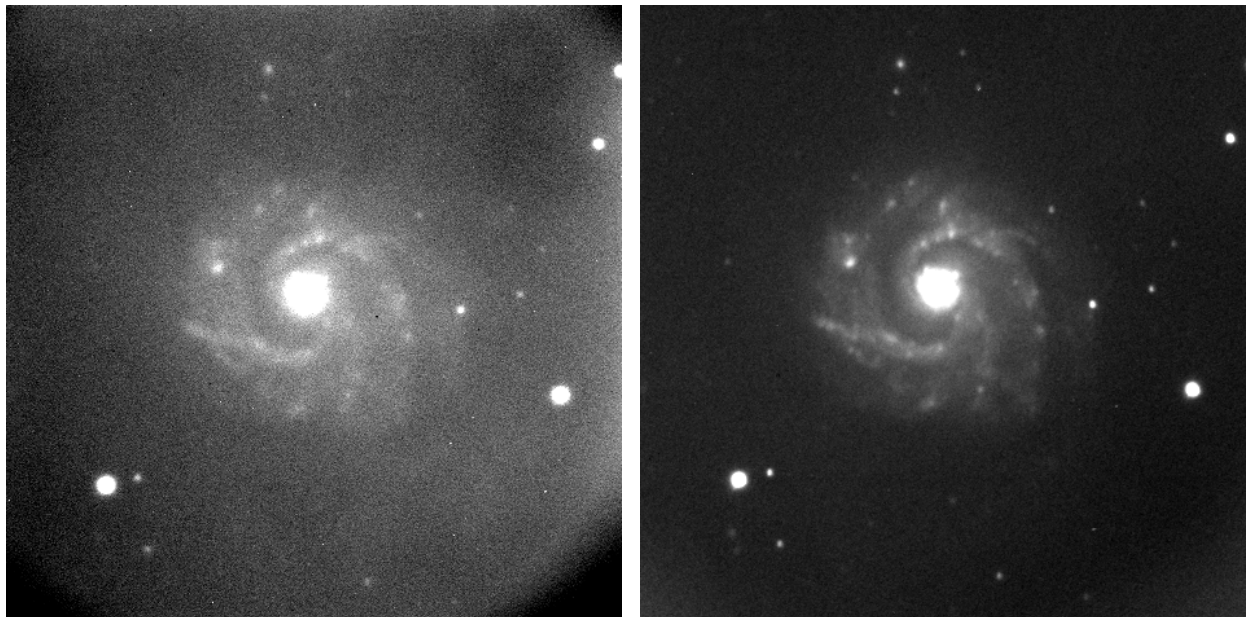


Astronomisk bildbehandling

Del 1: Hur du förädlar dina CCD-bilder

Av Alexis Brandeker

I denna artikelserie i tre delar tar jag upp tips om hur du kan förbättra dina fotografiska och CCD-bilders kvalitet genom olika typer av bildbehandling. Denna del 1 koncentrerar sig på de speciella egenskaper CCD-kameran har, och den grundläggande datorbearbetning som är specifik för CCD-bilder. Del 2 kommer att behandla enkel bildbehandling man kan göra i vanliga datorprogram, som t.ex. *Adobe Photoshop*, medan del 3 kommer handla om mer avancerad bildbehandling som kräver specialskrivna program och en viss matematisk förståelse.



Figur 1. CCD-bild av spiralgalaxen NGC 3631 före och efter grundläggande databehandling. Lagg märke till de mörka hörnen i bilden före bildbehandling som beror på ett filter som vinjetterar synfältet där. En känslighetskarta (beskriven nedan) kalibrerade bort denna effekt. CCD-bilden är tagen 2000-04-21 med 1 m spegelteleskopet i Saltsjöbaden av Bettan Ekemark och Alexis Brandeker. Kameran var av modell Apogee AP-7, en 512×511 pixlars kamera. Exponeringstiden för den första är 120 s, medan den andra bilden sammansatts av fem 120 s exponeringar. Bilden finns i färg på [www-sidan http://www.astro.su.se/~alexis](http://www.astro.su.se/~alexis).

Introduktion

CCD-kameran har inneburit en revolution inom astronomin och amatörastronomin. Detta främst på grund av två saker:

- 1) Dess höga känslighet för inkommande ljus; CCD-chipet är ungefär 100 gånger känsligare än vanlig fotografisk film.
- 2) Den linjära responsen över ett stort dynamiskt intervall, d.v.s. att om man exponerar CCD-chipet dubbelt så länge, så kommer den registrerade signalen att vara dubbelt så stor. Fotografisk film saknar denna goda egenskap, vilket gör kalibreringar mycket mer komplicerade.

Det finns fler fördelar med CCD-kameran, bland annat att all registrering sker elektroniskt och därmed är lättillgänglig för datorbearbetning, att man direkt får resultatet på sin skärm istället för att behöva vänta på fotolabbet samt att när man väl har utrustningen klarar sig utan förbrukningsmaterial som t.ex. kostsam film. Det finns förstås en del nackdelar med CCD-kameran också: den är dyr, den har ett väldigt litet synfält och det är en mer komplicerad teknik som används än vid vanlig fotografering, man måste bl.a. ha CCD-kameran kopplad till en dator.

En modell av CCD-kameran

Ett CCD-chip består av en matris av pixlar, där varje pixel är som en liten ljuskänslig detektor och förvaringsenhet i ett. För varje foton (en bit ljus) som

träffar pixeln placeras ett antal elektroner i dess förvaringsenhet. Efter exponeringen läser man av CCD-chipet genom att tömma alla pixlars förvaringsenheter och därmed få ett mått på hur mycket ljus som registrerats i varje pixel.

Om en verklig CCD-kamera inte varit mer komplicerad än beskrivet ovan så hade vi inte behövt någon ytterligare datorbearbetning. Den dåliga nyheten är att en verklig CCD-kamera medför några komplikationer:

- 1) Endast en viss andel av de fotoner som träffar en pixel registreras. Typiskt för CCD-chip är 30%-60%, ett mått som kallas *kvanteffektivitet*, eller *quantum efficiency* på engelska och förkortas QE. Detta hade inte varit något problem om det inte varit så att *olika pixlar är olika känsliga*, d.v.s. olika pixlars QE skiljer sig.
- 2) Redan direkt i början av en exponering finns det en liten mängd elektroner i förvaringsboxarna, en *grundnivå*, och mängden elektroner skiljer sig från pixel till pixel.
- 3) Även utan exponering ökar antalet elektroner i pixlarnas förvaringsboxar med tiden, och antalet elektroner ökar olika mycket för olika pixlar. Detta fenomen kallas *mörkerström* och är beroende av detektorns temperatur: ju lägre temperatur, desto lägre mörkerström.
- 4) När man tömmer pixlarnas förvaringsboxar, d.v.s. läser av CCD-chipet, så tillkommer *brus* som beror på att elektronerna studsar omkring lite vid avläsningen. Detta brus är helt slumpmässigt och kan inte förutsägas annat än i statistisk mening.
- 5) Pixlarnas förvaringsboxar är ändligt stora, d.v.s. de rymmer inte hur många elektroner som helst. Om man exponerar en pixel för mer ljus än det får plats med elektroner i dess förvaringsbox så kallas det att pixeln blir *saturerad* eller *överexponerad*. Om man därefter försöker fylla på med ännu fler elektroner kan det hända att boxen flödar över, och att dess innehåll sprids till flera intilliggande pixlars förvaringsboxar.

Den bra nyheten är att man kan kalibrera bort effekt 1-3, reducera 4 och undvika 5, givet att man anpassat sina observationer för ändamålet.

Låt oss kalla den utlästa signalen för S_i där i är ett index som betyder att vi avser pixel nummer i 's signal. Låt antalet fotoner som faller på pixel i per tidsenhet vara F_i . Då kan man en matematisk modell skriva sambandet mellan S_i och F_i som

$$S_i = (F_i Q_i + M_i)t + B_i + \tilde{N}_i,$$

där Q_i betecknar antalet elektroner som stoppas i förvaringsboxen i per foton, M_i är mörkerströmmen (*dark current* på engelska) för pixel i , t är exponeringstiden, B_i är grundnivån (*bias* på engelska) i förvaringsbox i vid tiden $t=0$, och \tilde{N}_i är det slumpmässiga utläsningsbruset, där tilde-tecknet är ditsatt för att påminna om att det rör sig om en slumpmässig variabel som varierar från exponering till exponering.

Att ta en CCD-bild: teori

Med ovan nämnda modell av en CCD-bild kan vi i mer detalj undersöka vad som menas med att "anpassa sina observationer" till bildbehandling. Vårt mål är att ur den registrerade signalen S_i få fram ett uttryck för ljuset F_i . Låt oss till att börja med försumma utläsningsbruset \tilde{N}_i . Det är ändå relativt litet och påverkar oftast inte resultatet nämnvärt utom i vissa extremfall. Antag nu att vi tar en bild med exponeringstid t_1 på ett objekt vi är intresserade av. Då kan vi uttrycka signalen per pixel som

$$S_i^{bild}(t_1) = (F_i Q_i + M_i)t_1 + B_i.$$

Mörkerström

Genom att ta vad man kallar för en *mörkerströmsbild* kan man enkelt kompensera för både mörkerströmmen och grundnivån. En mörkerströmsbild är en exponering med samma exponeringstid som bilden vi tog på objektet, men med stängd slutare så att inget ljus träffar CCD-chipet, d.v.s. $F_i = 0$:

$$S_i^{mörk}(t_1) = M_i t_1 + B_i.$$

Genom att subtrahera $S_i^{mörk}$ från S_i^{bild} får vi

$$S_i^{bild} - S_i^{mörk} = F_i Q_i t_1,$$

vilket är ett ganska bra steg på vägen eftersom vi nu kalibrerat bort hela effekten av mörkerström och grundnivå.

Denna enkla metod har nackdelen att man måste ta en mörkerströmsbild för varje exponeringstid man använt vid sina observationer. Denna nackdel kan man komma runt genom att dessutom ta en grundnivå-bild, d.v.s. en exponering med exponeringstid med tiden $t=0$. Då kan man nämligen skriva

$$\begin{aligned} S_i^{mörk}(t) &= \left(S_i^{mörk}(t_1) - S_i^{mörk}(0) \right) \frac{t}{t_1} + S_i^{mörk}(0) = \\ &= (M_i t_1 + B_i - B_i) \frac{t}{t_1} + B_i = M_i t + B_i. \end{aligned}$$

Känslighetskarta

Problemet med att kompensera för olika pixlars varierande känslighet är lite svårare. Ett sätt är att försöka hitta en jämn ljuskälla att exponera CCD-chipet med, så att varje pixel exponeras med samma antal fotoner per sekund $F_i^{\text{jämn}} = F^{\text{jämn}}$, som är konstant och oberoende av vilken pixel man tittar på. Genom att undersöka signalen får man då en *känslighetskarta* (*flatfield* på engelska), där variationerna i bilden beror endast på variationerna i Q_i för de olika pixlarna:

$$S_i^{\text{jämn}} - S_i^{\text{mörk}} = F^{\text{jämn}} Q_i t = k Q_i,$$

där k är en konstant som är densamma för alla pixlar. Med hjälp av denna känslighetskarta kan vi nu dividera ut beroendet på Q_i ur bilden:

$$\frac{S_i^{\text{bild}} - S_i^{\text{mörk}}}{S_i^{\text{jämn}} - S_i^{\text{mörk}}} = \frac{F_i Q_i t}{k Q_i} = F_i \frac{t}{k}.$$

Eftersom t/k endast är en skalfaktor som är densamma för alla pixlar har vi uppnått vårt mål.

Brus

Varför ska man överhuvudtaget bry sig om att ha långa exponeringstider? Enligt teorin ovan verkar det ju som att vi kan härleda fram ett uttryck för en bild där tiden bara är en konstant faktor, *informationen* i bilden är densamma. Anledningen till att exponeringstiden har betydelse är förstås brus, vilket vi hittills försummat. Som vi sett så ökar signalen linjärt med tiden, d.v.s. om vi fördubblar exponeringstiden så fördubblas signalen. Hur är det då med bruset? Om bruset också hade ökat linjärt med tiden så hade det varit meningslöst att ha långa exponeringstider. På grund av statistiska egenskaper hos det slumpmässiga bruset visar det sig emellertid att bruset ökar endast som *kvadratroten* av exponeringstiden; fyrdubbla exponeringstiden och bruset dubblas endast, medan signalen fyrdubblas. Genom att uttrycka kvoten *signal till brus*, S/N , får man ett mått på hur "ren" bild man har där högre signal till brus kvot motsvaras av en brusfriare bild. Signal till brus-kvoten ökar som kvadratroten av exponeringstiden. Det är därför man kan observera svagare objekt genom att förlänga exponeringstiden. Det är också därför du måste förlänga exponeringstiden fyra gånger för att se hälften så ljusstarka objekt med samma bildkvalité.

Att ta en CCD-bild: praktik

I praktiken finns det fler saker man ska tänka på ute på fältet som jag försummat i teorigenomgången ovan.

Mörkerström

Mörkerströmmen är inte bara beroende av exponeringstiden, utan även av CCD-kamerans

temperatur. Ju högre temperatur, desto högre mörkerström. Det är därför bra om man har en temperaturregulator på sin CCD-kamera så att man kan hålla den vid någorlunda konstant temperatur. Annars får man försöka göra en mörkerströmsbild per temperatur och exponeringstid, vilket kan bli en ganska stor mängd mörkerströmsbilder. Ofta räcker det dock att man tar sina mörkerströmsbilder en gång för alla, de kan sen återanvändas så länge inget dramatiskt ändrar sig hos CCD-kamerans egenskaper.

För att minska det ofrånkomliga utläsningsbruset kan man ta en serie mörkerströmsbilder och medelvärdesbilda över dem. På grund av utläsningsbrusets statistiska egenskaper reduceras det med kvadratroten av antalet bilder. Tar man t.ex. en serie med 16 mörkerströmsbilder och tar medelvärdet av dem minskas bruset till en fjärdedel. Detsamma gäller om man vill ta grundnivåbilder

CCD-kameror för amatörbruk har ofta en relativt hög mörkerström, så hög att det ibland är mörkerströmmen som sätter en gräns för hur långa exponeringstider man kan ta. Eftersom mörkerströmmens bidrag till elektronerna i pixlarnas förvaringsboxar ökar linjärt med exponeringstiden finns det en tidsgräns där förvaringsboxarna blivit helt fyllda av elektroner från mörkerströmmen. Se nedanstående avsnitt om exponeringstider för hur man ska handskas med detta.

Känslighetskarta

Att konstruera en känslighetskarta betraktas som svårt, så svårt att många CCD-fotografer struntar i det. Belöningen för en bra känslighetskarta i form av kvalité är emellertid så stor att jag verkligen rekommenderar ett försök. Svårigheten ligger i att få en ljuskälla som jämnt belyser CCD-pixlarna. En rättfram metod, som jag inte provat själv, är att rikta sitt teleskop mot ett vitt papper som är jämnt belyst av en lampa. Ett annat sätt, som jag själv tillämpar, är att ta bilder på himlen strax efter solnedgången innan himlen blivit så mörk att stjärnorna syns. Då är himmelsbakgrunden relativt jämnt belyst. Gemensamt för de båda metoderna är att man ska försöka ta så långa exponeringar som möjligt utan att överexponera.

När man tar känslighetskartor på detta sätt är det inte bara pixlarnas varierande känslighet man mäter, utan hela det optiska systemets, inklusive teleskop och eventuella filter. Det är precis vad man vill, eftersom ens bilder också påverkas av det optiska systemet. Det man ska tänka på är att det kan vara nödvändigt att ha en känslighetskarta för varje konfiguration av optik man använder, till exempel om man använder olika filter ska man ha en känslighetskarta per filter.

Ett tredje sätt att få fram en känslighetskarta kan man använda om man under en natt tar väldigt många CCD-bilder med samma konfiguration. Då kan man anta att alla pixlarna på CCD-chipet i snitt belysts med samma ljusstyrka. En känslighetskarta kan

därmed härledas genom att man tar *medianen* av alla exponeringar under natten. Medianen är en matematisk operation som är släkt med medelvärdet men där man givet ett stort antal olika värden för en pixel tar det mittersta värdet. Om man för en pixel t.ex. har värdena {1, 1, 3, 4, 1000} så är medianen 3, medan medelvärdet är $1009/5=201,8$.

Exponeringstider

Generellt sett är det bättre att exponera så lång tid man kan. Hur lång exponeringstid man kan använda beror på flera faktorer, som teleskopets kompensering för jordens rotation, objekt som rör sig snabbt över himlen (t.ex. kometer), ljusstarka objekt som saturerar CCD-chipets pixlar eller mörkerström som saturerar pixlarna efter en tid. Om man kan ta en exponering som är så lång så att objektet man är intresserad av blir överexponerad har man förmodligen inte problem med brus i bilden, eftersom signalen blir hög. Men ibland vill man ta bilder på väldigt ljussvaga objekt som ligger nära starka stjärnor (t.ex. nebulosor eller galaxer), eller på ljussvaga saker som rör sig snabbt relativt stjärnorna (t.ex. kometer). Då kan man vinna på att ta en serie exponeringar av samma objekt för att senare lägga ihop bilderna i ett bildbehandlingsprogram. Bruset i bilden reduceras nämligen lika mycket oavsett om man tar två exponeringar av en viss exponeringstid eller om man istället fördubblar exponeringstiden, men man undviker en del problem med de längre exponeringstiderna. Varför kan man då inte ta t.ex. 100 stycken 1 sekunds exponeringar istället för en 100 sekunders exponering? Svaret är att det kan man, men att man vid varje enskild exponering och därpåföljande utläsning av CCD-chipet adderar lite utläsningsbrus, och om man läser ut 100 gånger så kan utläsningsbruset bli avsevärt. Dessutom tar det ofta lång tid att läsa ut en CCD-bild på en typisk amatorkamera (minst 20 sekunder), så det är ganska tidsineffektivt. För att inte tala om rent praktiska problem som att hantera så stora datamängder som 100 bilder per objekt innebär.

Andra praktiska detaljer

Det finns förstås än mängd andra praktiska saker som är viktiga när det gäller fotografering med en CCD-kamera som jag inte tar upp här, t.ex. fokusering, placering av kamera relativt teleskopet, val av CCD-kamera, val av färgfilter m.m., men de har inte direkt med bildbehandlingen att göra. Jag hänvisar därför till andra texter för sådana detaljer.

Programvara

För att kunna datorbearbeta sina CCD-bilder krävs det programvara som klarar av att läsa det bildformat man får från kameran. Ofta kommer det med någon slags programvara som styr kameran, och ibland kan man även göra enkla bildbehandlingar med den, likt de beskrivna i denna artikel. Annars finns det förstås en hel del specialiserade fristående program som klarar uppgiften. För MS Windows till PC känner jag till *Maxim DL* och *CCD Soft*. Ett allmänt bildredigeringsprogram som *Adobe Photoshop* klarar också av att utföra de beskrivna operationer, även om det inte är konstruerat för uppgiften. En nackdel med Adobe Photoshop är att det bara klarar av att operera med 8 bitars precision per färg, vilket kan vara för lite för astronomiska bilder med stor dynamisk räckvidd som oftast är av 16 bitars precision. Gemensamt för dessa Windows-program är att de är dyra, tusentals kronor kostar de. Ett alternativ kan därför vara de UNIX-program som utvecklats för professionella astronomer och som finns gratis att ladda ner från internet. Ett enkelt sådant är *eclipse* som utvecklats av European Southern Observatory (ESO), och som finns att ladda ner från <http://www.eso.org/eclipse/>. Ett mer avancerat är programpaketet *IRAF* som utvecklats av amerikanska National Optical Astronomical Observatory (NOAO) och finns för nedladdning på sidan <http://iraf.noao.edu/iraf-homepage.html>. Båda programmen är gratis och fungerar under unix-operativsystemet linux, som också är gratis. För att visa din bilder i linux finns bildvisningsprogrammet *SAOimage*, som är gjort med avseende på astronomiska bilder med stor dynamik. Det är också gratis till linux, och finns att hämta på adressen <http://tdc-www.harvard.edu/saoimage/>.

Sammanfattning

Denna första del i artikelserien *Astronomisk Bildbehandling* har behandlat datorbearbetning specifik för CCD-bilder. Jag har visat hur man på ett enkelt sätt med gratis programvara kan förbättra sina CCD-bilders kvalitet avsevärt. I nästa del kommer jag ta upp mer allmän bildbehandling, hur man lurar ut detaljer ur en bild, detaljer som redan finns där men normalt är osynliga.