruite da Bessel¹ e sono mostrate in Fig. 1.1. In Appendice 1 è riprodotta la tabella contenuta nell'articolo di Bessel.



Figura 1.1:

Si noti però che le curve mostrate sono state tutte normalizzate in modo che il picco di ciascuna curva raggiunga il 100%. In realtà, se le curve fossero mostrate con la trasmittanza relativa, la loro altezza sarebbe diversa, con le curve Uj e Bj che raggiungono una trasmittanza attorno al 70-80%, la Vj che arriva al 90-95% etc.

2 I filtri in uso presso l'AFAM

L'AFAM ha acquistato nel 2018 una serie di filtri standard UBVRI prodotti dalla Baader-Planetarium.

Si tratta di filtri molto recenti, di cui la società produttrice proclama che aderiscono strettamente alle specifiche di trasmittanza di Johnson/Bessel.

¹M.S. Bessel, «UBVRI Passbands», Astronomical Society of the Pacific, Oct. 1990)

Questi filtri, del diametro di 31,8 mm (1,25"), di 4 mm di spessore, inseriti in un anello con filettatura («camicia»), sono stati scelti in quanto sono abbastanza sottili da poter essere avvitati nelle ruote portafiltri senza bisogno di essere scamiciati e hanno un prezzo relativamente basso (170 euro ciascuno al momento dell'acquisto). I filtri sono costituiti da una combinazione di dischi di vetro per filtrare la banda passante e ogni disco è rivestito con uno strato dielettrico per assicurare l'assenza di riflessi.

Le curve di trasmittanza dichiarate dalla Baader-Planetarium sono riportate in Fig. 2.1. Benché ci siano alcune differenze, come si può vedere le caratteristiche dichiarate si conformano abbastanza bene a quelle dei filtri Johnson-Cousins.



Figura 2.1:

Per esaminare le caratteristiche reali dei nostri filtri, il 17 agosto abbiamo portato i filtri a Forlì, ove il Stefano Moretti dell'Asiago Novae and Symbiotic Collaboration, che ringraziamo, ne ha misurato le caratteristiche. Le misure sono state effettuate nelle lunghezze d'onda da 200 a 1100 nm con passo di 1 nm.

I nostri dati sono stati confrontati con quelli dei filtri UBV di Johnson-Cousins, secondo l'approssimazione di Bessel, come riportati nella Tabella 2 dell'articolo citato (Appendice 1).

Una tabella simile, ma relativa ai filtri dell'AFAM, è invece riportata in Appendice 2. La tabella riporta anche le caratteristiche del filtro H-alfa, che non è un filtro fotometrico, ma di cui comunque disponiamo e che è stato anch'esso misurato.

3 Comparazione

Le curve ottenute per i filtri UBVRI e H-alfa dell'AFAM sono riportate nella figura seguente².



Figura 3.1:

I filtri mostrano una rimarchevole corrispondenza con la curva dichiarata dalla Baader-Planetarium, indice di una apprezzabile precisione nella lavorazione, dato che quest'ultima deve essere intesa come una curva «media» e ogni filtro può avere piccole variazioni statistiche.

Si noti la leggera contaminazione nel filtro I oltre i 1000 nm, peraltro visibile anche nella curva ufficiale della Baader-Planetarium.

Degna di nota è anche la maggiore trasmissibilità massima del filtro U rispetto a quanto mostrato nella curva ufficiale della Baader-Planetarium (in altre parole, abbiamo un filtro U un po' più efficiente di quanto previsto).

 $^{^2{\}rm I}$ colori delle curve, poco intuitivi, sono stati scelti in modo da corrispondere a quelli dell'immagine della Baader-Planetarium.

In ogni caso, ciò che conta è la corrispondenza con le curve dei filtri «standard» come definite da Bessel, che è mostrata nella figura successiva. La doppia curva in B è dovuta al fatto che Bessel definisce due curve di trasmissione in questo filtro, usate per scopi diversi³.



Figura 3.2:

Come si vede dal grafico, la corrispondenza c'è, anche se non è perfetta.

Curve di questo tipo sono caratterizzate dalla frequenza di picco (λ_{peak}) , cui corrisponde il massimo della trasmissibilità, e dalla larghezza della curva nel punto di altezza media (FWHM :«Full Width, Half Maximum»). Anche a un'ispezione visuale appare che le frequenze di picco dei due gruppi sono molto vicine, mentre le FWHM differiscono, in particolare nei filtri B e V.

Le frequenze di picco e le FWHM dei filtri Baader-Planetarium dell'AFAM e dell'approssimazione di Bessel sono stati calcolati analiticamente⁴, con i risultati mostrati nella tabella seguente (tutti i valori in nm):

 $^{^{3}}$ Le curve UX e BX vengono usate per calcolare il colore (U - B) standard, mentre la curva B viene usata per gli altri colori

⁴Per le immagini e il trattamento dei dati è stato usato il programma statistico R. Per quanto riguarda i calcoli successivamente effettuati sulle curve, i dati numerici sono stati smussati e interpolati con spline.

Filtro	picco (%)	λ_{peak}	$ \Delta\lambda_{peak} $	FWHM	$ \Delta FWHM $
Bessel_UjX	69.2730	370	2	65.3	5.8(8.9%)
AFAM_Uj	69.2706	368	-	59.5	-
Bessel_BjX	68.5420	420	0	98.1	18 (18%)
Bessel_Bj	68.542	420	0	94.9	14.8 (16%)
AFAM_Bj	67.6313	420	-	80.1	_
Bessel_Vj	90.364	530	6	85.3	33.3(39%)
AFAM_Vj	90.3456	524	-	118.6	-
Bessel_Rc	82.8260	600	9	156.7	12.4 (8%)
AFAM_Rc	82.8429	591	-	144.3	-
Bessel_Ic	94.743	800	35	154.5	9.5~(6%)
AFAM_Ic	94.7219	835	-	164	-



4 Conclusioni

Abbiamo confrontato le curve di trasmittanza dei filtri fotometrici UBVRI Baader-Planetarium in possesso dell'AFAM con l'approssimazione di Bessel dei filtri Johnson-Cousins, che rappresentano lo standard più diffuso per le misurazioni in fotometria.

Piuttosto che confrontare i valori di λ_{peak} e FWHM dei nostri filtri con i corrispondenti valori pubblicati, si è preferito ricavare i valori di riferimento direttamente dalle curve pubblicate da Bessel nell'articolo citato, in quanto in pratica i valori pubblicati nella letteratura scientifica differiscono a seconda dei filtri usati dall'autore. Ad esempio, Wikipedia, che è probabilmente la fonte di riferimento più attuale, riporta i valori indicati nell'Appendice 3.

Nel complesso, la differenza nella *frequenza di picco* tra i filtri dell'AFAM e l'approssimazione di Bessel appare contenuta, con l'eccezione del filtro I. Un po' più rilevanti le differenze in FWHM, soprattutto nei filtri più usati, cioè il V e il B.

Si pone pertanto il problema di valutare quanto queste differenze influenzino le prestazioni del nostro sistema.

Nella pratica, nessun sistema ottico (telescopio+filtri+CCD) è perfettamente aderente al sistema standard e, per ogni sistema, per riportare le misurazioni a quelle standard UBVRI vengono calcolati dei coefficienti di trasformazione.

Nel caso dell'AFAM, due anni di uso dei filtri con la precedente CCD⁵ hanno dimostrato una buona aderenza al sistema standard, con coefficienti di trasformazione molto poco influenti, tanto che nella maggior parte dei casi i dati che forniamo non vengono ridotti al sistema standard. In pratica, la presenza di variazioni anche sensibili dei nostri filtri rispetto all'approssimazione di Bessel non sembra influire in maniera determinante sulle misurazioni.

 $^{^5 \}mathrm{Una}$ FLI 1001E.

Appendice 1

Tabella delle curve normalizzate secondo l'approssimazione di Bessel alle bande UBVRI di Johnson-Cousins $^{6}.$

λ	UX	λ	BX	В	λ	V	λ	R	λ	Ι
300	0.000	360	0.000	0.000	470	0.000	550	0.00	700	0.000
305	0.016	370	0.026	0.030	480	0.030	560	0.23	710	0.024
310	0.068	380	0.120	0.134	490	0.163	570	0.74	720	0.232
315	0.167	390	0.523	0.567	500	0.458	580	0.91	730	0.555
320	0.287	400	0.875	0.920	510	0.780	590	0.98	740	0.785
325	0.423	410	0.956	0.978	520	0.967	600	1.00	750	0.910
330	0.560	420	1.000	1.000	530	1.000	610	0.98	760	0.965
335	0.673	430	0.998	0.978	540	0.973	620	0.96	770	0.985
340	0.772	440	0.972	0.935	550	0.898	630	0.93	780	0.990
345	0.841	450	0.901	0.853	560	0.792	640	0.90	790	1.000
350	0.905	460	0.793	0.740	570	0.684	650	0.86	800	1.000
355	0.943	470	0.694	0.640	580	0.574	660	0.81	810	1.000
360	0.981	480	0.587	0.536	590	0.461	670	0.78	820	0.990
365	0.993	490	0.470	0.424	600	0.359	680	0.72	830	0.980
370	1.000	500	0.362	0.325	610	0.270	690	0.67	840	0.950
375	0.989	510	0.263	0.235	620	0.197	700	0.61	850	0.910
380	0.916	520	0.169	0.150	630	0.135	710	0.56	860	0.860
385	0.804	530	0.107	0.095	640	0.081	720	0.51	870	0.750
390	0.625	540	0.049	0.043	650	0.045	730	0.46	880	0.560
395	0.423	550	0.010	0.009	660	0.025	740	0.40	890	0.330
400	0.238	560	0.000	0.000	670	0.017	750	0.35	900	0.150
405	0.114				680	0.013	800	0.14	910	0.030
410	0.051				690	0.009	850	0.03	920	0.000
415	0.019				700	0.000	900	0.00		
420	0.000									

Tabella 2:

 $^{^6\}mathrm{M.S.}$ Bessel, «UBVRI Passbands», Astronomical Society of the Pacific, Oct. 1990)

Appendice 2

Dati delle curve dei filtri UBVRI e H-alfa tipo Baader-Planetarium dell'AFAM, misurati il 27 agosto 2020.

λ	UX	λ	BX	λ	V	λ	R	λ	Ι	λ	H-alfa
300	0.000	360	0.000	470	0.001	550	0.007	700	0.060	635	0.001
305	0.000	370	0.028	480	0.123	560	0.143	710	0.256	640	0.003
310	0.002	380	0.203	490	0.555	570	0.521	720	0.559	642	0.005
315	0.014	390	0.440	500	0.803	580	0.741	730	0.764	644	0.009
320	0.064	400	0.546	510	0.882	590	0.828	740	0.857	646	0.020
325	0.155	410	0.659	520	0.902	600	0.814	750	0.905	648	0.050
330	0.269	420	0.684	530	0.901	610	0.808	760	0.922	650	0.146
335	0.386	430	0.645	540	0.885	620	0.786	770	0.956	652	0.408
340	0.480	440	0.600	550	0.857	630	0.758	780	0.943	654	0.686
345	0.553	450	0.519	560	0.811	640	0.706	790	0.940	655	0.774
350	0.607	460	0.407	570	0.752	650	0.682	800	0.944	656	0.842
355	0.645	470	0.271	580	0.680	660	0.647	810	0.946	657	0.834
360	0.674	480	0.151	590	0.588	670	0.603	820	0.941	658	0.677
365	0.690	490	0.070	600	0.506	680	0.565	830	0.945	659	0.438
370	0.692	500	0.003	610	0.417	690	0.509	840	0.944	660	0.137
375	0.678	510	0.000	620	0.332	700	0.462	850	0.936	661	0.137
380	0.639	520	0.000	630	0.254	710	0.421	860	0.944	662	0.080
385	0.555	530	0.000	640	0.189	720	0.373	870	0.885	663	0.048
390	0.428	540	0.000	650	0.136	730	0.330	880	0.573	664	0.031
395	0.277	550	0.000	660	0.095	740	0.290	890	0.052	665	0.021
400	0.146	560	0.000	670	0.064	750	0.245	900	0.007	666	0.015
405	0.060			680	0.042	800	0.096	910	0.002	667	0.011
410	0.019			690	0.027	850	0.001	920	0.001	668	0.008
415	0.005			700	0.017	900	0.000			672	0.003
420	0.001			710	0.010					675	0.002
425	0.000			720	0.006					680	0.001

Tabella 3:

Le misurazioni in ogni filtro sono state effettuate da Stefano Moretti con un passo di 1 nm. Per conformità, la tabella riporta i valori corrispondenti alle lunghezze d'onda fornite da Bessel e riportate nella tabella precedente, ma tutti i calcoli e le immagini nel testo sono state ottenute con l'intero insieme delle misure.

Appendice 3

Confronto tra i valori di frequenza di picco e FWHM dell'AFAM, secondo l'approssimazione di Bessel e secondo Wikipedia.

Nelle tabelle è riportato anche lo scostamento dei filtri dell'AFAM con l'approssimazione di Bessel e con i dati forniti da Wikipedia e, per la FWHM, anche la percentuale dello scostamento.

Nel complesso, a parte il filtro I, le *frequenze di picco* dei filtri AFAM sono più aderenti all'approssimazione di Bessel di quanto lo siano i dati di Wikipedia, mentre lo scostamento in percentuale della FWHM favorisce i nostri filtri solo nelle bande U e I, è paragonabile a quello di Wikipedia nelle bande B e V ed è superiore, ma comunque numericamente esiguo, nella banda R.

frequenza di picco	U	$ \Delta U $	В	$ \Delta B $	V	$ \Delta V $	R	$ \Delta R $	Ι	$ \Delta I $
AFAM	368	-	420	-	524	-	591	-	835	-
Approx Bessel	370	2	420	0	530	6	600	9	800	35
Wikipedia	365	3	445	25	551	27	658	67	806	29

FWHM	U	$ \Delta U $	В	$ \Delta B $	V	$ \Delta V $	R	$ \Delta R $	Ι	$ \Delta I $
AFAM	59.5	-	80.1	-	118.6	-	144.3	-	164	-
Apx Bessel	65.3	5.8 (10%)	94.9	14.8 (18%)	85.3	33.3~(28%)	156.7	12.4 (9%)	154.5	9.5~(6%)
Wikipedia	66.0	6.5(10%)	94.0	13.9 (17%)	88.0	30.6~(26%)	138.0	6.3 (4%)	149.0	15 (9%)

Figura 4.1: