

TUTTI I COLORI DEL CIELO

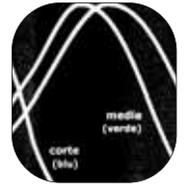
Quale è il colore “vero” degli oggetti astronomici?

Abstract

In this paper the origin of the possible discrepancies between the “true” colour of astronomical objects - as would ideally be seen with the naked eye - and their chromatic representation in astronomical photos is briefly studied.

To this end, the techniques used to make colour pictures of the astronomical sources and the main physiological mechanisms underlying the perception of colour are analysed.

The analysis allows to establish some criteria to identify and separate instrumental, subjective and objective components in astronomical photos, and therefore to discriminate between the aesthetic and scientific contents from the chromatic point of view.



Enrico Bernieri

INFN, Sezione di Roma Tre
bernieri@Inf.infn.it

Introduzione

La diffusione dei CCD ha portato a un grande sviluppo della fotografia astronomica, sia professionale sia amatoriale. Spettacolari foto astronomiche a colori costellano ormai i siti Web, i libri e le riviste di astronomia, e viene spesso da chiedersi se quei colori siano “veri”, se la loro funzione sia solo “cosmetica” o ancora se, in alcuni casi, abbia valenza scientifica.

Ogni tipo di *imaging* comporta l'applicazione di una funzione di trasferimento $T(\lambda)$ – dipendente dalla lunghezza d'onda λ – alla distribuzione d'intensità $S(\lambda)$ emessa da ogni punto della sorgente. L'intensità effettivamente osservata $I(\lambda)$ è data da:

$$I(\lambda) = T(\lambda) S(\lambda)$$

Nella funzione di trasferimento sono contenuti tutti i passaggi che agiscono sulla luce emessa dalla sorgente.

Nel caso astronomico, a esempio, in $T(\lambda)$ sono contenuti gli effetti dell'ottica del telescopio, delle risposte del sensore, dello sviluppo digitale e della resa cromatica del monitor o della carta nel caso della stampa – trascurando per semplicità gli effetti del mezzo interstellare, dell'atmosfera, etc.

La funzione di trasferimento è ovviamente presente anche nel caso della fotografia tradizionale di soggetti terrestri. A causa del fatto che $T(\lambda)$ non è mai uguale a 1, anche una foto terrestre non rappresenta mai esattamente, dal punto di vista cromatico, l'oggetto fotografato.

È ben noto che una immagine può risultare più “fredda” o più “calda”, più o meno satura, etc., a seconda del tipo di sensore utilizzato (pellicola o CCD), della resa cromatica in fase di stampa

o di visualizzazione sul monitor e dell'azione dello sviluppo (chimico o digitale) in cui una componente soggettiva è sempre presente. Tuttavia, avendo tutti esperienza di soggetti dal vivo possiamo, agendo sul processo, fare in modo che $T(\lambda)$ si avvicini a 1 il più possibile o comunque capire, nella maggior parte dei casi, quando e quanto ci stiamo allontanando da questa situazione.

Nel caso di soggetti astronomici la cosa è complicata dal fatto che non abbiamo quasi mai la possibilità di vederli “dal vivo” e quindi di effettuare un confronto. Inoltre, molto spesso, molta dell'informazione che ci proviene da tali soggetti e che viene registrata nelle immagini, appartiene a intervalli spettrali in cui l'occhio è poco o per niente sensibile.

La retina e il CCD

Se confrontiamo (Fig.1) le curve di sensibilità spettrale della retina e quella tipica di un CCD, espressa dalla sua Efficienza Quantica, notiamo come quest'ultima sia fortemente allargata nel rosso e nell'infrarosso dove l'occhio umano

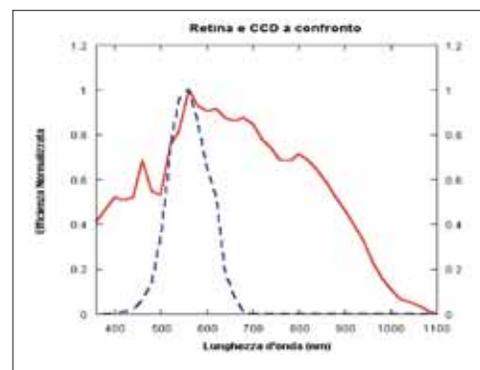
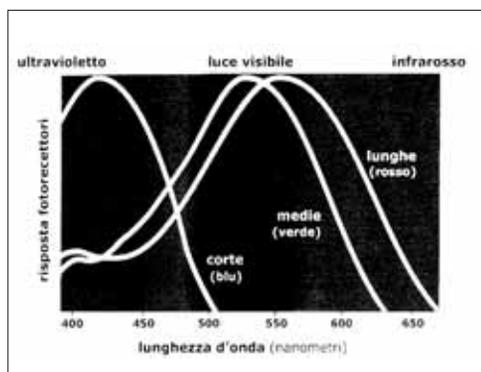


Figura 1. Confronto tra l'andamento dell'efficienza quantica di un CCD (Kodak KAF 4320) – linea continua – e dell'efficienza di risposta alla luminosità per la visione fotopica (coni) dell'occhio umano – linea tratteggiata – [1]. Entrambe le curve sono normalizzate sui rispettivi valori massimi. In valore assoluto le due efficienze sono molto diverse [2].



Figura 2. Curve di risposta dei tre tipi di coni alle lunghezze d'onda della luce visibile [3]



no non è sensibile.

Per ottenere un migliore adattamento con la sensibilità della retina – e quindi immagini più fedeli al vero – nelle macchine fotografiche digitali il CCD è schermato da un filtro che non lascia passare l'infrarosso.

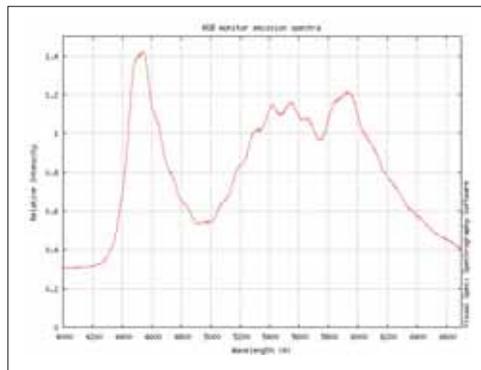
Per quanto riguarda l'aspetto cromatico, quello che chiamiamo "colore" è una complessa risposta del sistema nervoso a uno stimolo luminoso.

Nell'intervallo spettrale visibile – cioè per lunghezze d'onda comprese tra circa 400 nm e 700 nm – è possibile associare univocamente un colore a una lunghezza d'onda. A esempio, alla lunghezza d'onda di 580 nm corrisponde la percezione del colore giallo.

Ma noi vediamo "giallo" anche se la nostra retina è colpita contemporaneamente da onde elettromagnetiche la cui lunghezza d'onda corrisponde al verde e al rosso. E così avviene per tutti i colori, che possono essere dovuti sia a una singola lunghezza d'onda sia a un'opportuna composizione di altre lunghezze d'onda.

Tutti i colori – percepiti – possono essere prodotti in questo modo per *mescolanza additiva* di alcuni colori base. Tale meccanismo è anche alla base della nota tecnica fotografica RGB (*Red-Green-Blue*) in cui un'immagine a colori viene ottenuta sommando opportunamente questi tre canali di colore.

Figura 3. Somma degli spettri di emissione dei canali Blu (B), Verde (G) e Rosso (R) di un monitor. Intensità normalizzata. Spettri acquisiti con spettroscopio DADOS (Baader) e camera SBIG ST-7 (reticolo da 200 l/mm, dispersione 0.36 nm/pixel).



A livello di produzione dell'immagine, nelle macchine fotografiche digitali, il CCD è ricoperto da un opportuno pattern di filtri colorati RGB (matrice di Bayer) che individuano tre sottoinsiemi di pixel opportunamente distribuiti che vengono rispettivamente illuminati solo nel verde, nel rosso e nel blu.

Tenendo conto della trasmissione di ogni tipo di filtro e della sensibilità spettrale media della retina, il *software* ricostruisce cromaticamente l'immagine, o in maniera automatica (a esempio nel formato *jpg*) o attraverso un bilanciamento manuale (a partire da un file *raw*).

In fase di visualizzazione, se si osserva molto da vicino uno schermo televisivo o un monitor si può osservare che non contiene altro che un gran numero di puntini luminosi rossi, verdi e blu. Alla distanza dalla quale guardiamo normalmente la televisione questi puntini sono troppo piccoli per essere distinti l'uno dall'altro e quindi vengono fusi insieme dal nostro occhio. A seconda dell'intensità di ciascun colore di base noi percepiamo un colore diverso. In questo modo vengono prodotte tutte le tonalità di colore.

In questa fase è importante che l'emissione del monitor nei tre colori base (RGB) sia la più vicina possibile alla sensibilità spettrale della retina.

Nella retina, oltre ai bastoncelli, che sono le cellule più sensibili alla luce ma non sono sensibili al colore, esistono tre tipi di altre cellule, i coni, ognuno sensibile a un certo intervallo spettrale. Ci sono i coni del blu (che danno una risposta massima a circa 440 nm), quelli del verde (risposta massima a circa 530 nm) e quelli del rosso, che in realtà sono più sensibili al giallo e poco sensibili al rosso (risposta massima a circa 560 nm). La risposta spettrale dei tre tipi di coni è riportata in figura 2. Il rapporto tra il numero di coni del blu, del verde e del rosso sulla retina è circa 1:5:10. Ciò comporta una limitata sensibilità nel blu. L'occhio umano ha infatti il massimo della sua sensibilità a circa 560 nm, dove è all'incirca il massimo della emissione solare (sotto l'atmosfera) [3].

Per fornire colori il più possibile fedeli, i monitor dei computer e gli schermi televisivi, se opportunamente calibrati, sono realizzati in modo che la loro emissione si adatti il meglio possibile alla risposta dei fotorecettori della retina.

Abbiamo verificato sperimentalmente questo fatto misurando l'emissione di alcuni monitor per ciascuno dei tre colori base, ottenendo sempre uno spettro simile a quello riportato in figura 3 per un

particolare monitor, che mostra una buona corrispondenza con la sensibilità spettrale dell'occhio mostrata in figura 2. I picchi nelle tre bande di colore sono in buona corrispondenza con i massimi di risposta dei rispettivi coni (circa 450 nm nel Blu, 550 nm nel Verde e 590 nm nel Rosso).

In definitiva, nella fotografia digitale tradizionale, tutto "complotta" per fare in modo che la funzione di trasferimento $T(\lambda)$ si avvicini a 1. Ovviamente la componente soggettiva e artistica del fotografo può agire fortemente su questa funzione soprattutto nella fase di sviluppo digitale fino ad arrivare ad immagini fortemente e volutamente diverse cromaticamente (e non solo) dal soggetto fotografato.

Astrofotografia a colori con CCD

Nel caso dell'*imaging* astronomico lo scopo, in genere, non è quello di ottenere una rappresentazione cromaticamente fedele dell'oggetto, ma di raccogliere quanta più informazione possibile. Ciò ormai viene fatto in ampi intervalli spettrali che comprendono, oltre la luce visibile, l'infrarosso, l'ultravioletto, le onde radio, i raggi X e γ .

In questi intervalli spettrali, dove l'occhio umano (e spesso anche il CCD) non è sensibile, la rappresentazione visiva è necessariamente di natura convenzionale e utilizzata solo per visualizzare più facilmente i livelli d'intensità.

Poiché l'occhio è molto più sensibile alle variazioni di colore e delle sue sfumature che ai toni di grigio, spesso queste rappresentazioni sono a colori, e ormai capita molto di frequente di vedere immagini in "falsi colori" dell'emissione di sorgenti astronomiche in intervalli spettrali non visibili.

La fotografia astronomica amatoriale, e spesso anche quella professionale quando ha scopi illustrativi e "scenografici", si colloca in una situazione di compromesso in cui, da una parte, si cerca di restare vicini alla situazione "reale" di come gli oggetti si presentano - o si presenterebbero - nel visibile, dall'altra, si cerca di sfruttare al meglio le caratteristiche di efficienza quantica dei CCD per "sprecare" meno segnale possibile.

La classica fotografia astronomica a colori utilizza la tecnica RGB - o sue varianti - [4] in cui il CCD viene esposto in successione attraverso filtri con diverse bande spettrali di trasmissione.

La banda passante di questi filtri non è standard, dipende dalle case produttrici, ma in ogni

caso è sufficientemente ottimizzata per adattarsi il meglio possibile all'andamento dell'efficienza quantica dei CCD.

La figura 4 mostra la banda passante dei filtri RGB di due note case produttrici.

Come si vede le bande passanti non sono esattamente le stesse e in genere sono ottimizzate per particolari classi di sensori CCD.

In ogni caso, se si confronta la figura 4 con la figura 3 si nota che i canali di acquisizione del colore sono in genere *diversi* da quelli di visualizzazione sui monitor.

Rispetto alle bande dei canali di visualizzazione la trasmissione dei filtri è allargata nel blu e, in maniera molto più accentuata, nel rosso. Il motivo è chiaro: in questo modo si sfrutta l'estesa efficienza quantica del CCD, soprattutto nel rosso e si raccoglie bene l'emissione Ha dell'idrogeno, a 656 nm, tipica delle nebulose a emissione.

Complessivamente questo comporta una accentuazione "artefatta" del colore rosso in quanto il canale di visualizzazione del rosso "riceve" segnale da un canale di acquisizione del rosso spostato verso lunghezze d'onda dove la sensibilità dell'occhio è molto scarsa o nulla.

In parte questo avviene anche sul lato blu dello spettro, ma in maniera meno accentuata a causa della minore efficienza quantica del CCD nel blu rispetto al rosso.

Questo effetto è ancora più marcato quando per la ripresa del canale rosso si usano filtri a banda stretta, come i classici H α o SII (a 672 nm). In questo caso, una stretta banda di segnale, a cui l'occhio è pochissimo sensibile, viene spostata

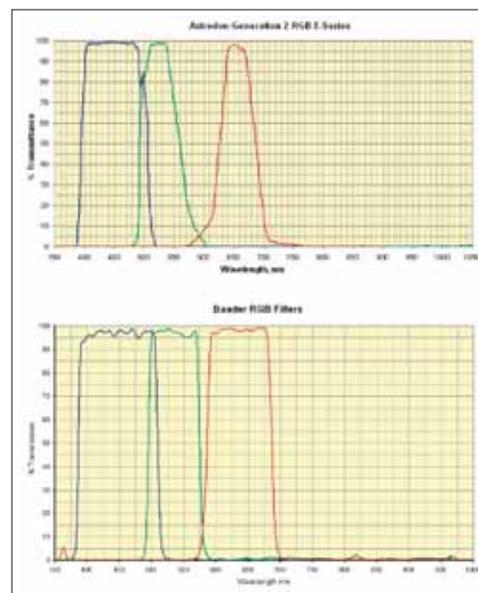


Figura 4. Trasmissione di filtri RGB di due note case produttrici di filtri interferenziali.

verso lunghezze d'onda minori e distribuita nel più ampio canale di emissione R del monitor.

È evidente che la discrepanza dipende molto dal soggetto fotografato.

Nel caso in cui la tecnica RGB (o LRGB) viene applicata a galassie o a stelle in cui l'emissione nel rosso o nell'infrarosso non è dominante (a esempio per stelle appartenenti alle prime classi spettrali), la discrepanza può essere minima.

Ma nel caso contrario, tipico a esempio delle nebulose a emissione che costituiscono il soggetto di alcune tra le più spettacolari foto astronomiche, la situazione è molto diversa.

Per questi soggetti numerosi astrofotografi hanno sviluppato sofisticate tecniche di sviluppo digitale [5] che si basano sull'enfatizzazione del canale H α usato insieme o in sostituzione del canale R e/o in luminanza.

Queste tecniche mirano soprattutto a trasferire nell'immagine l'informazione dominante presente nell'emissione di questi soggetti e facilmente raccolta dal CCD a causa dell'efficienza quantica particolarmente grande in questa regione spettrale, e a produrre immagini indubbiamente molto accattivanti dal punto di vista cromatico.

Tuttavia, considerando che l'occhio umano è quasi cieco nell'H α , tutte queste fotografie vanno considerate, in maniera maggiore o minore, come immagini a "falsi colori".

Il problema della "fedeltà" dei colori è stato sicuramente preso in considerazione da molti astrofotografi e sono state sviluppate tecniche in tal senso, basate soprattutto sul colore delle stelle [6]. Tuttavia queste tecniche si applicano soprattutto nella situazione "classica" RGB e non agiscono sull'informazione contenuta nel canale di luminanza che spesso domina il contenuto di segnale dell'immagine.

Inoltre, è spesso invalso l'uso di una elaborazione separata delle stelle [7], per cui il bilan-

ciamento cromatico agisce solo su queste e non sul resto dell'immagine.

Conclusioni: contenuti estetici e scientifici

L'uso dei falsi colori non inficia necessariamente il contenuto informativo delle immagini. Anzi, nella maggior parte dei casi, sia quando si utilizza una tavolozza convenzionale per visualizzare dati registrati in bande spettrali non visibili, sia quando si usano tecniche *narrow band* per visualizzare l'emissione di particolari elementi (come a esempio, O, H, S, etc.), permette di cogliere meglio il complessivo contenuto fisico dell'immagine.

Altro discorso vale per tutte le operazioni di *stretching* non lineare e di *sharpening* delle immagini, la cui analisi esula comunque dagli scopi di questo lavoro.

In ogni caso, la fotografia astronomica a colori fatta mediante l'uso dei filtri (a banda larga o stretta) le cui bande di trasmissione non corrispondono spettralmente alle bande di emissione dei monitor o degli schermi (o alle bande di riflessione dei pigmenti utilizzati in fase di stampa) introduce necessariamente delle alterazioni cromatiche,

In particolare, soprattutto per alcune classi di oggetti come le nebulose a emissione, le fotografie astronomiche a colori sono degli "artefatti" nel senso letterale di questo termine. Cioè opere che contengono un contenuto artistico in cui sta alla soggettività, alla creatività e al gusto del fotografo, enfatizzare opportunamente l'informazione contenuta nel segnale raccolto.

La figura 5 mostra, a titolo di esempio, un confronto che illustra come lo stesso soggetto possa essere reso in maniera cromaticamente assai diversa. Quale di queste tre immagini è più "vera" dal punto di vista cromatico? Se si analizza

Figura 5. M42 in tre diverse versioni cromatiche. A sinistra, foto di Russell Croman. Al centro e a destra, foto di Robert Gendler.



lo spettro di queste immagini al monitor, come illustrato in figura 6, si osserva che questo spettro è soggetto a diverse interpretazioni da parte degli astrofotografi. E in ogni caso è molto diverso dallo spettro originale, riportato in basso nella figura, nel quale sono presenti, in modo prevalente, solo le strette righe di emissione dell'idrogeno e dell'ossigeno.

Il contenuto estetico di una immagine non è quantificabile e quindi scientificamente definibile. Dipende, tra le altre cose, dalle tecniche dominanti in quel periodo storico, dallo stile dei fotografi di maggior "talento" operanti in quel periodo, dalle mode che abitano l'occhio e modellano il gusto e, infine da un margine – sempre auspicabile! – di preferenze soggettive.

Ovviamente, quello che una foto astronomica ben fatta dovrebbe conservare e opportunamente evidenziare sono le informazioni sui contenuti morfologici e strutturali del soggetto. E spesso una foto esteticamente ben riuscita è anche quella che rende nella maniera più efficace questi contenuti.

BIBLIOGRAFIA

[1] Shevell S.K., (a cura di), *The Science of Color*, Elsevier, Boston, p. 44-45, 91 (dati CIE), 2003.
 [2] Howell S.B., *Handbook of CCD Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 38, 2006.
 [3] Bressan P., *Il Colore della Luna*, Laterza, Bari, p. 68, 2007.
 [4] Wodaski R., *The New CCD Astronomy*, New Astronomy Press, cap. 7, 2002.
 [5] vedi in particolare:
<http://www.robgendlerastropics.com>,
<http://www.rc-astro.com>
 [6] vedi, ad esempio:
<http://astrofotografia.uai.it/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=19>
 [7] <http://astrofotografia.uai.it/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=26>.

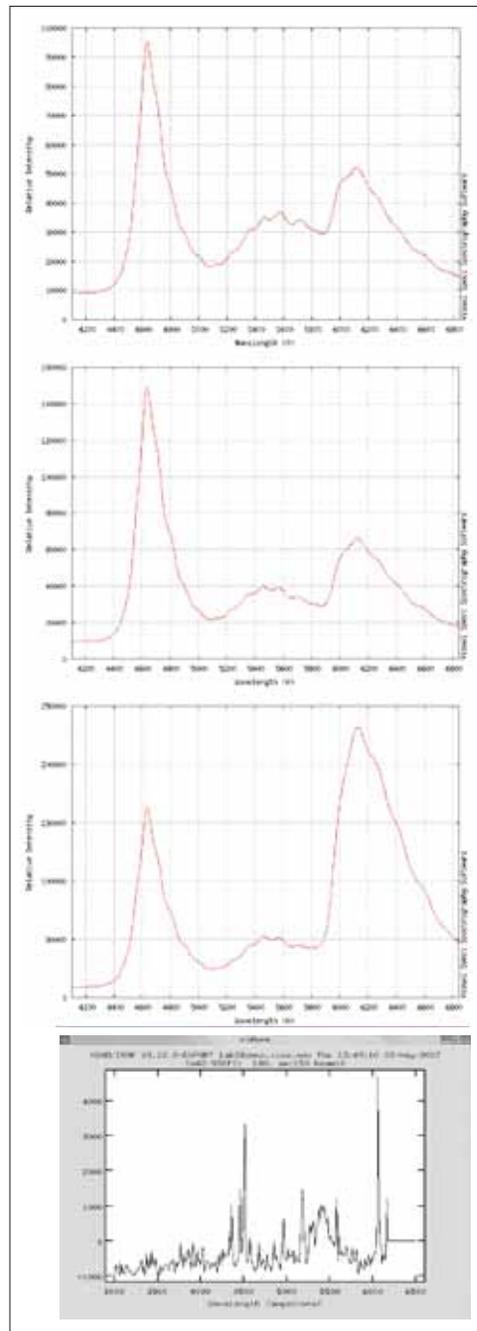


Figura 6. Spettri della rappresentazione su monitor delle tre foto di figura 5 e spettro reale della nebulosa di Orione (spettro non calibrato in lunghezza d'onda). Oltre alle righe di emissione della nebulosa sono presenti le righe dovute all'inquinamento luminoso.