



Fragment d'IC 1805, també coneguda com Nebulosa del Cor. Situada en la constel·lació de Cassiopeia, s'hi pot veure, gràcies als filtres  $H\alpha$ , la ionització produïda pels estels joves.

# ELS COLORS DE L'UNIVERS

## UNA APROXIMACIÓ A LA FOTOGRAFIA ASTRONÒMICA

Fernando Ballesteros i Alberto Fernández Soto

La immensa majoria del que sabem de l'univers ho hem après estudiant la llum provinent d'objectes increïblement llunyans. La llum no és més que una ona electromagnètica (una oscil·lació en els camps elèctrics i magnètics que es propaguen per l'espai). Quan aquestes ones incideixen en les nostres retines, només si oscil·len a un ritme d'entre 400 i 780 bilions de vegades per segon seran capaces de produir un senyal en els nostres cons i bastons que arribarà fins al nostre cervell fent-nos «veure». Per això, d'aquest rang de freqüències en diem «espectre visible» (figura 1). Dins d'aquests valors, cada freqüència produeix una sensació distinta: per exemple, la llum vibrant entre 400 i 460 bilions de vegades per segon ens provoca la sensació de «roig», pel fet que afecta exclusivament un dels tres tipus de cons de la nostra retina (els de tipus R), que envien senyals al nostre còrtex visual per a produir la sensació ja mencionada.

Cada freqüència de l'espectre visible correspon a un color, però aquests colors no existeixen en el món exterior: els produeix el cervell. A partir dels tres tipus de cons en la nostra retina (R, G i B, per *red*, *green* i *blue*) i de les relacions entre els seus senyals en el còrtex visual, construïm els colors: una ona constituïda per una freqüència pura que estiga a mitjan camí entre el roig i el verd, i que excite d'igual manera els cons

tipus R i tipus G, produirà la sensació de groc, ja que en l'àlgebra del color,  $R + G = Y$  (*yellow*, és a dir, "groc"). Igualment, dues freqüències pures que afecten només cons tipus R i només cons tipus G, respectivament, produiran també la sensació de groc. I el mateix per a qualsevol altra combinació que excite d'igual manera aquests dos cons i deixi de banda el tercer.

La nostra àlgebra del color té base tres perquè disposem de tres famílies diferents de cons en la retina (per la seua banda, els bastons només detecten presència o absència de llum, no generen sensació de color sinó imatges en blanc i negre). Però hi ha animals que tenen molts més tipus de receptors del color a les

retines, com alguns fardaxos o aus, amb quatre o cinc cons distints, o la galera, un crustaci amb setze fotoreceptors cromàtics distints. Literalment aquests éssers poden veure una gamma de colors que nosaltres no podem ni imaginar.

Així, la pregunta que moltes vegades se'ns fa als astrònoms en contemplar una imatge astronòmica, sobre si els colors que es veuen en la imatge són «reals», perd significat una vegada establert que en realitat no hi ha colors. Els construïm, i cada espècie (fins i tot cada persona, fins a cert punt) ho fa d'una manera distinta. El que sí que existeixen són diferents freqüències de vibració de la llum, les quals ens parlen de fenòmens

«CADA FREQUÈNCIA DE L'ESPECTRE VISIBLE CORRESPON A UN COLOR, PERÒ AQUESTS COLORS NO EXISTEIXEN EN EL MÓN EXTERIOR: ELS PRODUÏX EL CERVELL»



Figura 1. La llum no és més que una ona electromagnètica (una oscil·lació en els camps elèctrics i magnètics que es propaga per l'espai). En la imatge, rangs de freqüències i de longituds d'ona de l'espectre electromagnètic, des de les ones de ràdio, menys energètiques, fins als raigs gamma, més energètics, passant per la regió visible de l'espectre.

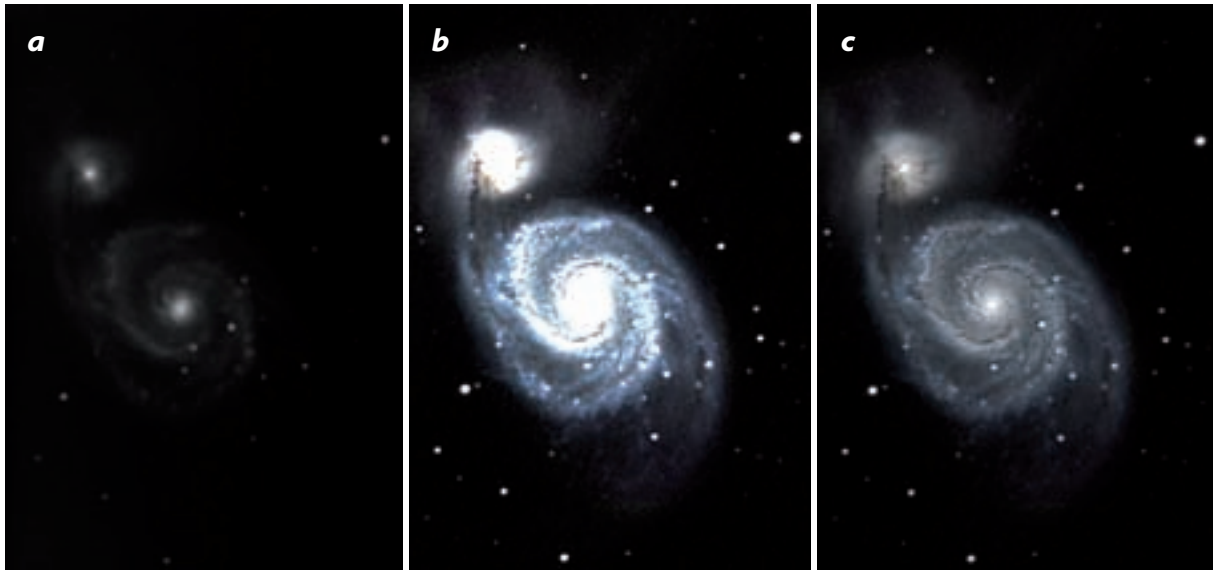


Figura 2. Treballar amb el contrast i la lluminositat és una de les primeres eines de què disposa la fotografia astronòmica per a fer perceptibles els senyals més dèbils. A dalt, trio d'imatges de la galàxia M51, pròxima però tot i això invisible a simple vista. En **a)**, es mostra tal com es veuria a ull nu a través d'un telescopi; en **b)**, veiem aquesta mateixa imatge després de ser captada amb una càmera amb una exposició prolongada i **c)** ens mostra el resultat una vegada processats els nivells de brillantor per ordinador.

**«LA VISIÓ “REAL” NO TÉ PER QUÈ SER LA MILLOR... ELS NOSTRES ULLS SÓN UNA EINA MERAVELLOSA, PERÒ LIMITADA»**

distints que tenen lloc en l'univers. La forma usual com els éssers humans les veiem és, per tant, només una interpretació, de manera que podem inventar lliurement altres interpretacions visuals noves a fi de reforçar les característiques que ens interesse estudiar.

### ■ FER VISIBLE L'INVISIBLE

Per això, la resposta a si veuríem així l'objecte fotografiat si estiguérem allí seria: no, mai, en cap cas. Però no cal patir per això. Al capdavall, el que intenta la imatge astronòmica és fer visible el que és invisible a ull nu. A més, això ja ens passa amb les càmeres digitals de consum. En una càmera fotogràfica ordinària s'intenta reproduir aproximadament la manera com l'ull i el cervell funcionen. Però es comporta de manera realista? La càmera té una resposta lineal, mentre que la del nostre ull és logarítmica. Això vol dir que en fer una fotografia de l'exterior des d'una habitació, si el temps d'exposició és breu, probablement eixirà ben il·luminat l'exterior però l'interior de l'habitació es veurà fosc. I si l'exposició és més llarga, eixirà bé l'interior de l'habitació però l'exterior estarà excessivament sobreil·luminat. En canvi, l'ull és capaç de veure amb una il·luminació semblant ambdues coses al mateix temps.

Treballar amb el contrast i la lluminositat és, de fet, una de les primeres eines de què disposa la fotografia

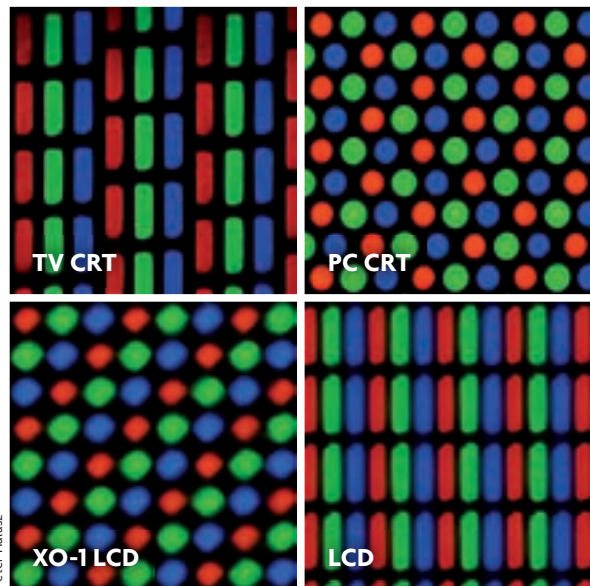


Figura 3. De la mateixa manera que els nostres ulls tenen tres tipus de cèl·lules (cadascun sensible al roig, al verd o al blau) també les càmeres digitals tenen tres tipus de detectors en el seu interior. Si ens acostem a les pantalles de molts dispositius podem observar que la imatge es compon de píxels de tres colors exclusivament, però la nostra percepció els fon perquè veiem en conjunt. En la imatge, d'esquerra a dreta i de dalt a baix, diferents geometries dels píxels d'un monitor: televisor de tub catòdic, monitor d'ordinador de tub catòdic, pantalla LCD d'ordinador portàtil i monitor LCD estàndard, respectivament.

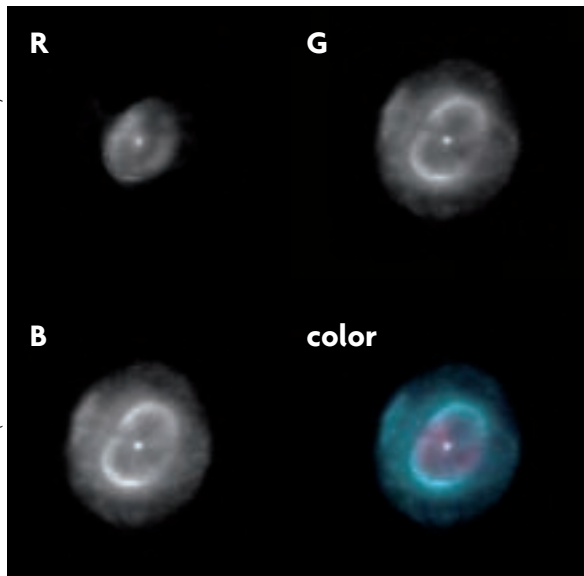


Figura 4. Els astrònoms no utilitzen en general càmeres fotogràfiques en color, sinó que prenen imatges «en blanc i negre». És a dir, que mesuren exclusivament la intensitat de la llum, però per separat i a través de tres filtres diferents: R, G, i B (*red, green i blue*). Quan es representa la imatge, es pot assignar a cadascun dels canals d'eixida la imatge presa amb el seu propi filtre, i així es reproduirà de manera aproximada el que seria la visió «real» de l'escena. Dalt, imatges en blanc i negre preses a través de filtres R, G i B de la nebulosa planetària NGC 7662 amb el telescopi TROBAR de la Universitat de València, i composició final de les tres imatges per a generar una imatge en color.

astronòmica per a fer perceptibles els senyals més dèbils. Fixem-nos, per exemple, en el trio d'imatges que mostra la galàxia M51 (figura 2), una galàxia pròxima, però invisible a ull nu. Si la mirarem a través d'un telescopi de grans dimensions, la veuríem com la primera de les tres imatges (2a): un objecte dèbil, quasi imperceptible i sense rastre de color. Això és perquè quan la intensitat de la llum és escassa, els cons no resulten excitats i només treballen els bastons dels nostres ulls, i per això veiem en blanc i negre. Com que el «temps d'exposició» dels nostres ulls (durant quant de temps acumulem llum en la retina abans d'enviar el senyal al cervell) és breu, d'1/20 de segon aproximadament, no podem acumular molta llum. Però si utilitzem una càmera fotogràfica podem acumular llum durant tant de temps com vulguem. Així, al cap de cinc minuts de recollida de llum, se'ns mostrarà una imatge de la galàxia semblant a la segona (2b), en la qual podem apreciar estructures que abans ens resultaven invisibles. A causa de la resposta lineal de la càmera, les parts brillants de la galàxia ho són molt més que les menys brillants. Per això cal processar per ordinador la imatge per a treballar

#### «LA IMATGE ASTRONÒMICA INTENTA FER VISIBLE EL QUE ÉS INVISIBLE A SIMPLE VISTA»

amb els nivells de lluminositat i contrast, i mostrar tota la informació que hi ha en la fotografia fins que obtenim la imatge definitiva (2c).

En realitat, fins ara només hem parlat de la intensitat de la llum, i de la manera com podem augmentar-la o millorar-la utilitzant llargues exposicions o canvis en la resposta. Però per què limitar-nos a considerar només la intensitat? De la mateixa manera que, com hem vist, els nostres ulls tenen tres tipus de cèl·lules (cadascuna sensible al roig, al verd o al blau) també les càmeres digitals tenen tres tipus de detectors en el seu interior (figura 3). De fet, una càmera pren alhora tres imatges amb tres filtres diferents (de nou: roig, verd i blau) i un programa les transforma automàticament perquè reflectesquen tots els colors que observem (o almenys que s'hi assemblen tant com siga possible). Quan mirem de prop les pantalles de molts dispositius podem observar que la imatge en realitat es compon de píxels de tres colors exclusivament, però la nostra percepció els fon perquè veu en conjunt.

#### ■ INFORMACIÓ I BELLESA

Així arribem al «primer pas» en la nostra escala de «falsedat» en acostar-nos al concepte de «fals color» utilitzat en imatges astronòmiques. Els astrònoms no fan servir en general càmeres fotogràfiques en color, sinó que prenen imatges «en blanc i negre» (és a dir, que mesuren exclusivament la intensitat de la llum) però per separat i a través de tres filtres diferents: R, G i B (*red, green i blue*). A l'hora de representar la imatge es pot assignar a cadascun dels canals d'eixida (les imatges parcials en color roig, verd i blau) la imatge presa amb el seu propi filtre, i així es reproduirà de manera aproximada el que seria la visió «real» de l'escena (figura 4).

Cal tenir en compte, però, que dins de la imatge corresponent a un color hi pot haver mesclada informació diferent, particularment interessant, o que convé ressaltar. Per exemple, les zones de formació estel·lar emeten llum en una freqüència pura corresponent a 457 bilions d'oscil·lacions per segon: és la freqüència d'emissió de l'hidrogen anomenada  $H\alpha$ , que es troba dins de la regió roja de l'espectre. Aquesta informació passa habitualment desapercebuda en una imatge presa amb un filtre roig estàndard, per la qual cosa hi ha filtres específics que només deixen passar aquesta freqüència i bloquen la resta de la llum, a fi d'augmentar-ne la rellevància. En el panell d'imatges que mostra una secció del Quintet de Stephan (figura 5), un grup compacte de galàxies en la constel·lació de Pegàs,

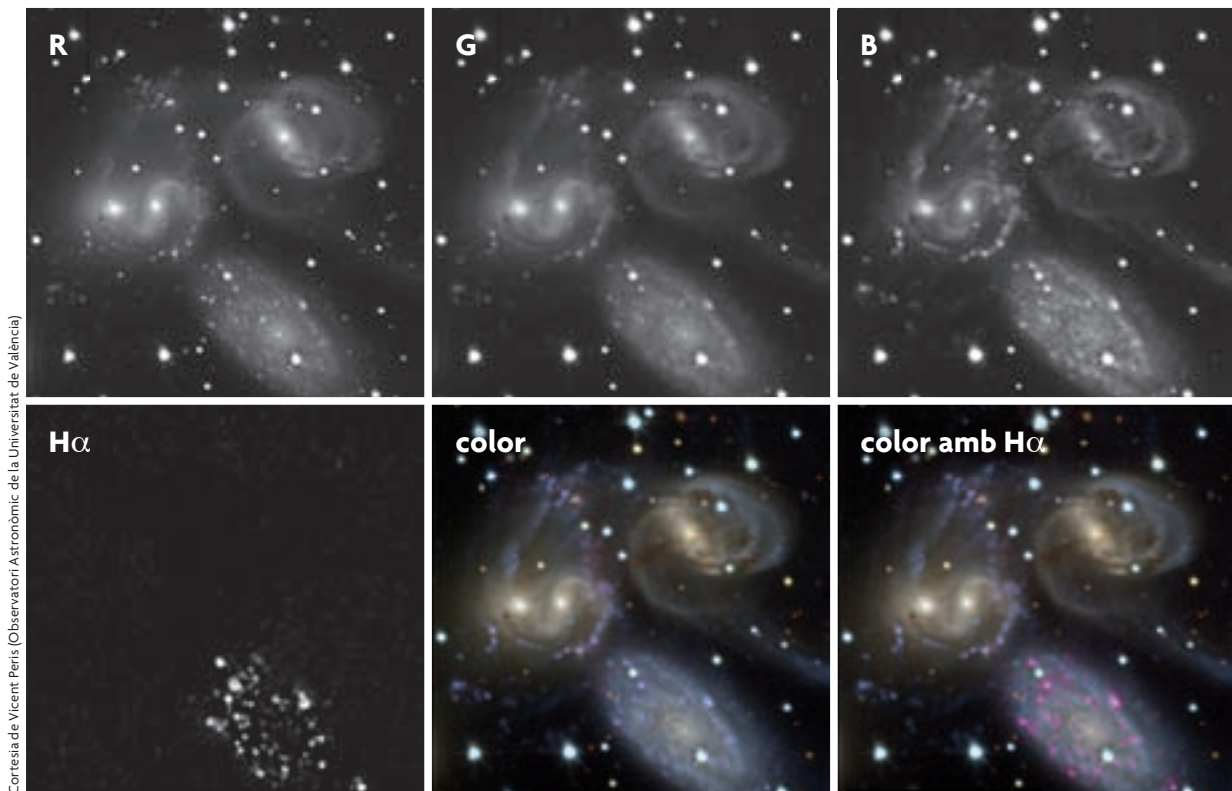
veiem quatre imatges en blanc i negre preses amb filtres R, G, B i  $H\alpha$ , respectivament. La cinquena és una composició en color a partir només de les imatges R, G i B, és a dir, semblant a la que veurien els nostres ulls. Però en l'última imatge, també en color, al canal roig se li ha assignat la suma de la imatge R més la imatge  $H\alpha$ . La fotografia resultant mostra així unes taques rosades que indiquen que la galàxia inferior presenta, en distintes zones del seu disc, una formació d'estels ben activa. Aquesta informació no sols té un valor estètic, sinó que és important per als astrònoms perquè mostra que aquesta galàxia no es comporta com les altres que hi ha en la imatge.

És clar que la visió «real» no té per què ser la millor... els nostres ulls són una eina meravellosa, però limitada. Per exemple, el sensor de qualsevol càmera web o telèfon mòbil té molta més sensibilitat en l'extrem roig de l'espectre. I per a comprovar-ho, podem fer la prova següent: si apuntem amb un comandament a distància cap a la webcam d'un ordinador o a un telèfon mòbil, i polsem un botó, veurem en la imatge

unes llampades que provenen del comandament a distància. És llum infraroja, que els nostres ulls no veuen, però que el comandament utilitza per a enviar senyals a l'aparell amb què es comunica. El rang infraroig de l'espectre inclou gran quantitat d'informació que interessa als astrònoms però que els nostres ulls no ens permeten veure. Per exemple, els estels més freds, o la pols que omple gran part de la nostra galàxia, emeten quasi tota la llum en aquesta longitud d'ona. Si les nostres càmeres la capten, per què no afegir-la a les nostres imatges?

#### ■ FALS COLOR

Però anem a un «segon pas» de l'escala de «falsedat». En compte de limitar-nos a assignar els colors *vertaders* als seus canals corresponents, podem ser creatius i, per exemple, introduir una imatge infraroja en el canal roig de la imatge. Així creem una imatge que seria «real» si els nostres ulls foren una mica més eficients en aquest rang de colors.



Cortesia de Vicent Peris (Observatori Astronòmic de la Universitat de València)

Figura 5. Dins de la imatge corresponent a un color hi pot haver mesclada informació diferent, particularment interessant, o que convé ressaltar. Per exemple, les zones de formació estel·lar emeten llum en una freqüència pura corresponent a 457 bilions d'oscil·lacions per segon: és la freqüència d'emissió de l'hidrogen anomenada  $H\alpha$ , que es troba dins de la regió roja de l'espectre. Aquesta informació passa desapercibuda en una imatge presa amb un filtre roig estàndard, per la qual cosa hi ha filtres específics que només deixen passar aquesta freqüència i que bloquegen la resta de la llum. Dalt, apareixen diverses imatges de la secció del Quintet de Stephan preses des de l'observatori de Calar Alto (Almeria). Les quatre primeres, preses respectivament amb els filtres R, G, B i  $H\alpha$  (imatges en blanc i negre). La cinquena és una composició de la imatge en color usant només els filtres R, G i B. En la sisena, s'hi ha afegit a més la informació del filtre  $H\alpha$ . Aquesta imatge final és important per als astrònoms perquè mostra que aquesta galàxia inferior no es comporta com les altres dues.

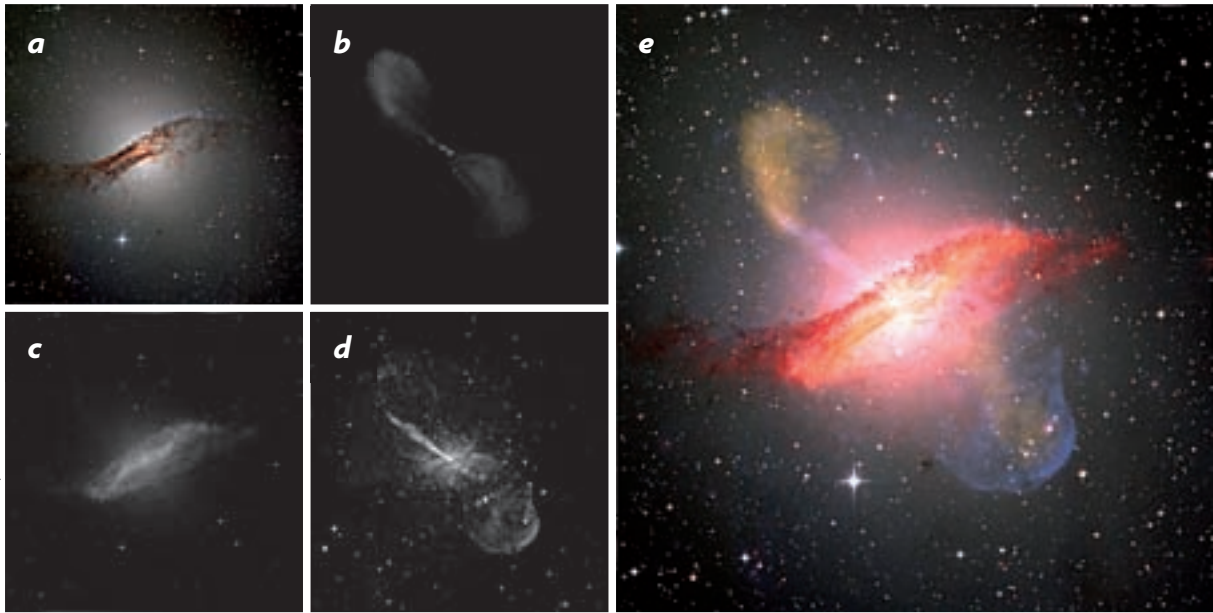


Figura 6. Centaurus A és una de les galàxies actives més pròximes a la Terra, amb un nucli que emet grans quantitats de radiació en diferents bandes de l'espectre electromagnètic (ràdio, infraroig, llum visible i raigs X). Tots aquests components s'han tingut en compte per a confeccionar la imatge final, que inclou informació de sis bandes distintes: **a**) imatge en color en la regió visible, amb els seus tres canals R, G i B, presa amb el telescopi òptic de 2,2 m de l'European Southern Observatory (La Silla, Xile); **b**) imatge en ones de ràdio (concretament microones), presa des d'Atacama (Xile) amb el radiotelescopi APEX de l'Institut Max Planck, que mostra dos dols de matèria que surten des del centre d'aquesta galàxia, indicatiu de l'activitat d'un forat negre massiu al centre. A aquesta imatge li assignarem un color groc, per la qual cosa la repartirem a parts iguals entre el canal R i el G ( $R+G=Y$ ); **c**) imatge en infraroig pel telescopi espacial Spitzer, de la NASA, que ens permet veure l'estructura íntima de la galàxia a través de la banda de pols en primer pla, i que afegirem al canal R; **d**) imatge en raigs X, presa per l'altre telescopi espacial Chandra, de la NASA, on s'aprecien els dols de matèria i com els seus extrems empenen i escalfen el tènue gas que embolcalla la galàxia, i que forma dues bombolles als extrems. Aquesta imatge l'afegirem al canal B. El resultat **e**) és una bella representació multispectral de Centaurus A, en fals color però sense cap dada falsa, que mostra molta més informació que no la que pot proporcionar la imatge en color en el visible.

Però una vegada que fem aquest pas... hem obert la caixa de Pandora. Per exemple, més enllà del blau hi ha la llum ultraviolada, que no travessa l'atmosfera de la Terra, per la qual cosa l'evolució no ha «considerat» necessari dotar-nos de sensibilitat per a captar-la, però que podem observar perfectament amb telescopis situats en l'espai. Mentre que l'infraroig és emès per objectes freds, l'ultraviolada, al contrari, és emesa per cossos molt calents o en explosions de gran energia. Podem crear una visió més àmplia de l'univers si generem, per exemple, una imatge que incloga una presa ultraviolada en el canal blau, una presa visible en el canal verd i una presa infraroja en el canal roig. Aquesta imatge seria com la que tindria un hipotètic ull amb visió de gran rang. És real, encara que certament no té res a veure amb el que veuríem amb els nostres propis ulls.

Potser en arribar ací algun lector ja deu pensar que realment podem fer encara més passos en «l'escala de falsedat»... l'ultraviolat i l'infraroig són invisibles per als nostres ulls, és cert, però són rangs d'energia (o longituds d'ona) molt pròxims a la llum visible. Què passa amb rangs molt més extrems, com ara els raigs gamma, els raigs X, les microones o les ones de ràdio?

Per descomptat, podem combinar els canals de color de les imatges que creem en el mode que, en cada cas, siga més convenient (figura 6). Així podem arribar a imatges en què el terme *fals color* assoleix tota la seua expressió: per exemple, una imatge en què el canal blau conté dades preses en raigs X, el roig inclou dades provinents d'ones de ràdio i el canal verd inclou informació del rang ultraviolat de l'espectre. De nou, és una imatge real, en el sentit que cadascuna de les preses ha estat realitzada amb un detector de llum més o menys sofisticat i no ha estat trucada en cap moment. Però necessitaríem Superman i la seua visió de raigs X, o el Tinent La Forge (de *Star Trek, The New Generation*) i el seu visor connectat directament al cervell, per a poder dir-nos que «així és com ho veiem amb els ulls» (i ja posats, afegir unes pupil·les tan grosses com un telescopi!). ☺

**Fernando Ballesteros.** Investigador de l'Observatori Astronòmic de la Universitat de València.

**Alberto Fernández Soto.** Científic titular del Consell Superior d'Investigacions Científiques. Institut de Física de Cantabria (CSIC-UC), Santander.